



# MÁSTER EN ESTRUCTURAS, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO EN MADERA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

***PRINCIPIOS DE CÁLCULO DEL CLT MIX Y DEL CLT T  
Y PROPUESTA DE MODELIZADO MEDIANTE  
DLUBAL SOFTWARE***

**Autor**

*Andoni Martin Sanz*

**Tutor**

*Iñaki Sánchez Peman*

**Curso académico**

*2021/2022*

*En San Sebastián, a 8 de Julio de 2022*



## Resumen

**Alumno:** Andoni Martin Sanz.

**Director:** Iñaki Sánchez Peman.

**Título del proyecto:** Principios de cálculo del CLT MIX y del CLT T y propuesta de modelizado mediante Dlubal Software.

**Plazo de ejecución:** Diciembre 2021 – Julio 2022.

**Resumen:** en el mercado de la construcción, en el que la sostenibilidad adquiere cada vez mayor relevancia, el uso de la madera toma un papel protagonista. Esto, por consecuencia, ha despertado un interés y una inversión cada vez mayor en proyectos de I+D+i relacionados con la madera estructural, lo que ha llevado a obtener productos de características especiales que permiten a la madera competir con otros materiales, como el hormigón o el acero.

Esta frenética carrera en la creación de nuevos elementos estructurales acusa un problema: la dificultad para encontrar herramientas de modelización de dichos elementos, más únicos por naturaleza que aquellos con una industrialización más afianzada.

En este trabajo se pretende plantear, mediante el software modular de *Dlubal Software*, la modelización de algunos de estos productos, como lo son el CLT MIX y el CLT T.

### Palabras clave

Madera, CLT, CLT MIX, MLE, Método de Elementos Finitos, cálculo estructural.



# Índice

Resumen.....	i
LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRÓNIMOS.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	iv
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	iv
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	vii
NORMATIVA UTILIZADA EN EL ESTUDIO .....	vii
1.    Introducción .....	1
2.    Contexto .....	2
2.1.    I+D+i y MEF.....	4
3.    Objetivos .....	6
4.    Alcance .....	7
5.    Estado del arte.....	8
5.1.    CLT .....	8
5.2.    CLT MIX.....	10
5.3.    CLT T .....	14
6.    Propuestas de modelización .....	19
6.1.    Modelización del CLT MIX .....	20
6.1.1.    Modelización del CLT MIX mediante RF-LAMINATE.....	20
6.1.2.    Modelización del CLT MIX en RFEM mediante elementos tipo barra.....	24
6.1.3.    Modelo MEF del CLT MIX en RFEM .....	30
6.1.4.    Contraste de resultados de las propuestas de modelizado del CLT MIX .....	36
6.2.    Modelización del CLT T.....	39
6.2.1.    Modelo MEF del CLT T en RFEM.....	46
6.2.2.    Contraste de resultados de la propuesta de modelizado del CLT T .....	52
6.2.3.    Modelo para comprobación de los conectores en el CLT T .....	54
7.    Conclusiones.....	57
8.    Líneas futuras .....	65
9.    Referencias.....	67
10.   Anexo I: principios de cálculo del CLT .....	68
10.1.   Método de las Uniones Mecánicamente Unidas (Gamma y Gamma Extendido).....	68
10.2.   Método de acoplamiento a cortante (Viga de Kreuzinger).....	72

---

10.3.	Comportamiento frente al fuego del CLT.....	75
11.	Anexo II: principios de cálculo del CLT MIX.....	77
11.1.	Efecto de arrastre por cortante en el CLT MIX.....	77
11.2.	Factor de carga compartida en el CLT MIX.....	79
11.3.	Comportamiento frente al fuego del CLT MIX .....	79
11.4.	Fenómeno de tecleo en situación de uso en el CLT MIX.....	82
11.5.	Fenómeno de tecleo en situación de incendio en el CLT MIX.....	83
12.	Anexo III: principios de cálculo del CLT T .....	85
12.1.	Efecto de arrastre por cortante en el CLT T .....	85
12.2.	Cálculo de la interfase en el CLT T .....	89
12.3.	Factor de carga compartida en el CLT T .....	91
12.4.	Comportamiento frente al fuego del CLT T.....	91
12.5.	Fenómeno de tecleo en situación de uso y en situación de incendio en el CLT T .....	92
12.6.	Efectos de la orientación del CLT en el CLT T .....	95

## LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRÓNIMOS

### LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas y físicas del Pinus Radiata D. Don en probetas pequeñas [7].	3
Tabla 2. Clases resistentes del Pinus Radiata D. Don y sus propiedades estructurales [7].	3
Tabla 3. Secciones estándares de CLT que ofrece el fabricante EGOIN.	9
Tabla 4. Secciones estándares de CLT MIX que ofrece el fabricante EGOIN.	14
Tabla 5. Secciones estándares de CLT T que ofrece el fabricante EGOIN.	18
Tabla 6. Contraste de resultados de los modelos simplificados del CLT MIX respecto a los resultados del MEF.	36
Tabla 7. Contraste de resultados de los modelos simplificados del CLT MIX respecto a los resultados del MEF.	52
Tabla 8. Tabla de predimensionamiento de CLT biapoyado frente a carga uniforme.	62
Tabla 9. Tabla de predimensionamiento de CLT MIX biapoyado frente a carga uniforme.	62
Tabla 10. Tabla de predimensionamiento de CLT T biapoyado frente a carga uniforme.	62
Tabla 11. Tabla de secciones óptimas de CLT, CLT MIX y CLT T atendiendo exclusivamente al aprovechamiento de la madera.	64

### LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Paneles de CLT de 3 y 5 capas.	8
Ilustración 2. Paneles de CLT longitudinales (izqda.) y transversales (dcha.).	8
Ilustración 3. Sección de un alveolo de un panel de CLT MIX estándar.	10
Ilustración 4. Aportación de los tableros transversales en el CLT MIX y transferencia de esfuerzos hasta los apoyos.	11
Ilustración 5. Comparación de secciones del CLT200 y del CLT MIX 300.	13
Ilustración 6. Ejemplo de un forjado de CLT T en obra.	14
Ilustración 7. Panel de CLT T estándar.	16
Ilustración 8. Comparación cualitativa de secciones de CLT MIX y de CLT T.	17
Ilustración 9. Apoyo del CLT T sobre muros: usando escotillas.	17
Ilustración 10. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: modelo.	20
Ilustración 11. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: definición de superficies en Dlubal Software.	21
Ilustración 12. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: ventana principal del módulo RF-LAMINATE.	22
Ilustración 13. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: resultado de las deformaciones.	23
Ilustración 14. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: modelo.	24
Ilustración 15. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: ventana de definición de la sección.	25
Ilustración 16. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: sección modificada del CLT MIX.	27
Ilustración 17. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: reparto de cargas en los elementos tipo barra.	28
Ilustración 18. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: resultado de deformaciones.	29

Ilustración 19. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: resultado de las tensiones paralelas a la fibra. ....	29
Ilustración 20. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: resultado de la sollicitación de las barras mediante RF-TIMBER Pro. ....	30
Ilustración 21. MEF del CLT MIX: modelo MEF. ....	31
Ilustración 22. MEF del CLT MIX: resultados de las deformaciones totales ( $uzLARGUERO$ ). ....	31
Ilustración 23. MEF del CLT MIX: resultado de las deformaciones totales en las capas superiores del CLT MIX ( $uzLARGUERO$ ). ....	32
Ilustración 24. MEF del CLT MIX: modelo MEF para el estudio de las deformaciones locales. ....	32
Ilustración 25. MEF del CLT MIX: resultados de las deformaciones locales ( $uzTABL.TRANSV$ ) en los largueros. ....	33
Ilustración 26. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones paralelas a la fibra ( $\sigma_0, tLARGUERO$ y $\sigma_0, cLARGUERO$ ) en los largueros. ....	33
Ilustración 27. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones perpendiculares a la fibra ( $\sigma_{90}, c$ ). ....	34
Ilustración 28. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones paralelas a la fibra ( $\sigma_0, tTABLTRANSV$ y $\sigma_0, cTABLTRANSV$ ) en los tablonos transversales. ....	34
Ilustración 29. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones tangenciales en el plano xz ( $\tau_{xz}$ ). ....	35
Ilustración 30. Propuesta de modelizado del CLT T: modelo. ....	40
Ilustración 31. Propuesta de modelizado del CLT T: ventana de definición de la excentricidad del elemento tipo barra. ....	41
Ilustración 32. Propuesta de modelizado del CLT T: ventana de liberación de líneas. ....	42
Ilustración 33. Propuesta de modelizado del CLT T: ventana de resultados de RF-TIMBER Pro. ....	44
Ilustración 34. Propuesta de modelizado del CLT T: resultados de deformación en RFEM. ....	45
Ilustración 35. MEF del CLT T: modelo MEF. ....	47
Ilustración 36. MEF del CLT T: deformaciones globales en el eje z ( $uzVIGA$ ). ....	47
Ilustración 37. MEF del CLT T: modelo MEF utilizado para la comprobación de deformaciones locales. ....	48
Ilustración 38. MEF del CLT T: resultados de deformaciones locales ( $uzCLT$ ). ....	48
Ilustración 39. MEF del CLT T: tensiones paralelas a la fibra en la viga de MLE ( $\sigma_0, tVIGA$ y $\sigma_0, cVIGA$ ). ....	49
Ilustración 40. MEF del CLT T: compresiones perpendiculares a la fibra en la viga de MLE ( $\sigma_{90}, c$ ). ...	49
Ilustración 41. MEF del CLT T: tensiones perpendiculares a la fibra en el CLT ( $\sigma_0, cCLT$ ). ....	50
Ilustración 42. MEF del CLT T: tensiones tangenciales en el CLT en el plano xy ( $\tau_{xy}$ ). ....	50
Ilustración 43. MEF del CLT T: tensiones tangenciales en el CLT en el plano xz ( $\tau_{xz}$ ). ....	51
Ilustración 44. MEF del CLT T: tensiones tangenciales en el CLT en el plano yz ( $\tau_{yz}$ ). ....	51
Ilustración 45. Comprobación de los conectores en la interfase del CLT: modelo. ....	54
Ilustración 46. Comprobación de los conectores en la interfase del CLT: esfuerzos cortantes en los conectores. ....	55
Ilustración 47. Comprobación de los conectores en la interfase del CLT: esfuerzos cortantes máximos en los conectores. ....	55
Ilustración 48. Sección de un panel de CLT de 5 capas. ....	69
Ilustración 49. Influencia del módulo de rodadura en los tablonos transversales del CLT. ....	69
Ilustración 50. Vigas de Kreuzinger (barras visuales A y B). ....	72

Ilustración 51. Componentes de tensiones de flexión de cada una de las capas del CLT en el método de acoplamiento a cortante. ....	73
Ilustración 52. Componentes de tensiones axiales de cada una de las capas del CLT en el método de acoplamiento a cortante. ....	73
Ilustración 53. Superposición de componentes de flexión del CLT para el método de acoplamiento a cortante. ....	74
Ilustración 54. Distintas zonas en la sección de un elemento de madera expuesto al fuego.....	75
Ilustración 55. Velocidades de carbonización para forjados y muros de CLT. ....	76
Ilustración 56. Deformación de una sección tipo debido al efecto de arrastre por cortante.....	77
Ilustración 57. Ejemplos de sección reducida debido al fenómeno de arrastre por cortante.....	78
Ilustración 58. Sección real del CLT MIX 300.....	79
Ilustración 59. Sección reducida del CLT MIX expuesto frente al fuego. ....	81
Ilustración 60. Modelo mediante RFEM y RF-TIMBER Pro para el estudio del fenómeno de tecleo en el CLT MIX.....	82
Ilustración 61. Resultados de las deformaciones en los tablones transversales al colapsar el CLT MIX en situación de uso.....	82
Ilustración 62. Resultados de las deformaciones en los tablones transversales al colapsar el CLT MIX en situación de incendio. ....	83
Ilustración 63. Anchuras eficaces según la posición en el vano.....	86
Ilustración 64. Valor de $\psi_{el}$ según la posición en el vano.....	86
Ilustración 65. Distribución transversal de tensiones normales a lo largo de la anchura del ala. ....	88
Ilustración 66. Modos de fallo de un conector en uniones entre elementos de madera según las propuestas de Johansen.....	89
Ilustración 67. Comportamiento frente al fuego del CLT T: sección reducida del CLT. ....	92
Ilustración 68. Modelo utilizado para estudiar el comportamiento del CLT T a tecleo en situación de uso y en situación de incendio. ....	93
Ilustración 69. Resultados de deformación del modelo utilizado para estudiar el comportamiento del CLT T a tecleo en situación de uso. ....	93
Ilustración 70. Resultados de deformación del modelo utilizado para estudiar el comportamiento del CLT T a tecleo en situación de incendio. ....	94
Ilustración 71. Resultados de las deformaciones del CLT T dependiendo de la orientación del CLT (izqda., orientado en el mismo sentido que las vigas; dcha. orientado en sentido contrario a las vigas). ....	95

## LISTA DE ACRÓNIMOS

I+D+i: Investigación, desarrollo e innovación.

CLT: Madera contralaminada (Cross Laminated Timber).

TFM: Trabajo Fin de Máster.

UPV/EHU: Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea.

MEF/FEM: Método de Elementos Finitos (Finite Elements Method).

a.C.: Antes de Cristo.

EEUU: Estados Unidos.

UNE: Una Norma Española.

NFB/AFNOR: Association Française de Normalisation.

BIM: Building Information Modeling.

MLE: Madera Laminada Encolada.

CTE: Código Técnico de la Edificación.

NUI: Interfaz Natural de Usuario (Natural User Interface).

## NORMATIVA UTILIZADA EN EL ESTUDIO

- Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-1. Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios y sobrecargar de uso en edificios. EN 1990-1-1:2002+A1.
- Eurocódigo 5: Diseño de estructuras de madera. Parte 1-1: General. Reglas generales y reglas para estructuras. EN 1995-1-1:2004+A1.
- Eurocódigo 5: Diseño de estructuras de madera. Parte 1-1: General. Diseño estructural frente al fuego. EN1995-1-2.
- CTE. Documento Básico SE-AE Acciones en la edificación.
- CTE. Documento Básico SE-M Madera.
- CTE. Documento Básico SI Seguridad en caso de Incendio.
- Canadian CLT Handbook. Edición de 2019. Volumen 1. FPInnovations.
- Pro:Holz. Análisis y diseño estructural de estructuras de madera. Volúmenes 1 y 2. ISBN 978-3-902926.
- Instrucción de Acero Estructural (EAE).
- EAD 140022-00-0304. Prefabricated Wood-Based Loadbearing Stressed Skin Panels.

## 1. Introducción

En el presente documento se recoge el Trabajo Fin de Máster (TFM) realizado por Andoni Martin Sanz, estudiante del Máster en Estructuras, Construcción y Diseño en Madera, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de San Sebastián, perteneciente a la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), con la dirección y supervisión del Ing. Iñaki Sánchez Peman.

El autor desea agradecer, además, la ayuda aportada por todos sus compañeros de trabajo en Egoín, cuya participación en los problemas que han surgido a lo largo del proyecto ha sido esencial para la consecución de este, y especialmente a Iker Iruña Iriarte, quien lo ha sabido guiar, en todo momento, en los aspectos de interpretación de resultados más técnicos y complicados y lo ha incentivado a reflexionar más allá de lo que podría haberlo hecho por cuenta propia; y, por otro lado, a los profesores Manuel Guaita y Jose Antonio Lorenzana, por animarle y darle las herramientas para desarrollar este trabajo con una profundidad que por sí mismo no habría sido capaz de desarrollar.

A continuación, se procederá a realizar una memoria descriptiva del proyecto realizado. Para ello, se situará el proyecto en el contexto al que se adscribe, así como su alcance y sus objetivos, mediante los cuales se pretende plasmar el valor que el presente estudio pudiera aportar a su género.

El objetivo principal de este estudio es proponer un método de modelización simplificado para distintos productos estructurales basados en madera y cuyo carácter innovativo y de uso incipiente ha dejado fuera de las bibliotecas de los softwares de cálculo por elementos finitos (MEF), por lo general más enfocadas en productos de mayor industrialización. Este estudio se realizará en el software de cálculo estructural de Dlubal Software (principalmente en RFEM, su módulo troncal, y los módulos RF-LAMINATE y RF-TIMBER Pro), y se detallará paso a paso la construcción de dichos modelos simplificados.

La propuesta de los modelos se ha realizado considerando los principios de cálculo estudiados y reunidos al final del documento a modo de anexos en los apartados de Anexo I, Anexo II y Anexo III, que ahondan en el comportamiento estructural del CLT, del CLT MIX y del CLT T, respectivamente.

Posteriormente, se han realizado sendas simulaciones MEF en Dlubal Software, mediante las cuales el autor ha contrastado los resultados de los modelos simplificados propuestos para el CLT MIX y para el CLT T. Se han comparado los resultados y se ha estudiado la idoneidad de cada una de las propuestas y los posibles ámbitos de aplicación de cada una de ellas.

Para terminar, a modo de conclusión, se presentarán una serie de consideraciones a tener en cuenta a la hora de estudiar la posibilidad de utilizar alguna de estas composiciones en un proyecto de construcción real, y se propondrán líneas futuras de estudio.

## 2. Contexto

Se cree que la madera ha acompañado a los humanos desde sus primeros asentamientos, en el neolítico; la accesibilidad de este material, así como la capacidad de los humanos para tratarlo (por aquel entonces ya se usaban ampliamente objetos cortantes como hachas o cuchillos de piedra, que permitían su manipulación) hacía de él un elemento atractivo para construir refugios allí donde la orografía no ofreciese refugios naturales. Si bien las suposiciones sobre el uso de la madera en construcciones tan antiguas son solamente eso: suposiciones (ya que la madera no fosiliza y por tanto no se pueden encontrar evidencias de utilización tan antigua), es posible remontarse al siglo I a.C., a la civilización romana, para encontrar el primer tratado sobre edificación, escrito por Marco Viturbio y titulado *De architectura*. Entre otros muchos aspectos, esta obra recoge las primeras descripciones sobre la composición, cualidades y usos de la madera [1].

De esta civilización se ha heredado también, en la zona del Mar Mediterráneo, la percepción negativa sobre la madera como material de construcción de alta peligrosidad ígnea, y desde entonces se optó por realizar construcciones con materiales de menor combustibilidad, como el adobe, los ladrillos de arcilla cocida, la piedra o el mármol. Esta mala fama no se expandió a otros territorios: en la arquitectura escandinava, por ejemplo, la madera siempre ha sido el principal material de construcción; en las culturas asiáticas como la china o la japonesa, la madera es el elemento principal de edificios con siglos de antigüedad (las pagodas son un claro ejemplo de ello), lo que evidencia su buena durabilidad, siempre que sea bien tratada [1]; e incluso hoy, en los Estados Unidos de América (EEUU), la madera es uno de los materiales favoritos a la hora de construir viviendas unifamiliares.

Recientemente, y gracias parcialmente a los tratamientos que se le aplican, la madera ha recobrado su buena fama como material de construcción fiable, y su uso se está expandiendo en la zona del Mediterráneo también. Dentro de este campo, el método de construcción por entramado ligero, que data del siglo XIX, es el que mayor relevancia tiene actualmente. En este, la estructura se compone de tres tipos de elemento, cada cual con su función particular: entramado, cerramiento y revestimiento. Entre el 60 y el 80 % de todas las viviendas que se construyen en países como Finlandia, Suecia, Austria, EEUU o Australia son edificios de entramado ligero [1].

Hoy en día, la sostenibilidad es casi un requisito, no solo en la construcción, sino en otras industrias como la textil, el transporte, etc. La concienciación de la sociedad sobre los problemas medioambientales es cada vez más sólida, y ello sobreviene en una adaptación de las empresas. La madera, en esta revolución del mercado, ocupa un puesto destacado [2].

Entre los beneficios de hacer un edificio o la reforma de un edificio ya existente con elementos de madera, pueden resaltarse los siguientes: la reducción del consumo energético tanto en su puesta en obra como en su vida útil [3] [4], su gran capacidad de aislamiento eléctrico, térmico y acústico, la velocidad y eficiencia de puesta en obra, la flexibilidad de diseño, la durabilidad (tiene una vida útil superior a un siglo, siempre que sea bien tratada) y su bajo coste en comparación a otras soluciones constructivas [5].

En el País Vasco, el árbol con mayor superficie plantada es el *Pinus radiata D. Don*. La superficie total que abarca este espécimen es de aproximadamente 110.000 ha, lo que pronostica un volumen de madera estructural útil de en torno a 28,5 M de m<sup>3</sup>. Si bien históricamente su utilización ha orbitado en torno a la industria papelera, actualmente se utiliza más en aplicaciones estructurales, gracias, entre otras cosas, al incipiente uso de la madera contralaminada (CLT) por fabricantes de la región [6].

El *Pinus Radiata D. Don* muestra las siguientes propiedades en probetas pequeñas y libres de defectos (tabla 1):

Tabla 1. Propiedades mecánicas y físicas del *Pinus Radiata D. Don* en probetas pequeñas [7].

Propiedades mecánicas	Norma	Unidades	12 %	18 %	Verde	Calificación
Comp. Axial	UNE 56535	Kg/cm <sup>2</sup>	434	293	201	Media
Flex. Estática	UNE 56537	Kg/cm <sup>2</sup>	875	660	479	Media
Módulo elástico de flex.	UNE 56537	Kg/cm <sup>2</sup>	90.000	80.000	75.000	Flexible
Propiedades físicas	Norma	Unidades	12 %	Varios	Verde	Calificación
Densidad (al 12 %)	NFB 51005	Kg/m <sup>3</sup>	500		900	Media (C)
Contracción volumétrica		%		14,5		
Contracción radial		%		4,2		
Contracción tangencial		%		7,5		
Calor específico		J/kg·°C	1650			Media
Vel. penetración llama	UNE 23093	mm/min	0,83			Alta

Las propiedades estructurales reales, en cambio, se calculan con piezas de mayor tamaño, debido a que sus características se acercan más a las características de la madera puesta en obra. Estas propiedades dependen de la clase resistente y se regulan en base a la norma UNE 56544:2007. Algunas de estas propiedades se reúnen en la tabla 2:

Tabla 2. Clases resistentes del *Pinus Radiata D. Don* y sus propiedades estructurales [7].

Clases resistentes	Unidades	C18	C22	C24
Flexión	N/mm <sup>2</sup>	18	22	24
Tracción paralela a la fibra	N/mm <sup>2</sup>	11	13	14
Tracción perpendicular a la fibra	N/mm <sup>2</sup>	0.4	0.4	0.4
Compresión paralela a la fibra	N/mm <sup>2</sup>	18	20	21
Compresión perpendicular a la fibra	N/mm <sup>2</sup>	2.2	2.4	2.5
Cortante	N/mm <sup>2</sup>	3.4	3.8	4
Módulo de elasticidad media paralelo a la fibra (flexión)	N/mm <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup>	9	10	11
Módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5º percentil)	N/mm <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup>	6	6.7	7.4
Módulo de elasticidad media paralelo a la fibra (tracción)	N/mm <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup>	8.3	9.2	10.1
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	N/mm <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup>	0.3	0.33	0.37
Módulo de cortante medio	N/mm <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup>	0.56	0.63	0.69
Densidad característica	kg/m <sup>3</sup>	320	340	350
Densidad media	kg/m <sup>3</sup>	380	410	420

## 2.1. I+D+i y MEF

El uso generalizado de los ordenadores ha otorgado a los ingenieros actuales una herramienta capaz de automatizar una serie de cálculos complejos, aligerando su trabajo de formas que un siglo atrás habrían sido impensables. Como cualquier otro sector beneficiado de los avances tecnológicos y matemáticos que esto conlleva, la ingeniería civil o de estructuras, y más concretamente el cálculo estructural, ha experimentado un importante impulso.

Fruto del desarrollo científico e informático, se ha creado el Método de los Elementos Finitos (MEF), que, basándose en el Método Matricial, permite aproximar de forma numérica el análisis tensional y de deformaciones de los sistemas estructurales, a elementos espaciales virtuales, elevándolo de estructura discretizada a continua, mediante la interacción de esos elementos discretos conocidos como *nodos*, de manera que se satisfagan las condiciones de continuidad en todo el sistema [8].

Las bases de esta teoría se desarrollaron en un período que comprende aproximadamente los años entre 1942 y 1967. En estos primeros años de desarrollo se distinguen varios autores, añadiendo cada uno mejoras que desembocarían en algo parecido a lo que hoy en día conocemos como el Método de los Elementos Finitos [9].

Así, Courant desarrolló la idea de reducir el cálculo del comportamiento de una región compleja al cálculo combinado de ciertas subregiones dentro de esta, calculando los valores tensionales de los puntos extremos de dichas subregiones (a los que denominó *nodos*) y, por extensión, calculando los valores de los puntos centrales de la región mediante aproximación lineal, por cuestiones de simplicidad de cálculo. Las limitaciones de sus propuestas, en cambio, eran evidentes: (a) las subregiones se definían de forma aleatoria, lo cual evidenciaba un desconocimiento de las características básicas del problema físico; (b) por otro lado, limitaba la forma de las subregiones o elementos finitos a triángulos; y, para terminar (c), consideraba solamente la situación tensional de la región a estudio, obviando otras características físicas de gran importancia, que se incluirían en posteriores trabajos de otros autores [9].

Sería Argyris quien, años más tarde, enriquecería la base teórica de este método suprimiendo el efecto de la última de las limitaciones: desarrolló la teoría de matrices en las estructuras de elementos discretos y la definió como un caso particular del estudio de los cuerpos continuos; esta innovación derivaría en la consideración de los conceptos de flexibilidad y rigidez dentro del cálculo estructural, lo que permitiría relacionar las tensiones con las deformaciones. Por otro lado, también permitió realizar elementos finitos cuadrangulares [9].

Asimismo, Turner propuso, más adelante, el uso de las coordenadas globales en el MEF, en estudios en que usaba elementos finitos triangulares, dado que, no solamente hacían el cálculo más sencillo respecto a los cuadrangulares, sino que resultaban de mayor flexibilidad para subdividir regiones de geometrías complejas [9].

Clough aportó sus conocimientos en el cálculo de los coeficientes de flexibilidad y realizó estudios que ahondaban en las diferencias y similitudes entre el estudio del sólido continuo y el estudio del sólido discreto mediante el método matricial [9].

Zienkiewicz y Cheung redondearon la teoría con el concepto de topología: la forma y distribución de los elementos finitos pasaba de ser aleatoria a ser objeto de estudio [9].

Desde entonces, la teoría de los Elementos Finitos se ha ido apuntalando y normalizando, y cada vez son más los softwares que pretenden cubrir los huecos existentes en el mercado del MEF. Algunos se centran en el cálculo estructural, mientras otros se centran en otras dimensiones de la metodología BIM (Building Information Modeling), que se define de la siguiente manera:

*«Una metodología de trabajo colaborativa para la concepción y gestión de proyectos de edificación y obra civil. Dicha metodología centraliza toda la información de un proyecto – geométrica o 3D, tiempos o 4D, costes o 5D, ambiental o 6D, y mantenimiento o 7D – en un modelo digital desarrollado por todos sus agentes [10].»*

La posición que el MEF ocupa dentro de esta metodología de trabajo es troncal.

Son muchos los softwares de elementos finitos que permiten al usuario modelizar estructuras de madera. De entre todos ellos, cabe mencionar a Dlubal Software como uno de los que más destacadamente apuesta por modernizarse y situarse en la vanguardia de los software MEF que trabajan con madera.

Dlubal Software, una empresa dedicada al desarrollo de softwares de análisis y dimensionamiento de estructuras, tiene como producto MEF el software RFEM. El programa de análisis estructural RFEM es la base de un sistema de software modular. El programa principal se utiliza para definir estructuras, materiales y cargas para tanto sistemas de estructuras planas como espaciales compuestas de placas, muros, láminas y barras. La creación de estructuras combinadas, así como el modelado de sólidos y elementos de contacto también es posible. RFEM proporciona resultados de deformaciones, esfuerzos internos, esfuerzos en apoyos, así como tensiones de contacto del suelo [11].

Debido al uso cada vez mayor de la madera en la industria de la construcción, en las últimas décadas se han ido multiplicando las inversiones en I+D+i respectivas a productos estructurales de madera, ampliando el abanico de resoluciones que existía anteriormente. Así, hoy en día se han normalizado elementos estructurales como la madera contralaminada (CLT) o la madera laminada encolada (MLE), pero no son los únicos productos existentes.

Si bien esto es una ventaja, pues permite optimizar el uso de cada elemento estructural y, por tanto, de las estructuras de madera, está ocurriendo a una velocidad tan acelerada que puede dejar flecos sueltos por el camino: al hilo de los softwares MEF, estos son las discrepancias sobre su modelización y la falta de capacidad para responder a todas las innovaciones en la programación de los softwares.

Este trabajo pretende enumerar varios elementos estructurales innovadores y propone una modelización MEF para el software modular de Dlubal Software.



### 3. Objetivos

En este apartado se enumerarán los objetivos que se esperan alcanzar con la realización de este proyecto.

El objetivo principal es plantear un modelo simplificado eficaz de varios elementos estructurales de I+D en madera mediante el software modular de cálculo estructural de Dlubal Software, de manera que este tipo de composiciones puedan estudiarse tanto de manera individual como integrados en un edificio, sin la necesidad de construir modelos más complicados y de mayor coste computacional, que requieren de una inversión de tiempo considerable en comparación a estos modelos simplificados. Los elementos estructurales que se van a modelizar son el CLT MIX y el CLT T.

Cumplido el objetivo principal, se pretende desarrollar el trabajo hasta cumplir con los siguientes objetivos secundarios:

- Estudiar la bibliografía existente para concluir los fenómenos que puedan afectar el comportamiento estructural del CLT MIX y del CLT T, sobre los que fundamentar los modelos simplificados construidos.
- Reunir, a modo de anexo, las teorías más empleadas en las que se basa el cálculo del CLT y los fundamentos en lo que se basará el estudio del CLT MIX y del CLT T, de manera que dicha información pueda utilizarse por otros autores para realizar cálculos manuales o desarrollar nuevos modelos, tanto en Dlubal Software como en otros softwares.
- Redactar un manual para la construcción de los modelos simplificados del CLT MIX y del CLT T en Dlubal Software, de manera que estos puedan usarse por usuarios no familiarizados con el software utilizado.
- Contrastar los modelos simplificados propuestos mediante la construcción de un modelo MEF del CLT MIX y del CLT T, para estudiar la precisión de los modelos simplificados propuestos, así como evidenciar las ventajas y desventajas de cada uno.
- Mediante los modelos simplificados propuestos, reflexionar sobre las composiciones estudiadas y las situaciones en que pudieran ser de mayor utilidad.
- Proponer nuevas vías para el estudio y desarrollo del CLT MIX y del CLT T.

## 4. Alcance

El primer paso a realizar en el presente estudio es la definición de los elementos constructivos que se van a modelizar a lo largo del proyecto: el CLT MIX y CLT T. Para ello, se presentará la información gráfica necesaria.

Una vez realizado este primer paso, se propondrá un sistema de modelización del elemento constructivo en el software modular proporcionado por Dlubal Software. Para este objeto, será necesario usar, además del módulo principal de este software modular, llamado RFEM, otros módulos adicionales, específicos para ciertos detalles o materiales y que cubren las carencias que RFEM pudiera tener. Estos son: RF-TIMBER Pro y RF-LAMINATE.

Presentadas las composiciones, se procederá a realizar una propuesta basada en las bases teóricas de cada una de ellas, y considerando las limitaciones ofrecidas por las herramientas de Dlubal Software. Estas propuestas se compararán con un modelo de Elementos Finitos, como método de validación de los resultados obtenidos en cada propuesta, y se acotará el uso de estas dependiendo de la precisión de los resultados y de la complejidad de construcción.

Para concluir con el estudio, se extraerán una serie de conclusiones sobre el CLT MIX y el CLT T, que ayudarán tanto al usuario no familiarizado como al usuario habitual de estas composiciones a decidir en qué momento puede ser más o menos útil su utilización en una obra real. También se propondrán líneas futuras a estudio.

A modo de anejo, se redactarán las bases teóricas utilizadas para el estudio del CLT, del CLT MIX y del CLT T en las que se han basado las propuestas simplificadas realizadas.

El proyecto se dará por finalizado con la redacción de un documento que recoja el trabajo llevado a cabo y los resultados y las conclusiones obtenidas.

Las dimensiones de todos los elementos utilizados en este proyecto se han extraído del catálogo del fabricante Egoin. Los resultados obtenidos han sido estudiados en base a la reglamentación española (CTE) y europea (Eurocódigos) vigente.

## 5. Estado del arte

### 5.1. CLT



Ilustración 1. Paneles de CLT de 3 y 5 capas.

Los paneles de madera contralaminada (CLT, por sus siglas en inglés –*Cross Laminated Timber*– ilustración 1), son paneles de madera macizos formados por tablas encoladas por capas, organizadas las capas de manera que los tablones de dos capas alternativas estén entrecruzados. Se considera que la dirección principal del panel está definida por la dirección principal de las capas predominantes en número, es decir: si hay 2 capas en dirección longitudinal y 3 capas en dirección transversal, la orientación de dicho panel será transversal (ilustración 2).

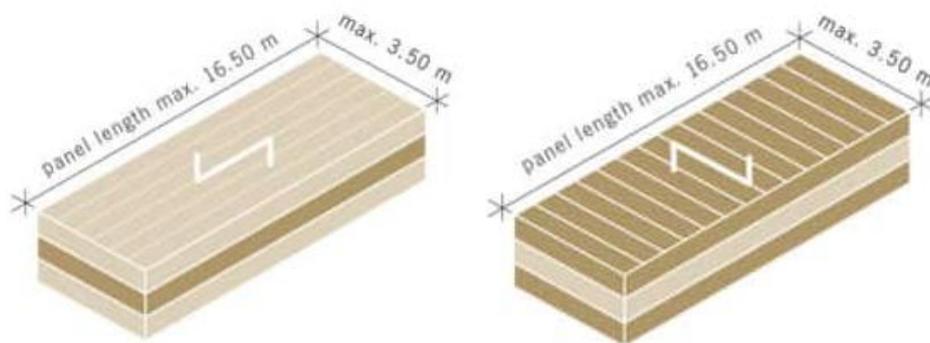


Ilustración 2. Paneles de CLT longitudinales (izqda.) y transversales (dcha.).

El número de capas de los paneles es casi siempre impar, siendo la cantidad de capas más comunes: 3, 5, 7, 9 y 13; y los espesores de las láminas de 20, 25, 30, 35 y 40 mm. La disposición de los tablones es simétrica e igual a lo largo de todo el espesor del panel, por simplicidad, aunque también se pueden usar espesores de tablón distintos en el mismo panel, siempre que se mantenga la simetría (y algunos fabricantes disponen dos capas consecutivas con tableros en la misma dirección). La composición de las capas de los paneles de CLT es flexible y depende de cada fabricante. En la tabla 3 se muestran las secciones estándar del fabricante español Egoín:

Tabla 3. Secciones estándares de CLT que ofrece el fabricante EGOIN.

SECCIONES ESTÁNDARES DE CLT								
TIPO	ESPESOR (mm)	COMPOSICIÓN (Gris longitudinales) (mm)						
EGO-CLT 3 c	75		25	25	25			
	90		30	30	30			
	100		30	40	30			
	120		40	40	40			
EGO-CLT 5 c	125		25	25	25	25	25	
	150		30	30	30	30	30	
	170		30	40	30	40	30	
	200		40	40	40	40	40	
EGO-CLT 7 c	210	30	30	30	30	30	30	30
	240	30	40	30	40	30	40	30
EGO-CLT 9 c	270	30+30	30	30	30	30	30	30+30
	300	30+30	40	30	40	30	40	30+30

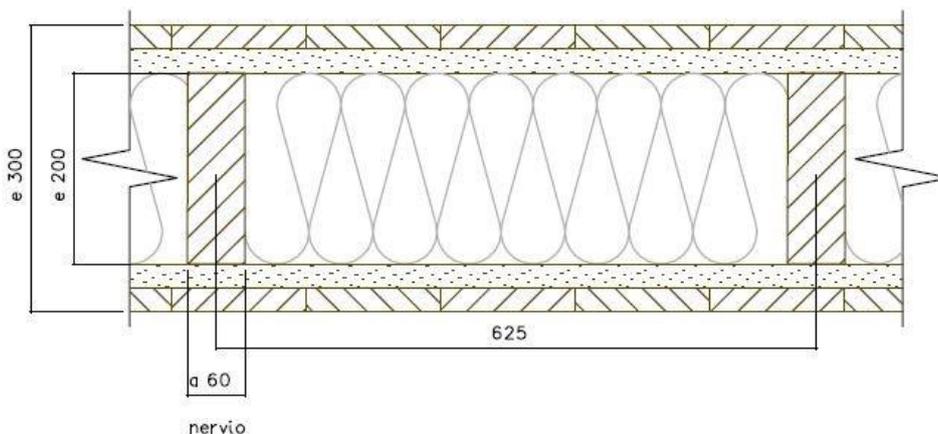
Las capas se unen entre ellas mediante cola de poliuretano, otorgando así al conjunto una continuidad que le permite transmitir esfuerzos como elementos bidireccionales. De esta forma, sobre la primera capa se extiende una lámina de cola, sobre la cual se coloca una segunda capa en sentido transversal (es decir, a 90°), para añadir otra capa de cola; este proceso se repite hasta obtener el panel deseado. Depende del fabricante el encolar el canto de las tablas: esto permite repartir mejor los esfuerzos entre flexores y torsores, pero puede provocar fendas en las tablas de las capas más superficiales. Una vez colocadas todas las capas, se procede al prensado.

Una de las características a mencionar del CLT es su estabilidad dimensional, tanto a lo largo como a lo ancho, creada por la retención que realizan las fibras de las tablas colocadas en sentido longitudinal respecto a las de las tablas colocadas en sentido transversal y viceversa.

Debido a su uso cada vez más industrializado, el CLT ya está modelizado e incluido en las bibliotecas de muchos softwares de cálculo con madera, entre los que se incluye RFEM. Los métodos para la modelización del CLT ya están, por tanto, implementados en Dlubal, y por esa misma razón este trabajo no ofrece nuevas propuestas. Aun así, las bases teóricas para la modelización del CLT son de gran importancia para comprender las bases teóricas en las que se fundamentarán las modelizaciones de los elementos que se estudiarán más adelante en este trabajo. Por ello, se han incluido a modo de anexo en el apartado 10.

## 5.2. CLT MIX

Los paneles CLT MIX se comportan como paneles de madera alveolares. En ellos, se sustituye la tongada central del panel por una estructura de largueros de madera que delimitan una serie de alveolos interiores que se rellenan de aislante térmico como lana de roca, lana de vidrio o fibra de madera. Los paneles están cerrados en todo su perímetro por cabios de madera laminada encolada de tipo DUO.



*Ilustración 3. Sección de un alveolo de un panel de CLT MIX estándar.*

En este caso, la cola se aplica sobre estos largueros, y se colocan arriba y abajo otras dos tongadas de tablas, formando un panel de cinco capas como el que se puede observar en la ilustración 3.

Respecto al CLT común, estos paneles aportan mejores prestaciones mecánicas y térmicas para un mismo volumen de madera por unidad de superficie. Proporcionan una gran estabilidad, permitiendo edificar con luces relativamente grandes (de hasta 10-12 m) para las cargas habituales de los edificios residenciales y administrativos.

Su utilización principal en la actualidad son los forjados entre plantas y de cubiertas de geometrías regulares, ya que una geometría complicada puede generar dificultades en el diseño. Son de gran ayuda para realizar voladizos de cubiertas de grandes dimensiones, debido al ratio peso/resistencia que ofrecen.

Si bien sus prestaciones mecánicas son superiores que las del CLT convencional, un ojo experimentado podría observar la diferencia en el funcionamiento de ambos elementos constructivos. El CLT, compuesto por tabloncillos encolados de manera entrecruzada entre capa y capa, mantiene una estabilidad considerable en su rigidez a lo largo de cada plano, lo que permite una transferencia de esfuerzos más equitativa en todas las direcciones, otorgándole así una de sus características más reconocidas: la bidireccionalidad. Aun así, la bidireccionalidad no es total, ya que la dirección principal de transferencia de esfuerzos queda definida por la dirección en que mayor cantidad de capas quedan dispuestas; esto implica que siempre habrá una dirección de transferencia de esfuerzos dominante y más resistente; esta es la razón por la cual existen paneles que trabajan

mejor en su sentido transversal y otros que trabajan mejor en su sentido longitudinal (como se ha mostrado en la ilustración 2). El reparto de los esfuerzos a lo largo del panel depende de la casuística (puntos de apoyo, posición de las cargas, etc.).

En el párrafo anterior se ha mencionado una característica muy importante a la hora de estudiar la transferencia de esfuerzos a lo largo de un elemento o de una estructura: la rigidez. La rigidez define en gran manera el camino que los esfuerzos tomarán a lo largo del medio sólido. En el CLT común, al mantener la rigidez en su volumen, la bidireccionalidad es más acentuada de lo que lo sería en un volumen de rigidez cambiante, en el cual los esfuerzos tomarían el camino de mayor rigidez de una manera más clara.

En el estudio de la anatomía del CLT MIX, se presentan cuatro tipos de elementos: el primero es el aislante térmico, cuya aportación resistente es despreciable; el segundo, los tableros longitudinales; el tercero, los tableros transversales; y el cuarto, los largueros que unen las capas superiores e inferiores de tableros (ilustración 4). Cada uno de ellos aporta algo al conjunto:

- a) Los tableros longitudinales, dispuestos en las capas superior e inferior del conjunto, definen junto a los largueros la dirección principal del CLT MIX, y aportan mayor resistencia, en comparación a los tableros transversales.
- b) Los tableros transversales, situados tanto arriba como abajo una capa más al interior que los longitudinales, tienen como objetivo transmitir los esfuerzos generados por las cargas a los largueros. Sin su presencia, los tableros longitudinales estarían desolidarizados entre sí, provocando el fenómeno de *tecleo*, en el cual cada tablón longitudinal debería soportar por su propia cuenta toda la carga ejercida sobre él; encolados a una capa de tableros transversales, se forma un puente para la transferencia de esfuerzos hacia los largueros.

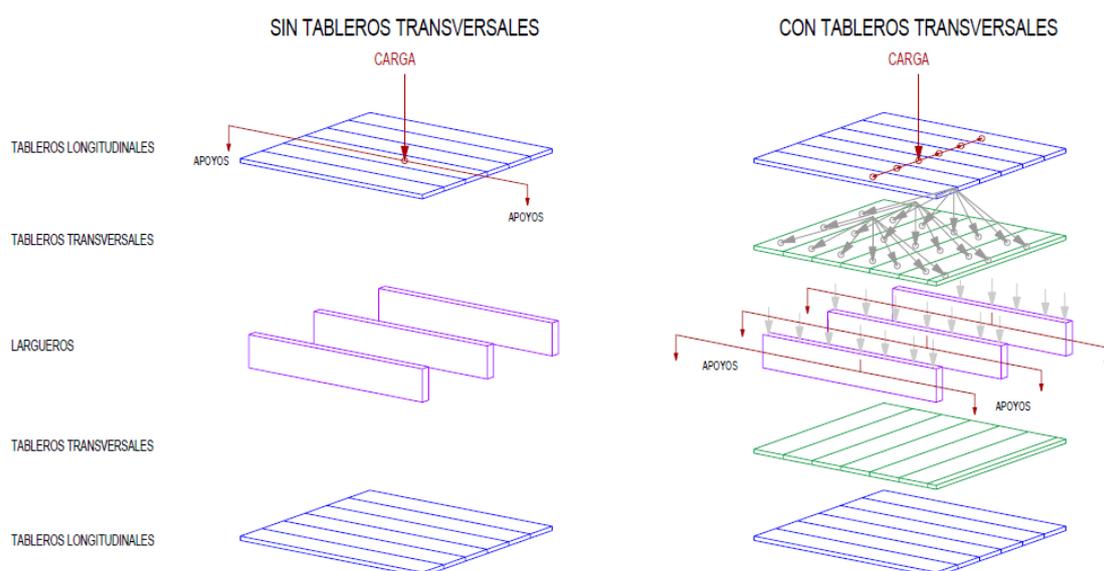


Ilustración 4. Aportación de los tableros transversales en el CLT MIX y transferencia de esfuerzos hasta los apoyos.

- c) Los largueros, en última instancia, reciben los esfuerzos transmitidos por los tablonos transversales y redireccionan las cargas hacia los puntos de apoyo.

Resulta evidente, a estas alturas, que la rigidez no queda igualmente repartida en todo el conjunto, sino que ofrece un valor mayor en las zonas donde se disponen los largueros, y que por esta misma razón son estos, en definitiva, los que transmiten la carga hasta los puntos de apoyo, o, dicho de otra forma: que el comportamiento del CLT MIX tiende a un grado de unidireccionalidad mayor que el del CLT convencional. Así, el CLT MIX, en su comportamiento estructural, sería más parecido a un forjado en T que a un forjado bidireccional (que es hacia lo que se escora el CLT).

Si bien la pérdida de un porcentaje de su bidireccionalidad aleja el comportamiento del CLT MIX del CLT convencional, este efecto ocurre solo en cierto grado, ya que la pérdida de la bidireccionalidad es solo parcial: sigue funcionando en ambas direcciones, aunque su comportamiento en su dirección transversal sea menos dominante que en forjados de CLT.

¿Cuáles son, entonces, las ventajas del CLT MIX por sobre el CLT? Anteriormente se ha mencionado la mejora de prestaciones mecánicas que tiene respecto a las del CLT común, lo que se traslada en un aumento de las luces que van a poder utilizarse en el modelizado de una estructura; así, un CLT común, por sí mismo, tiene grandes dificultades para cubrir luces mayores a 6 metros, y un pequeño incremento de las luces requiere de un aumento del espesor del CLT bastante significativo. El CLT MIX, en cambio, empieza a justificar su uso a partir de los 6 metros, es decir: el uso del CLT MIX, considerando todas las ventajas y desventajas que lo acompañan, solo es más efectivo que el del CLT común a partir de las luces en que el CLT común ya no funciona por sí mismo. Esto convierte al CLT MIX en la opción perfecta para seguir usando una opción similar al CLT más allá de las capacidades estructurales del mismo CLT.

Todo esto, además, reduciendo el uso de madera total en el elemento: para cubrir 6 metros de luz con CLT MIX se necesita menos madera que para cubrir esa misma distancia con CLT. Este hecho puede resultar confuso, pero tiene una explicación sencilla: el incremento de inercia debido al cambio de anatomía es mucho mayor en el CLT MIX, debido a que la madera se aleja del eje neutro, y, por definición, la inercia crece a medida que la madera se aleja de dicho eje neutro, un valor igual al cubo de esa distancia: el reparto de la madera a lo largo de la sección está mejor aprovechado, y esto se traduce en unas mejores prestaciones mecánicas por volumen de madera.

Si contabilizamos las inercias como mediante el método Gamma (sección 10.1), es decir, suponiendo que solamente los tablonos longitudinales aportan inercia al conjunto, y suponiendo un ancho de  $b_t = 0,625$  m (la distancia entre largueros) y una luz de 6 metros, se obtiene que el CLT MIX tiene una inercia gobernada mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 I_z^{MIX} &= \frac{b_l \cdot h_l^3}{12} + \frac{b_t}{12} \cdot [(4 \cdot h_t + h_l)^3 - (2 \cdot h_t + h_l)^3] \\
 &= \frac{0.06 \cdot 0.2^3}{12} + \frac{0.625}{12} \cdot [(4 \cdot 0.025 + 0.2)^3 - (2 \cdot 0.025 + 0.2)^3] = 6.324 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Estas inercias requieren de una sección de  $0.0745 \text{ m}^2$  de madera. Dividiendo la inercia por la superficie, sale un ratio  $I/A$  de  $8.489 \cdot 10^{-3}$ .

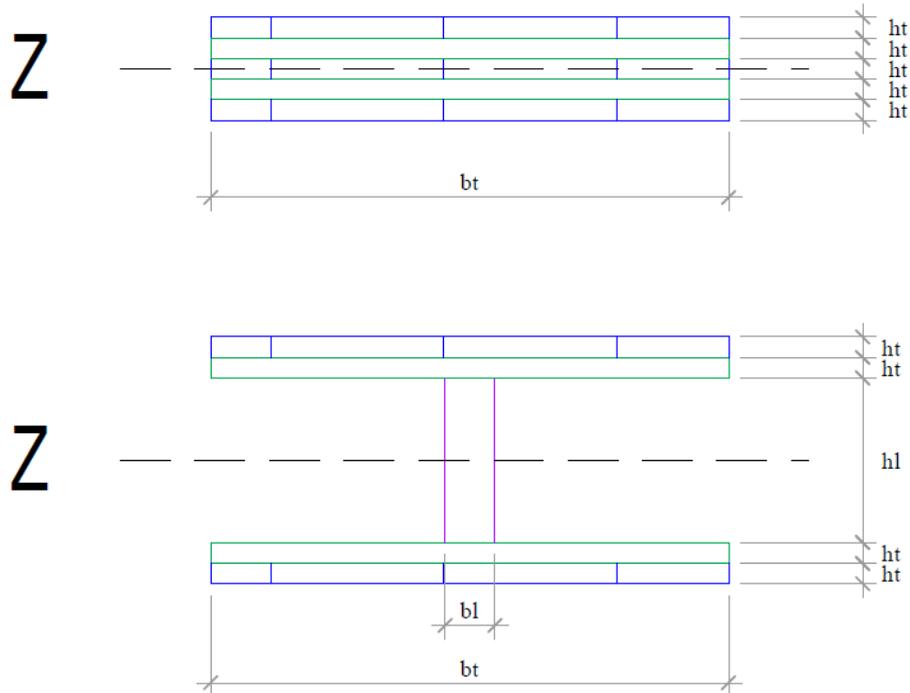


Ilustración 5. Comparación de secciones del CLT200 y del CLT MIX 300.

Si estudiásemos un CLT 200 de cinco capas como el de la ilustración 5 (40-40-40-40-40 mm), que es el utilizado para superar luces de 6 metros, el ratio I/A sería el siguiente:

$$I_z^{CLT} = \frac{b_t \cdot (5 \cdot h_t)^3}{12} - \frac{b_t \cdot (3 \cdot h_t)^3}{12} + \frac{b_t \cdot (h_t)^3}{12} = \frac{97}{12} \cdot b_t \cdot h_t^3 = \frac{97}{12} \cdot 0.625 \cdot 0.04^3$$

$$= 3.233 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$A^{CLT} = 5 \cdot b_t \cdot h_t = 5 \cdot 0.625 \cdot 0.04 = 0.125 \text{ m}^2$$

$$\frac{I_z^{CLT}}{A^{CLT}} = 2.586 \cdot 10^{-3}$$

Como puede observarse, el ratio inercia/superficie de la sección del CLT MIX es más de tres veces superior al del CLT convencional; y esto, sin entrar siquiera a considerar la sollicitación de cada uno de los elementos: el CLT convencional estaría cerca del fallo, mientras que el CLT MIX soportaría la misma situación con bastante holgura.

El CLT MIX tiene más ventajas respecto al CLT: los huecos interiores se utilizan para alojar lana de roca, lana de vidrio o fibra de madera, lo que mejora el aislamiento; al ser un elemento de mayor inercia, su comportamiento frente al ruido también mejora respecto al CLT común (79 dB del CLT 200 contra 87 dB del CLT MIX, según ensayos). Y, aunque en el CLT también puedan realizarse estas modificaciones, tiene una composición flexible, lo que permite añadir capas de yeso para mejorar su comportamiento frente al fuego, en caso de considerarse necesario.

Por otro lado, también tiene sus desventajas: la altura de la sección es más grande, por lo que ocupa mayor espacio en el transporte que el CLT convencional; su fabricación es más complicada, debido a que la inclusión de los largueros implica tomar medidas en fábrica por operarios, mientras que en el CLT basta con alinear canto contra canto los tablonos en cada capa, y esto requiere un mayor control en fábrica; su comportamiento no es tan bidireccional como el del CLT, característica que, en ocasiones, puede ser interesante.

El único fabricante de CLT MIX actual es Egoin, que define las secciones que se listan en la tabla 4:

*Tabla 4. Secciones estándares de CLT MIX que ofrece el fabricante EGOIN.*

SECCIONES ESTÁNDARES DE CLT MIX							
TIPO	ESPESOR (mm)	COMPOSICIÓN (Gris longitudinales) (mm)					VOLUMEN MADERA (l/m <sup>2</sup> )
EGO-CLT MIX 5 c	240	25	25	140	25	25	113
	300	25	25	200	25	25	119
	340	25	25	240	25	25	125
	360	30	30	240	30	30	145
	400	40	40	240	40	40	185

### 5.3. CLT T



*Ilustración 6. Ejemplo de un forjado de CLT T en obra.*

Los forjados en T se obtienen a partir de un sistema mixto, uniendo, mediante conectores, un panel de CLT de tres capas a vigas de madera laminada encolada (MLE). Se obtiene así un elemento constructivo que trabaja de manera similar a los forjados en T de hormigón armado. Su fundamento físico se basa en el gran incremento inercial que las vigas de MLE otorgan al conjunto, de un valor considerablemente mayor en comparación a la cantidad de material añadido (ilustración 6).

En ese aspecto, su comportamiento estructural podría recordar ligeramente al CLT MIX, con la diferencia de que el CLT MIX se parece más a un panel formado por vigas en doble T y el CLT T, en

cambio, a un panel con vigas en T, pero hay muchos más aspectos involucrados en su comportamiento estructural.

Al igual que el CLT MIX, su uso principal es en forjados y en cubiertas de grandes dimensiones. En el caso del CLT T, en cambio, la flexibilidad es mayor. Esto se debe al proceso de fabricación: si bien el CLT MIX es un volumen cerrado que contiene aislante en su interior y que se encola en bañeras (factor este último que obliga a fabricar paneles rectangulares), y que no puede cortarse con las mismas formas irregulares que el CLT convencional, el CLT T es una composición compuesta por CLT fabricado en bañeras atado a posteriori mediante uniones mecánicas (normalmente tirafondos) a unas vigas de MLE. Este factor es determinante, ya que aumenta significativamente la posibilidad de alterar el perímetro de la composición, mecanizando el CLT primero y atando las vigas de MLE hechas a medida posteriormente.

Respecto al CLT y al CLT MIX, el CLT T también presenta mejores prestaciones mecánicas, habiéndose puesto en obra composiciones biapoyadas que cubren luces de hasta 16 metros de luz para cargas en edificios residenciales y administrativos. Esta cifra supera incluso los resultados ofrecidos por el CLT MIX, limitado, en la mayoría de los casos, a luces de 10-12 metros en su estado biapoyado. Este incremento de hasta 4 metros de luz respecto al CLT MIX no es descabellado, ya que las vigas de MLE introducidas son de un tamaño considerable, en sus composiciones más espesas, y puede recordar, salvando las distancias, a la construcción con madera en grandes luces.

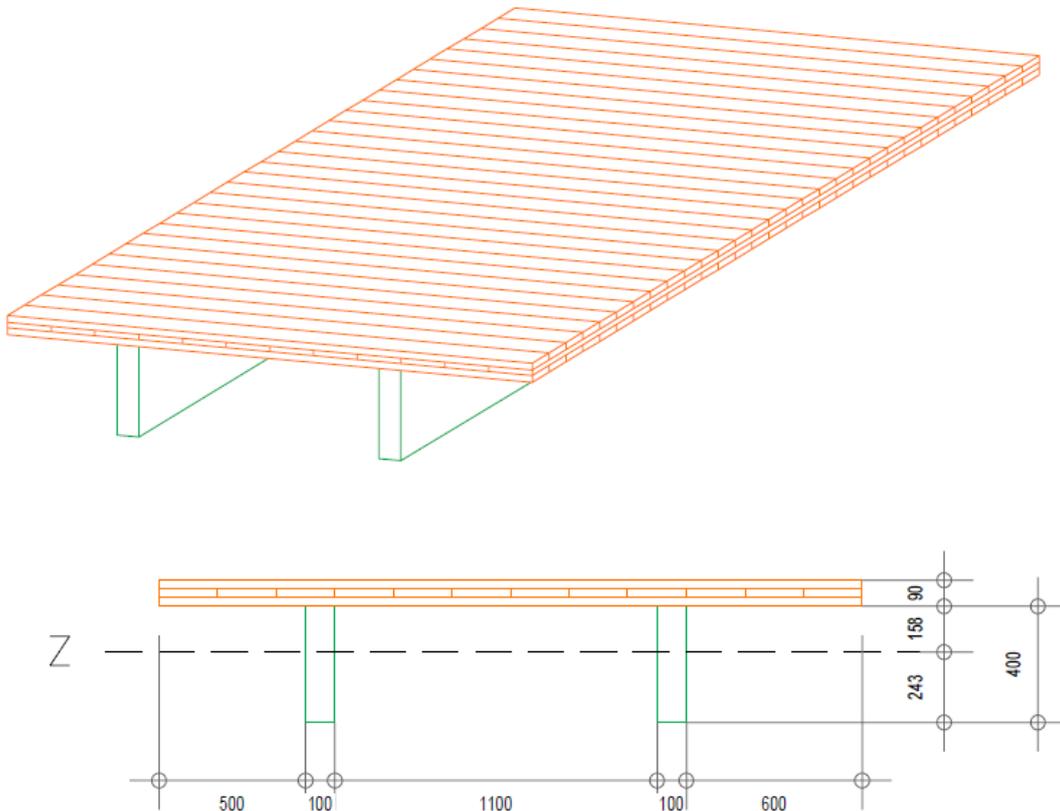
Si bien estas luces superan las que puede alcanzar el CLT y el CLT MIX, acarrear cierta desventaja: la cantidad de madera utilizada incrementa mucho al integrar las vigas de MLE. Es, de todas formas, el precio a pagar por ampliar la franja de luces en que se pueden usar composiciones similares al CLT.

Todo esto, si bien hace del CLT T una herramienta muy útil, también marca ciertas recomendaciones constructivas: su uso es casi únicamente recomendable para luces más grandes que las del CLT MIX. Para luces menores a 12 metros, habría que sopesar, dependiendo de las cargas aplicadas, del tipo de acabado inferior y del perímetro del panel, si el CLT T es una alternativa mejor.

Se ha mencionado que el CLT T consiste en la unión mecánica de dos elementos. En su concepción actual, cada uno de esos dos elementos está dispuesto de la siguiente manera:

- a) CLT de tres capas: con capas de igual espesor, cuyo espesor de tablón varía dependiendo de la configuración. Su dirección dominante será aquella definida por las vigas de MLE unidas a su superficie inferior, lo que le dará al conjunto una mayor resistencia en su dirección longitudinal.
- b) Vigas de MLE: son las principales responsables de poder cubrir las luces que el CLT T puede cubrir. Aportan una gran inercia al conjunto. El intereje entre dos vigas contiguas es de 1.2 metros, lo que define el panel CLT T estándar para un ancho de 2.4 metros. Serán, en última instancia, las responsables de transmitir los esfuerzos generados por las cargas aplicadas a los puntos de apoyo; por ello, deberán ser las vigas, y no el CLT, las que tengan contacto directo con los apoyos; de lo contrario, podrían aparecer en el CLT fallos a cortante en sus puntos de apoyo.

En la ilustración 7 puede observarse un panel de CLT T estándar:



*Ilustración 7. Panel de CLT T estándar.*

En caso de que el CLT de la parte superior estuviese girado  $90^\circ$ , mejoraría su comportamiento entre vigas, pero reduciría significativamente la inercia del conjunto en su dirección longitudinal (ya que, en ese caso, tan solo una capa aportaría inercia al conjunto entre vanos, mientras que las otras dos incrementarían las deformaciones por rodadura, por su consideración como uniones), lo cual reduciría la capacidad del CLT T para cubrir grandes luces y podría desplazar su uso para las luces con las que se usa el CLT MIX, en las que el segundo podría ser mejor opción, debido al mejor aprovechamiento de la madera en la sección

A estas alturas, aparece una divergencia importante entre el cálculo del CLT MIX y el del CLT T: mientras que el CLT MIX solo tiene uniones encoladas entre las capas longitudinales, el CLT T tiene tanto uniones encoladas (la capa transversal del CLT) como uniones mecánicas (unión entre el CLT y las vigas de MLE). Asimismo, la unión encolada del CLT no es una unión encolada convencional, dado que las deformaciones de dicha unión no se deben solamente a la rodadura, como en el CLT MIX; ahora, al introducir uniones mecánicas, la resistencia a la deformación por rodadura en la capa transversal del CLT (causada por  $G_R$ ) se solapará con la resistencia a la deformación de las uniones mecánicas. Esto, en la realidad, mitigaría en cierto grado la deformación, pero dado que no se tienen resultados de estudios al respecto, se recomienda, del lado de la seguridad, no contar la resistencia a la deformación que oponen los tirafondos a la hora de definir la deformación de la capa transversal:

la resistencia de las uniones mecánicas a la deformación solo se considera en la interfase entre el CLT y las vigas de MLE.

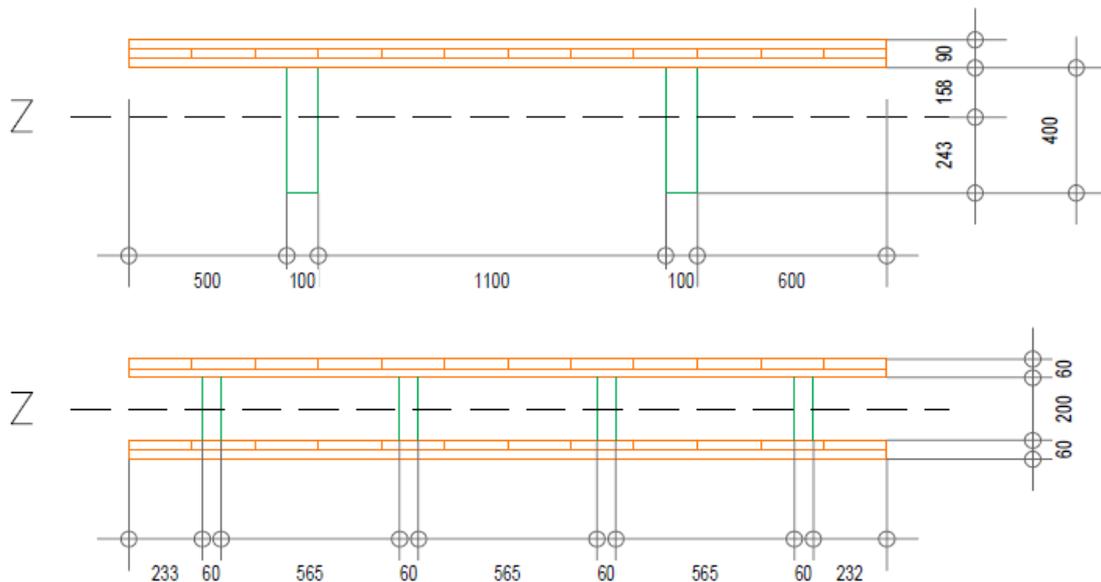


Ilustración 8. Comparación cualitativa de secciones de CLT MIX y de CLT T

El CLT T es una composición interesante para situaciones que comprendan grandes luces, pero tiene una serie de desventajas que limitan su uso para luces más pequeñas. Más allá de su cualidad estética, puede ser más útil usar el CLT MIX en situaciones en las que las luces sean inferiores a 12 metros, debido al incremento en el ratio cantidad de madera/luz a cubrir. La anatomía de las composiciones así lo justifica: una sección en doble T con almas relativamente pequeñas tiene la inercia mejor repartida que una sección en T con almas de mayor tamaño, como puede observarse en la ilustración 8.

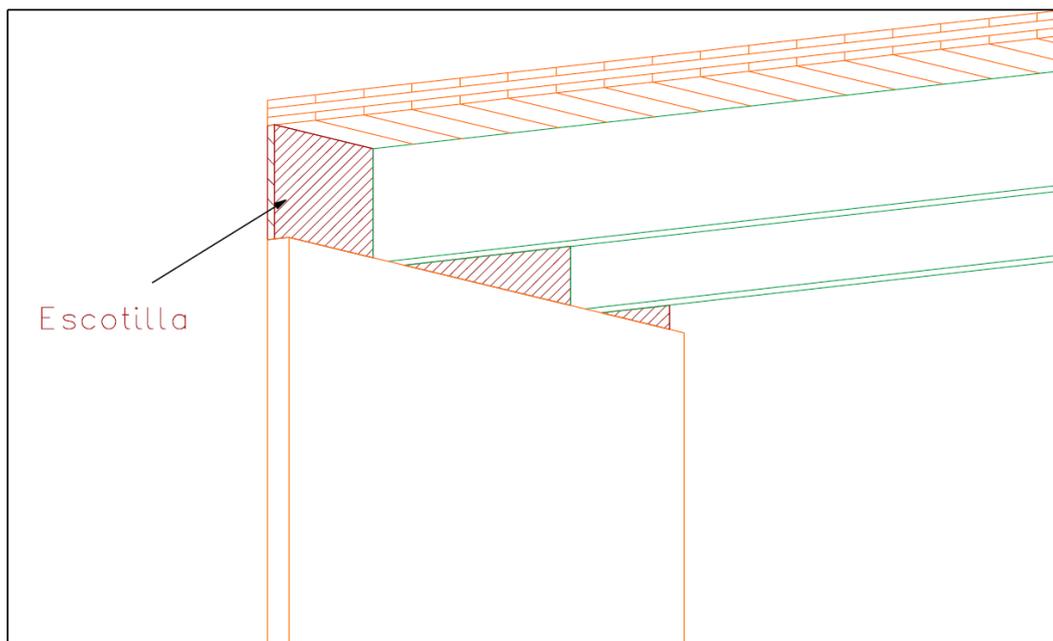


Ilustración 9. Apoyo del CLT T sobre muros: usando escotillas.

Otra desventaja obvia respecto al CLT MIX es que el CLT T no tiene aislante integrado, y toda su capacidad aislante será la que el CLT de la parte superior le otorgue.

Además, la mecanización de los muros de apoyo del CLT T es complicada. Se presentan dos soluciones: mecanizar de manera dentada los muros o, en caso de que los muros no sean vistos, disponer escotillas que cubran la altura de las vigas (ilustración 9).

Su espesor, por otro lado, es grande en comparación a otras composiciones como el CLT o el CLT MIX, lo que reduce la cantidad de forjados que pueden transportarse en un camión, y desaprovecha de esa forma el volumen de la unidad de transporte.

Donde el CLT T se alza como mejor opción de manera indiscutible es para cubrir luces de más de 12 metros.

El único fabricante de CLT MIX actual es Egoin, que define las secciones que se listan en la tabla 5:

*Tabla 5. Secciones estándares de CLT T que ofrece el fabricante EGOIN.*

SECCIONES ESTÁNDARES DE CLT T						
TIPO	ESPESOR (mm)	COMPOSICIÓN (Gris longitudinales) (mm)				VOLUMEN MADERA (l/m <sup>2</sup> )
EGO-CLT T 4 c	460	20	20	20	400	152
	595	25	25	25	520	191
	700	30	40	30	600	268

## 6. Propuestas de modelización

Una de las mayores limitaciones a las que este proyecto se ha enfrentado ha sido aquella presentada por el software. Si bien Dlubal software es un programa increíblemente completo que ofrece varias alternativas para el cálculo de los elementos a estudio, todo software tiene carencias que limitan la libertad de modelización más allá de sus bibliotecas o de los elementos más industrializados. Por eso, algunas de las concepciones de modelado originales han sido descartadas a medida que se ha ido profundizando en la programación.

Algunos apartados del cálculo estructural han sido realizados de manera manual o con ayuda de hojas de cálculo. Esto se debe a que la base teórica exige considerar ciertos parámetros que, por sí mismo, el software de Dlubal no calcula o no tiene en cuenta. Uno de ellos es el parámetro de efectividad de las uniones calculado en la adaptación del método Gamma para el cálculo del CLT, que varía respecto a la fórmula original para uniones mecánicas; en otras ocasiones, las herramientas ofrecidas son insuficientes para ciertos tipos de cálculo, como los relativos al comportamiento frente al fuego.

El software modular de Dlubal implementa dos métodos para el cálculo del CLT:

- Por un lado, RFEM, el módulo principal, permite implementar el método Gamma en ciertos tipos de sección (por ejemplo, la sección en doble T).
- Por otro, el módulo RF-LAMINATE, centrado en teoría de placas, tiene programado por defecto el método de acoplamiento a cortante.

El hecho de disponer de sendos métodos ha permitido mayor flexibilidad de diseño que si solo se hubiese podido contar con uno de ellos, pero al mismo tiempo ha presentado también ciertas desventajas: el hecho de que cada uno de los módulos funcione de manera independiente con uno de los métodos ha hecho que al combinar el uso de ambos módulos (cosa que en Dlubal se debe hacer casi siempre), se hayan tenido que descartar algunas propuestas de modelado debido a que las deformaciones calculadas mediante un método en un módulo se solapaban con las deformaciones calculadas mediante el otro método en el otro módulo.

Las propuestas de modelización del CLT MIX que se propondrán en los siguientes apartados han pasado ya el filtro de las limitaciones planteadas. Para otro software, las limitaciones pueden ser distintas. Este hecho obliga a adaptar la modelización del CLT MIX al software que se usará para su cálculo, debiendo ser necesario, en algunas ocasiones, servirse de cálculos manuales o de hojas de cálculo.

## 6.1. Modelización del CLT MIX

### 6.1.1. Modelización del CLT MIX mediante RF-LAMINATE

La primera opción consiste en utilizar el módulo RF-LAMINATE para definir las características resistentes del material. Este módulo utiliza el método de acoplamiento a cortante, basado en teoría de placas. Respecto al método Gamma, ofrece resultados más exactos para el cálculo de CLT. El conjunto debería dividirse en tres superficies de tipo *laminada* bien diferenciadas que pueden verse en la ilustración 10:

- La superficie horizontal inferior reúne la capa longitudinal inferior y la capa transversal inferior. La composición está formada, por tanto, de abajo arriba, por una capa longitudinal y por otra transversal (superficie verde en la ilustración 10).
- Las superficies verticales que conectan la capa horizontal superior y la capa horizontal inferior modelizan los largueros. La composición está formada por dos capas longitudinales, que modelizan los dos tablonos encolados que conforman el larguero (superficies amarillas en la ilustración 10).
- La superficie horizontal superior reúne la capa transversal superior y la capa longitudinal superior. La composición está formada, de abajo arriba, por una capa transversal y por una capa longitudinal (superficie azul en la ilustración 10).

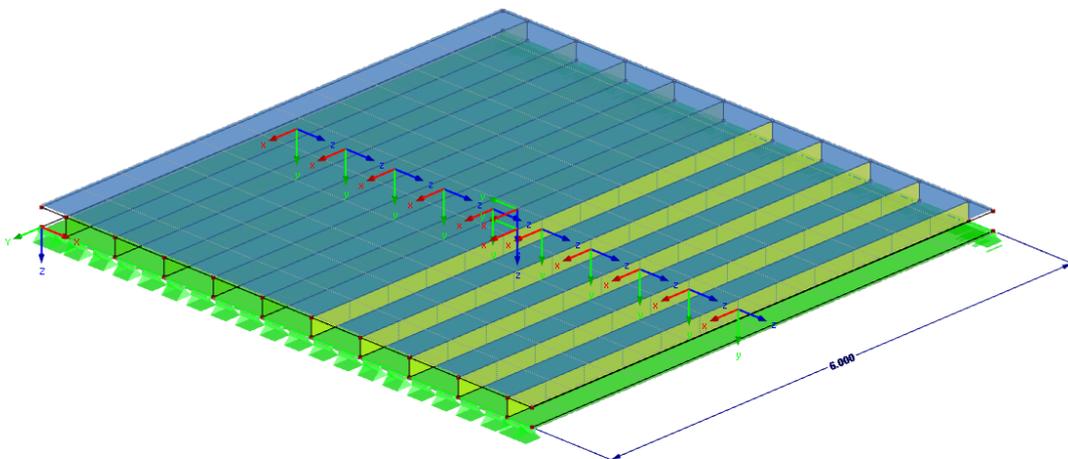


Ilustración 10. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: modelo.

Para definir correctamente el modelo, hay varias condiciones a tener en cuenta. Los apoyos del CLT MIX deben ponerse solamente en la superficie inferior, ya que será esta la que entre en contacto con los muros de apoyo cuando la composición sea colocada en obra: un apoyo debe ser articulado fijo, mientras que el resto deben ser articulados deslizantes en la dirección de trabajo principal del CLT MIX.

En caso de querer modelar el CLT MIX dentro de un edificio más complejo, habría que considerar que los muros superiores cargan en la superficie superior. En ambos casos, debe definirse

una articulación lineal para unir ambos elementos, cuyas características pueden definirse dependiendo del caso a estudio; esta articulación lineal es la encargada de modelizar el apoyo lineal definido en el modelo de la ilustración 10, y es de gran importancia para definir el tipo de articulación existente entre CLT MIX y muros.

Al ser las superficies un elemento de dos dimensiones, los volúmenes que describen (ya sean la capa de tablonos inferior o superior, ya sean los largueros) quedan definidos teniendo esta superficie en su plano central. Si bien este hecho hace el cálculo más sencillo, impide aprovechar plenamente la ventaja inercial que el CLT MIX como conjunto tiene respecto a otras composiciones, ya que, conectando las superficies como aparecen en la ilustración 10, se conectan las superficies centrales, no los volúmenes sólidos, es decir: a la altura que aportan los largueros (200 mm) se le suman, por cada lado, solo los 25 mm de altura que sobresalen del plano central de las superficies superior e inferior hacia el exterior de la composición (ilustración 11).

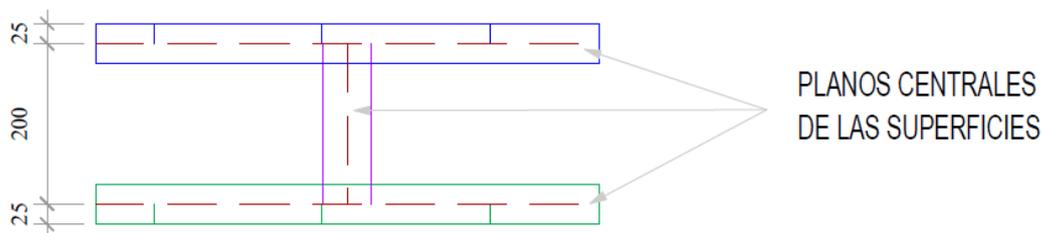


Ilustración 11. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: definición de superficies en Dlubal Software.

Esta particularidad de funcionamiento del software hace que el CLT MIX de 300 mm de espesor que se desea modelar tenga en realidad una sección de 250 mm de altura. En sí, mientras el usuario tenga conciencia de las implicaciones de modelar de esta manera, la corrección es sencilla: desplazar 25 mm hacia fuera ambas superficies. Es necesario corregir la excentricidad, dado que esos 25 mm tienen una aportación elevada al cubo en la inercia, y puede llevar a un sobredimensionamiento pronunciado.

Otra consideración es el sistema de ejes local, ya que es este el que define la dirección de trabajo principal de la superficie, y para materiales ortótropos, que por definición tienen distintas propiedades dependiendo de la dirección que se estudie, es algo a considerar. La dirección del eje x es la que marca la dirección fuerte de la madera tal como está definida en la biblioteca de RFEM.

Un usuario con experiencia en modelado de CLT en RFEM podría estar tentado en definir articulaciones lineales en las líneas de contacto entre las superficies, para modelar una unión articulada: si bien esto es una práctica obligatoria para uniones entre paneles de CLT independientes, y se debe considerar en uniones entre el CLT MIX con otros paneles, no debe haber articulaciones lineales dentro del panel de CLT MIX. La razón de esto es que RFEM, por defecto, empotra los puntos, líneas y superficies en contacto directo entre ellos, que es precisamente el tipo de unión entre largueros y tablonos; alterar con una articulación lineal lo que ya de por sí está bien definido incrementa de manera innecesaria el coste computacional y las probabilidades de cometer errores en el modelo. Podría argumentarse que la definición de la articulación sirve para definir la deformación a rasante (debida al módulo de rodadura) de las capas transversales, pero esto

implicaría realizar el cálculo de esta deformación a mano, cuando RF-LAMINATE lo hace por sí mismo de manera automática mediante teoría de placas.

Posteriormente, se deberán definir los casos de carga y las cargas antes de entrar al módulo RF-LAMINATE. Una de las ventajas de este método es la facilidad para definir las cargas, ya que basta con aplicar una carga superficial a la superficie superior del conjunto para que el resto del modelo distribuya las cargas correctamente.

En la ilustración 12 puede observarse la ventana principal del módulo RF-LAMINATE:

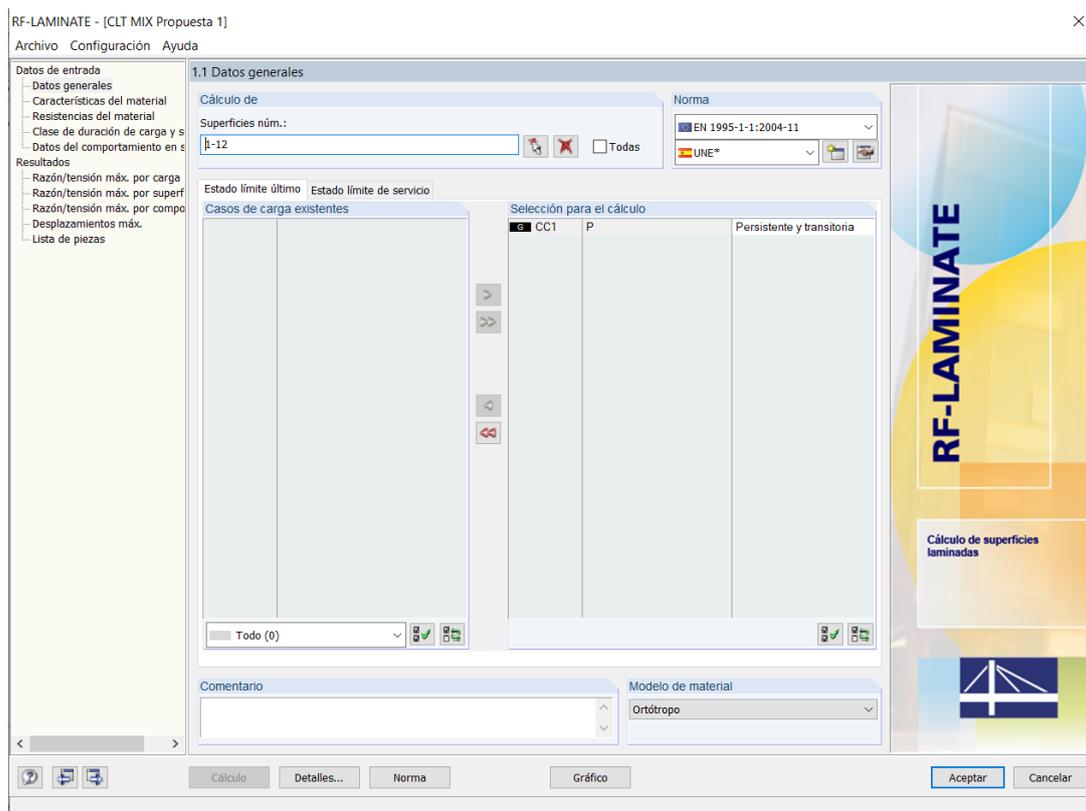


Ilustración 12. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: ventana principal del módulo RF-LAMINATE.

Debido a un desfase entre normativas y actualizaciones de Dlubal Software, es una práctica recomendable revisar que los factores de material de la normativa escogida en todos los módulos de Dlubal sean correctos. A 8 de julio de 2022, se deben realizar las siguientes modificaciones:

- Para la madera maciza, en situación de proyecto persistente y transitoria, puede tenerse en cuenta el  $k_{sys}$ , por lo que el coeficiente parcial debe dividirse entre este:

$$\gamma_M^* = \gamma_M \cdot k_{sys} = 1.3 / 1.1 = 1.182$$

- Para madera contralaminada, en situación de proyecto permanente y transitoria, el coeficiente parcial de seguridad ( $\gamma_M$ ) es 1.25.

Una vez comprobada la normativa a uso, deben definirse cada una de las composiciones mencionadas al principio de este apartado. En todos los casos, el material es madera de chopo y coníferas C24.

La composición de los largueros, al ser estos DUOs de MLE, se compondrá de dos capas de 30 mm cada una, siendo la categoría del material “Madera laminada encolada”. En el caso de ambas capas, la dirección ortótropa coincide con el eje x, es decir, es de 0°.

Para las composiciones de las superficies superior e inferior, la categoría del factor será “Madera contralaminada” para dos capas de 25 mm de espesor entrecruzadas. Para estas dos composiciones, la capa compuesta por los tableros transversales debe tener una dirección ortótropa de 90°. Siguiendo las recomendaciones del *CLT Handbook* en su versión canadiense, se propone alterar el valor del coeficiente de rodadura ( $G_{yz}$  en Dlubal Software), otorgándole un valor de 50 N/mm<sup>2</sup>, en vez de los 69 N/mm<sup>2</sup> que tiene por defecto la madera de coníferas C24 en la biblioteca del software.

Tras elegir las superficies que el usuario quiera estudiar, puede lanzarse el cálculo del módulo. Los resultados obtenidos se podrán consultar tanto en RFEM como en RF-LAMINATE, dependiendo de lo que se desee observar. En la interfaz natural de usuario (NUI) de RFEM, se podrá observar la deformación del modelo de la como se ve en la ilustración 13.

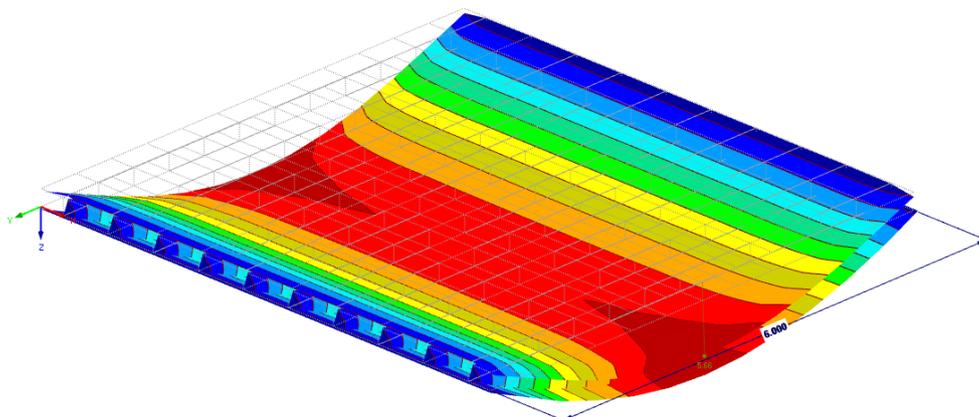


Ilustración 13. Propuesta de modelizado 1 del CLT MIX: resultado de las deformaciones.

El usuario de Dlubal deberá servirse de sus conocimientos teóricos y sus conocimientos del software para buscar los resultados deseados y realizar las comprobaciones convenientes en cada caso.

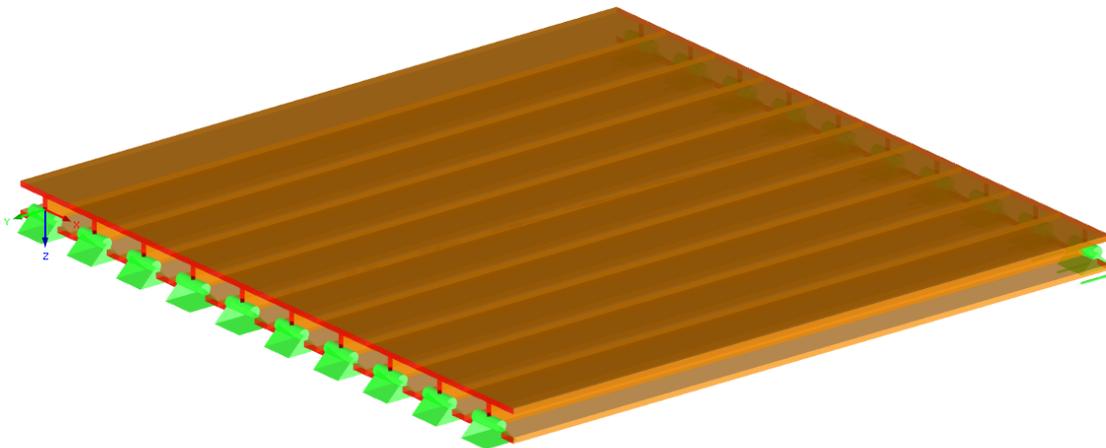
Para las modelizaciones propuestas, Dlubal software no ofrece medios que permitan calcular la situación de fuego directamente. Así, la propuesta para el estudio del comportamiento del CLT MIX frente al fuego varía dependiendo del modelo que se decida utilizar. El cálculo manual, en casos como este, es de mayor ayuda que el software mismo, debido a las limitaciones que este plantea; por ello, el software es solo útil como medio para acelerar los cálculos frente a fuego, y requiere de una base teórica clara por parte del usuario. De esta manera, con el módulo RF-LAMINATE puede verse el comportamiento de la sección reducida del CLT, pero la sección reducida no se calcula automáticamente en el programa, sino que debe introducirse manualmente.

### 6.1.2. Modelización del CLT MIX en RFEM mediante elementos tipo barra

La segunda opción consiste en apoyarse solamente en el módulo principal de Dlubal: RFEM. De esta manera, el método utilizado para calcular el CLT MIX es el método Gamma. En el apartado 5 se ha mencionado que el método de acoplamiento a cortante es más exacto; esta diferencia, de todas formas, no es lo suficientemente determinante, de manera aislada, como para inclinarse por usar solo el método de acoplamiento a cortante, sin mirar otras cualidades de la simulación. En el software ocupado en el desarrollo de este estudio, existe una diferencia fundamental a la hora de inclinarse por el tipo de modelización: RF-LAMINATE usa un método más exacto, pero cada elemento del CLT MIX está modelizado por una superficie distinta, lo que deriva en el uso paralelo de RF-LAMINATE y RFEM; este hecho no genera interferencias si se usa tal como se ha explicado en el apartado 6.1.1, pero puede resultar confuso a la hora de mostrar los resultados, pues habrá que saltar de elemento en elemento para visualizarlos.

La opción de usar solamente RFEM es una alternativa que permite analizar los resultados de una manera más simple.

El modelo es muy sencillo de construir: bastaría con trazar una serie de líneas paralelas en las posiciones de los ejes de los largueros y otorgarles la cualidad de barras. Además, habrá que apoyar con una articulación fija que permita el giro a flexión; el resto de las articulaciones deben permitir el giro a flexión y deslizar en el eje longitudinal de las barras (ilustración 14).



*Ilustración 14. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: modelo.*

Estas barras tienen una sección en doble T, en la que las dimensiones del alma son aquellas del larguero y las dimensiones de las alas son las de las capas longitudinales y transversales (50x625 mm<sup>2</sup>), como se puede observar en la ilustración 15.

Además, como se observa en la sección, los puntos de unión entre alma y alas tienen asociado un valor  $\gamma$ , que es el factor de eficiencia de la unión del método Gamma. Este valor debe calcularse manualmente mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_i = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i}{l^2} \cdot \frac{\bar{d}_i}{G_R \cdot b_{eff}}\right)^{-1}$$

Donde:

$E_i$ : es el módulo de elasticidad paralelo a la fibra del *Pinus Radiata D Don* ( $E_i = 11.600$  MPa).

$A_i$ : es la superficie de la capa longitudinal del ala superior o inferior.

$l$ : es la luz que hay que salvar.

$d_i$ : espesor de la capa transversal.

$G_R$ : es el módulo de rodadura del *Pinus Radiata D Don* ( $G_R = 50$  MPa).

$b_{eff}$ : es el ancho eficaz en que se deforma la capa transversal debido al efecto de encolado, que se propone definir como el espesor del larguero, de manera muy conservadora.

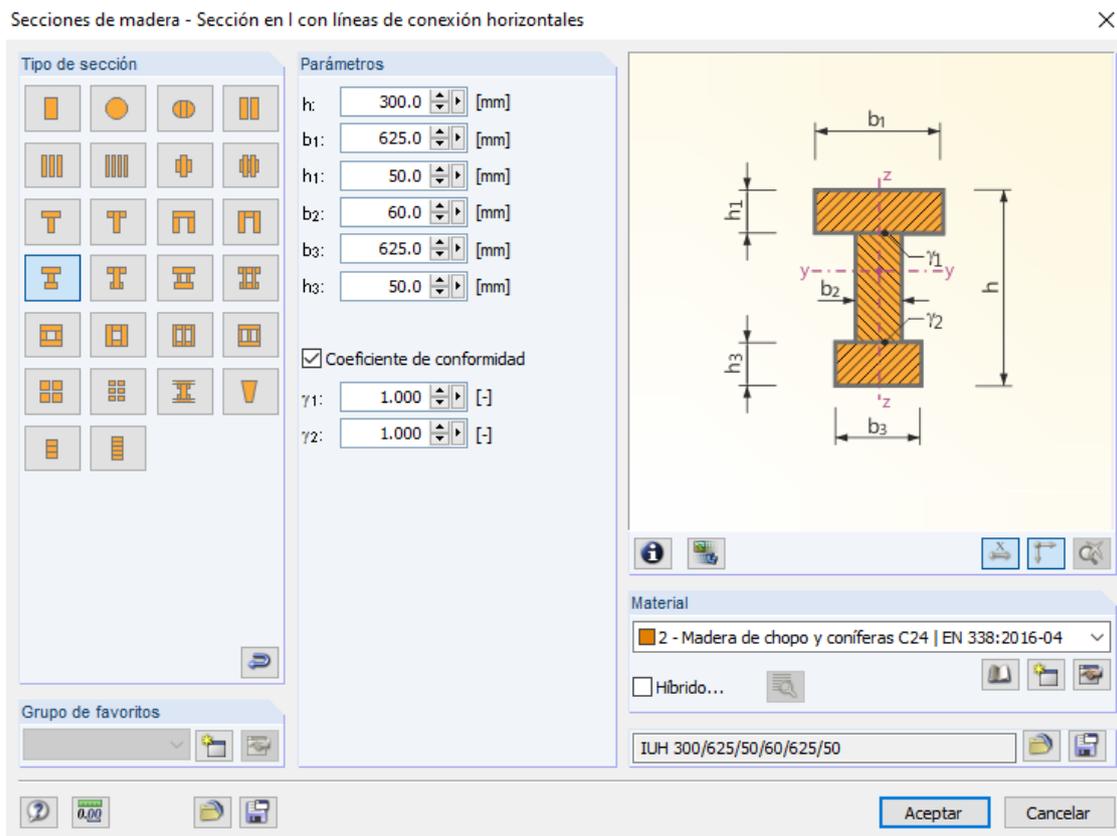


Ilustración 15. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: ventana de definición de la sección.

Esta sección no puede ser considerada definitiva, ya que, como se ha explicado en la base teórica, se considera que las capas transversales no aportan capacidad resistente al conjunto. Para considerar este hecho en la simulación, habrá que restar los parámetros involucrados en este desfase de manera manual. Esta es la manera más limpia de conectar el alma con las superficies, contacto que es de obligado cumplimiento para poder calcular el elemento continuo. Los parámetros afectados a alterar serían los siguientes:

$$I_{y,real} = \frac{1}{12} \cdot b_{alma} \cdot h_{alma}^3 + \frac{1}{12} \cdot b_{ala} \cdot [h_{total}^3 - (h_{alma} + 2 \cdot h_{tabla})^3] \rightarrow FC_{Iy} = I_{y,real} / I_{y,RFEM}$$

$$I_{z,real} = \frac{1}{12} \cdot h_{alma} \cdot b_{alma}^3 + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot h_{tabla} \cdot b_{ala}^3 \rightarrow FC_{Iz} = I_{z,real} / I_{z,RFEM}$$

$$A_{real} = b_{alma} \cdot h_{alma} + 2 \cdot b_{ala} \cdot h_{tabla} \rightarrow FC_A = A_{real} / A_{RFEM}$$

$$A_{y,real} = \frac{5}{6} \cdot (2 \cdot b_{ala} \cdot h_{ala}) \rightarrow FC_{Ay} = A_{y,real} / A_{y,RFEM}$$

$$A_{z,real} = h_{alma} \cdot b_{alma} \rightarrow FC_{Az} = A_{z,real} / A_{z,RFEM}$$

Donde:

$I_{y,real}$ : inercia reducida respecto al eje y (ilustración 15).

$I_{z,real}$ : inercia reducida respecto al eje z (ilustración 15).

$A_{real}$ : superficie de la sección reducida.

$A_{y,real}$ : superficie a cortante en eje y de la sección reducida.

$A_{z,real}$ : superficie a cortante en eje z de la sección reducida. RFEM calcula la superficie a cortante en z como  $A_z = h_{alma} \cdot b_{alma}$ , cuando, en realidad se calcula con el  $h_{total}$ . Las diferencias en los resultados de las deformaciones son de en torno al 1 %, pero se recomienda cambiarlo para mayor exactitud teórica.

$b_{alma}$ : espesor del alma.

$h_{alma}$ : altura del alma.

$b_{ala}$ : espesor del ala.

$h_{total}$ : espesor del CLT MIX.

$h_{tabla}$ : espesor de los tablonos de las capas longitudinales y transversales del CLT MIX.

$FC_{Iy}$ : factor de multiplicación de la inercia respecto al eje y.

$I_{y,RFEM}$ : inercia respecto al eje y de la sección bruta definida en RFEM.

$FC_{Iz}$ : factor de multiplicación de la inercia respecto al eje z.

$I_{z,RFEM}$ : inercia respecto al eje z de la sección bruta definida en RFEM.

$FC_A$ : factor de multiplicación de la superficie de la sección.

$A_{RFEM}$ : superficie de la sección bruta definida en RFEM.

$FC_{Ay}$ : factor de multiplicación de la superficie a cortante en y de la sección.

$A_{y,RFEM}$ : superficie a cortante en y de la sección bruta definida en RFEM.

$FC_{Az}$ : factor de multiplicación de la superficie a cortante en z de la sección.

$A_{z,RFEM}$ : superficie a cortante en z de la sección bruta definida en RFEM.

Además de todas estas modificaciones, es importante asegurarse de que la casilla de Material → Mixto está desactivada; de lo contrario, RFEM no podrá calcular la deformación debida al esfuerzo cortante, que no debe despreciarse para las luces que cubre el CLT MIX.

Para activar este tipo de deformaciones, el usuario debe asegurarse de marcar la siguiente casilla: Barra de herramientas → Cálculo → Parámetros de cálculo → Parámetros de cálculo global → Opciones → Activar rigidez a cortante de barras (áreas de sección  $A_y$ ,  $A_z$ ). Los valores de inercia y de superficies de la sección modificada quedaría como puede observarse en la ilustración 16.

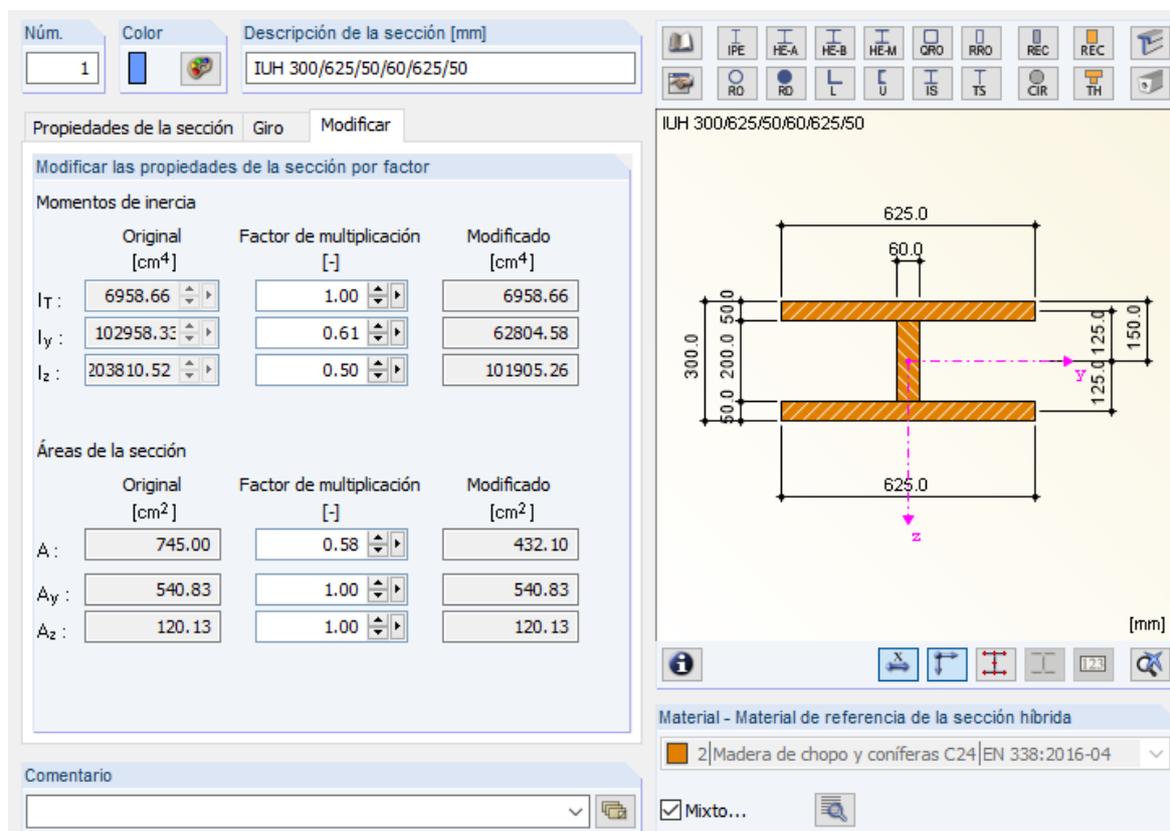


Ilustración 16. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: sección modificada del CLT MIX.

De esta manera, el CLT MIX quedará modelizado como un conjunto de barras que trabajan de forma desolidarizada. A la hora de generar los casos de carga, por tanto, deberá considerarse que hay dos maneras de aplicar las cargas sobre las barras: la primera es calcular manualmente el reparto de cargas superficial que absorbería cada una de las barra y aplicarle esa carga individualmente a cada una de ellas; la segunda es utilizar una herramienta que ofrece RFEM, mediante la cual puede hacerse ese reparto de manera automática, definiendo el plano de aplicación de las cargas para después elegir las barras en las que las absorben (Barra de herramientas → Herramientas → Generar cargas → A partir de cargas superficiales en barras por medio de un plano). El reparto de cargas, descompuesto, quedaría como se muestra en la ilustración 17:

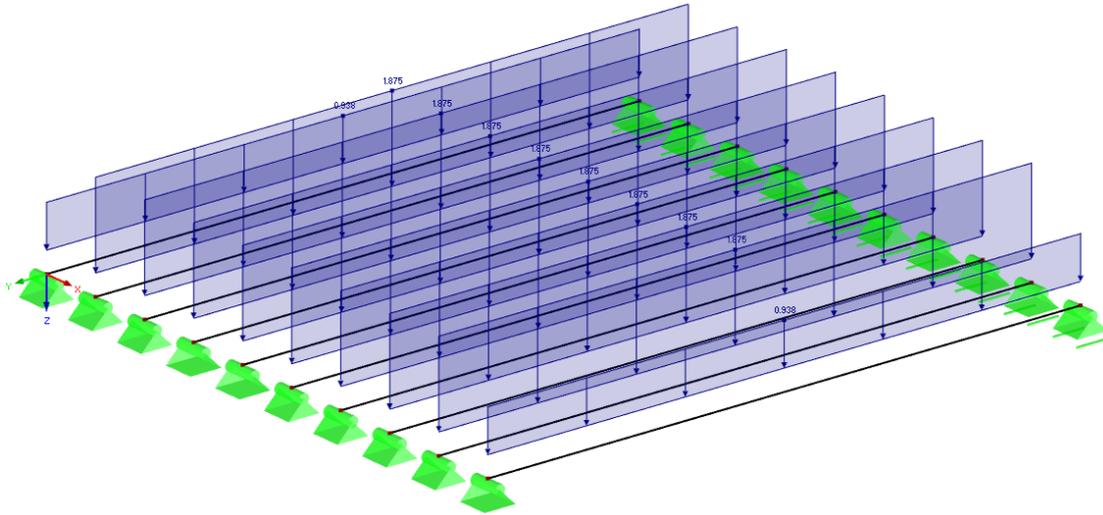


Ilustración 17. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: reparto de cargas en los elementos tipo barra.

Si bien esto es ya suficiente para hacerse a una idea del comportamiento del CLT MIX, el módulo RF-TIMBER Pro puede servir de ayuda. Se abrirá una ventana como la del módulo RF-LAMINATE, mostrada en la ilustración 12 del apartado 6.1.1. En este caso, solo habrá que hacer una modificación en la norma:

- Para la madera maciza, en situación de proyecto persistente y transitoria, puede tenerse en cuenta el  $k_{sys}$ , por lo que el coeficiente parcial debería dividirse entre este:

$$\gamma_M^* = \gamma_M \cdot k_{sys} = 1.3 / 1.1 = 1.182$$

Por otro lado, al no haber definido ningún elemento tipo CLT, no es necesario modificar el coeficiente parcial de seguridad de la madera contralaminada en situación permanente y transitoria, como en la sección anterior, dado que nunca se activará: el único  $\gamma_M$  es el de la madera maciza, por lo que este valor de la norma deberá considerar también las limitaciones normativas que tiene el CLT. Por ello, el autor de este proyecto recomienda, del lado de la seguridad, limitar el valor del  $\gamma_M$  de la madera maciza a 1.25; por debajo de este, se le está otorgando al conjunto un coeficiente de seguridad más permisivo del que tiene uno de sus dos materiales, es decir, se sobrestimaría la seguridad del material.

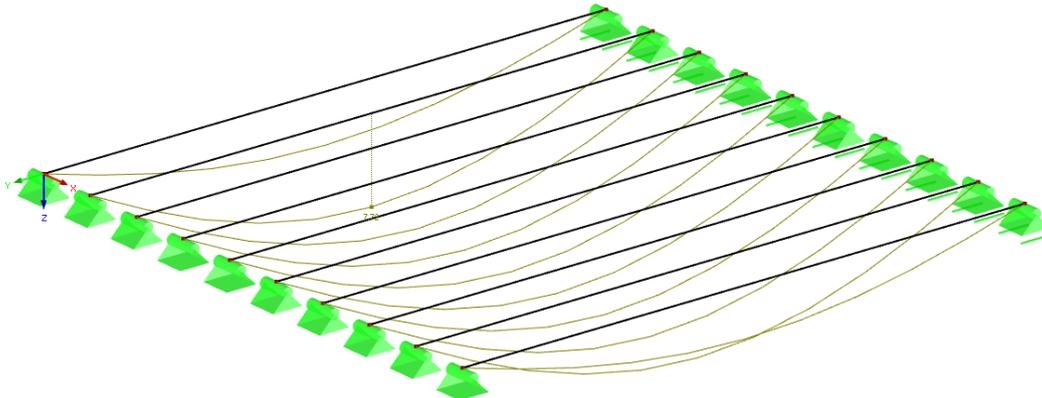
Dado que el valor del coeficiente parcial de seguridad más limitante entre el de la madera contralaminada y el de la madera maciza modificado por el  $k_{sys}$  es el de la madera contralaminada, el valor de  $\gamma_M$  que debe usarse para modificar la norma en esta propuesta de modelizado es el de la madera contralaminada:

$$\gamma_{M,P2}^* = 1.25.$$

Este valor podría elevarse o reducirse mediante realización de ensayos experimentales que así lo justificasen.

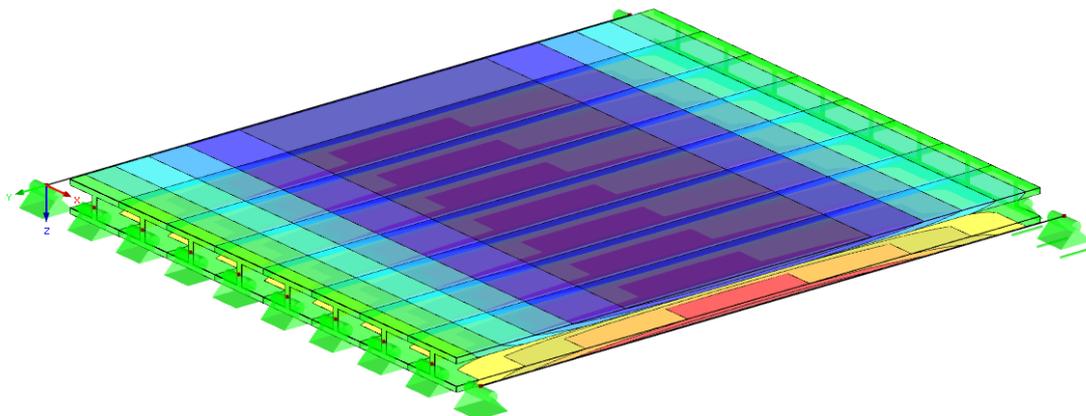
Antes de lanzar el cálculo de RF-TIMBER Pro, debe desmarcarse la opción de calcular el pandeo de las barras, dado que el CLT MIX, como conjunto, por la anatomía alveolar y el tipo de unión entre el larguero y las capas superiores e inferiores de tablonos, tiene impedido el pandeo de los largueros.

En la ilustración 18 se pueden observar los resultados de las deformaciones del módulo RFEM:



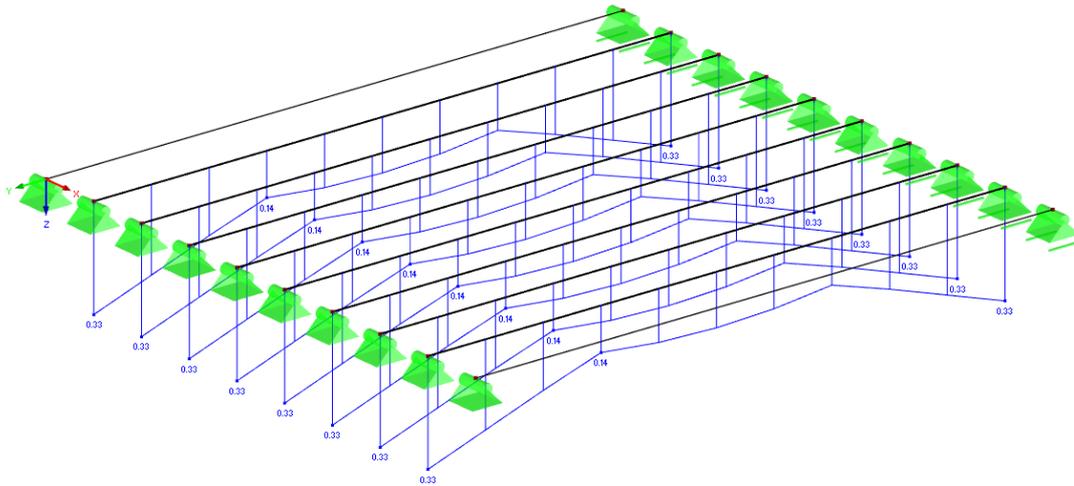
*Ilustración 18. Propuesta de modelado 2 del CLT MIX: resultado de deformaciones.*

Asimismo, se podrán consultar los valores de las tensiones y los diagramas de las barras en RFEM, mostrando resultados gráficos que harán el estudio del comportamiento del CLT MIX bastante intuitivo (ilustración 19):



*Ilustración 19. Propuesta de modelado 2 del CLT MIX: resultado de las tensiones paralelas a la fibra.*

Para terminar, RF-TIMBER Pro muestra el grado de sollicitación de cada barra, lo cual puede ser de ayuda para hacer un estudio rápido de la viabilidad de la configuración utilizada sin entrar en un análisis más detallado (ilustración 20):



*Ilustración 20. Propuesta de modelizado 2 del CLT MIX: resultado de la solicitud de las barras mediante RF-TIMBER Pro.*

La mayor limitación de esta propuesta es el estudio en situación de incendio. TIMBER Pro no es capaz de calcular a fuego una sección en doble T, debido a la complejidad en su geometría. Por ello, una alternativa sería modificar la normativa para dar a los coeficientes parciales de seguridad el valor definido en la normativa pertinente y calcularlo como en situación de uso. Además, será necesario calcular de manera manual, mediante el método de la sección reducida, la sección residual de las barras, y también los valores modificados de la inercia y de las secciones, tanto la real como las de cortante. Esto deriva en cálculos demasiado conservadores.

Las comprobaciones de tecleo también deben hacerse de forma manual, como se muestra en los apartados 11.4 y 11.5.

### 6.1.3. Modelo MEF del CLT MIX en RFEM

Para la validación de las propuestas de modelo desarrolladas en apartados anteriores, se ha realizado una simulación de elementos de una composición de CLT MIX 5c 240. Por cuestiones de coste computacional, se ha limitado la anchura a dos alveolos, acotados por tres largueros. La luz cubierta es de 6 m.

Se han utilizado elementos finitos de un tamaño máximo de 3 cm, aproximadamente el espesor de los tablonos de las capas de madera superiores e inferiores. Nuevamente, este valor a quedado limitado debido al coste computacional requerido para elementos finitos de menor tamaño y a la imposibilidad de RFEM de calcular archivos más pesados.

Para su cálculo, no se ha considerado el peso propio del material, sino que se ha aplicado en toda la superficie una carga de 3 kN, común en la categoría de uso A del CTE.

El modelo de elementos finitos se muestra en la ilustración 21.

En total, se han contabilizado 201683 nodos, 154650 elementos finitos en 2D y 676647 elementos finitos en 3D en la malla del conjunto.

Las zonas consideradas válidas para el cálculo se han ceñido al material comprendido entre los dos largueros exteriores.

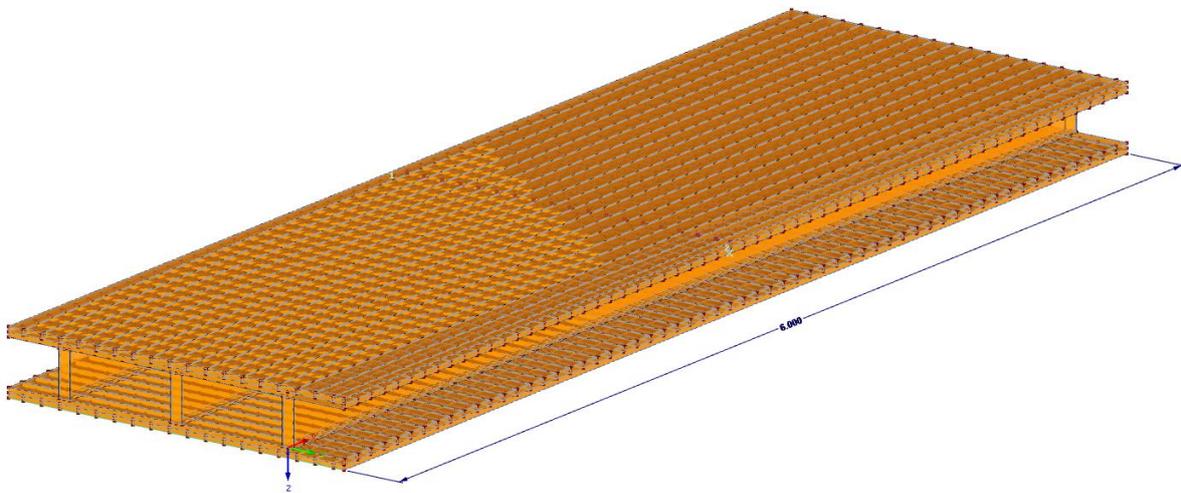


Ilustración 21. MEF del CLT MIX: modelo MEF.

Los resultados obtenidos se reflejarán en las próximas páginas con ayuda de material gráfico:

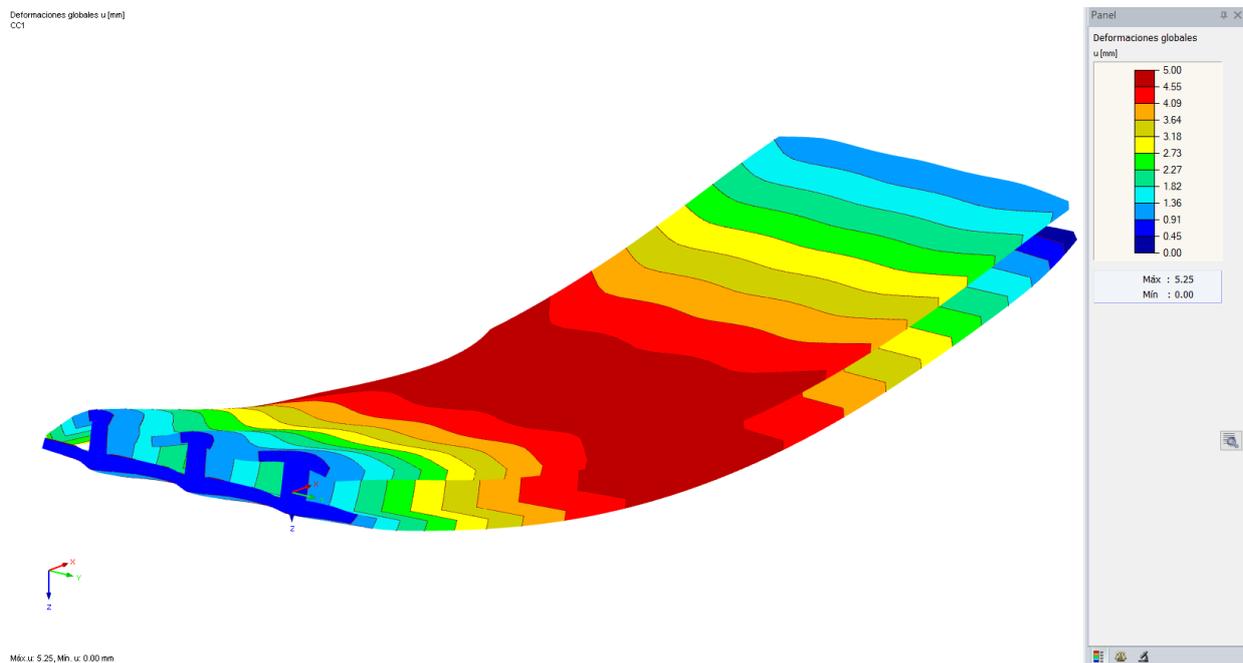


Ilustración 22. MEF del CLT MIX: resultados de las deformaciones totales ( $u_z^{LARGUERO}$ ).

Las deformaciones máximas en el eje z ( $u_z^{LARGUERO}$ ) han sido de 4.99 mm para los largueros (el máximo permitido por normativa es 20 mm). Se ha descontado el efecto de los vuelos de las capas de los tablonos inferiores y superiores en vuelo, acotando el campo de estudio al material contenido entre los dos largueros extremos. En la imagen superior pueden observarse los resultados de deformación obtenidos. Se ha realizado un comido de las zonas con deformaciones en el eje z superiores a 5 mm, y se ha hallado que estas ocurren solo en las partes centrales de las capas de

tablones en voladizo, zona que se halla fuera del estudio y que nunca aparecerá en una composición de CLT MIX; por ello, no es necesario considerarla (ilustración 22).

En la ilustración 23 puede observarse una vista de la deformación en z de la capa superior longitudinal de un CLT MIX. Las deformaciones globales máximas dentro del rango de estudio son de 5.25 mm para los tablones transversales superiores, que son los que más notan el efecto de las cargas aplicadas sobre la composición.

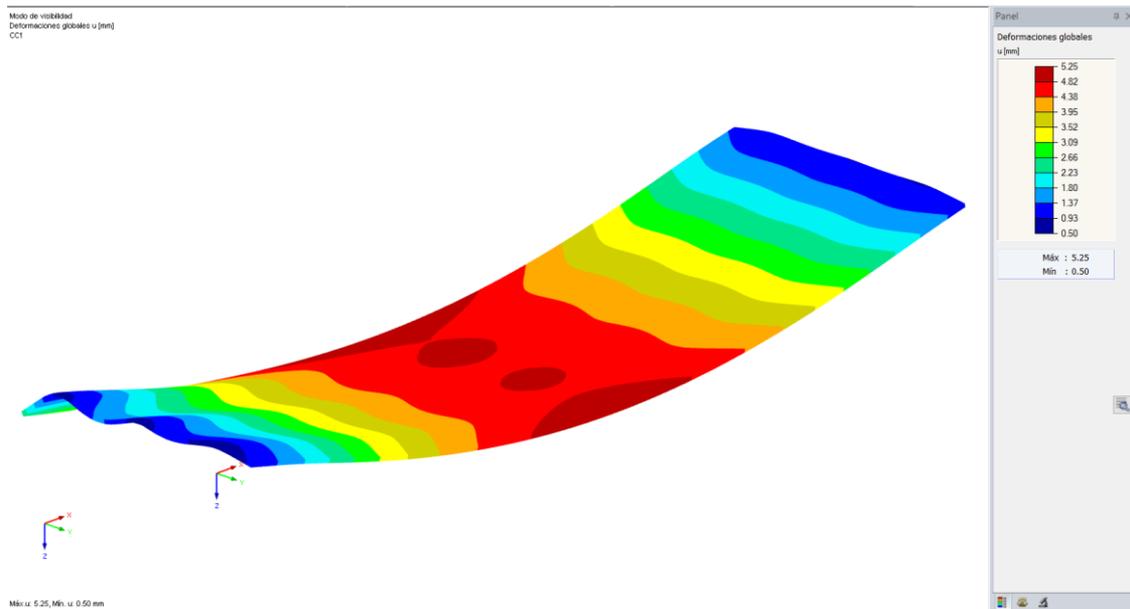


Ilustración 23. MEF del CLT MIX: resultado de las deformaciones totales en las capas superiores del CLT MIX ( $u_z^{LARGUERO}$ ).

Se ha realizado un estudio más exhaustivo para determinar la deformación que los tablones transversales sufren respecto a los largueros ( $u_z^{TABL.TRANSV}$ ), que es, en definitiva, la deformación a considerar en el cálculo del ELS de los tablones transversales. Para ello, se han fijado las superficies inferiores de los tablones longitudinales inferiores mediante articulaciones que impiden el desplazamiento en el espacio. El modelo utilizado para este objeto puede verse en la ilustración 24:

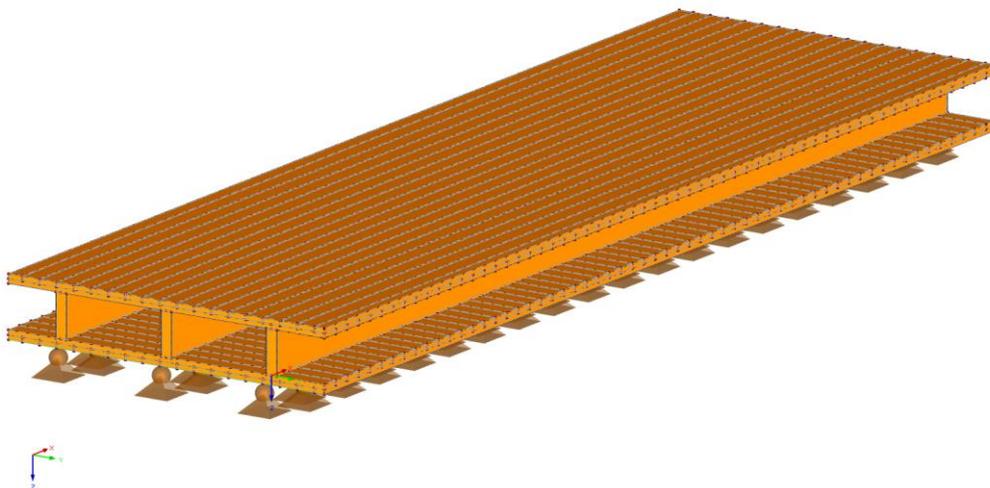


Ilustración 24. MEF del CLT MIX: modelo MEF para el estudio de las deformaciones locales.

Los resultados obtenidos se muestran en la ilustración 25. Como puede observarse, en las zonas cercanas a los apoyos las deformaciones alcanzan valores de 0.6 mm, muy por debajo de los 2.083 mm que pueden deformarse los tabloncillos transversales para seguir respetando la normativa. Este valor, en cambio, no plasma la realidad del CLT MIX: La deformación máxima de este modelo, en la realidad, se vería prácticamente impedida por los cabios que cierran el perímetro del conjunto. Por ello, para buscar resultados más realistas hay que desplazarse en la longitud del elemento hasta encontrar una zona homogénea de deformaciones. En esta zona, la que es realmente válida, las deformaciones rondan los 0.2 mm. Este es un valor más cercano a la realidad.

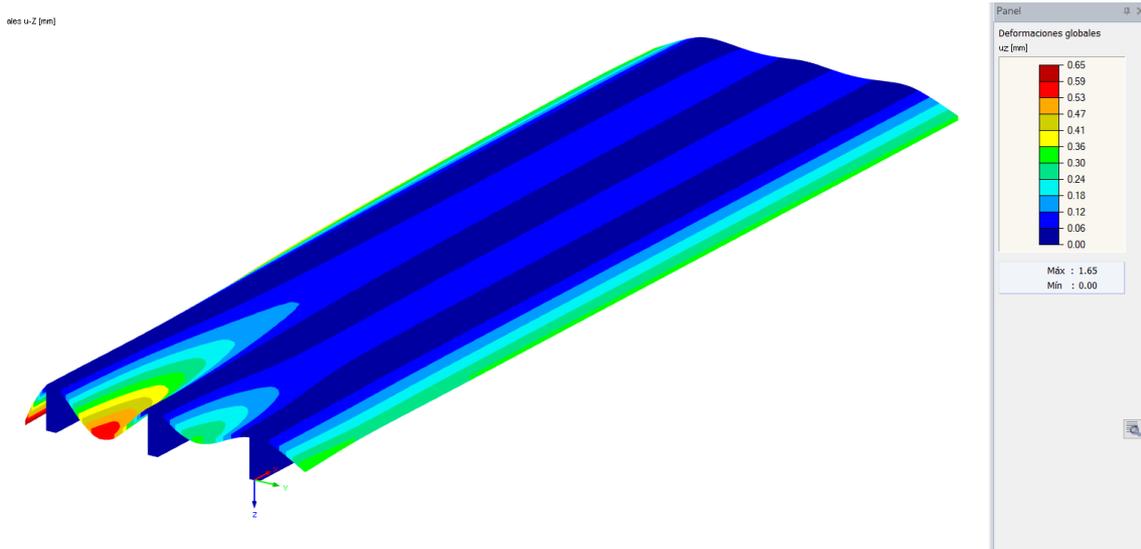


Ilustración 25. MEF del CLT MIX: resultados de las deformaciones locales ( $u_z^{TABL.TRANSV}$ ) en los largueros.

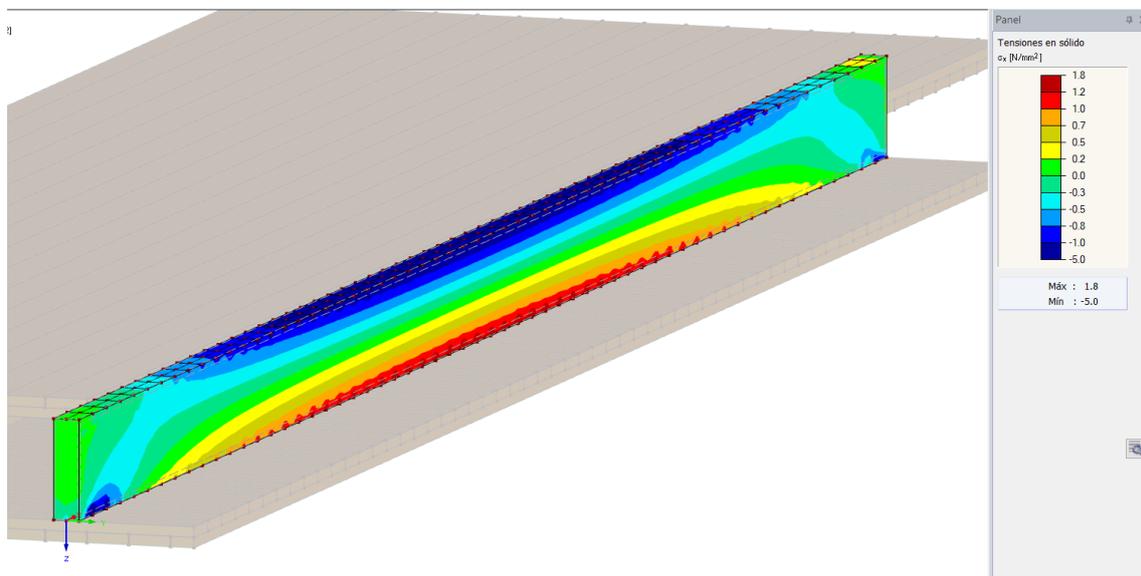


Ilustración 26. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones paralelas a la fibra ( $\sigma_{0,t}^{LARGUERO}$  y  $\sigma_{0,c}^{LARGUERO}$ ) en los largueros.

Las tensiones paralelas a la fibra de mayor valor se han dado en el larguero, y corresponden a unos valores límite de 1.2 N/mm<sup>2</sup> a tracción ( $\sigma_{0,t}^{LARGUERO}$ ) y de entre 1-1.5 N/mm<sup>2</sup> a compresión ( $\sigma_{0,c}^{LARGUERO}$ ), lejos de los puntos singulares de cálculo (los nodos). El valor de la resistencia a tracción de la madera de *Pinus Radiata D Don* (C24) es de 6.72 N/mm<sup>2</sup>, y el de compresión paralela a la fibra

es de  $10.08 \text{ N/mm}^2$ , por lo que los esfuerzos entran dentro de lo aceptable. Los resultados se muestran en la ilustración 26.

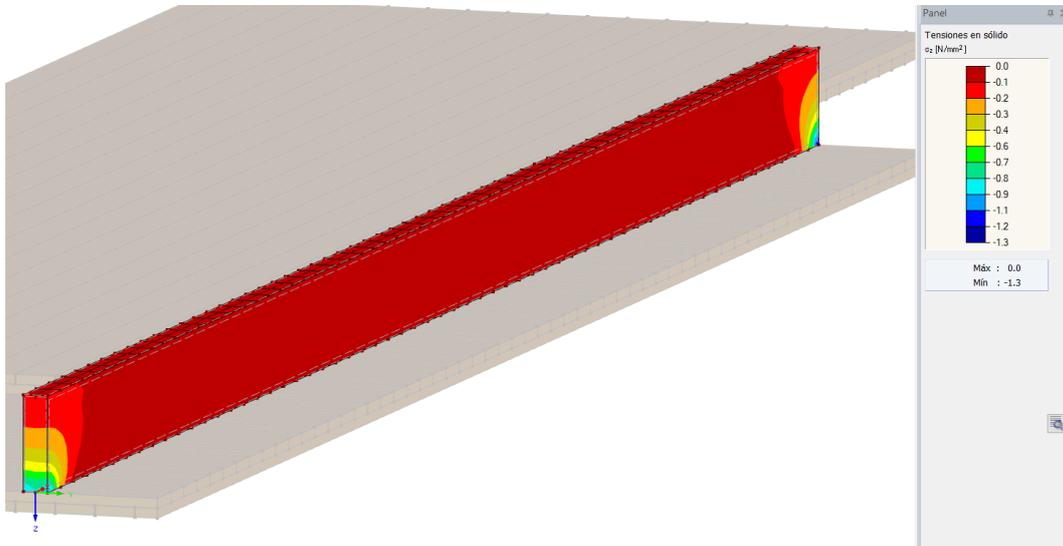


Ilustración 27. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones perpendiculares a la fibra ( $\sigma_{90,c}$ ).

Las compresiones perpendiculares a la fibra ( $\sigma_{90,c}$ ) máximas aparecen en los puntos de apoyo del conjunto (ilustración 27), especialmente en los largueros, y han sido de un valor de  $1,3 \text{ N/mm}^2$ . Considerando que la resistencia a compresión perpendicular a la fibra del material puede llegar a ser hasta de  $1.51 \text{ N/mm}^2$ , siempre que el fabricante lo tenga especificado en su ETA, estos valores entran dentro de lo aceptable.

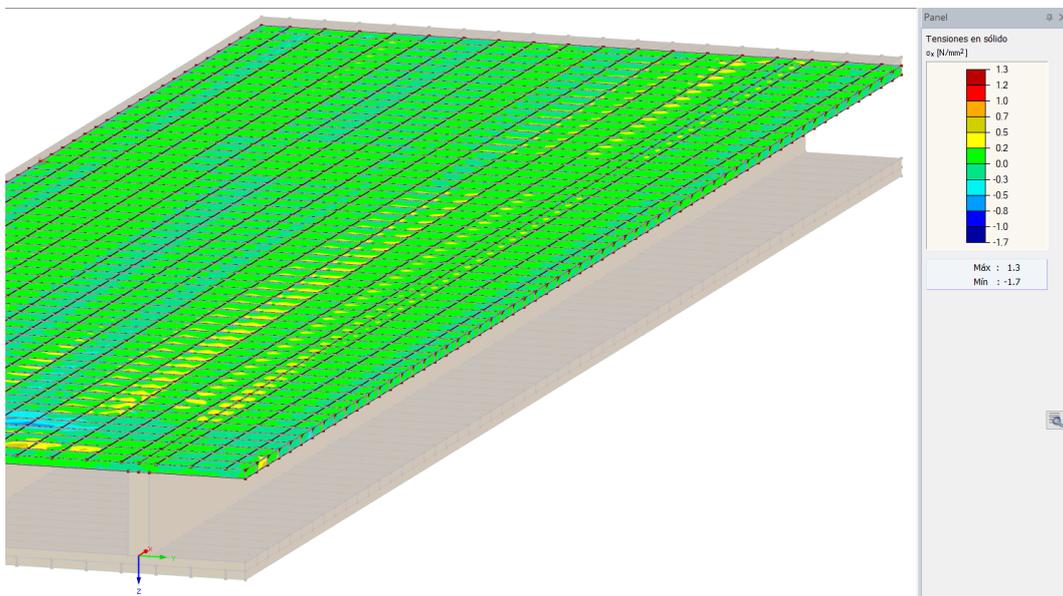


Ilustración 28. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones paralelas a la fibra ( $\sigma_{0,t}^{TABL.TRANSV}$  y  $\sigma_{0,c}^{TABL.TRANSV}$ ) en los tablonces transversales.

En el caso de los tablonces transversales, las tensiones normales máximas son de  $0.8 \text{ N/mm}^2$  a tracción ( $\sigma_{0,t}^{TABL.TRANSV}$ ) y de  $0.8 \text{ N/mm}^2$  a compresión ( $\sigma_{0,c}^{TABL.TRANSV}$ , ilustración 28), ambas dentro

de los límites admitidos por la normativa vigente; estas tensiones aparecen de manera muy aislada, lo que evidencia singularidades locales cercanas a nodos o aristas que tienden a desaparecer, dejando resultados más cercanos a  $0.1 \text{ N/mm}^2$ .

En cuanto al estudio de tensiones tangenciales, los resultados obtenidos pueden observarse en la ilustración 29:

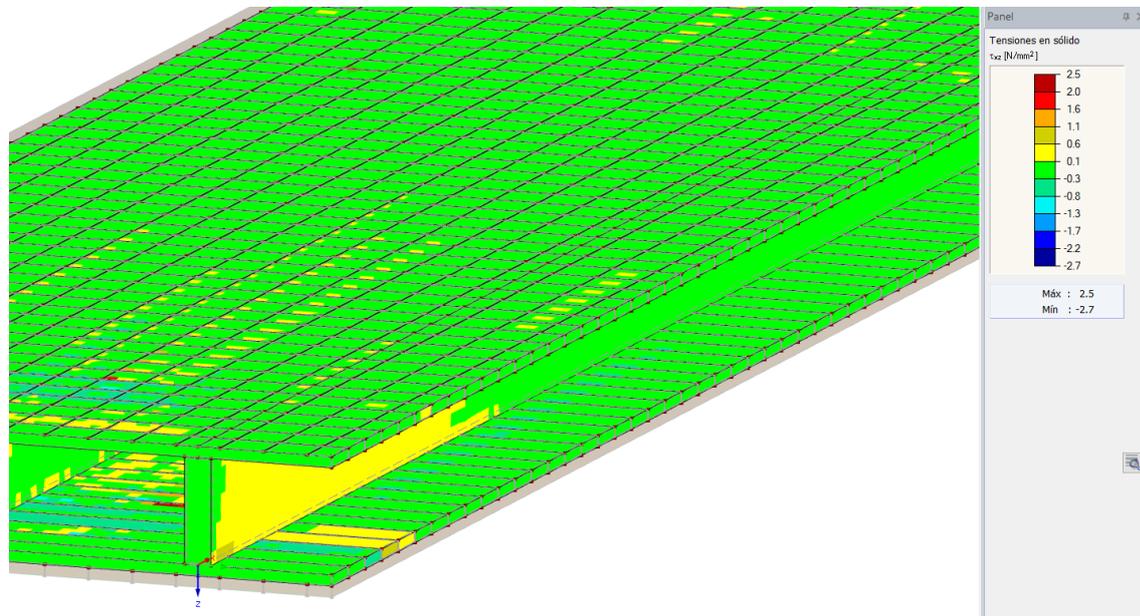


Ilustración 29. MEF del CLT MIX: resultados de las tensiones tangenciales en el plano  $xz$  ( $\tau_{xz}$ ).

En el plano  $xz$  ( $\tau_{xz}$ ), los valores máximos son de  $2.7 \text{ N/mm}^2$  en zonas cercanas a nodos. Estos valores son causados por singularidades propias del MEF, por lo que los resultados reales son más exactos ignorando esos puntos de tensiones pico aisladas. Para las tensiones tangenciales en el plano  $xz$ , por tanto, los valores son más próximos a  $0.1\text{-}0.3 \text{ N/mm}^2$  en las zonas más solicitadas, situadas en los extremos de los largueros y que intentan provocar cizallamientos perpendiculares a la sección del CLT MIX (ilustración 29). Estas tensiones se relacionan con el módulo de rodadura ( $G_R$ ) e intentan deformar el larguero a lo largo de su longitud.

Las tensiones tangenciales en el plano  $xy$  ( $\tau_{xy}$ ) tienen unos valores medios nulos, con pequeñas desviaciones que alcanzan los  $0.2 \text{ N/mm}^2$  en las zonas de los tablonces transversales que se hallan en el centro del vano de los tablonces entre dos largueros. Estos valores son totalmente lógicos, debido a que, al estar las cargas aplicadas en sentido vertical, el larguero no tiende a deformarse ni a generar tensiones en planos perpendiculares al eje vertical  $z$ .

Las tensiones tangenciales en el plano  $yz$  ( $\tau_{yz}$ ) son igualmente nulas de media, pudiendo alcanzarse desviaciones hasta  $0,6 \text{ N/mm}^2$  en los nodos del centro del vano de los tablonces transversales. Por la misma razón que para las tensiones tangenciales en el plano  $xy$ , estos resultados son coherentes con el funcionamiento en carga del CLT MIX.

Según normativa, la resistencia a tensiones tangenciales del *Pinus Radiata D. Don* es de  $1.92 \text{ N/mm}^2$ , por lo que su correcto funcionamiento queda respaldado en todos los casos.

#### 6.1.4. Contraste de resultados de las propuestas de modelizado del CLT MIX

Para la validación de los modelos propuestos, se han estudiado los resultados ofrecidos por estos y se han enfrentado a los resultados obtenidos mediante el modelo de Elementos Finitos. Las comparaciones pueden observarse en la tabla 6:

Tabla 6. Contraste de resultados de los modelos simplificados del CLT MIX respecto a los resultados del MEF.

Tensión o deformación	Límite normativo	Resultado MEF	Resultado Propuesta 1	OKP1	Resultado Propuesta 2	OKP2
$u_z^{LARGUERO}$	20 mm	4.99 mm	5.1 mm	X	7.72 mm	X
$u_z^{TABL.TRANSV}$	2.08 mm	0.2 mm	0.66 mm*	X	0.66 mm*	X
$\sigma_{0,t}^{LARGUERO}$	6.78 N/mm <sup>2</sup>	1.2 N/mm <sup>2</sup>	1.25 N/mm <sup>2</sup>	X	0.6 N/mm <sup>2</sup>	X
$\sigma_{0,c}^{LARGUERO}$	10.08 N/mm <sup>2</sup>	1.5 N/mm <sup>2</sup>	1.25 N/mm <sup>2</sup>	X	0.6 N/mm <sup>2</sup>	X
$\sigma_{0,t}^{TABL.TRANSV}$	6.78 N/mm <sup>2</sup>	0 N/mm <sup>2</sup>	0 N/mm <sup>2</sup>	X	-	X
$\sigma_{0,c}^{TABL.TRANSV}$	10.08 N/mm <sup>2</sup>	0.1 N/mm <sup>2</sup>	0.11 N/mm <sup>2</sup>	X	-	X
$\sigma_{90,c}$	1.51 N/mm <sup>2</sup>	1.3 N/mm <sup>2</sup>	**	X	**	X
$\tau_{xy}$	1.92 N/mm <sup>2</sup>	0 N/mm <sup>2</sup>	0 N/mm <sup>2</sup>	X	-	X
$\tau_{xz}$	1.92 N/mm <sup>2</sup>	0.3 N/mm <sup>2</sup>	0.35 N/mm <sup>2</sup>	X	0.6 N/mm <sup>2</sup>	X
$\tau_{yz}$	1.92 N/mm <sup>2</sup>	0 N/mm <sup>2</sup>	0 N/mm <sup>2</sup>	X	-	X

\* Las deformaciones de los tablonces transversales se han obtenido de simulaciones como las utilizadas en las comprobaciones de tecleo. Estas simulaciones son más precisas, ya que consideran las sobrecargas puntuales exigidas por el CTE.  
 \*\* Requiere comprobación manual del aplastamiento de los largueros.  
 - Dlubal no ofrece resultado.

En caso de que el resultado de cierto esfuerzo o deformación haya sido satisfactorio, esto es, de que sus resultados sean más conservadores que los del modelo de EF y que la norma, se ha marcado una "X" azul en la columna OKP1 o en la columna OKP2, dependiendo de la propuesta, mientras que, en caso de obtener resultados menos conservadores que el modelo de EF y la norma, se ha marcado mediante una "X" roja en su respectiva columna. Asimismo, en caso de que el resultado no haya podido medirse en el modelo, se ha indicado mediante una "X" negra; esto, por supuesto, implica que es necesario realizar cálculos manuales para obtener los resultados de esfuerzos o deformaciones de dicha fila.

Además de la comprobación de los valores máximos exactos obtenidos mediante el modelo de Elementos Finitos, se ha comprobado que no se superan las tensiones máximas que aparecen en el MEF en ninguna de las propuestas.

En el caso de la propuesta 1, los resultados obtenidos han sido satisfactorios; por un lado, la mayoría de las tensiones y deformaciones pueden leerse de una manera u otra mediante este modelo, siendo las dos únicas excepciones la deformación de los tablonces transversales, que puede comprobarse mediante el modelo propuesto para la comprobación del tecleo, y el valor de las tensiones perpendiculares a la fibra, que, aun pudiendo obtenerse mediante la lectura de las reacciones en los apoyos de manera indirecta, requiere realizar la comprobación de la normativa de manera manual. Estos valores no son sencillos de leer, y saber dónde encontrarlos implica que el usuario deberá conocer cómo serán legibles, lo cual, en ocasiones, es lo más complicado.

Dentro de los valores legibles, uno de ellos ha dado valores menos conservadores que el modelo MEF: las tensiones de compresión paralelas a la fibra en los tablonos transversales ( $\sigma_{0,c}^{LARGUERO}$ ). Esto, si bien a priori podría suponer un error en el modelo, tiene una explicación lógica: la diferencia de rigideces entre la sección a tracción y la sección a compresión provoca un reparto desigual de las tensiones. Este efecto se ve aumentado al apoyar la superficie inferior del CLT MIX, en vez de apoyar la parte central o el punto por el que pasa el plano neutro. El modelo MEF es capaz de leer de manera relativamente precisa este efecto, lo que se traduce en unos resultados en los que las compresiones de mayor valor se alejan más de los nodos que en las tensiones de mayor valor. El modelo propuesto 1, en cambio, al estudiar una superficie en 2D, más que un volumen en 3D propiamente dicho, muestra un error de un 17 % para el caso estudiado; que palidece considerando la sollicitación a la que se encuentra el larguero (un 7.14 % en el modelo MEF, frente a un 5.95 % en la propuesta 1 – un 1.19 % de diferencia). Para sollicitaciones mayores, este error podría incrementarse, pero no al punto de llegar a ser el mecanismo de fallo, ya que este casi siempre será el fallo por ELS, esto es: por deformaciones, y no un fallo resistente.

Respecto a los valores que no se han podido obtener de esta propuesta, cabe también resaltar que el modelo de estudio del tecleo ha demostrado ser mucho más conservador que el MEF (un 230 % más conservador). Aun así, se recomienda usar los valores del modelo de tecleo en vez de los del MEF, del lado de la seguridad.

Así, la propuesta 1 puede servir para un estudio bastante detallado del comportamiento del CLT MIX. Los resultados de las tensiones y las deformaciones son bastante ajustados y están casi siempre del lado de la seguridad, como puede consultarse en la tabla de la página anterior (es interesante mencionar la exactitud del valor de la deformación total de la composición, de un error de tan solo un 2.2 % del lado conservador, ya que este será el mecanismo de fallo principal). De la misma manera, también puede usarse para estudiar composiciones con agujeros a lo largo del vano, y permite incluir los cabios que cierran la composición por su perímetro, dejando un modelo más limpio y menos abierto a la interpretación.

Esta propuesta, al servirse del módulo RF-LAMINATE, también usa el método más exacto para el cálculo de CLT: el método de acoplamiento a cortante; lo que se traduce en una mayor fiabilidad y en un estudio más exacto de las deformaciones a rodadura de las capas transversales.

El cálculo a fuego puede realizarse de manera semiautomática: si bien el cálculo de la sección reducida debe correr por parte del usuario, es sencillo alterar el espesor de tanto las capas superior e inferior como de las superficies que modelizan los largueros; la única modificación de la composición que no se puede hacer sin modificar la geometría de las superficies en RFEM es la altura de los largueros que se consume con el tiempo.

Como desventaja, en cambio, pueden mencionarse la complejidad del modelo, relativamente importante en comparación a la propuesta 2, que lo hace menos viable para estudios en la fase previa de un proyecto que esta segunda propuesta. Esto requiere de mayor tiempo para modelizar la composición. Asimismo, los esfuerzos no son sencillos de interpretar: buscar los resultados requiere saltar de módulo en módulo y conocer bien la nomenclatura que Dlubal utiliza para cada esfuerzo.



La propuesta 2, por otro lado, ha dado resultados menos satisfactorios que la propuesta 1. En la propuesta 2 solo se han podido leer 4 de ellos 10 valores estudiados, de los cuales 2 han sido insatisfactorios, por no entrar en el criterio de ir del lado de la seguridad, y las otras han dado errores del lado de la seguridad próximos al 50 %. Así, este modelo puede servir solamente para etapas previas de un proyecto, ya que es de muy rápida construcción (una vez se tienen los valores de inercias y secciones modificadas) y permiten un estudio del lado de la seguridad, en ocasiones excesivo, del mecanismo de fallo principal de estas composiciones: la deformación entre vanos. Otra ventaja de esta propuesta a mencionar es la sencillez de la lectura de la sollicitación, ya que RF-TIMBER Pro da el ratio de sollicitación de la deformación, que es, a fin de cuentas, el valor que más interesa en esta propuesta.

Entre las desventajas, se deben añadir a las antes mencionadas que RF-TIMBER Pro no es capaz de realizar la comprobación frente al fuego de secciones en doble T, por lo que su estudio pasa a ser íntegramente manual, ya que alterar la sección de los elementos tipo viga en RFEM implica modificar la sección y sus valores de inercias y superficies a cortante modificadas para cada momento que se quiera estudiar. Este modelo no permite estudiar el comportamiento de las capas de tablonos transversales.

Esta segunda propuesta, al ser calculada mediante RFEM, se sirve del método Gamma para realizar los cálculos, método que es mucho más conservador que el utilizado en la propuesta 1.

## 6.2. Modelización del CLT T

Al igual que en el caso del CLT MIX, una gran limitación para las propuestas de modelizado realizadas en este estudio han sido presentada por el software. En algunos casos, estas limitaciones han sido más permisivas y han permitido abordar el estudio de los modelos con un abanico mayor de posibilidades. En este aspecto, cabe mencionar una desventaja del CLT MIX que coartó, en su momento, las propuestas de modelización: para que RFEM considere que dos elementos están en contacto, los elementos que lo definen en RFEM deben estar en contacto. Aunque esto resulte obvio y casi descontable, impide, por ejemplo, definir el CLT MIX como la unión de las dos superficies laminadas que representan las capas longitudinales y transversales superiores e inferiores y de los elementos tipo barra que definen los largueros tipo DUO que se usan en estas composiciones, ya que, para ello, todos los elementos deberían estar definidos en la misma superficie, y mientras que es posible definir una serie de elementos tipo barra y un elemento de superficie laminada de manera superpuesta, definir dos elementos de tipo superficie laminada superpuestos en una misma superficie es imposible. En definitiva, no había manera de conectar esos tres elementos para que trabajasen solidariamente, lo que descartó de manera automática el modelo que habría sido óptimo para el estudio del CLT MIX en cualquier situación.

Este problema no se manifiesta para modelizar el CLT T, ya que, al tener solo una composición de CLT en su parte superior y una serie de vigas de MLE en su parte inferior, el modelo más eficaz es también un modelo posible: los elementos tipo barra que definen las vigas y el elemento tipo superficie laminada que define la composición del CLT pueden compartir superficie y, por tanto, ser considerados como elementos en contacto para RFEM.

Así, para el estudio del CLT T se ha propuesto solamente un modelo, dado que su viabilidad y simpleza lo hacen más rápido y preciso de estudiar que el resto de las propuestas estudiadas.

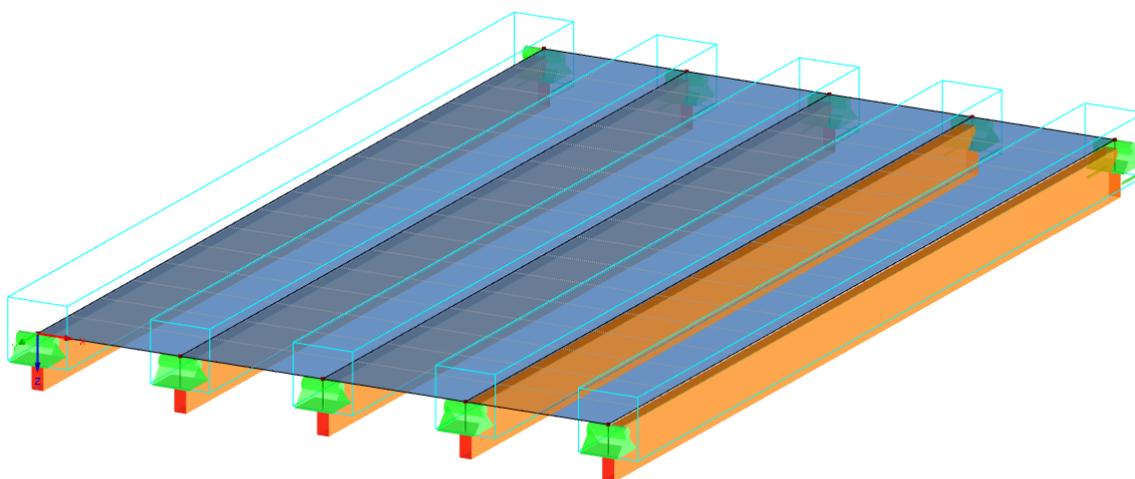
Se han descartado las modelizaciones con elementos tipo barra que representen vigas en T (modelizaciones que, por otro lado, no se descartaron para el CLT MIX), por las complicaciones derivadas del fenómeno de arrastre por cortante que provocarían, teniendo que reducir o no, dependiendo de la distancia entre vanos y como se ha desarrollado en el apartado 12.1, la sección eficaz del ala de cada barra. Se ha preferido aprovechar la capacidad de RFEM de estudiar gráficamente el reparto de tensiones que aparecerá en el elemento superficie laminada que representa al CLT debido al arrastre por cortante.

Por otro lado, la modelización del CLT T también tiene limitaciones que, en este caso, se manifiestan en el estudio de la interfase, es decir, en los tirafondos. Para uniones no encoladas, el factor de eficiencia de la unión ( $\gamma$ ) no es igual a 1, sino que varía entre 0 y 1 dependiendo de la cantidad de tirafondos y de la sección de estos en la interfase CLT-viga. Dlubal no permite definir estos parámetros, sino que solo permite definir el factor  $\gamma$ . Por ello, el usuario deberá apoyarse en cálculos manuales para obtener los esfuerzos de rasante en la interfase y para estudiar el comportamiento de los tirafondos, proceso el cual se deberá realizar de forma iterativa hasta que el resultado sea satisfactorio.

La modelización propuesta implica usar de manera conjunta todos los módulos de Dlubal software vistos hasta el momento en este estudio: RFEM, RF-LAMINATE y RF-TIMBER Pro. Cada uno

de ellos tendrá un objetivo distinto: RFEM servirá para la construcción de la geometría del modelo y la definición de la interfase, RF-LAMINATE para definir el CLT y estudiar su comportamiento, y RF-TIMBER Pro para estudiar las vigas de MLE. El modelo, por tanto, deberá constar de los siguientes elementos:

- Una superficie horizontal que represente el CLT. Se estudiarán mediante RFEM y RF-LAMINATE.
- Una serie de elementos tipo barra que representen las vigas de MLE. Se estudiarán mediante RFEM y RF-TIMBER Pro.



*Ilustración 30. Propuesta de modelizado del CLT T: modelo.*

Para definir correctamente el modelo, hay varias condiciones a tener en cuenta. Los apoyos del CLT T deben ser similares a su situación en obra: en caso de que en obra sean las vigas las que se apoyen, deberán definirse un apoyo articulado fijo y otro articulado deslizante en la dirección principal del conjunto en los extremos de las vigas; en caso de que se apoye el CLT, será un apoyo lineal fijo lo que deberá definirse en una de las aristas del CLT que se encuentre apoyada en obra, mientras que en la opuesta deberá definirse un apoyo articulado deslizante en su dirección de trabajo principal. Se recomienda, para evitar posibles fallos por cortante en el panel de CLT, que sean las vigas las que se apoyen. En la ilustración 30 puede observarse el modelo propuesto para el CLT T.

En caso de modelar la composición de CLT T dentro de un edificio, habría que considerar cómo se relaciona con los elementos de su entorno, definiendo, donde sea necesario, articulaciones lineales para representar la unión articulada entre el panel de CLT T y los colindantes.

Debido a un desfase entre normativas y actualizaciones de Dlubal Software, es una práctica recomendable revisar que los factores de material de la normativa escogida en todos los módulos de Dlubal sean correctos. A 8 de julio de 2022, se deben realizar las siguientes modificaciones en RF-LAMINATE:

- Para la madera maciza, en situación de proyecto persistente y transitoria, puede tenerse en cuenta el  $k_{sys}$ , por lo que el coeficiente parcial debe dividirse entre este:

$$\gamma_M^* = \gamma_M \cdot k_{sys} = 1.3/1.1 = 1.182$$

- Para madera contralaminada, en situación de proyecto permanente y transitoria, el coeficiente parcial de seguridad ( $\gamma_M$ ) es 1.25.

Una vez comprobada la normativa a uso, deben definirse cada una de las composiciones mencionadas al principio de este apartado. En todos los casos, el material es madera de chopo y coníferas C24.

En RF-TIMBER Pro, la única alteración a realizar es la inclusión del  $K_{sys}$ , de la misma manera que en RF-LAMINATE.

Al estar el CLT y las vigas representadas por una superficie y por un elemento tipo barra, respectivamente, no se consideran las ventajas inerciales que el CLT T otorga, ya que, de no introducir manualmente la posición real de cada elemento, se considera que el plano neutro de ambas comparte posición (visualmente, las vigas estarían atravesadas horizontalmente por su centro por el CLT).

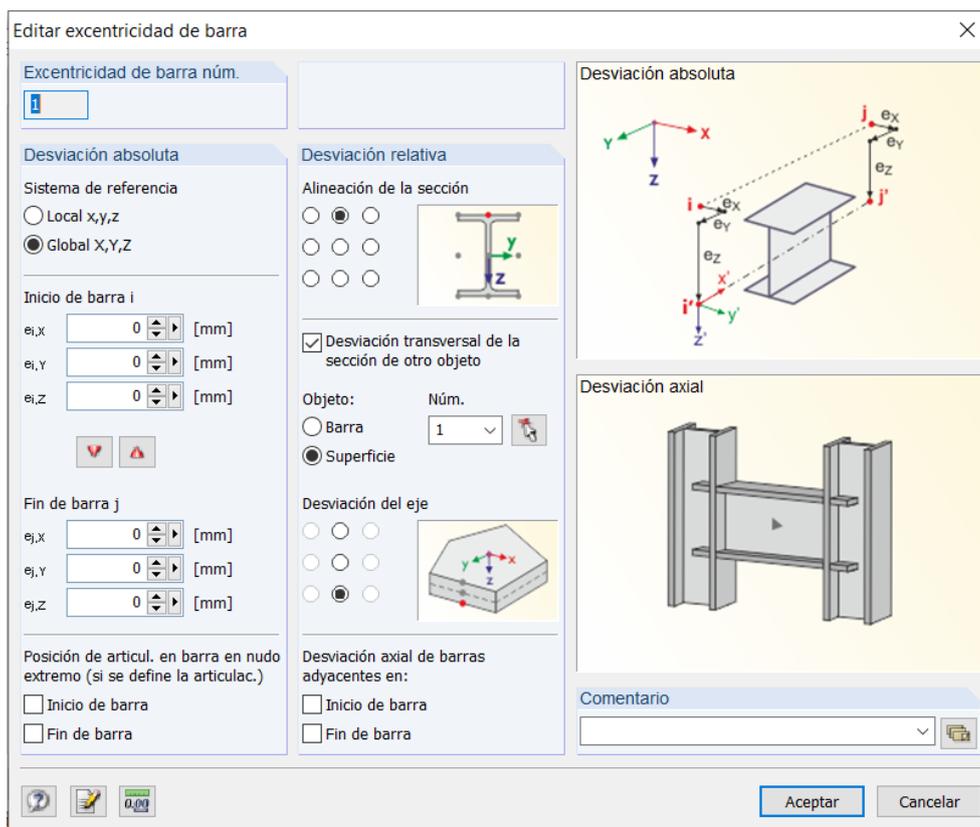


Ilustración 31. Propuesta de modelado del CLT T: ventana de definición de la excentricidad del elemento tipo barra.

Este efecto debe tenerse en cuenta para definir una excentricidad. Para este modelo, se ha optado por correlacionar las vigas con la superficie, de manera que la cara superior de las vigas esté siempre alineada con la cara inferior del CLT, como aparece en la ilustración 31.

Otra consideración es el sistema de ejes local, ya que es este el que define la dirección de trabajo principal de la superficie, y para materiales ortótropos, que por definición tienen distintas propiedades dependiendo de la dirección que se estudie, es algo a considerar. La dirección del eje x es la que marca la dirección fuerte de la madera tal como está definida en la biblioteca de RFEM.

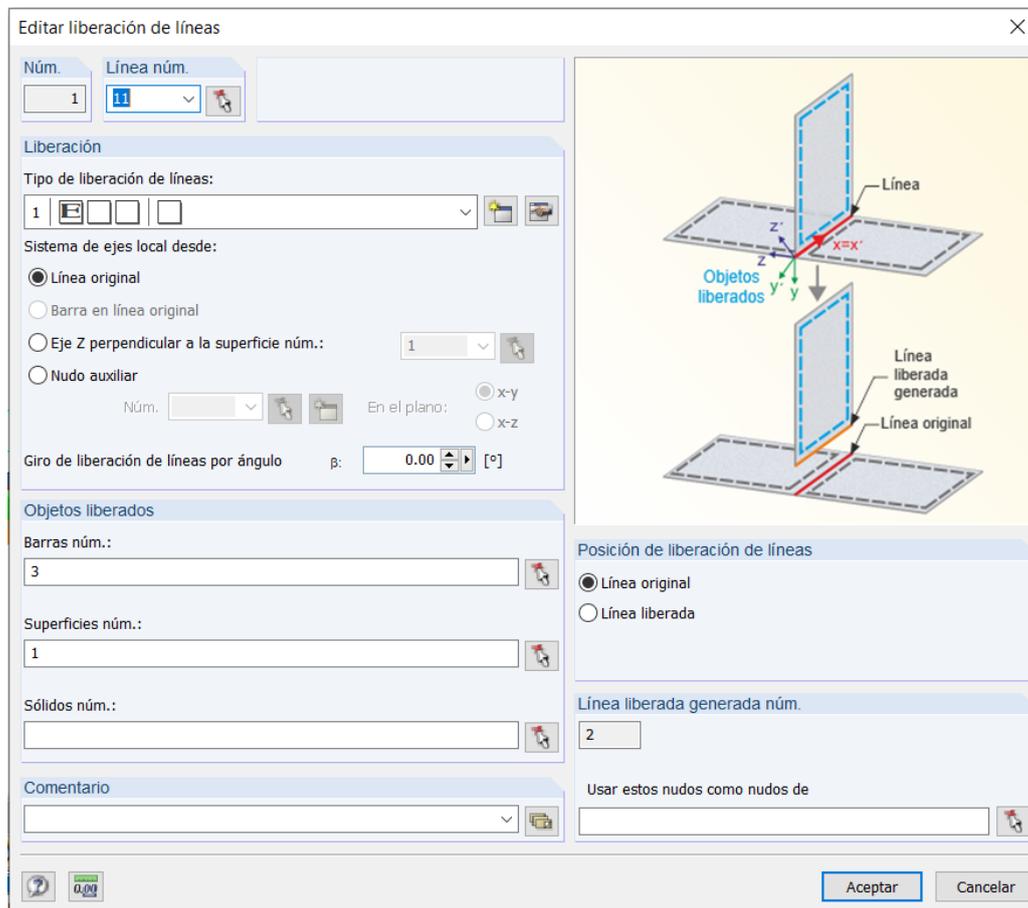


Ilustración 32. Propuesta de modelado del CLT T: ventana de liberación de líneas.

Al igual que con el CLT MIX, las articulaciones lineales solo deben usarse para conectar distintos paneles, y deben evitarse en el interior de estos. Lo que sí deberá definirse es una liberación de línea (ilustración 32), que desolidarice el CLT de las vigas de MLE y permita definir los conectores de la interfase.

Como se ha mencionado antes en este mismo apartado, estos deberán diseñarse de manera iterativa. Debido a que el cálculo de la fuerza rasante en la interfase requiere de la definición de los conectores de la interfase y a que Dlubal no permite definirlos para cuantificar la liberación de línea, se deben fijar una cantidad de conectores y sus diámetros para definir el coeficiente de muelle ( $c_x$ ) de dicha liberación de línea. Para estos valores, RF-TIMBER Pro obtendrá ciertos valores máximos de cortante que, sustituyendo en la fórmula del esfuerzo rasante, permitirá estudiar si la resistencia a cortante de los conectores es capaz de resistir dicho esfuerzo rasante. El problema, en este caso, es que el usuario debe definir previamente esos conectores para obtener un valor del esfuerzo cortante para luego comprobar si esos conectores aguantan los esfuerzos a cortante que aparecerán en la composición.

De manera esquemática, por tanto, el problema a resolver sería el siguiente:

1. Definir los conectores para obtener el valor del coeficiente de muelle de la liberación de línea en x ( $c_x$ ). Especificar separación entre conectores ( $s_k$ ) y diámetro (d) de estos. El coeficiente de muelle se calcula mediante las siguientes fórmulas:

$$c_x = \frac{k_{ser}}{s_k} \cdot 10^3$$

Donde:

$c_x$ : coeficiente de muelle de la liberación de línea en x por metro lineal, en kN/m<sup>2</sup>.

$s_k$ : distancia entre ejes de conectores, en mm.

$k_{ser}$ : módulo de deslizamiento de los conectores, en N/mm. Para el caso del CLT T, en el que los conectores son tirafondos:

$$k_{ser} = \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d}{23}$$

Donde:

$\rho_m$ : densidad de la madera. Para los cálculos realizados en este estudio, se ha considerado igual a 550 kg/m<sup>3</sup>.

$d$ : diámetro de los conectores, en mm.

2. Cuantificada la liberación de línea para los conectores elegidos, se podrán definir los casos de carga, así como las cargas. Posteriormente, se definirá también en RF-LAMINATE la composición del CLT. Los datos de las vigas de MLE se introducen en el módulo RF-TIMBER Pro, que ofrecerá los resultados de estas (realizar el cálculo para todas las combinaciones de resultados en ELU y en ELS).
3. Se lanza el cálculo del modelo completo.
4. Obtenidos los resultados, realizar las comprobaciones pertinentes para el CLT y para las vigas, buscando en cada módulo los resultados pertinentes.
5. Para estudiar la interfase, RF-TIMBER Pro no calcula directamente el valor de la rasante en la cara superior de las vigas (que coincide con la interfase), debido a que desconoce las características exactas de la conexión: separación entre tirafondos y diámetro de estos. Por ello, el usuario debe buscar en la lista de resultados de RF-TIMBER Pro el valor máximo de cortante en las vigas y servirse de la siguiente fórmula para calcular el valor de la fuerza rasante.

$$F_{1,v,Cd} = \frac{V_{z,d}^{MAX} \cdot \gamma_{CLT} \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 \cdot s_k}{(E \cdot I)_{eff}}$$

Donde:

$F_{1,v,Cd}$ : valor máximo del esfuerzo rasante en la interfase, en kN.

$V_{z,d}^{MAX}$ : valor máximo del esfuerzo cortante en las vigas de MLE, en kN (ilustración 33).

$\gamma_{CLT}$ : factor de eficiencia de la unión del CLT considerado como madera maciza.

$E_1$ : módulo de Young de la madera del CLT, en kN/cm<sup>2</sup>.

$A_1$ : área equivalente de la sección en T que forman el CLT y las vigas de MLE, en cm<sup>2</sup>.

$s_k$ : distancia entre ejes de conectores, en cm.

$\alpha_1$ : distancia desde el eje neutro al centro del área del CLT, en cm.

$(E \cdot I)_{eff}$ : rigidez eficaz respecto al eje fuerte (y-y) de la sección en T que forman el CLT y las vigas de MLE, en kN·cm<sup>2</sup>.

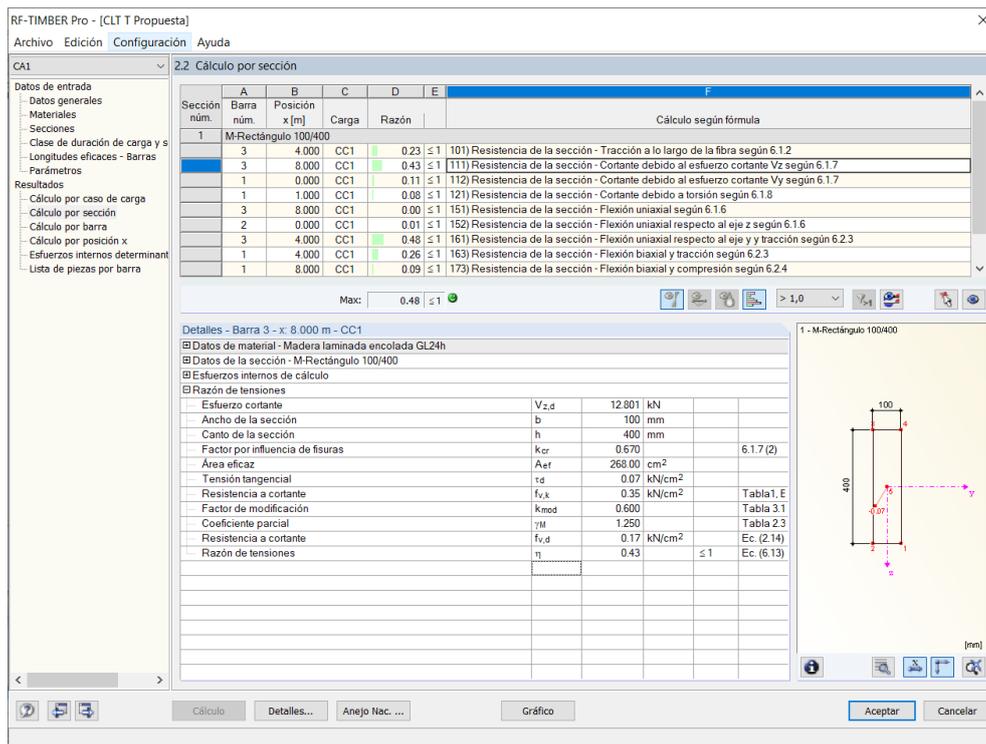


Ilustración 33. Propuesta de modelizado del CLT T: ventana de resultados de RF-TIMBER Pro.

En la ventana que se muestra en la ilustración 33 pueden observarse los resultados de RF-TIMBER Pro.

- Comprobar, mediante el catálogo de un fabricante y/o mediante las ecuaciones de Johanssen, que la resistencia a cortante de los conectores es mayor que el esfuerzo rasante que aparece en la interfase:

$$F_{1,v,Cd} < F_{v,Rd}$$

Donde:

$F_{v,Rd}$ : resistencia de cálculo de los tirafondos a esfuerzo cortante.

Para calcular los parámetros de la ecuación anterior, deben considerarse las siguientes expresiones:

$$F_{v,Rd} = F_{v,Rk} \cdot \frac{k_{MOD}}{\gamma_M}$$

Donde:

$F_{v,Rk}$ : resistencia característica de los conectores a esfuerzo cortante. Puede obtenerse de distintos catálogos de fabricante o mediante la aplicación de las ecuaciones de Johansen (sección 12.2).

$\gamma_M$ : coeficiente parcial de seguridad. En este caso, se le dará un valor de 1.25, que es el del CLT.

$k_{MOD}$ : coeficiente de modificación de la carga. 0.6 para clase de servicio 1 y cargas permanentes.

7. En caso de cumplirse la condición anterior, podría intentarse optimizarse la cantidad de tirafondos; en caso contrario, habría que aumentar la cantidad de tirafondos e iterar los cálculos de la secuencia 1 → 3 → 4 → 5 → 6 hasta que los resultados converjan. Siempre es recomendable, de todos modos, realizar dos o tres iteraciones hasta ver convergencia entre los resultados del coeficiente de muelle de la liberación de línea y el valor del esfuerzo rasante máximo de la interfase.

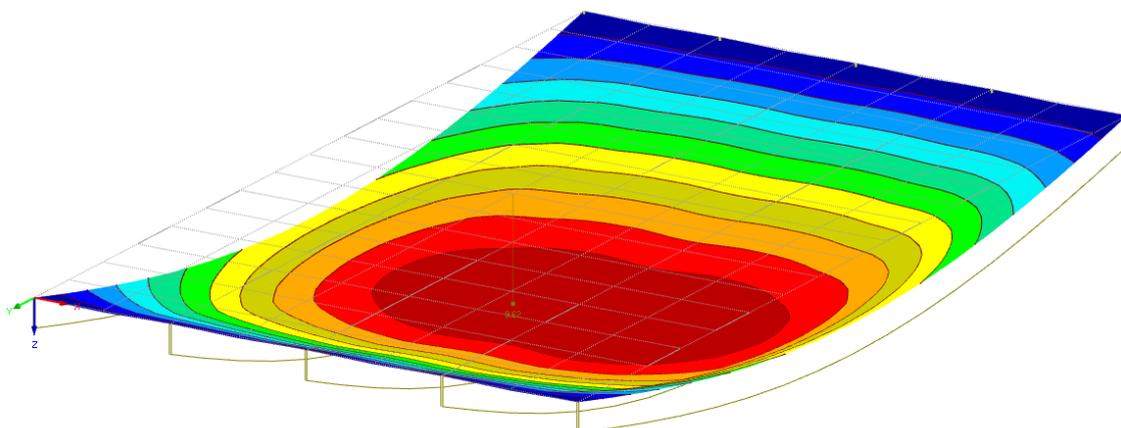


Ilustración 34. Propuesta de modelizado del CLT T: resultados de deformación en RFEM.

Los resultados pueden estudiarse tanto en RF-LAMINATE como en RF-TIMBER Pro y en RFEM; en este último caso, los resultados pueden estudiarse tanto de manera gráfica como numérica, obteniendo en la NUI gráficos de deformaciones, tensiones, esfuerzos, etc. como el que se muestra en la ilustración 34, y valores exactos en los módulos RF-LAMINATE, RF-TIMBER Pro y en el panel de resultados de RFEM.

Para el estudio de la interfase del CLT T se ha despreciado el efecto de arranque por tracción de los tirafondos, debido a que la resistencia de estos al arranque es mucho mayor que a cortante y a que los esfuerzos de tracción entre CLT y vigas de MLE son inferiores a los esfuerzos de rasante en la interfase.

El cálculo a fuego, para el modelo propuesto del CLT T es bastante directo en Dlubal. Los pasos a seguir para realizar el cálculo a fuego de un modelo ya estudiado en situación de uso, serían los siguientes:

- Generar un caso de carga para fuego, del que se desglosarán varias combinaciones de resultados para situación de fuego.
- Para el cálculo a fuego de las vigas de MLE, basta con solicitar también en RF-TIMBER Pro el cálculo a fuego de las vigas, que estarán expuestas solamente en sus caras laterales y en su cara inferior. La actualización de la normativa a situación de uso será automática.
- En el caso del CLT, la sección reducida deberá calcularse manualmente, y se deberá reducir el espesor de las capas inferiores dependiendo del tiempo de exposición al fuego. En este caso, la norma deberá modificarse manualmente como se hizo para la primera propuesta de modelizado del CLT MIX.

### 6.2.1. Modelo MEF del CLT T en RFEM

Para la validación de las propuestas de modelo desarrolladas en apartados anteriores, se ha realizado una simulación de elementos de una composición de CLT T 4c 460. Por cuestiones de coste computacional, se ha limitado el estudio a la zona de influencia de una sola viga, y para una luz de 8 m.

Se han utilizado elementos finitos de un tamaño máximo de 3 cm, aproximadamente el espesor de los tablonos de madera que conforman el CLT. Nuevamente, este valor ha quedado limitado debido al coste computacional requerido para elementos finitos de menor tamaño y a la imposibilidad de RFEM de calcular archivos más pesados; de la misma manera, el modelo se ha estudiado mediante un modelo partido en el plano perpendicular a la luz y en el centro de esta, siendo el giro impedido en el centro del vano, condición de contorno que es igual a calcular el vano entero. Por la misma razón y con los mismos resultados, se ha impedido el giro del CLT en el centro de los vanos entre vigas.

Para su cálculo, no se ha considerado el peso propio del material, sino que se ha aplicado en toda la superficie una carga de 3 kN, común en la categoría de uso A del CTE.

El modelo de elementos finitos se muestra en la ilustración 35.

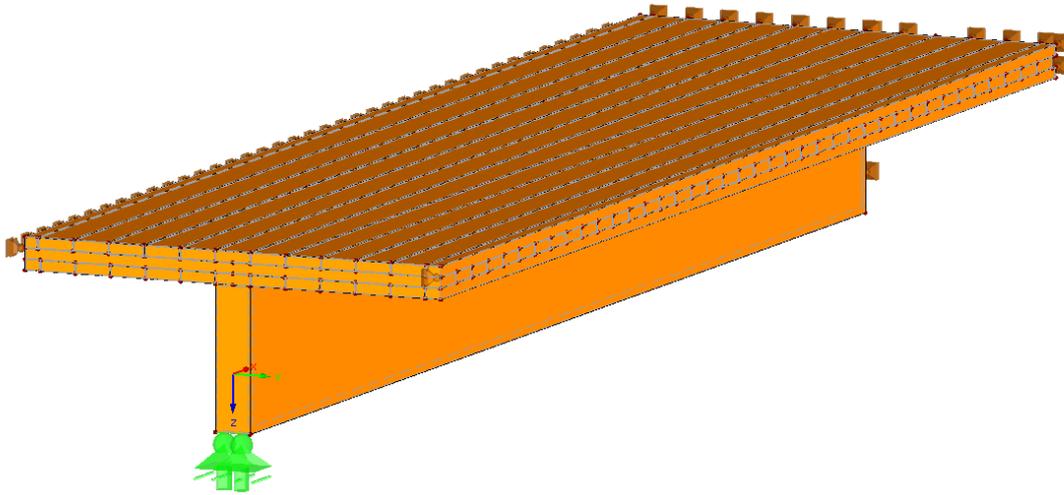


Ilustración 35. MEF del CLT T: modelo MEF.

En total, se han contabilizado 237220 nodos, 124059 elementos finitos en 2D y 924211 elementos finitos en 3D en la malla del conjunto.

Los resultados obtenidos se reflejarán a continuación con ayuda de material gráfico:

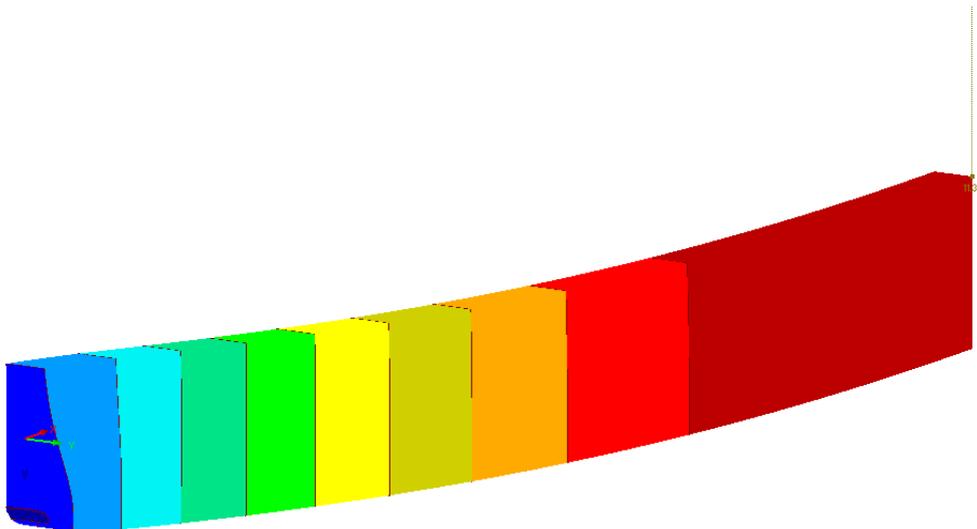


Ilustración 36. MEF del CLT T: deformaciones globales en el eje z ( $u_z^{VIGA}$ ).

Las deformaciones máximas en el eje z ( $u_z^{VIGA}$ ) han sido de 11.32 mm para los largueros (el máximo permitido por normativa es 26.67 mm). En la ilustración 36 pueden observarse los resultados de deformaciones obtenidos.

Se ha realizado un estudio más exhaustivo para determinar la deformación que los tablonés transversales sufren respecto a las vigas ( $u_z^{CLT}$ ), que es, en definitiva, la deformación a considerar en

el cálculo del ELS de los tablonos transversales. Para ello, se ha fijado la superficie inferior de las vigas mediante un empotramiento que impide el desplazamiento en el espacio. El modelo utilizado para este objeto puede verse en la ilustración 37:

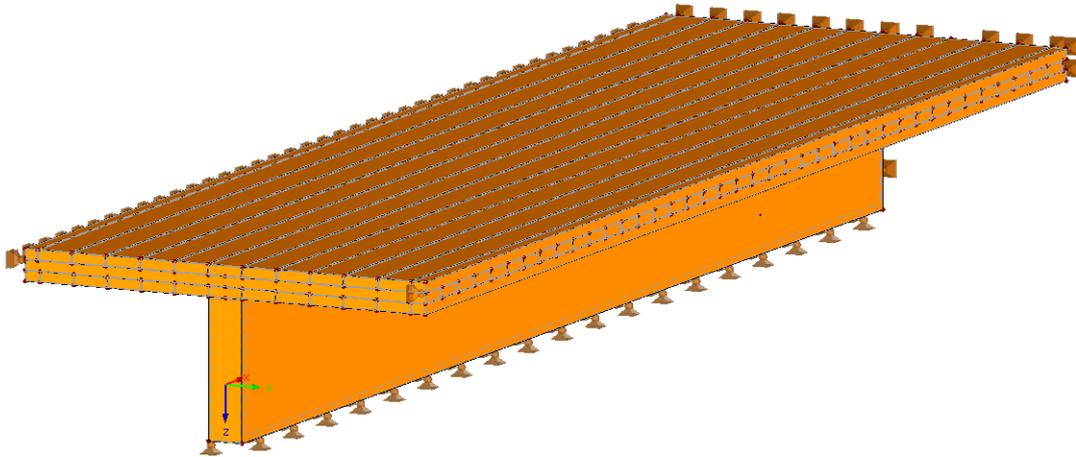


Ilustración 37. MEF del CLT T: modelo MEF utilizado para la comprobación de deformaciones locales.

Los resultados obtenidos se muestran en la ilustración 38:

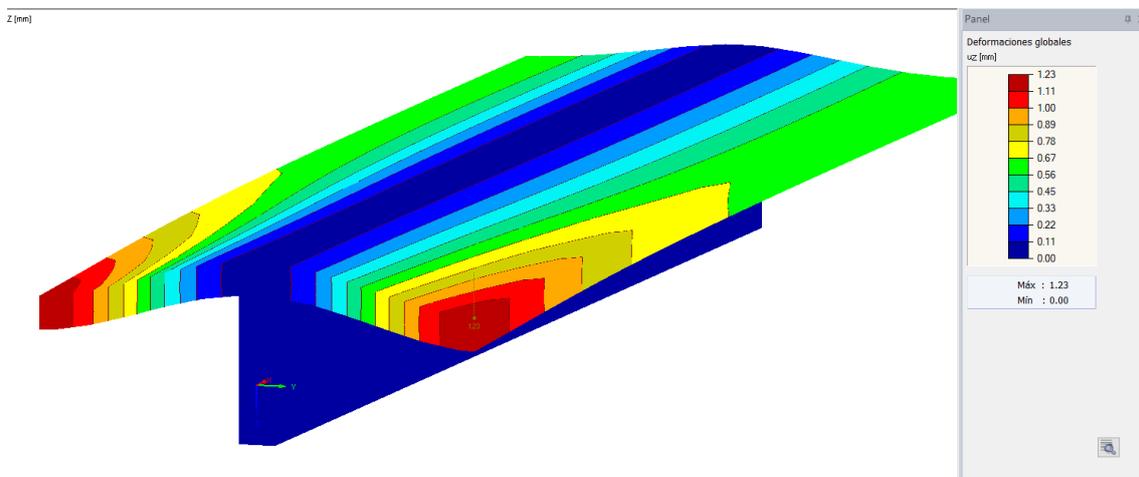


Ilustración 38. MEF del CLT T: resultados de deformaciones locales ( $u_z^{CLT}$ ).

Como puede observarse, los desplazamientos locales máximos de los tablonos que conforman el CLT ( $u_z^{CLT}$ ) son de 1.23 mm en la dirección vertical y en el centro del vano entre viga y viga; este es un valor inferior al máximo establecido por la norma, que se fija, para el CLT T, en 4 mm ( $L/300$  mm, siendo la distancia entre dos vigas –  $L$  – 1.2 m).

Las tensiones paralelas a la fibra de mayor valor se han dado en las vigas, y corresponden a unos valores límite de 5.5 N/mm<sup>2</sup> a tracción ( $\sigma_{0,t}^{VIGA}$ ) y de entre 1.2 N/mm<sup>2</sup> a compresión ( $\sigma_{0,c}^{VIGA}$ ). El valor de la resistencia a tracción de la madera de *Pinus Radiata D Don* (C24) es de 6.72 N/mm<sup>2</sup>, y el de compresión paralela a la fibra es de 10.08 N/mm<sup>2</sup>, por lo que los esfuerzos entran dentro de lo aceptable. Los resultados se muestran en la ilustración 39.

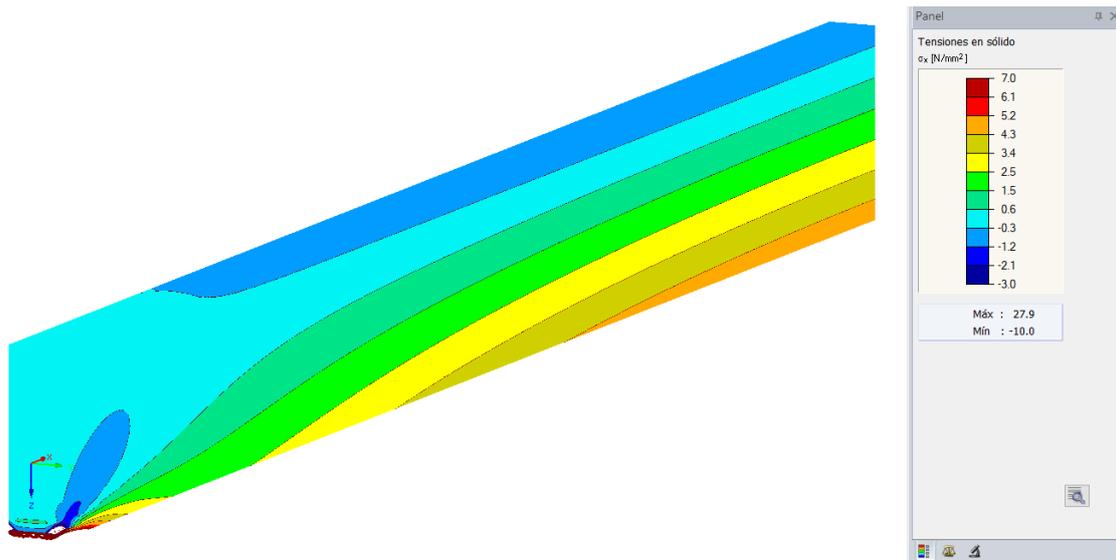


Ilustración 39. MEF del CLT T: tensiones paralelas a la fibra en la viga de MLE ( $\sigma_{0,t}^{VIGA}$  y  $\sigma_{0,c}^{VIGA}$ ).

Las compresiones perpendiculares a la fibra ( $\sigma_{90,c}$ ) máximas aparecen en los puntos de apoyo del conjunto (ilustración 40), esto es, en la zona de las vigas en contacto con el apoyo, y han sido de un valor de 0.9 N/mm<sup>2</sup>. Considerando que la resistencia a compresión perpendicular a la fibra del material puede llegar a ser hasta de 1.51 N/mm<sup>2</sup>, siempre que el fabricante lo tenga especificado en su ETA, estos valores entran dentro de lo aceptable.

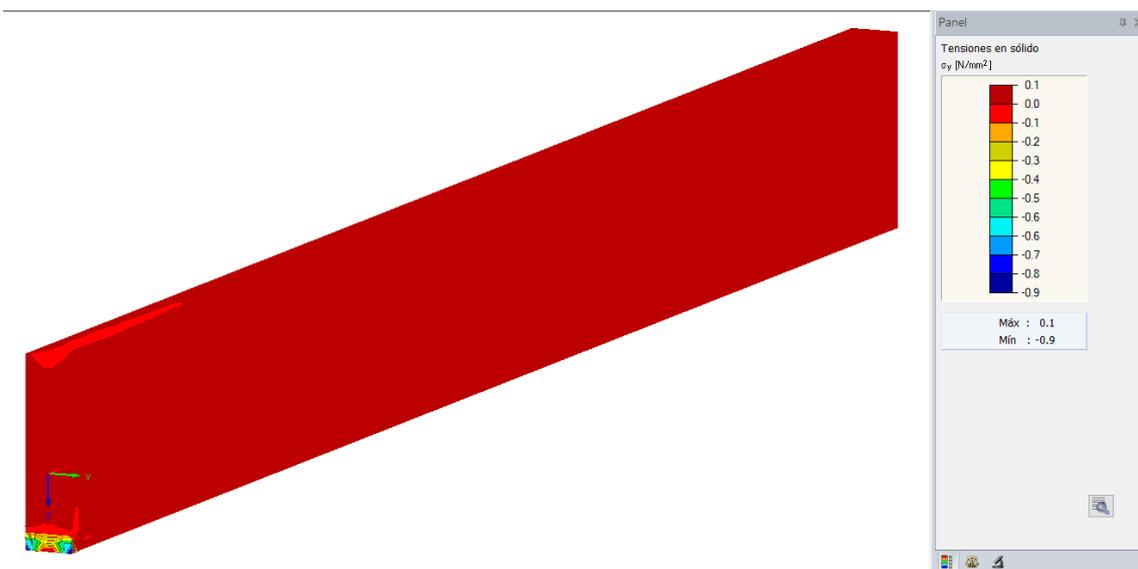


Ilustración 40. MEF del CLT T: compresiones perpendiculares a la fibra en la viga de MLE ( $\sigma_{90,c}$ ).

En el caso del CLT, las tensiones normales máximas son de 4.3 N/mm<sup>2</sup> a tracción ( $\sigma_{0,t}^{CLT}$ ) y de 1.3 N/mm<sup>2</sup> a compresión ( $\sigma_{0,c}^{CLT}$ , ilustración 41), ambas dentro de los límites admitidos por la normativa vigente. Estas tensiones aparecen en el intereje entre la capa de tableros transversales y la capa de tableros longitudinales superior del CLT.

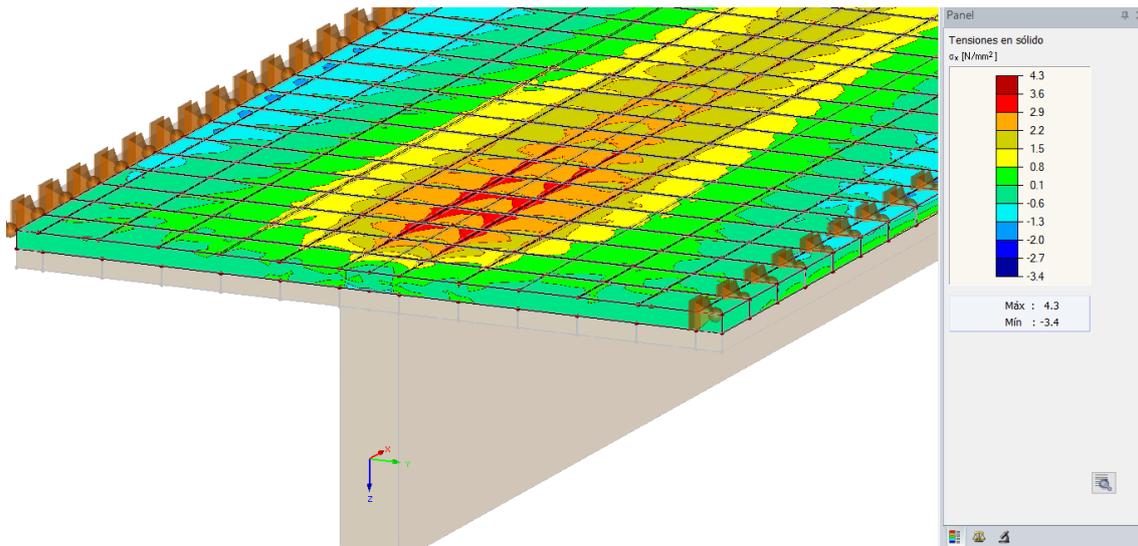


Ilustración 41. MEF del CLT T: tensiones perpendiculares a la fibra en el CLT ( $\sigma_{0,c}^{CLT}$ ).

En el plano  $xy$  ( $\tau_{xy}$ ), los valores máximos de las tensiones tangenciales son de  $1 \text{ N/mm}^2$ . Estos valores son causados por singularidades propias del MEF, por lo que los resultados reales son más exactos ignorando esos puntos de tensiones pico aisladas. Para las tensiones tangenciales en el plano  $xz$ , por tanto, los valores son más próximos a  $0.1 \text{ N/mm}^2$ . Estas tensiones cortantes aparecen en el plano horizontal, y crecen cerca de los apoyos. Los resultados pueden observarse en la ilustración 42.

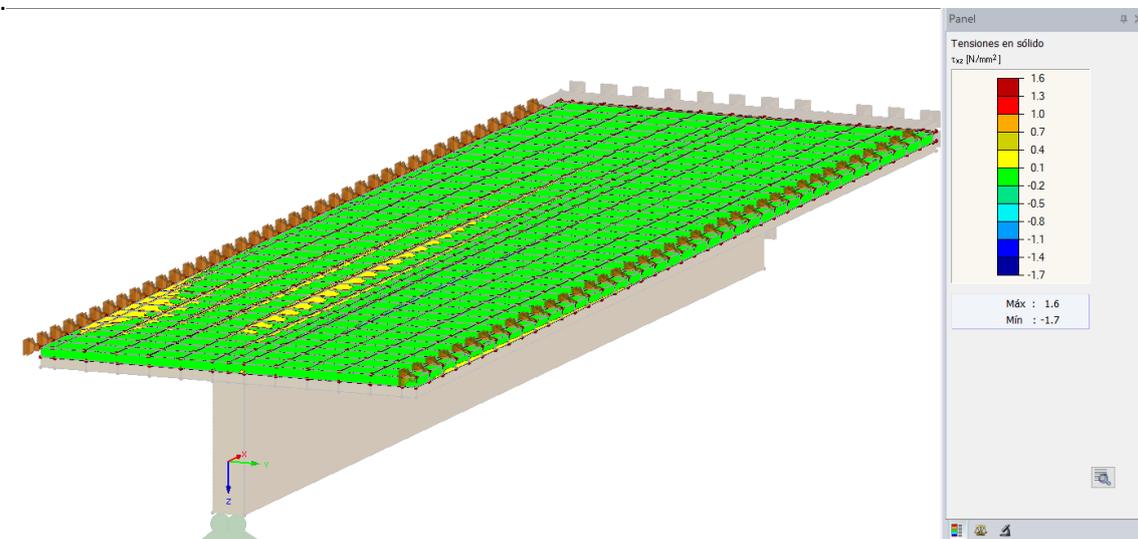


Ilustración 42. MEF del CLT T: tensiones tangenciales en el CLT en el plano  $xy$  ( $\tau_{xy}$ ).

Las tensiones tangenciales en el plano  $xz$  ( $\tau_{xz}$ ) tienen unos valores pico de  $1.6 \text{ N/mm}^2$ , que aparecen en la capa de tabloncillos transversales del CLT, tanto cerca de las vigas como en el centro del vano. En la mayoría de la composición, en cambio, los esfuerzos cortantes en el plano  $xz$  se mantienen en torno a los  $0.2 \text{ N/mm}^2$ . Estas tensiones se relacionan con el módulo de rodadura ( $G_R$ ) e intentan deformar la composición en su longitud (ilustración 43).

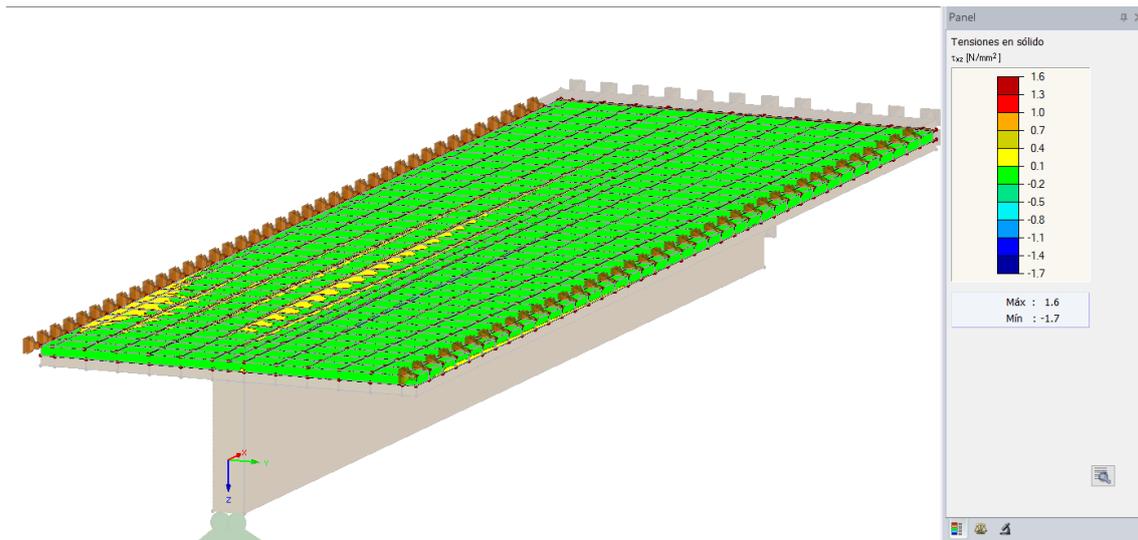


Ilustración 43. MEF del CLT T: tensiones tangenciales en el CLT en el plano xz ( $\tau_{xz}$ ).

Las tensiones tangenciales en el plano yz ( $\tau_{yz}$ ) son igualmente nulas de media, pudiendo alcanzarse desviaciones hasta 0,05 N/mm<sup>2</sup> en el centro del vano entre vigas de los tabloncillos transversales (ilustración 44).

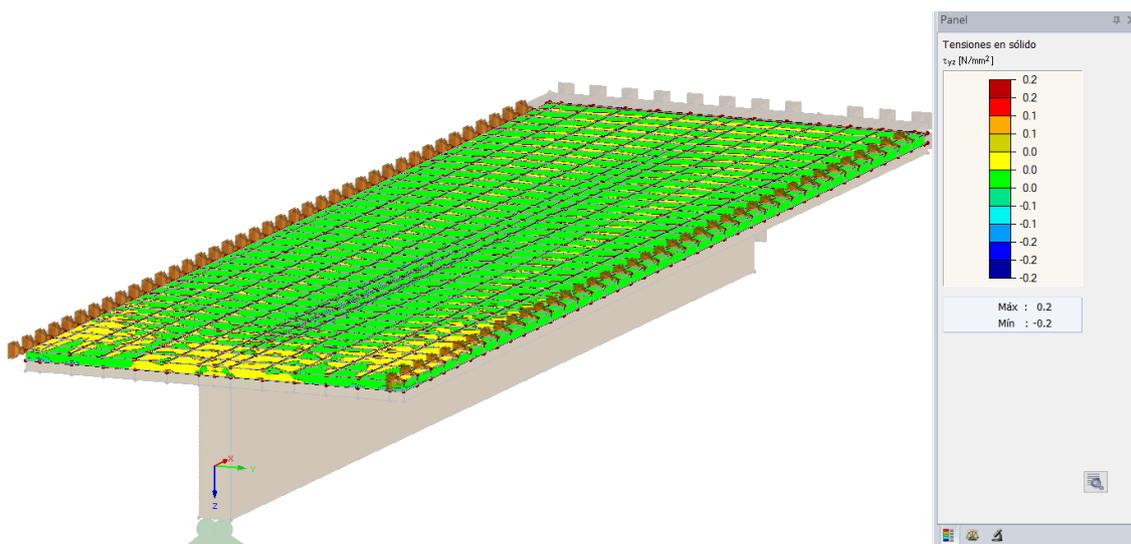


Ilustración 44. MEF del CLT T: tensiones tangenciales en el CLT en el plano yz ( $\tau_{yz}$ ).

Según normativa, la resistencia a tensiones tangenciales del *Pinus Radiata D. Don* es de 1.92 N/mm<sup>2</sup>, por lo que su correcto funcionamiento queda respaldado en todos los casos.

## 6.2.2. Contraste de resultados de la propuesta de modelizado del CLT T

Para la validación de los modelos propuestos, se han estudiado los resultados ofrecidos por estos y se han enfrentado a los resultados obtenidos mediante el modelo de elementos finitos. Las comparaciones pueden observarse en la tabla 7:

Tabla 7. Contraste de resultados de los modelos simplificados del CLT MIX respecto a los resultados del MEF.

Tensión o deformación	Límite normativo	Resultado MEF	Resultado Propuesta 1	OK
$u_z^{VIGA}$	26.67 mm	11.32 mm	12.85 mm	X
$u_z^{CLT}$	4 mm	1.23 mm	1.58 mm*	X
$\sigma_{0,t}^{VIGA}$	6.78 N/mm <sup>2</sup>	5.5 N/mm <sup>2</sup>	5.95 N/mm <sup>2</sup>	X
$\sigma_{0,c}^{VIGA}$	10.08 N/mm <sup>2</sup>	1.2 N/mm <sup>2</sup>	2.1 N/mm <sup>2</sup>	X
$\sigma_{0,t}^{CLT}$	6.78 N/mm <sup>2</sup>	4.3 N/mm <sup>2</sup>	4.4 N/mm <sup>2</sup>	X
$\sigma_{0,c}^{CLT}$	10.08 N/mm <sup>2</sup>	1.3 N/mm <sup>2</sup>	1.83 N/mm <sup>2</sup>	X
$\sigma_{90,c}$	1.51 N/mm <sup>2</sup>	0.9 N/mm <sup>2</sup>	**	X
$\tau_{xy}$	1.92 N/mm <sup>2</sup>	0.1 N/mm <sup>2</sup>	0.14 N/mm <sup>2</sup>	X
$\tau_{xz}$	1.92 N/mm <sup>2</sup>	1.6 N/mm <sup>2</sup>	0.44 N/mm <sup>2</sup>	X
$\tau_{yz}$	1.92 N/mm <sup>2</sup>	0.05 N/mm <sup>2</sup>	0.07 N/mm <sup>2</sup>	X

\* Las deformaciones del CLT se han obtenido de simulaciones como las utilizadas en las comprobaciones de tecleo. Estas simulaciones son más precisas, ya que consideran las sobrecargas puntuales exigidas por el CTE.  
 \*\* Requiere comprobación manual del aplastamiento de las vigas de MLE.  
 - Dlubal no ofrece resultado.

En caso de que el resultado de cierto esfuerzo o deformación haya sido satisfactorio, esto es, de que sus resultados sean más conservadores que los del modelo de EF y que la norma, se ha marcado una "X" azul en la columna OK, mientras que, en caso de obtener resultados menos conservadores que el modelo de EF y la norma, se ha marcado mediante una "X" roja en su respectiva columna. Asimismo, en caso de que el resultado no haya podido medirse en el modelo, se ha indicado mediante una "X" negra; esto, por supuesto, implica que es necesario realizar cálculos manuales para obtener los resultados de esfuerzos o deformaciones de dicha fila.

Los resultados obtenidos para la propuesta de modelizado han sido satisfactorios, si bien, en algunos casos, demasiado conservadores en comparación a los de la propuesta del CLT MIX respecto a su simulación mediante elementos finitos. Por otro lado, casi todas las deformaciones y tensiones pueden leerse mediante este modelo, siendo las excepciones la deformación relativas entre vigas del CLT ( $u_z^{CLT}$ ) y la tensión a compresión perpendicular ( $\sigma_{90,c}$ ); en el caso de la primera, se ha ofrecido un modelo para estudiar su deformación, tanto en situación de uso como en situación de incendio, y completar así el estudio de las deformaciones; en el caso de la segunda, puede calcularse indirectamente conociendo el tipo de apoyo en cada caso y obteniendo de RFEM los esfuerzos en dicho apoyo. El único resultado no satisfactorio ha sido el de las tensiones tangenciales en el plano xz ( $\tau_{xz}$ ), es decir, en el plano afectado por las tensiones de rodadura, ya que el modelo propuesto ha ofrecido valores menos conservadores que la simulación de elementos finitos. Este error es muy elevado, llegando a alcanzar el 72'5 % para el valor máximo; pero, como en la mayoría de los casos, como se puede observar en la ilustración 43, los resultados más reales, es decir, aquellos alejados de los nodos y más sensibles a distorsionarse por las características del cálculo mediante elementos

finitos, se acercan más a valores de entre 0.1 y 0.4 N/mm<sup>2</sup>, lo que entra dentro de la normativa; al mismo tiempo, esto hace que los valores obtenidos mediante el modelo propuesto sean más conservadores que la simulación por elementos finitos.

Al estudiar la tabla 7 y compararla con la del CLT MIX, hay una gran diferencia perceptible, atendiendo a la diferencia de tensiones paralelas de tracción y de tensiones paralelas de compresión. Mientras que, para el caso del CLT MIX, la diferencia entre tensiones de tracción y de compresión se diferenciaban un 20 %, siendo las tensiones de compresión las más elevadas, en el caso del CLT T, esta diferencia asciende a un 458 % del lado de la tracción. En su momento, se argumentó que la diferencia entre valores máximos de tracción y compresión paralela en los largueros del CLT MIX se debía a la diferencia de rigideces a lo alto de la sección era asimétrica, debido a que la madera ofrece distintos valores de resistencia a tracción paralela y a compresión paralela. En el caso del CLT T, el factor dominante que hace que la diferencia entre tensiones paralelas sea tan grande es la asimetría de la sección: el eje neutro es arrastrado hacia la zona donde más inercia hay en mucha mayor medida de lo que es arrastrado por la diferencia de resistencias paralelas: esto se traduce en un aumento de la sollicitación a tracción paralela que, si bien hace del CLT T una solución interesante para salvar luces mayores a las configuraciones estudiadas anteriormente en este documento, implica cambiar el foco de la comprobación en algunos casos, ya que el mecanismo de fallo pasará en ocasiones de las deformaciones de los diferentes ELS a la comprobación a resistencia a tracción paralela en las vigas de MLE. Este cambio de perspectiva dependiente de la luz puede confundir a gente con poca experiencia en el cálculo de la madera. Por otro lado, perjudica también a las comprobaciones a fuego, ya que la sollicitación resistente en el momento del fallo en situación de uso será mayor que configuraciones como el CLT MIX, por ejemplo. Dicho de otra manera: un CLT T está más cerca de su límite resistente en situación de uso normal, cuando, generalmente, falla por ELS, de lo que lo estaría un CLT MIX cuando fallase también en ELS en situación de uso.

La asimetría de la sección es también la causante de que las capas de tipo CLT trabajen más que en el CLT MIX, ya que “redirigen” el flujo de tensiones en mayor medida de lo que lo hacían en el CLT MIX, donde las tensiones se desarrollaban más en el larguero y quedaban más repartidas entre las dos capas longitudinales de tablonés.

Respecto a los valores que no se han podido obtener de esta propuesta, cabe también resaltar que el modelo de estudio del tecleo ha demostrado ser mucho más conservador que el MEF (un 28.45 % más conservador). Aun así, se recomienda usar los valores del modelo de tecleo propuesto en la sección 12.5 en el Anexo III en vez de los del MEF, del lado de la seguridad.

### 6.2.3. Modelo para comprobación de los conectores en el CLT T

El CLT T, a diferencia del CLT MIX, no se basa solamente en la comprobación de la madera. En el caso del CLT MIX, se consideraba que las uniones estaban empotradas, debido a que los largueros y las capas transversales superiores e inferiores se hallaban encoladas. En el CLT T, en cambio, el CLT y las vigas de MLE se unen mediante conectores (generalmente tirafondos) que deben ser comprobados por el procedimiento de las ecuaciones de Johansen. En apartados anteriores se ha mostrado un método de cálculo, que se basaba en obtener el valor del esfuerzo rasante a partir del esfuerzo cortante máximo en el vano, útil para el modelo propuesto. A la hora de verificar los resultados obtenidos mediante este método, se ha optado por realizar otro modelo de comprobación. Esta decisión se ha debido a la naturaleza del software elegido para realizar las comprobaciones: RFEM, por mucho que pueda realizar simulaciones MEF, no es un software de cálculos MEF, sino un software de cálculo estructural. Este hecho, aunque parezca contradictorio, es muy importante, ya que limita las herramientas disponibles para el usuario. Para comprobar los esfuerzos locales que aparecerían en los tirafondos, por ejemplo, la simulación MEF que se ha utilizado para comprobar los valores de deformaciones y tensiones contiene elementos demasiado toscos (y así debe ser, por capacidad computacional del software), lo que impide una lectura exacta de ese tipo de esfuerzos y tensiones locales.

Este segundo modelo de comprobación se ha construido aprovechando las herramientas que ofrece RFEM. Se han modelizado las vigas de MLE por medio de elementos tipo barra y el CLT superior como una superficie laminada cuya sección es definida en RF-LAMINATE. Los conectores se han modelizado por medio de barras rígidas en las posiciones que los tirafondos ocuparían en la configuración real. Para este caso, se ha definido una distancia entre conectores de 25 cm. A dichas barras se les han otorgado las propiedades mecánicas de un tirafondo. El modelo puede observarse en la ilustración 45:

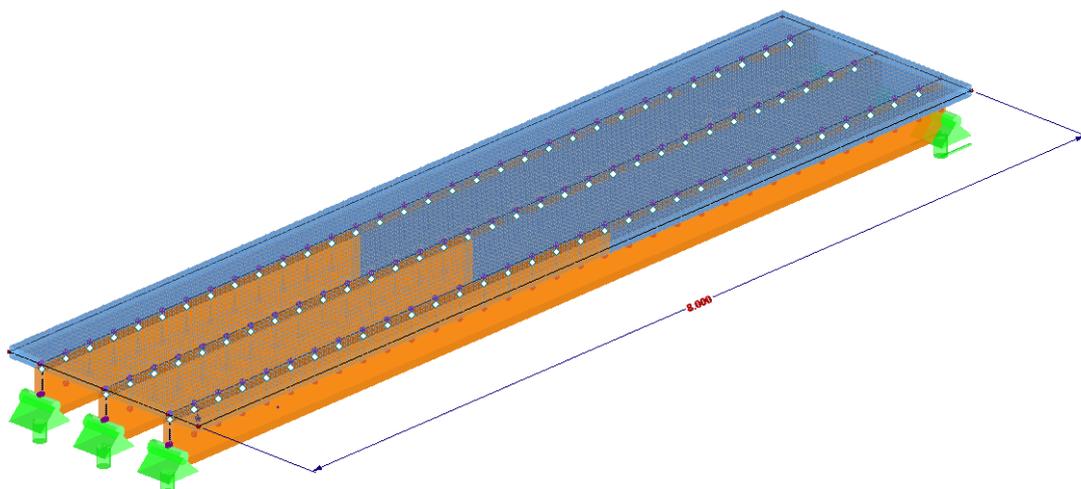


Ilustración 45. Comprobación de los conectores en la interfase del CLT: modelo.

RFEM calculará de manera automática el esfuerzo rasante del intereje entre el CLT y las vigas, y lo mostrará como esfuerzo cortante de los tirafondos, como puede observarse en la ilustración 46:

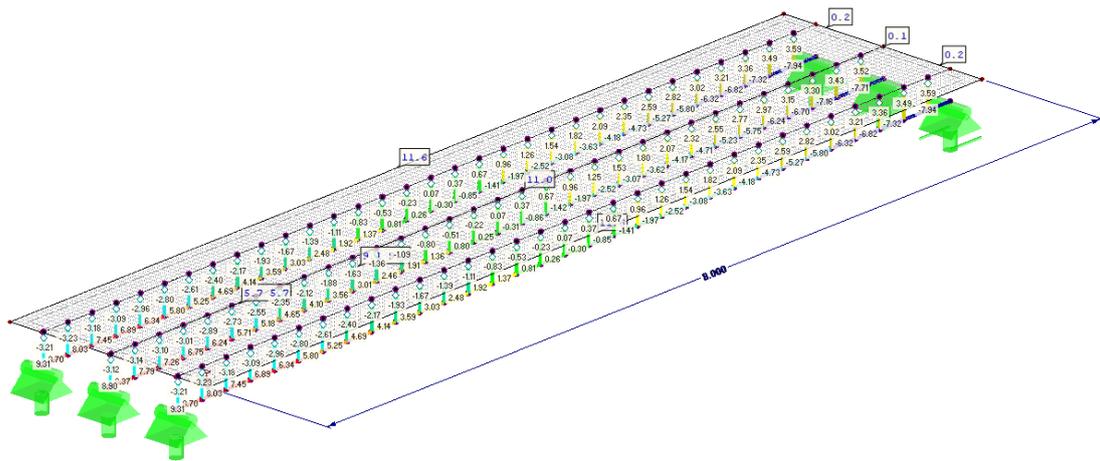


Ilustración 46. Comprobación de los conectores en la interfase del CLT: esfuerzos cortantes en los conectores.

Los esfuerzos rasantes máximos suelen hallarse en los extremos de la composición (ilustración 47):

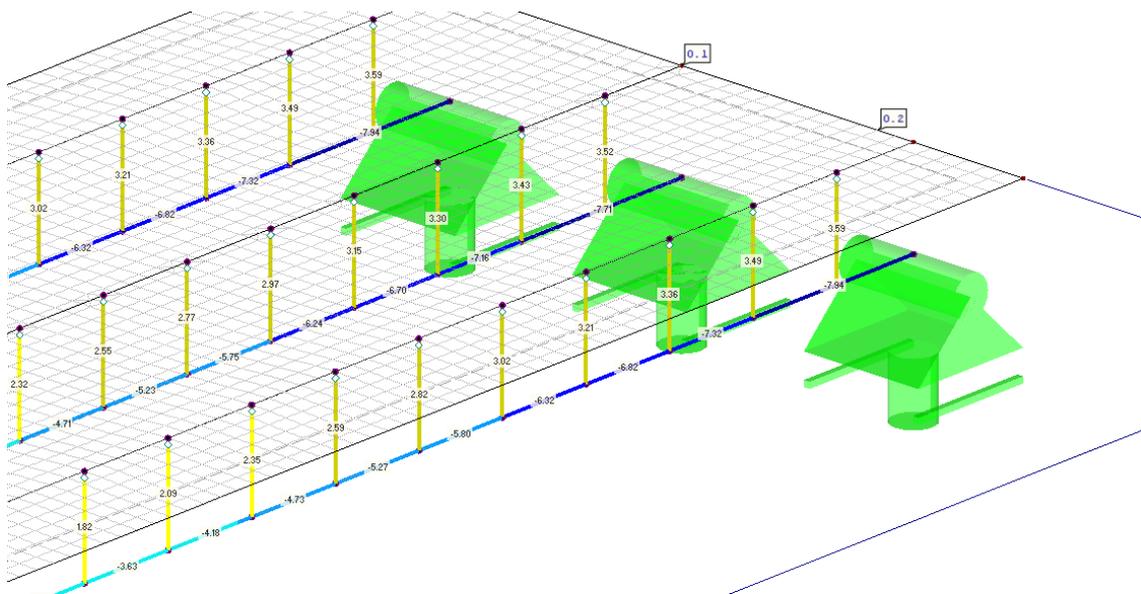


Ilustración 47. Comprobación de los conectores en la interfase del CLT: esfuerzos cortantes máximos en los conectores.

Para el caso estudiado, el esfuerzo cortante máximo que debe aguantar un tirafondo es de 3.59 kN. Esto requeriría de un tirafondo de 12x180 a media rosca, cuya resistencia a cortante, considerando todos los posibles mecanismos de fallo propuestos por Johansen, es de 3.67 kN

Mediante la metodología propuesta en el modelo del apartado 6.2.1, el esfuerzo cortante a resistir por los tirafondos, es decir, el esfuerzo rasante en el intereje, es de 6.42 kN. Este esfuerzo es mayor que el que puede resistir un tirafondo de 12 mm de diámetro, y se aleja bastante del valor obtenido mediante un cálculo más exacto (casi lo duplica).

Se concluye por tanto que, si bien el modelo propuesto en páginas anteriores es eficaz a la hora de realizar cálculos de la composición en sí, no permite realizar el cálculo de los conectores que unen las vigas de MLE y la capa de CLT de manera correcta; para ello es necesario utilizar una



variante entre el MEF y la propuesta simplificada enfocada en el cálculo de los conectores, pero que sacrifica la simplicidad del modelo propuesto por un estudio más completo de la composición. Así, el modelo propuesto es especialmente recomendable, principalmente, para cálculos en etapas de predimensionamiento o para cálculos de forjados que se hayan en situación de uso a una sollicitación holgada, mientras que es recomendable realizar el cálculo de los conectores de una manera menos conservadora pero más realista, como el modelo utilizado para contrastar los resultados.

La propuesta de modelo realizada se ha calculado usando RFEM y RF-LAMINATE. Para definir las deformaciones debido a la rodadura de los tabloncillos transversales del CLT se ha utilizado, por tanto, el método de acoplamiento a cortante, mientras que para definir la deformación de la sección en el intereje se ha definido un coeficiente de muelle calculado por medio de la normativa vigente.

## 7. Conclusiones

A lo largo de este documento se han llegado a varias conclusiones respecto al CLT MIX y respecto al CLT T. Algunas de ellas son relativas a la anatomía de las composiciones, otras son reflexiones respecto al cálculo general de la madera, otras giran en torno al método de los elementos finitos y respecto a la idoneidad de las propuestas realizadas. Este apartado pretende sumarizar y profundizar en dichas reflexiones.

En el apartado 2, relativo al contexto, se ha hecho un breve recorrido histórico sobre la madera como material de construcción y se han mostrado sus propiedades más importantes para este estudio; este apartado ha concluido con una introducción al desarrollo inicial del MEF y a sus autores más sobresalientes, así como las aportaciones que hizo cada uno de ellos, y que harían evolucionar la teoría de los elementos finitos hasta llegar al concepto que entendemos hoy en día. De esta manera, se ha pretendido resaltar la importancia de los modelos de cálculo en el cálculo de estructuras contemporáneo, así como la problemática derivada del desarrollo tecnológico y que ha impulsado este estudio: la necesidad de modelos precisos y actualizados de cálculo de los elementos más innovadores del mercado.

En el apartado 3 se han enumerado los objetivos, de entre los que se resalta el de realizar un planteamiento simplificado de modelización del CLT MIX y del CLT T, que pueda servir para calcular estas composiciones tanto de manera aislada y rápida, como integradas en una estructura.

El apartado 5, estado del arte, ha servido para definir cada una de las composiciones de manera separada. Inicialmente, se ha definido el CLT (apartado 5.1), pues es la base teórica del cálculo para las composiciones estudiadas en el presente documento, y por tanto sirve para contextualizarlas a estas también. Los apartados 5.2 y 5.3 han presentado el CLT MIX y en el CLT T, respectivamente, reuniendo las composiciones existentes de cada uno de ellos y una serie de características a considerar a la hora de estudiar su utilización. Estos apartados, tomados de manera aislada, sirven para entender el funcionamiento de ambas composiciones, si bien no profundizan en su comportamiento estructural salvo a grandes rasgos. Para un estudio más profundo del comportamiento estructural del CLT MIX y del CLT T se han enumerado y desarrollado, en los anexos II (apartado 11) y III (apartado 12), los fenómenos y factores de corrección a considerar en cada uno de estos, respectivamente. Como contextualización, nuevamente, se han reunido también los fundamentos de cálculo del CLT, en el anexo I (apartado 10).

Respecto al CLT, si bien existen varias teorías para estudiar su comportamiento estructural, este trabajo ha decidido reunir tan solo las dos siguientes: el método Gamma, recomendado por los Eurocódigos y por las ETAs de varios fabricantes (entre las cuales está la de EGOIN, fabricante del CLT MIX y del CLT T), cuenta con la ventaja de poder utilizarse para realizar cálculos manuales, pues permite calcular el CLT como un elemento bajo el efecto de una flexión simple, aunque ofrece resultados bastante imprecisos, siempre del lado de la seguridad. Esta falta de precisión ha quedado evidenciada en el apartado 6.1.4, donde, al comparar los resultados con un modelo MEF, se han observado errores en la flecha del 50 %, del lado de la seguridad. En este método, las capas de tablonos longitudinales del CLT se consideran de material sólido y por tanto aportan inercia y resistencia al conjunto, mientras que las capas de tablonos transversales se definen como uniones, y carecen tanto de inercia como de aporte resistente, definiendo solo la deformación de la sección a

rasante. El segundo método de cálculo es el de Acoplamiento de cortante, respaldado por la norma estadounidense ASCII y por la EAD que regula el comportamiento estructural de los elementos de madera prefabricados de tipo forjado. Este método se basa en la teoría de placas, y define cada una de las capas de tablonos como una viga unida mediante conectores rígidos a las barras contiguas y que por tanto se deforma de igual manera a estas. El comportamiento del CLT, así, se estudia calculando de manera separada las tensiones debidas a la flexión en cada capa y las tensiones axiales de cada capa, superponiéndolos después. Los resultados obtenidos mediante los modelos en que se usa este método han sido satisfactorios, llegando a obtenerse, respecto a la simulación MEF, errores de tan solo un 2 % para la flecha, del lado de la seguridad. También se han definido las velocidades de carbonización y el comportamiento frente al fuego del CLT, en el apartado 10.3.

En el anexo II, del apartado 11, se ha estudiado el comportamiento estructural del CLT MIX. Se ha concluido que el efecto de arrastre por cortante es despreciable, según la EAE, bien por su anatomía, semejante a un forjado alveolar formado por vigas en doble T, bien por los espesores de cada elemento y por su separación (por este segundo efecto, el arrastre por cortante se ha calculado despreciable para vanos mayores a 6.25 m). Se ha mencionado también que, a la hora de calcular un forjado de CLT MIX, el calculista puede contar con el factor de carga compartida, incrementando la resistencia de los largueros del CLT MIX un 10 %. Se han propuesto dos métodos de cálculo frente al fuego en el CLT MIX: el primero calcula la resistencia de la composición frente al fuego como si el hueco entre largueros estuviese vacío, es decir, suponiendo que, en el momento en que los tablonos inferiores se consumen, tanto los largueros como la superficie inferior de los tablonos transversales superiores quedarán expuestos frente al fuego y se quemarán a las velocidades definidas para el CLT convencional en el apartado 10.3; el segundo, propone aprovechar que el aislante encolado entre largueros aguanta el efecto del fuego durante cierto tiempo, pero se ha descartado, debido a la carencia de datos experimentales disponibles para sustentar que ese aislante no se descolgará al perder el soporte de las capas de tablonos inferiores. Por ello, el método elegido para el cálculo frente al fuego del CLT MIX es el primero de los descritos, mediante el cual se ha calculado que el CLT MIX tiene una resistencia de hasta R45 para categorías de carga residenciales y dependiendo de las luces a salvar, en cada caso. Para concluir con el anexo II, se ha estudiado el fenómeno de tecleo, o lo que es lo mismo, la resistencia frente a fallos locales que pudieran aparecer por la presencia de cargas puntuales en los tablonos transversales y entre largueros. Los resultados han demostrado que el CLT MIX es capaz de resistir cargas puntuales de hasta 7 kN en situación de uso, lo cual abarca la mayoría de las categorías de uso del CLT y de los Eurocódigos, siempre que los tablonos tengan una altura de 25 mm; en caso de incendio, por otro lado, se ha calculado que el CLT MIX sería capaz de resistir las cargas solicitadas para categorías de uso residenciales (2 kN) siempre que quede una sección residual de al menos 15 mm de altura.

En el anexo III (apartado 12), que estudia el comportamiento estructural del CLT T, se ha concluido que la aplicación del fenómeno de arrastre por cortante es necesaria en cálculos manuales para luces menores de 12 m, y por ello en el apartado 12.1 se han definido los principios de cálculo de este. También se ha explicado la teoría de Johansen para el cálculo de tirafondos, que será de aplicación en la interfase entre el CLT y las vigas de MLE que conforman el CLT T. Como para el CLT MIX, se ha argumentado la consideración del factor de carga compartida, que incrementa el valor resistente de las vigas de MLE un 10 %. Se ha estudiado nuevamente el fenómeno de tecleo,

obteniendo como resultado que, en situación de uso, el fenómeno de tecteo no será el principal mecanismo de fallo para categorías de uso cuya carga puntual sea menos o igual a 5 kN, punto a partir del cual los tablonos transversales pudieran fallar por esfuerzos cortantes al aplicar una carga puntual cerca de las vigas de MLE; en situación de incendio, por otro lado, el tecteo no será el mecanismo de fallo principal en viviendas hasta que la sección reducida existente de los tablonos transversales tenga una altura inferior a 19 mm. Para concluir con el anexo III, el apartado 12.6 estudia los efectos de la orientación del CLT en el CLT T. Los resultados muestran que el conjunto resistiría 4.5 minutos más en caso de que el CLT estuviese orientado ortogonalmente frente a las vigas que si estuviese orientado en la misma dirección que estas, pero que, de esta manera, su flecha entre puntos de apoyo se vería reducida hasta un 18 % para luces de 8 m.

En el apartado 6 se han realizado las propuestas de modelización simplificadas. En este apartado se ofrece una especie de guía paso por paso que permitirá a usuarios con poca experiencia en Dlubal construir sus propios modelos para el cálculo del CLT MIX y del CLT T. Para el CLT MIX se han realizado dos propuestas: la primera consiste en un modelo formado por elementos tipo superficie laminada que se estudiará mediante el módulo RF-LAMINATE mediante la teoría de acoplamiento a cortante; la segunda consiste en modelizar el CLT MIX como una serie de elementos tipo barra en doble T paralelos, cuyos resultados se estudian en el módulo principal RFEM; para el CLT T solo se ha propuesto un modelo simplificado, que combina RFEM con RF-LAMINATE.

En el apartado 6.1.3 se calcula un modelo MEF del CLT MIX como modo de contrastar los resultados de los modelos simplificados planteado en el presente estudio, y se presentan los resultados obtenidos mediante este. En el apartado posterior, el 6.1.4, se ha realizado la comparación de resultados mencionada. Mediante el estudio de todos los esfuerzos leídos en sendos modelos, se ha concluido lo siguiente:

La primera propuesta del CLT MIX, que basa sus cálculos en el método de acoplamiento a cortante usando el módulo RF-LAMINATE, ha mostrado resultados satisfactorios, siendo el error en las flechas de en torno al 2 % respecto al modelo MEF. Los resultados de deformaciones locales (tecteo) y de compresiones perpendiculares a la fibra no pueden obtenerse directamente, pero sí pueden usarse otros modelos para obtenerlos, como el de tecteo, propuesto en los apartados 11.4, 11.5 y 12.5. La lectura del resultado de compresión paralela a la fibra ha resultado ser menos conservadora que la del modelo MEF, pero esto se debe a un fenómeno propio del método de elementos finitos, por lo que no se ha considerado a efectos de descarte del modelo. Esta propuesta, si bien es más elaborada y trabajosa de construir que la siguiente, ha demostrado ser de gran precisión y fácilmente moldeable, lo que permite su uso en cualquier etapa de un proyecto.

La segunda propuesta del CLT MIX basa sus cálculos en el método Gamma. Los errores obtenidos han sido mayores (como el anteriormente mencionado error del 50 % del lado de la seguridad para la flecha) que, en la primera propuesta, y la mayoría de los resultados no son obtenibles. Por tanto, este modelo simplificado, por la simplicidad de construcción, puede ser utilizado en las etapas iniciales de un proyecto, aunque no se recomienda su uso más allá de estas, debido a la escasa precisión que ofrecen, y usarlo derivaría en un desperdicio de material que entra en conflicto con el ahorro de material que se espera de composiciones como esta.

Para evitar complicaciones relativas a la aplicación del fenómeno de arrastre por cortante (su aplicación no es sencilla), se ha realizado una sola propuesta de cálculo simplificada para el CLT T, que puede consultarse en el apartado 6.2, y que pretende aprovechar las fortalezas del software para obtener los resultados finales sin necesidad de la aplicación de dicho fenómeno. Esta propuesta, como se ha mencionado anteriormente, combina RFEM y RF-LAMINATE.

Tras realizar la comparación con un modelo MEF, en el apartado 6.2.2 se ha concluido que los resultados son satisfactorios, por un lado, porque tan solo los resultados de deformaciones locales y de compresiones perpendiculares a la fibra no son legibles (pero sí son legibles mediante otros modelos o de manera indirecta, en caso de buscar mayor exactitud, como por ejemplo, la posibilidad de medir la compresión perpendicular a la fibra mediante la lectura de los esfuerzos en los apoyos o la lectura de las deformaciones locales mediante el modelo de los apartados 11.4, 11.5 y 12.5). Por otro lado, los resultados de las tensiones tangenciales de rodadura en los tableros transversales han resultado menores en la propuesta que en el modelo MEF, pero este hecho se ha atribuido, nuevamente, a singularidades propias del método de elementos finitos. En el apartado 6.2.3 se estudia el comportamiento de la interfase con mayor exactitud, y se propone otro modelo simplificado, mediante el cual se define cada tirafondo mediante un elemento tipo barra rígida para leer directamente el esfuerzo cortante que este va a tener que resistir en situación de uso.

En los apartados 6.1.4 y 6.2.2 pueden leerse las interpretaciones de los resultados de los modelos MEF y de los resultados de las propuestas.

El CLT MIX y el CLT T son composiciones exclusivas del fabricante español Egoín, por lo que para el estudio de las composiciones de CLT, se ha optado por utilizar las secciones estándares de dicho fabricante. En los apartados 5.1, 5.2 y 5.3 se han presentado ya las composiciones del CLT, CLT MIX y del CLT T respectivamente, en la tabla 3, en la tabla 4 y en la tabla 5, pero por cuestiones de utilidad, se mostrarán en este apartado.

Se han calculado sendas tablas de predimensionamiento para una situación de uso biapoyada en forjados y cubiertas, aplicando una carga uniformemente repartida en la cara superior de la composición. Para dicho cálculo, se han utilizado la primera propuesta simplificada del CLT MIX (apartado 6.1.1), cuya precisión ha quedado probada, y la propuesta simplificada del CLT T (apartado 6.2). Se han considerado las comprobaciones a ELU y ELS, siendo, para los casos del CLT MIX y del CLT T, la flecha de apariencia el mecanismo de fallo mayoritario.

Tabla 3. Secciones estándares de CLT que ofrece el fabricante EGOIN.

SECCIONES ESTÁNDARES DE CLT										
TIPO	Nº	ESPESOR (mm)	COMPOSICIÓN (Gris longitudinales) (mm)							VOLUMEN MADERA (l/m <sup>2</sup> )
EGO-CLT 3 c	1	75	25	25	25					75
	2	90	30	30	30					90
	3	100	30	40	30					100
	4	120	40	40	40					120
EGO-CLT 5 c	5	125	25	25	25	25	25			125
	6	150	30	30	30	30	30			150
	7	170	30	40	30	40	30			170
	8	200	40	40	40	40	40			200
EGO-CLT 7 c	9	210	30	30	30	30	30	30	30	210
	10	240	30	40	30	40	30	40	30	240
EGO-CLT 9 c	11	270	30+30	30	30	30	30	30	30+30	270
	12	300	30+30	40	30	40	30	40	30+30	300

Tabla 4. Secciones estándares de CLT MIX que ofrece el fabricante EGOIN.

SECCIONES ESTÁNDARES DE CLT MIX										
TIPO	Nº	ESPESOR (mm)	COMPOSICIÓN (Gris longitudinales) (mm)							VOLUMEN MADERA (l/m <sup>2</sup> )
EGO-CLT MIX 5 c	1	240	25	25	140	25	25			113
	2	300	25	25	200	25	25			119
	3	340	25	25	240	25	25			125
	4	360	30	30	240	30	30			145
	5	400	40	40	240	40	40			185

Tabla 5. Secciones estándares de CLT T que ofrece el fabricante EGOIN.

SECCIONES ESTÁNDARES DE CLT T										
TIPO	Nº	ESPESOR (mm)	COMPOSICIÓN (Gris longitudinales) (mm)							VOLUMEN MADERA (l/m <sup>2</sup> )
EGO-CLT T 4 c	1	460	20	20	20	400				152
	2	595	25	25	25	520				191
	3	700	30	40	30	600				268

Tabla 8. Tabla de predimensionamiento de CLT biapoyado frente a carga uniforme.

Predimensionamiento CLT												
Luz (m)												
Q <sub>k</sub>	3 m	4 m	4,5 m	5 m	5,5 m	6 m	6,5 m	7 m	7,5 m	8 m	8,5 m	9 m
1 kN/m <sup>2</sup>	1	3	4	4	6	7	8	8	10	11	11	11
2 kN/m <sup>2</sup>	2	4	6	7	8	8	10	11	11	11	12	
3 kN/m <sup>2</sup>	3	6	7	8	8	10	11	11	11	12		
3,5 kN/m <sup>2</sup>	3	6	7	8	8	10	11	11	12			
4 kN/m <sup>2</sup>	4	6	8	8	10	11	11	11	12			
4,5 kN/m <sup>2</sup>	4	7	8	8	10	11	11	12				
5 kN/m <sup>2</sup>	4	7	8	8	10	11	11	12				
5,5 kN/m <sup>2</sup>	4	7	8	10	11	11	12	12				
6 kN/m <sup>2</sup>	4	8	8	10	11	11	12					
7 kN/m <sup>2</sup>	6	8	8	10	11	11	12					

Tabla 9. Tabla de predimensionamiento de CLT MIX biapoyado frente a carga uniforme.

Predimensionamiento CLT MIX							
Luz (m)							
Q <sub>k</sub>	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m
1 kN/m <sup>2</sup>	1	1	1	2	2	4	5
2 kN/m <sup>2</sup>	1	1	2	3	5		
3 kN/m <sup>2</sup>	1	2	3	5			
3,5 kN/m <sup>2</sup>	1	2	4	5			
4 kN/m <sup>2</sup>	2	3	4				
5 kN/m <sup>2</sup>	2	3	5				
5,5 kN/m <sup>2</sup>	2	4	5				
6 kN/m <sup>2</sup>	2	4					
7 kN/m <sup>2</sup>	3	5					

Tabla 10. Tabla de predimensionamiento de CLT T biapoyado frente a carga uniforme.

Predimensionamiento CLT T						
Luz (m)						
Q <sub>k</sub>	6 m	8 m	10 m	12 m	14 m	16 m
1 kN/m <sup>2</sup>	1	1	1	1	2	3
2 kN/m <sup>2</sup>	1	1	1	2		
3 kN/m <sup>2</sup>	1	1	2			
3,5 kN/m <sup>2</sup>	1	1	2			
4 kN/m <sup>2</sup>	1	2	2			
4,5 kN/m <sup>2</sup>	1	2	3			
5 kN/m <sup>2</sup>	1	2	3			
6 kN/m <sup>2</sup>	1	2				
7 kN/m <sup>2</sup>	2	3				

Para la utilización de estas tablas, se han tenido y se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha considerado toda la carga como carga permanente. El usuario debe sumar las cargas permanentes con las sobrecargas de uso para entrar a la tabla con la carga total superpuesta linealmente. El peso propio de las composiciones se ha incluido ya en los cálculos, siendo el material *Pinus Radiata D. Don* ( $520 \text{ kg/m}^3$ ).
- No se ha comprobado la resistencia a fuego de las composiciones.
- Los límites de flechas aplicadas son los siguientes:
  - Integridad: Luz/300.
  - Confort: Luz/350.
  - Apariencia: Luz/300.
- Factores de seguridad:
  - $k_{MOD}$ : 0'8.
  - $k_{DEF}$ : 0'6.
  - $\gamma_m$ : 1'3.
- Los resultados de las tablas de predimensionamiento son solamente orientativos. Hay que analizar cada proyecto según sus condiciones de contorno.

Esta serie de tablas permiten a un usuario del CLT, del CLT MIX o del CLT T estudiar el comportamiento estructural de todas las composiciones de tipo forjado o de tipo cubierta ofrecidas por Egoín frente a una carga uniforme, y le ayuda a elegir, de entre todas, aquella que menor cantidad de madera necesita para resistir la situación de proyecto, lo cual puede ser útil como medio de ahorrar costes. Se recomienda utilizarlas siguiendo la siguiente secuencia:

1. Definir la luz y la carga aplicadas sobre el elemento.
2. Buscar en las tablas de predimensionamiento las secciones de CLT, CLT MIX y CLT T necesarias para resistir dichas condiciones de contorno. Se obtendrá así un número de sección para cada composición.
3. Acudir a las tablas de secciones estándares con los números de sección obtenidos de las tablas de predimensionamiento y observar la cantidad de madera necesaria para cada composición.
4. Decidir, en base a la cantidad de madera y en base a sus características constructivas, la composición y la sección final a utilizar en el proyecto.

Atendiendo solamente a la capacidad resistente en relación con la cantidad de madera utilizada, las composiciones óptimas a elegir se muestran en la tabla 11:

Tabla 11. Tabla de secciones óptimas de CLT, CLT MIX y CLT T atendiendo exclusivamente al aprovechamiento de la madera.

SECCIONES ÓPTIMAS DE CLT, CLT MIX Y CLT T PARA MAYOR APROVECHAMIENTO DE LA MADERA														
Q <sub>k</sub>	Luz (m)													
	3 m	4 m	4,5 m	5 m	5,5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m	14 m	16 m
1 kN/m <sup>2</sup>	CLT 75	CLT 100	CLT 120	CLT 120	CLT 150	MIX 240	MIX 240	MIX 240	MIX 300	MIX 300	MIX 360	MIX 400	T 595	T 700
2 kN/m <sup>2</sup>	CLT 90	CLT 120	CLT 150	CLT 170	CLT 200	MIX 240	MIX 240	MIX 300	MIX 340	MIX 400	T 595	T 595		
3 kN/m <sup>2</sup>	CLT 100	CLT 150	CLT 170	CLT 200	CLT 200	MIX 240	MIX 300	MIX 340	MIX 400	T 595				
3,5 kN/m <sup>2</sup>	CLT 100	CLT 150	CLT 170	CLT 200	CLT 200	MIX 240	MIX 300	MIX 360	MIX 400	T 595				
4 kN/m <sup>2</sup>	CLT 120	CLT 150	CLT 200	CLT 200	CLT 240	MIX 300	MIX 340	MIX 360	T 595	T 595				
5 kN/m <sup>2</sup>	CLT 120	CLT 170	CLT 200	CLT 200	CLT 240	MIX 300	MIX 340	MIX 400	T 700	T 700				
5,5 kN/m <sup>2</sup>	CLT 120	CLT 170	CLT 200	CLT 240	CLT 270	MIX 300	MIX 360	MIX 400						
6 kN/m <sup>2</sup>	CLT 120	CLT 200	CLT 200	CLT 240	CLT 270	MIX 300	MIX 360	T 595						
7 kN/m <sup>2</sup>	CLT 150	CLT 200	CLT 200	CLT 240	CLT 270	MIX 340	MIX 400	T 700						

En caso de que fuese plausible fabricar forjados de CLT MIX para luces menores de 6 metros, cabría valorar una alteración de la tabla 11, en la cual el CLT MIX 240 podría pisar todos los forjados de CLT de más de 120 mm de espesor.

Es inetersante observar cómo la tabla 11 puede construirse sumando las tabla 8 y la tabla 10, del CLT y del CLT T respectivamente, y pisándolas luego con la tabla 9, del CLT MIX. Esto evidencia el paso hacia adelante que supone el CLT MIX respecto al CLT convencional en cuanto ahorro de materia prima, es decir, en cuanto a aprovechamiento de madera. Asimismo, puede observarse también que el CLT T de más de 595 mm de altura de sección es útil de cara a ampliar el espectro en que la madera puede utilizarse para construir forjados. Aun así, es importante considerar otros aspectos que no se reflejan en la tabla 11, como lo es la limitación de altura (y los costes en el transporte derivados de ello), la estética o el comportamiento frente al fuego, entre otros. Tras analizar todos estos aspectos, el CLT convencional podría ser una opción más interesante, dependiendo del proyecto y de su autor.

## 8. Líneas futuras

Este proyecto ha pretendido estudiar en profundidad el comportamiento del CLT MIX y del CLT T mediante una serie de propuestas de modelos simplificados. Si bien los objetivos definidos al inicio del documento se han alcanzado con holgura, a lo largo del desarrollo de este se han abierto flecos que, en pos de la abarcabilidad y debido a la falta de tiempo, se han decidido no cerrar. Esto ha planteado la posibilidad de seguir estudiando en mayor profundidad las composiciones presentadas en este proyecto, siguiendo varias líneas de estudio que se enlistarán en los siguientes puntos:

- Realizar ensayos experimentales del comportamiento estructural del CLT MIX y del CLT T para contrastar los resultados obtenidos tanto con las simulaciones MEF como con las propuestas de modelizado simplificadas, ya sea en situación de uso como en situación de incendio.
- Del hilo de la propuesta anterior, estudiar mediante ensayos el comportamiento frente al fuego del CLT MIX, para observar si las capas superiores de aislante que se encolan entre los largueros resisten su propio peso una vez han perdido el soporte de las capas de tablonos inferiores, como se ha propuesto en el apartado 11.3, del anexo II. En caso de comprobarse que se mantienen en su sitio, esto podría incrementar la resistencia al fuego del CLT MIX más allá de R45, dependiendo de las condiciones de contorno de la composición, en cada caso.
- Estudiar las secciones existentes del CLT MIX y del CLT T y concluir si el abanico ofrecido merece ser reconsiderado en base a unas secciones estandarizadas que abarquen un espectro de usos diferente y más adaptado al mercado.
- Extender las propuestas de modelización simplificada a otros softwares o profundizar y afinar las propuestas realizadas en este estudio en Dlubal Software. Por ejemplo, en este estudio se ha evitado modelizar el CLT T como una serie de barras en T paralelas a las que se les aplica el efecto de arrastre por cortante, debido a la falta de simplicidad que este modelo “simplificado” implicaría. Podría desarrollarse dicha modelización, como modo de completar el presente estudio.
- Generar hojas de cálculo específicas que sirvan para completar el uso de Dlubal Software para las propuestas de modelo simplificado que se han realizado en este documento, de manera que el cálculo del CLT MIX y del CLT T sea aún más fluida que apoyándose en cálculos manuales o en hojas de cálculo no enfocadas específicamente en dichos modelos. Entre otras: comprobación de las ecuaciones de Johansen, sección reducida en situación de incendio, cálculo de la rasante en la interfase del CLT T, cálculo de los coeficientes de eficiencia de la unión del método Gamma, etc.
- Realizar simulaciones del CLT MIX y del CLT T mediante otros softwares más aptos para la aplicación del método de los elementos finitos, que permitan definir, entre otros aspectos, el tipo de unión entre distintos elementos, como, por ejemplo, la unión mediante conectores

entre el CLT y las vigas de MLE del CLT T.

- Estudiar de manera experimental o mediante simulaciones de elementos finitos en softwares especializados la interferencia en la deformación por rodadura que tienen los conectores con las capas de tableros transversales del CLT.
- Ampliar el estudio del fenómeno de tecleo para distintos interejos y espesores de tablón, buscando así la manera para que el estudio de este fenómeno sea lo más rápido posible.
- Optimizar las composiciones estudiadas en este documento, como, por ejemplo: entrecruzar los conectores en el CLT T, de manera que la sección del conector que resiste el esfuerzo rasante en el intereje sea mayor; el CLT T se comporta mejor al revés, es decir, con las vigas de MLE hacia arriba, y no hacia abajo (esto se debe a que en el intereje la rasante es menor y que hay más madera en la zona que más sufre a flexión: la parte inferior, que resiste la tracción).
- Generar tablas de predimensionamiento más útiles para un uso más amplio: comportamiento en situación de fuego, forjados y cubiertas triapoyadas, entre otros.
- Extender el estudio de la optimización del uso de la madera a otras tipologías de forjado o cubierta, como por ejemplo: forjados colaborantes madera hormigón (donde debería medirse también el volumen de hormigón utilizado, lo cual generaría una problemática singular, pues su precio por unidad de volumen variaría dependiendo del precio de la madera y del hormigón en cada momento: esto generaría unas tablas de predimensionamiento “vivas”, que cambiarían a medida que variase el precio de cada una de las dos materias primas), forjados de entramado ligero, tipologías de viga y viguetas, etc.

## 9. Referencias

- [1] X. Borrás, «Breve historia de la madera como material de construcción,» Interempresas, 20 10 2010. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Madera/Articulos/44265-Breve-historia-de-la-madera-como-material-de-construccion.html>. [Último acceso: 25 01 2022].
- [2] G. O. M. C. Sostenible, «Madera: una solución para una construcción más sostenible,» Interempresas, 08 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/308490-Madera-una-solucion-para-una-construccion-mas-sostenible.html>. [Último acceso: 25 01 2022].
- [3] Carpintek, «¿Qué es la madera sostenible?,» [En línea]. Available: <https://www.carpintek.es/que-es-madera-sostenible/>. [Último acceso: 25 01 2022].
- [4] J. Svailenka y M. Kozlovska, «Evaluation of the efficiency and sustainability of timber based construction,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 259, nº 120835, 2020.
- [5] «La madera, un material sostenible en la construcción,» [madera-sostenible.com](http://madera-sostenible.com), 25 01 2020. [En línea]. Available: <https://madera-sostenible.com/opinion/la-madera-un-material-sostenible-en-la-construccion/>. [Último acceso: 25 01 2022].
- [6] M. Michel, *Pino radiata y otras especies vascas con capacidad estructural*, Donostia: Máster en Estructuras, Construcción y Diseño en Madera, 2021.
- [7] «Grupo Gámiz,» [En línea]. Available: [https://www.grupogamiz.com/pdf/pino/Ficha\\_Pino\\_Radiata\\_es.pdf](https://www.grupogamiz.com/pdf/pino/Ficha_Pino_Radiata_es.pdf) . [Último acceso: 25 01 2022].
- [8] «Cálculo estructural: El Método de los Elementos Finitos,» Eadic, 12 04 2017. [En línea]. Available: <https://www.eadic.com/calculo-estructural-el-metodo-de-los-elementos-finitos/>. [Último acceso: 25 01 2022].
- [9] K. Gupta y J. Meek, «A brief history of the beginning of Finite Element Method,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 39, pp. 3761-3774, 1996.
- [10] A. Esarte, «BIM o Metodología BIM (Qué es): más que tecnología,» *Espacio BIM*, 16 01 2020. [En línea]. Available: <https://www.espaciobim.com/bim>. [Último acceso: 25 01 2022].
- [11] «RFEM 5: Software de análisis de estructuras mediante elementos finitos,» Dlubal Software, [En línea]. Available: <https://www.dlubal.com/es/productos/rfem-software-del-mef/que-es-rfem>. [Último acceso: 25 01 2022].

## 10. Anexo I: principios de cálculo del CLT

Existen varios métodos utilizados para el cálculo del CLT, de entre los cuales cabe destacar los dos siguientes: el Método de las Uniones Mecánicamente Unidas y el Método de acoplamiento a cortante, que se estudiarán a continuación en los apartados 10.1 y 10.2 respectivamente.

### 10.1. Método de las Uniones Mecánicamente Unidas (Gamma y Gamma Extendido)

El primero es el Método de las Uniones Mecánicamente Unidas, también conocido como el método Gamma, que se usa principalmente para vigas. Este método es el adoptado por los Eurocódigos (EN 1995-1-1:2004+A1:2008), y se basa en la teoría de elasticidad lineal. Consiste en suponer el elemento a estudio como una serie de capas superpuestas y conectadas mediante uniones mecánicas. En su adaptación al CLT, el método Gamma considera como tablonés sólidos únicamente aquellos alineados en la dirección principal del panel (pongamos, en dirección longitudinal); mientras, los paneles transversales son definidos como las uniones entre los paneles longitudinales, que reducen, por normativa y mediante un coeficiente llamado *factor de eficiencia de la unión* ( $\gamma_i$ ), la inercia y, por tanto, la rigidez a deformación transversal del conjunto. Así, un  $\gamma=1$  representaría una unión totalmente encolada, mientras que un  $\gamma=0$  representaría una carencia total de conexión entre dos elementos.

Se supondrá que el CLT está formado por capas de material homogéneo y que producirá una deformada de forma sinusoidal o parabólica (esto último, para simplificar las ecuaciones obtenidas, de naturaleza diferencial, en ecuaciones lineales).

Las siguientes ecuaciones definen el valor de la inercia eficaz y el valor del factor de eficiencia de la unión a usar en el método Gamma:

$$I_{eff} = \sum_1^i (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2) < I$$

$$\gamma_i = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{l^2 \cdot k_i}\right)^{-1}$$

Donde se usan los valores medios de  $E_i=E_{i,med}$  y las siguientes ecuaciones:

$$A_i = b_i \cdot h_i$$

$$I_i = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}$$

Y  $a_i$  es la distancia entre el eje neutro y el centro de cada sección.

En el caso del CLT, el factor  $s_i/k_i$  no tiene sentido, ya que divide la distancia entre conectores por su módulo de deslizamiento, y el CLT no usa conectores, sino que se encola. En su lugar, ese coeficiente se sustituye por el siguiente:

$$\frac{s_i}{k_i} = \frac{\bar{d}_i}{G_R \cdot b}$$

Siendo,

$\bar{d}_i$  : espesor de la capa.

$G_R$ : módulo de rodadura.

$b$ : ancho de la capa.

Los valores geométricos referenciados en estas ecuaciones pueden extraerse de la ilustración 48.

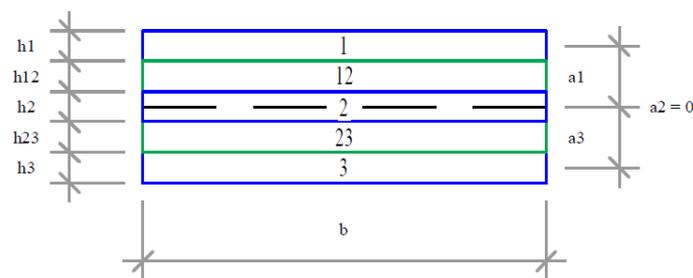


Ilustración 48. Sección de un panel de CLT de 5 capas.

Dejando como resultado la siguiente ecuación para el cálculo de los factores de eficiencia de las uniones:

$$\gamma_i = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i}{l^2} \cdot \frac{\bar{d}_i}{G_R \cdot b}\right)^{-1}$$

De esta manera, se plantea el CLT como la unión de dos o tres capas longitudinales, separadas a una distancia  $d_i$  pero unidas entre ellas mediante capas de tableros transversales que se deforman longitudinalmente en función de su espesor, anchura y módulo de rodadura ( $G_R$ ).

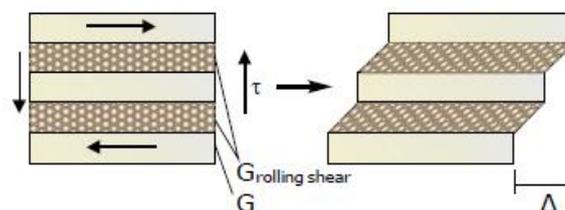


Ilustración 49. Influencia del módulo de rodadura en los tableros transversales del CLT.

En la ilustración 49 puede observarse una simulación del comportamiento a deformación del modelo del CLT.

Respecto al módulo de rodadura, cabe mencionar que su valor depende de factores tan variados como la especie del árbol del que se haya extraído la madera, la densidad de la madera de cada capa, el espesor de laminación, el contenido de humedad, etc., y que la distribución de

esfuerzos a lo largo de todo el elemento y su deformación dependerán en gran medida del valor de este, y que, si bien está universalmente aceptado que su valor se aproxima a un 1/10 del módulo de elasticidad transversal ( $G_0$ ), este ratio depende de la especie y de las condiciones de uso, acercándose más a valores de entre  $1/12 \cdot G_0$  y  $1/20 \cdot G_0$ . Por ello, aunque en muchas bibliotecas el valor del módulo de rodadura se considere de  $69 \text{ N/mm}^2$  ( $1/10 \cdot G_0$ ) para el *Pinus Radiata D. Don*, sería más correcto utilizar un valor cercano a los  $50 \text{ N/mm}^2$ . Este parámetro es de gran importancia en el cálculo de deformaciones, debido a que, para un ratio luz/espesor de 20, la contribución a la deformación debida al módulo de rodadura se mueve en torno a un 22 %, y para un ratio de 30, en torno al 11 %.

Asimismo, la deformación del conjunto dependerá, además del módulo de rodadura, de la luz a salvar, de la carga aplicada, de la geometría de las capas y del grado de unión entre ellas.

Obtenida la inercia eficaz mediante esta metodología, pueden obtenerse la rigidez y las tensiones normales mediante las siguientes ecuaciones:

$$(EI)_{ef} = \sum_1^i (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2)$$

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M}{(EI)_{ef}}$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0.5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot M}{(EI)_{ef}}$$

Y para configuraciones de cinco capas, el valor de la tensión tangencial máxima, que se da en el punto de tensiones normales máximas, se obtiene mediante la ecuación:

$$\tau_{2,max} = \frac{\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0.5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2}{b_2 \cdot (EI)_{ef}} = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 + 0.5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2}{b_2 \cdot (EI)_{ef}}$$

Si bien este método puede ser perfectamente válido para vigas o para composiciones de CLT de 3 y 5 capas, empieza a mostrar carencias a la hora de calcular configuraciones de CLT de 7 o más capas. Esto se debe a su naturaleza, pues se trata tan solo de una adaptación al CLT de un método de cálculo para vigas, donde rara vez se tienen más de tres elementos resistentes y dos uniones (es decir, un total de 5 capas), y que, por ello, no está contemplado en los Eurocódigos.

Para configuraciones de más de 7 capas, de todas formas, existe la posibilidad de realizar una extensión del método Gamma que los Eurocódigos no contemplan, mediante la cual pueden obtenerse los valores y mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales. En esta extensión, solo se permite suponer una aproximación sinusoidal de la deformada del conjunto.

$$[V] \cdot \gamma = s \rightarrow \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & 0 & 0 & 0 & \gamma_1 & s_1 \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} & 0 & 0 & \gamma_2 & s_2 \\ 0 & v_{3,2} & v_{3,3} & v_{3,4} & 0 & \gamma_3 & s_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & v_{m,m-1} & v_{m,m} & \gamma_m & s_m \end{bmatrix}$$

Donde los coeficientes de las matrices son:

$$v_{i,i-1} = -C_{i-1,i} \cdot a_{i-1}$$

$$v_{i,i} = -(C_{i-1,i} + C_{i,i+1} + D_i) \cdot a_i$$

$$v_{i,i+1} = -C_{i,i+1} \cdot a_{i+1}$$

$$C_{j,k} = \frac{b \cdot G_{R,jk}}{d_{j,k}}$$

$$D_i = \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot b \cdot d_i}{l_{ref}^2}$$

$$s_i = -C_{i,i+1} \cdot (a_{i+1} - a_i) + C_{i-1,i} \cdot (a_i - a_{i-1})$$

Donde:

$$z_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b \cdot d_i \cdot o_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b \cdot d_i}$$

$$a_i = o_i - z_s$$

$o_i$ : distancia desde el centro de gravedad de cada capa longitudinal al borde superior del elemento.

$z_s$ : distancia desde el centro de gravedad del conjunto al borde superior del conjunto.

$a_i$ : distancia desde el centro de gravedad de la capa longitudinal  $i$  al centro de gravedad del conjunto.

Entre las ventajas del método Gamma, quizá la más importante es que, gracias al concepto de inercia eficaz, las deformaciones pueden ser calculadas simplemente como el producto de un esfuerzo de flexión, sin tener que considerar términos separados para las deformaciones causadas, por un lado, por la flexión simple, y por otro, las causadas por la flexibilidad de las capas transversales o rodadura, lo cual es beneficioso para un cálculo manual.

Como desventajas, cabe mencionar la dependencia de la inercia eficaz ( $I_{eff}$ ) utilizada en este método matemático ante la luz a salvar: para valores de luz pequeños, el valor de la inercia eficaz decrece más y de manera menos cuadrática respecto al ratio luz/espesor. Este factor, entre otros, hace que este método matricial, aunque se haya probado lo suficientemente exacto como para ser considerado como una alternativa para el cálculo del CLT en diversas normas internacionales y en ETAs de fabricantes de renombre, no sea el que mayor exactitud ofrece.

Este es el método utilizado por RFEM para el cálculo de vigas con uniones mecánicas.

## 10.2. Método de acoplamiento a cortante (Viga de Kreuzinger)

El método de acoplamiento a cortante se sirve de programas de cálculo para, mediante teoría de placas, poder modelizar el comportamiento de capas superpuestas de distintas geometrías y de materiales de distintos módulos de elasticidad, para prácticamente cualquier configuración.

Se definen dos placas superpuestas como dos barras virtuales A y B y se les asocian sus características resistentes. A la barra A se le otorga la rigidez a flexión y a rodadura entre los centros de ambas barras; a la barra B, se le otorgan los valores de “Steiner” (o momentos de inercia mayorados), debido a la distancia que lo separa del eje neutro.

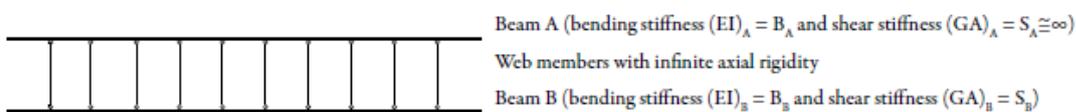


Ilustración 50. Vigas de Kreuzinger (barras virtuales A y B).

Ambas barras se unen mediante elementos infinitamente rígidos, de manera que la deformación en ambas sea la misma (ilustración 50). Superponiendo las tensiones debidas a rodadura y debidas a flexión, se obtiene el resultado final.

Desarrollando el proceso: a la barra A se le otorga una rigidez a flexión igual a la suma de rigideces a flexión de todas las capas individuales que componen la sección:

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

Donde  $B_A$  es la rigidez a flexión de esa barra.

La rigidez a flexión de la barra B se calcula usando el teorema de los ejes paralelos (teorema de Steiner):

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

Adicionalmente, la barra B contiene también rigidez a rodadura. Dicha rigidez  $-S_B$  o  $(GA)_B$  puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

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

Cumpliendo la condición de que las deformaciones son iguales en todas las capas, se obtienen los siguientes esfuerzos:

$$M_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot M_A$$

$$V_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot V_A$$

De esta manera, se obtienen las tensiones de flexión de cada una de las capas que forman el conjunto (ilustración 51):

$$\sigma_{A,i} = \pm \frac{M_{A,i}}{I_i} \cdot \frac{h_i}{2}$$

$$\tau_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot 1.5 \cdot \frac{V_A}{b \cdot h_i}$$

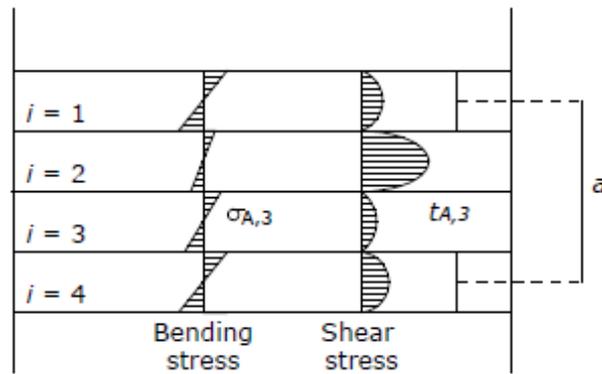


Ilustración 51. Componentes de tensiones de flexión de cada una de las capas del CLT en el método de acoplamiento a cortante.

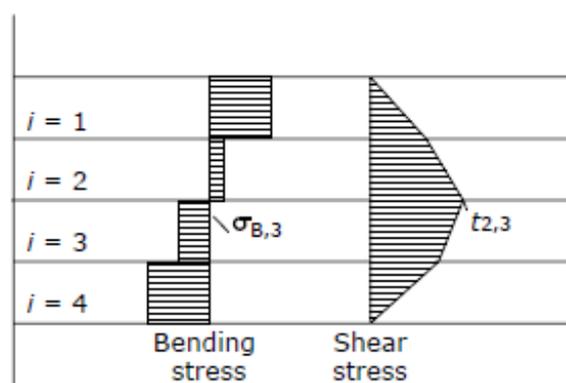


Ilustración 52. Componentes de tensiones axiales de cada una de las capas del CLT en el método de acoplamiento a cortante.

Para calcular los esfuerzos axiales ( $N_{B,i}$ ) y las tensiones generadas por el efecto de rodadura en el resto de capas que forman el conjunto, se usan las siguientes ecuaciones (ilustración 52).

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

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

$$\tau_{Bi,i+1} = \frac{V_B}{B_B} \cdot \sum_{j=i+1}^n E_j \cdot A_j \cdot z_j$$

Superponiendo los gráficos de los dos tipos de tensiones, se obtiene el resultado final, que puede observarse en la ilustración 53:

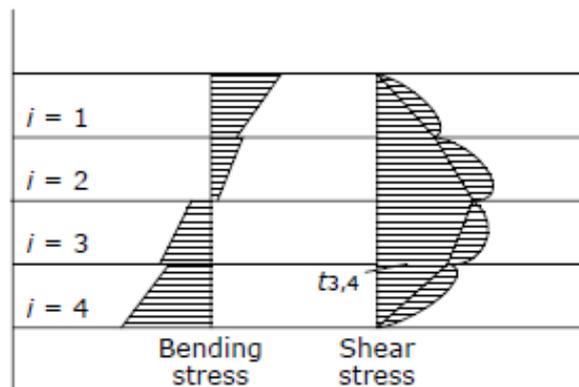


Ilustración 53. Superposición de componentes de flexión del CLT para el método de acoplamiento a cortante.

Este método es aplicable para el cálculo de elementos con placas sólidas entrecruzadas con capas transversales deformables, como el CLT, siempre y cuando la carga que se le aplica sea perpendicular al panel.

Como ventaja, cabe mencionar su independencia respecto a la cantidad de capas que conforman el elemento, a diferencia del Método Gamma simple que se adapta desde los Eurocódigos, y ha demostrado ser más exacto. Es el método utilizado en la norma estadounidense (ANSI/APA PRG 320) y en la 2018 NDS (*National Design Specification for Wood Construction*).

Asimismo, Dlubal ofrece la posibilidad de usar este método en el módulo RF-LAMINATE.

### 10.3. Comportamiento frente al fuego del CLT

En su comportamiento frente al fuego, la madera sufre cambios físicos y mecánicos. Al ser expuesta a una llama, la madera empieza a generar una zona de pirólisis, en la cual sus propiedades mecánicas se reducen tanto que la normativa excluye del cálculo resistente la aportación de la madera que forma parte de dicha zona. Si el efecto del fuego se vuelve más patente, esa capa de pirólisis avanza hacia el interior de la madera, dejando tras de sí una zona de carbonización, que funciona como capa aislante pero que carece, por el contrario, de aportación resistente. En la ilustración 54 pueden observarse sendas zonas que conforman la sección de un elemento de madera expuesto al fuego:

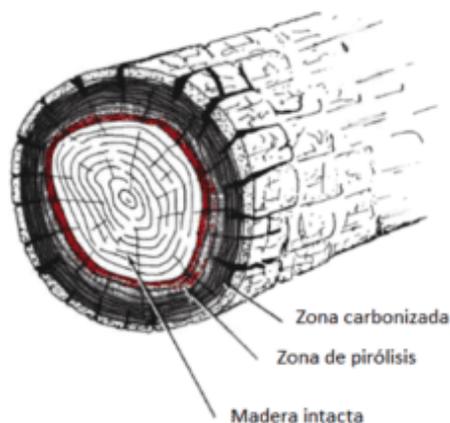


Ilustración 54. Distintas zonas en la sección de un elemento de madera expuesto al fuego.

El CLT puesto en obra, al igual que cualquier otro material de cierta importancia estructural, debe aguantar su función estructural durante el periodo de tiempo exigido por la norma. La *capacidad portante* (R), presenta el tiempo que esa estructura debe mantenerse en pie. Así, un R30 exige el funcionamiento correcto de la estructura a lo largo de 30 minutos de exposición al fuego; un R60, a lo largo de 60 minutos, y así sucesivamente. La capacidad portante se fija dependiendo de la naturaleza de la estructura y de su implicación en la estructura, entre otros factores.

El avance de las zonas de pirólisis y de carbonización está bien estudiado, y puede realizarse mediante simulaciones de una manera bastante exacta. Como alternativa más simple, en cambio, el CTE y los Eurocódigos proponen el Método de la Sección Reducida. El Eurocódigo presenta la siguiente ecuación para modelizar el avance del frente de pirólisis:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_o \cdot d_o$$

Donde:

$d_{ef}$ : profundidad de carbonización total.

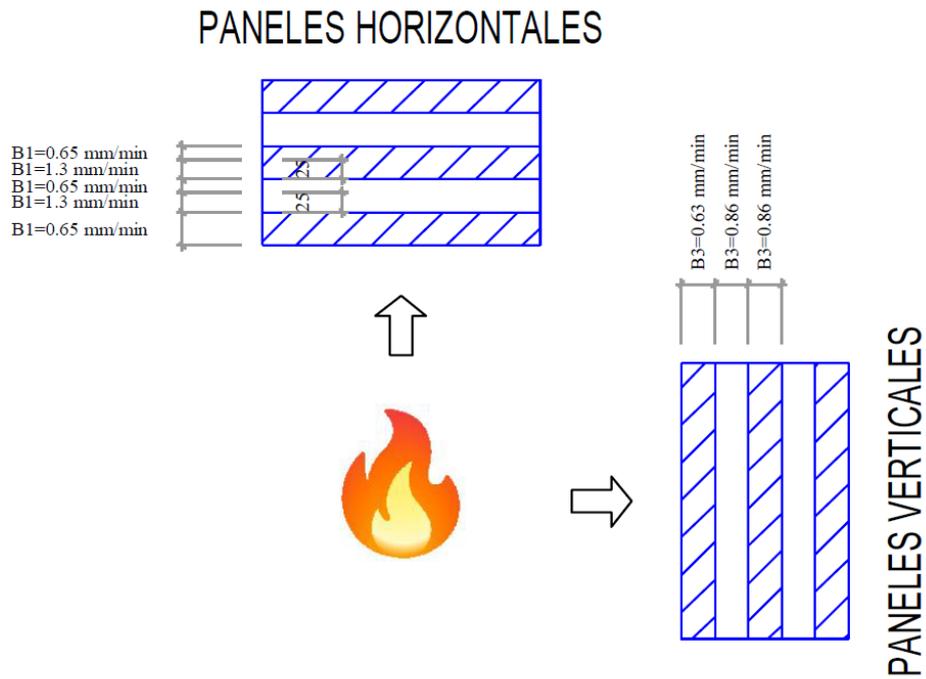
$d_{char,n}$ : se obtiene mediante la tabla 3.1 del BS EN 1995-1-2:2004.

$k_o$ : factor dependiente del tiempo de exposición al fuego.

$d_o = 7$  mm.

Para el CLT, se consideran como correctas las velocidades de carbonización siguientes; diferenciando para elementos verticales y elementos horizontales (ilustración 55):

- Elementos horizontales: 0,65 mm/min la capa inferior. En las capas siguientes, se carbonizan los primeros 25 mm a 1,3 mm/min y el resto de la capa a 0,65 mm/min.
- Elementos verticales: 0,63 mm/min la primera capa; 0,86 mm/min el resto de las capas.



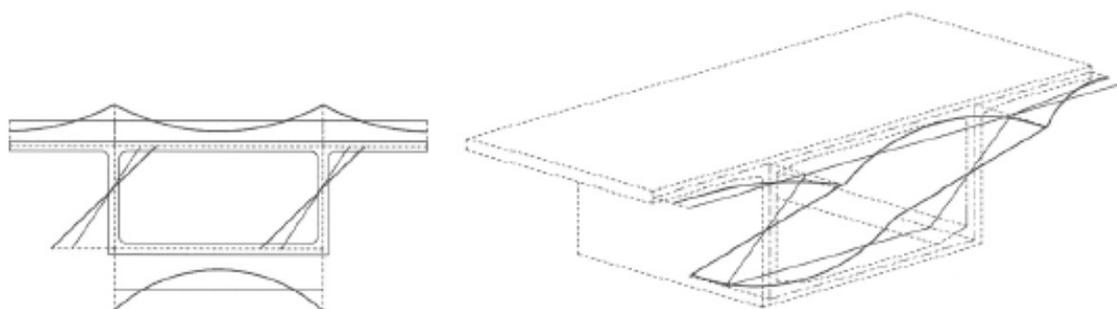
*Ilustración 55. Velocidades de carbonización para forjados y muros de CLT.*

## 11. Anexo II: principios de cálculo del CLT MIX

La realización de una propuesta de modelo de cálculo simplificada del CLT MIX se ha basado en los principios teóricos que pudieran gobernar el comportamiento estructural de dicha composición, y se ha respaldado mediante simulaciones MEF. En este anexo se listan los efectos estudiados durante el proceso de desarrollo de los modelos de cálculo, y las razones para considerarlos o no dependiendo de su influencia.

### 11.1. Efecto de arrastre por cortante en el CLT MIX

El efecto de arrastre por cortante es un fenómeno real en estructuras o componentes estructurales, que se deriva de la simplificación más o menos acertada de la teoría de vigas de Navier-Bernoulli en que se dice que una sección plana antes de deformarse se mantendrá plana después de su deformación por flexión simple. De esta forma, las tensiones que aparecen en dicha sección tienen una distribución lineal a lo largo de esta. Este efecto, que ayuda a simplificar los cálculos, solo podría ocurrir en la realidad en elementos con sección de rigidez infinita a cortante. Si bien esta suposición no es real, sí que sirve como simplificación en gran cantidad de elementos estructurales, y solo aparece en una pequeña serie de casos, como en el de un puente con una sección parecida a la mostrada en la ilustración 56, en el que la sección tendería a deformarse en su plano.



*Ilustración 56. Deformación de una sección tipo debido al efecto de arrastre por cortante.*

Estos casos, ampliando el marco del análisis estructural más allá de la madera, son aquellos en que las distorsiones de sección debidas al reparto no lineal de las tensiones en la sección comprometen la integridad estructural del elemento. Entre ellos, pueden contarse las secciones de puentes de gran tamaño con túneles interiores para el paso de personas o de instalaciones o forjados con perfiles metálicos de pequeño espesor. Estos casos comparten un denominador común: una sección cuyos elementos resistentes son muy estrechos en comparación a las geometrías que los distancian. Las secciones pueden ser tanto cerradas como abiertas.

La resolución de problemáticas que involucran este efecto se basa en compensar las no linealidades en las tensiones de las secciones (y los consecuentes picos de tensiones) mediante el uso de las secciones reducidas (ilustración 57). Mediante este método, se reduce de manera matemática la sección que aporta rigidez, y por tanto la sección efectiva de cálculo es siempre menor a la sección bruta. Para forjados como el CLT MIX, la anchura eficaz de las alas se reduciría proporcionalmente en función del número y espesor de almas de la sección y la distancia entre estas.

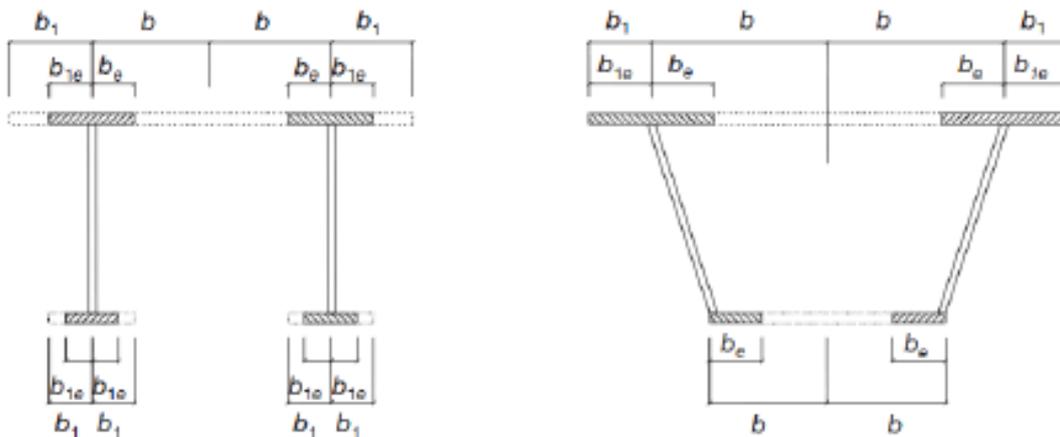


Ilustración 57. Ejemplos de sección reducida debido al fenómeno de arrastre por cortante.

El efecto de arrastre por cortante queda normado en la EAE, pero su efecto depende más de la geometría que del material, y su uso puede ser interesante para ser considerado en el cálculo de otros materiales: esto queda evidenciado en su consideración al cálculo de los puentes de hormigón armado anteriormente mencionados. Cabe sopesar, por tanto, su posible aplicación en el cálculo de la madera.

La EAE excluye de la consideración de los efectos del arrastre por cortante, entre otros, a secciones que cumplan con las siguientes características:

- En el análisis global de estructuras cuyos elementos sean perfiles o vigas armadas en doble T, en edificación principalmente.
- $b_o \leq L/n$ , donde

$b_o$ : mitad de la anchura entre almas.

$L$ : distancia aproximada entre puntos adyacentes de momento flector nulo o, del lado de la seguridad, distancia entre apoyos.

$n = 20$ : para elementos convencionales de edificación.

Por un lado, el CLT MIX se comporta como un elemento en doble T, lo que ya de por sí permite considerarlo como exento de aplicar el efecto de arrastre por cortante. Por otro lado, dado que el intereje entre los largueros del CLT MIX ya está definido como 625 mm, la ecuación del punto siguiente permite despreciar el efecto para luces mayores a 6.25 m; para distancias ligeramente menores, el efecto será mínimo. Estas razones justifican la no consideración del efecto de arrastre por cortante para el cálculo del CLT MIX.

Se ha optado por mencionar este efecto en el presente apartado por la utilidad que pudiera tener para el cálculo del CLT MIX en casos en que se decidiera agrandar el intereje o estrechar los largueros.

## 11.2. Factor de carga compartida en el CLT MIX

Para composiciones en que, como en el CLT MIX, se disponen largueros a una distancia reducida, la normativa ofrece la posibilidad de incrementar el aporte resistente de estos, considerando la aportación de los elementos en su entorno a lo largo de su vida útil. Así, el CTE define el factor de carga compartida o  $k_{sys}$  de la siguiente manera:

*Siempre que el sistema de distribución de carga sea capaz de transferir las cargas de un elemento a otros que estén en sus proximidades, puede tomarse un valor de  $k_{sys} = 1.1$ . La comprobación de resistencia del sistema de distribución de la carga debe realizarse suponiendo una duración corta de las acciones y con el coeficiente parcial de seguridad del material  $\gamma_M$ .*

Debido a la ayuda que aporta al cálculo contar con un coeficiente de mayoración de la resistencia, se recomienda que sea considerado en los cálculos. Dlubal permite solamente modificar el valor de  $\gamma_M$ , por lo que este factor de carga compartida deberá considerarse mediante una modificación de la norma, en la que se debe dividir el valor de  $\gamma_M = 1.3$  por el  $k_{sys}$ ; esto da un valor de  $\gamma_M$  de 1.182.

## 11.3. Comportamiento frente al fuego del CLT MIX

Como se viene mencionando desde las primeras palabras del presente documento, el CLT MIX es un elemento constructivo de carácter innovativo. Este hecho le otorga al fabricante del producto una ventaja competitiva, pero genera complicaciones en cuanto al contraste de información: los ensayos experimentales oficiales son limitados y, en algunos casos, inexistentes. En el caso del CLT MIX, por ejemplo, los ensayos se limitan al comportamiento frente al ruido.

Los ensayos a resistencia y deformación son internos, no oficiales, y sirven más para generar seguridad en el fabricante que como acreditación legal. Los cálculos se respaldan en la teoría de cálculo del CLT, y no en normativa específica del CLT MIX ni en acreditaciones por órganos oficiales.

El aspecto que más incertidumbres genera, en este contexto, es su comportamiento frente al fuego. El presente estudio propone un método de cálculo de la resistencia al fuego del CLT MIX basado en la teoría de la sección reducida recogida en los Eurocódigos y en el CTE. Dentro de la propuesta, se diferencian dos casuísticas. Para diferenciarlas, habrá que retrotraerse a la anatomía del CLT MIX.

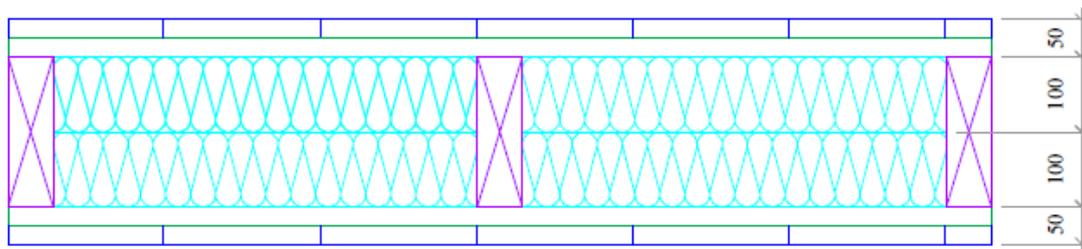


Ilustración 58. Sección real del CLT MIX 300.

En la ilustración 58 se plasma una imagen más fidedigna del CLT MIX que en las imágenes utilizadas para justificar el cálculo resistente, ya que, en ellas, se había suprimido el elemento aislante, debido a que no aporta resistencia alguna al conjunto. Para la comprobación frente al fuego, en cambio, cobra importancia. Como puede apreciarse en la ilustración 58, la capa aislante del CLT MIX se compone de dos capas de 100 mm superpuestas de aislante, ya sea lana de roca, lana de vidrio o fibra de madera.

La carencia de ensayos obliga a considerar su presencia; de este modo, el presente documento no pretende proponer un cálculo exacto de su comportamiento, sino una franja de posibilidades. El resultado final, probablemente, se halle en un punto intermedio de la franja; queda pendiente de ensayo.

En su vertiente más conservadora, las dos capas de aislante se descuelgan y caen al quemarse las dos capas de tableros inferiores. En este caso, los largueros y las dos capas superiores de tableros empezarán a quemarse al quemarse en toda su altura las capas inferiores, y la resistencia al fuego alcanzaría su valor mínimo.

Como argumento de defensa de un cálculo más optimista, podría alegarse que, al haberse encolado el CLT MIX en una bañera de encolado, la capa superior de aislante quedará encolada a las capas de tableros superiores cuando las capas inferiores se hayan quemado. Este hecho, de ser comprobado, incrementaría enormemente la resistencia al fuego del conjunto, ya que, tras quemarse las capas inferiores, solo la mitad inferior de los largueros quedaría expuesta a tres caras. La capa superior de aislante protegería el resto del conjunto. Como punto negativo a considerar para esta hipótesis: la cola de poliuretano pierde propiedades de conexión con el incremento de la temperatura, de manera que esa segunda capa de aislante puede descolgarse antes de lo que lo haría si considerásemos que se mantiene pegada a la madera hasta el fallo resistente de la madera. Además, este cálculo no es válido para el caso en que el aislante sea fibra de madera, ya que se carbonizará al exponerse.

En el aspecto numérico, y sirviéndose de las bases del apartado 10.3, las dos capas inferiores del CLT MIX se quemarán en 46,9 minutos. En casos en que las capas inferiores no sean determinantes en el cálculo resistente, el CLT MIX ofrece una resistencia al fuego mínima de R45. A partir de ese punto, si los aislantes se descuelgan, se empezará a quemar la capa transversal superior; al empezar esta a quemarse, la transferencia de esfuerzos desde los tableros transversales a los largueros no queda asegurada, debido a que aparece el fenómeno de tecteo, lo que inhabilitará la capacidad estructural del conjunto. La resistencia de los largueros queda por tanto en un segundo plano, ya que, aunque estos pudieran soportar los esfuerzos aplicados sobre el conjunto, aparecerán fallos locales en los puntos de aplicación de las cargas debido a que los tableros longitudinales superiores no son capaces de soportar las cargas que descansan sobre ellos por sí mismos, sin la presencia de los tableros transversales, que ayuden a disipar hacia los largueros esos esfuerzos. La situación en la que los tableros superiores a los largueros empiezan a quemarse se ilustra en la ilustración 59.

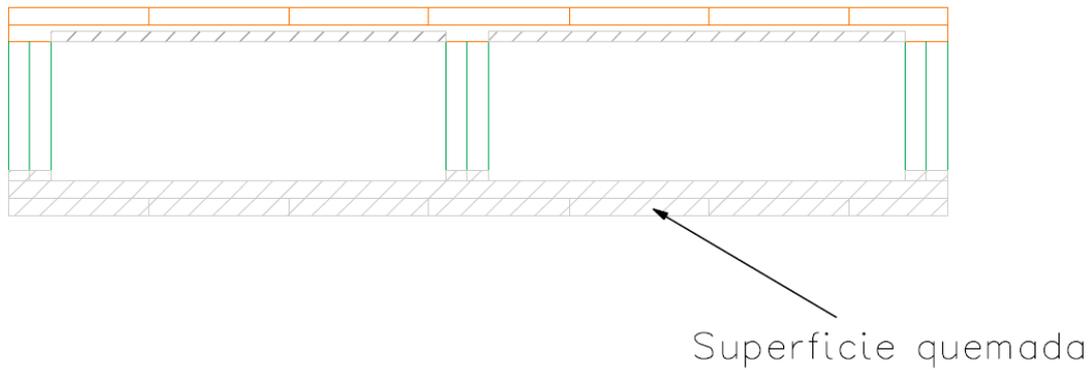


Ilustración 59. Sección reducida del CLT MIX expuesto frente al fuego.

En la ilustración 59 se resalta la sección quemada de los tableros transversales superiores y la sección quemada en la parte inferior de los largueros, por cuestiones de simplicidad, dado que esa imagen pretende solamente representar la razón por la que aparecerá el tecleo, que se estudiará en el apartado 11.4.

En la versión ligeramente más optimista del comportamiento del CLT MIX frente al fuego, en la que la capa superior del aislante quede embebida contra la capa transversal superior del conjunto, se retardará el efecto del fuego en la capa transversal superior y por tanto el tecleo tardará más en aparecer. En casos así, podría justificarse un R60. El fallo vendría por uno de los dos caminos siguientes:

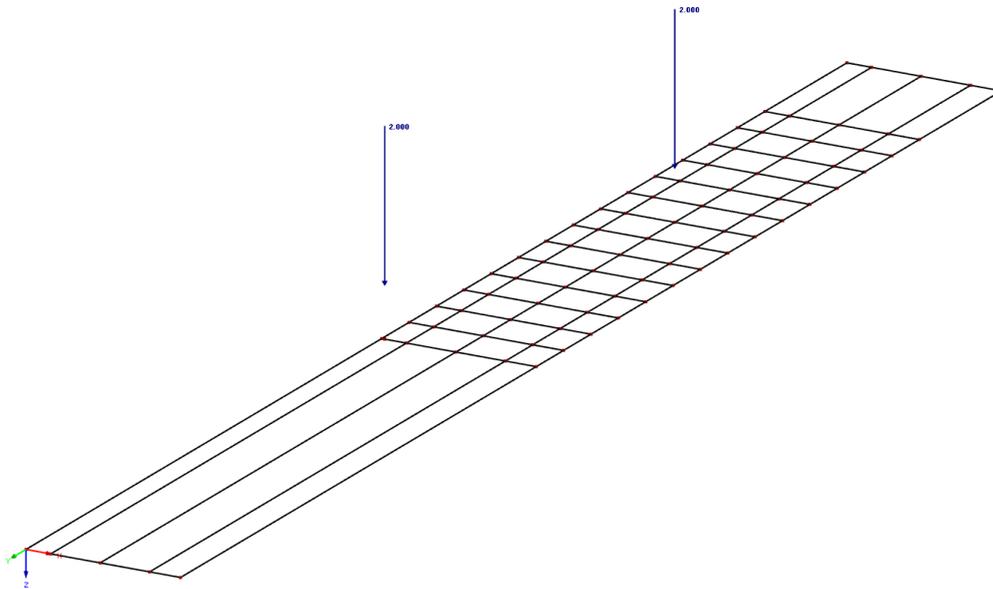
- Fallo resistente debido a que los largueros han alcanzado su límite resistente al considerar la sección reducida. En este caso, solo la mitad inferior del larguero se quemaría hasta el descuelgue de la capa superior del aislante, lo que podría alargar más allá del R60 la resistencia al fuego del CLT MIX, dependiendo de la casuística a estudio.
- La capa superior del aislante se descolgará y se quemará la capa transversal superior, causando el mismo modo de fallo que en el caso más conservador (fallos locales por tecleo).

En caso de querer otorgar mayor seguridad en el cálculo frente al fuego a la composición, se podría integrar una capa de yeso inferior, que podría mejorar el comportamiento frente al fuego del conjunto.

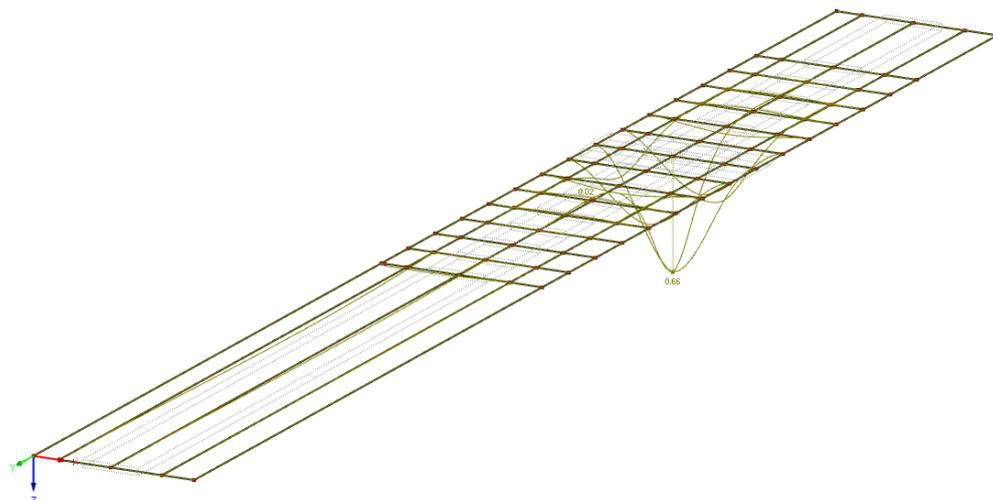
En cualquier caso, la verdadera resistencia al fuego del CLT MIX queda pendiente de aprobación por medio de un ensayo de las composiciones que el fabricante produzca.

## 11.4. Fenómeno de tecleo en situación de uso en el CLT MIX

El fenómeno de tecleo, tal como se ha definido en el apartado 5.2 y para cargas concentradas en el centro del vano que cubren los tablonces transversales de 2 kN (valor fijado por el CTE para la categoría de uso A), no suele ser el mecanismo de fallo principal en una composición de CLT MIX. De hecho, hay que alcanzar cargas concentradas de 7 kN para que este efecto empiece a manifestarse con tablonces de 25 mm de espesor, casos en los cuales habría que aumentar el grosor de tablón a configuraciones de 25, 30 o 40 mm; esas cargas concentradas solo se solicitan a comprobación en las subcategorías de uso C4, D2 y E, que comprenden gimnasios, supermercados y zonas de tráfico de vehículos ligeros, respectivamente.



*Ilustración 60. Modelo mediante RFEM y RF-TIMBER Pro para el estudio del fenómeno de tecleo en el CLT MIX.*



*Ilustración 61. Resultados de las deformaciones en los tablonces transversales al colapsar el CLT MIX en situación de uso.*

Para comprobar el efecto del tecleo y su aparición tanto en situación de uso normal como en situación de fuego, se ha realizado un modelo en Dlubal, dimensionando tanto los largueros (cuya deformación en el eje vertical se ha limitado para poder estudiar con mayor foco los tablones de las capas superiores e inferiores), como los tablones longitudinales y transversales con sus dimensiones. Este modelo, como puede observarse en la ilustración 60, se ha ejecutado como la unión de elementos tipo viga que se entrecruzan en direcciones ortótropas, que es, en definitiva, una manera de modelizar cada tablón y cada larguero de forma individual de la misma manera en que trabajarían las capas superiores del CLT MIX, donde podría aparecer este efecto. Así, las secciones de los largueros son de 60x200 mm<sup>2</sup>, mientras que las secciones de los tablones son de 25x200 mm<sup>2</sup> (tamaño de tablón de uso común por fabricantes).

Se ha calculado que, en situaciones normales (ilustración 61), el tablón transversal se deformará 0.66 mm, siendo el límite de deformación de 2,083 mm (L/300); esto implica que el tablón trabaja a un 31.68 % de su ELU de apariencia. Asimismo, la sollicitación resistente (ELU) de dicho tablón asciende a un 28 %.

### 11.5. Fenómeno de tecleo en situación de incendio en el CLT MIX

En situación de incendio, una vez se consuman las dos capas inferiores de tablones del CLT MIX, considerando que todo el aislante interior se desprenderá y que, por tanto, la superficie inferior de los tablones transversales de las capas superiores va a quedar expuesta, la sección de dichos tablones transversales se verá reducida cada vez más con el paso del tiempo de exposición al fuego.

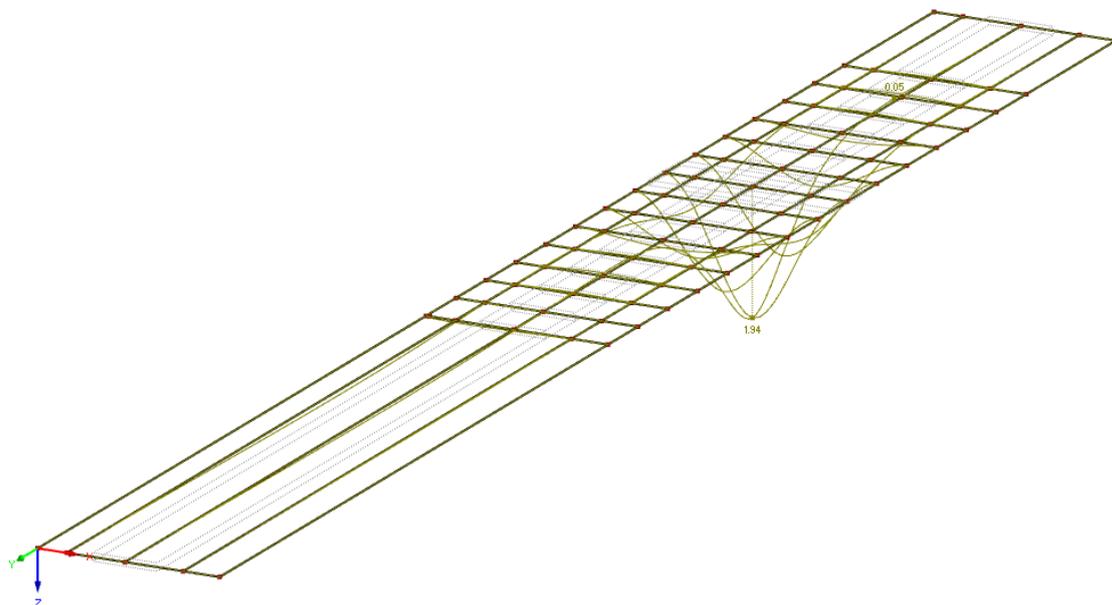


Ilustración 62. Resultados de las deformaciones en los tablones transversales al colapsar el CLT MIX en situación de incendio.

Se han hecho cálculos para situación de incendio en el modelo anteriormente descrito. Los resultados muestran que los tablones trasversales son capaces de transferir los esfuerzos a los largueros para una carga concentrada de 2 kN siempre que la sección tenga una sección reducida de



al menos 15 mm de altura. Para esa sección reducida de tablón transversal, de 15x200 mm<sup>2</sup>, la sollicitación a ELU es del 89 %, pero aumenta más allá de lo permitido por los Eurocódigos para secciones de altura inferior a 15 mm. En este caso, los tablonos se deforman una flecha de 1.94 mm; aunque en situación de incendio no se exija cumplir las limitaciones de flechas, el tablón seguiría por debajo del límite definido para los ELS (ilustración 62).

Traducido a minutos, el CLT MIX descrito en este apartado, con las velocidades de carbonización definidas en el apartado del CLT, y con las cargas concentradas estudiadas en el modelo, el efecto de tecleo se retrasa hasta 7.7 minutos desde que su superficie inferior está expuesta al fuego.

Para distintos espesores de tablón, categorías de uso o modelos de carbonización, habría que realizar estudios individualizados.

## 12. Anexo III: principios de cálculo del CLT T

La realización de una propuesta de modelo de cálculo simplificada del CLT T se ha basado en los principios teóricos que pudieran gobernar el comportamiento estructural de dicha composición, y se ha respaldado mediante simulaciones MEF. En este anexo se listan los efectos estudiados durante el proceso de desarrollo de los modelos de cálculo, y las razones para considerarlos o no dependiendo de su influencia.

### 12.1. Efecto de arrastre por cortante en el CLT T

En el apartado 11.1, respectivo al comportamiento del CLT MIX, se ha definido el efecto de arrastre por cortante y se ha justificado el no uso de este para esas composiciones: su anatomía, así como la relación de dimensiones de los elementos que componen el CLT MIX hacía despreciable este efecto por debajo de los 6.25 metros, luces para las cuales el CLT MIX ni siquiera se recomienda, siendo el CLT convencional una composición más ventajosa en aspectos de tiempos de fabricación y simplicidad anatómica, de transporte y de estudio.

El efecto de arrastre por cortante vuelve a tener que ser comprobado para el CLT T. El primer argumento para su desprecio en el CLT MIX era la anatomía alveolar de este, conformada por una especie de vigas en doble T conectadas entre ellas por sus alas. Este argumento pierde validez para el CLT T, ya que las partes inferiores de las vigas que lo conforman no tienen un elemento transversal que las solidarice entre ellas.

La segunda comprobación es la siguiente:

$$b_o \leq L/n$$

Donde,

$b_o$ : mitad de la anchura entre almas: 0.6 m.

$L$ : distancia aproximada entre puntos adyacentes de momento flector nulo o, del lado de la seguridad, distancia entre apoyos. Se considerará la distancia entre apoyos.

$n = 20$ : para elementos convencionales de edificación.

El resultado de esta inecuación es el siguiente:  $b_o \leq \frac{L}{n} \rightarrow L \geq b_o \cdot n = 0.6 \text{ m} \cdot 20 = 12 \text{ m}$ . O lo que es lo mismo, para vanos superiores a 12 m, el efecto de arrastre por cortante es despreciable. Y, aunque el uso óptimo para el CLT T es a partir de esos vanos, la posibilidad de usarlo para vanos inferiores es real. Por ello, se realizará un estudio más preciso de las implicaciones que el efecto de arrastre por cortante puede tener en vanos inferiores a 12 m.

Para Estados Límite de Servicio, la EAE define un coeficiente  $\psi_{el}$  menor o igual a la unidad, que reduce el ancho eficaz de las alas (o, lo que es lo mismo, la aportación del panel de CLT sobre las vigas). En la imagen del apartado del CLT MIX puede verse la reducción debida a este coeficiente  $\psi_{el}$ .

Para las alas interiores, como las del caso del CLT T, el coeficiente reduce el ancho eficaz del CLT de manera lineal:

$$b_e = \psi_{el} \cdot b$$

Donde  $b$  es la mitad de la anchura entre almas.

La distribución de anchuras eficaces a lo largo de una viga continua puede extraerse de la EAE (ilustración 63):

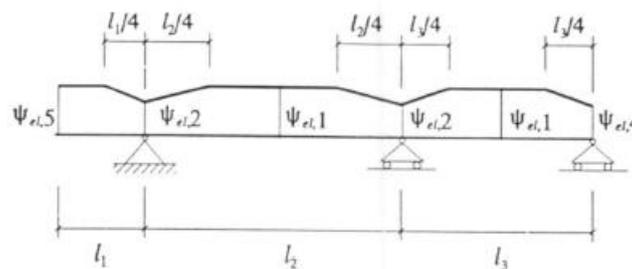


Ilustración 63. Anchuras eficaces según la posición en el vano.

Para la estimación de  $\psi_{el}$  puede adoptarse como longitud de referencia  $L$  la distancia entre puntos de momento nulo. Como simplificación, en vigas continuas pueden adoptarse las longitudes de referencia aproximadas indicadas en la ilustración 64, válidas siempre que la relación de luces entre vanos contiguos no supere 1.5 y que la longitud de eventuales voladizos sea inferior a la mitad de la luz de dos vanos adyacentes:

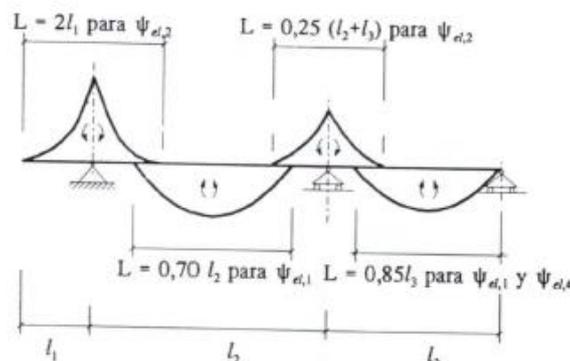


Ilustración 64. Valor de  $\psi_{el}$  según la posición en el vano.

Los coeficientes reductores de la anchura eficaz de las alas,  $\psi_{el}$ , adoptan los siguientes valores, en función del parámetro  $\beta = b_0 \cdot L$ :

- Para todos los casos:

$$\psi_{el,i} = 1 \leftrightarrow \beta \leq 0.02$$

- En centro de vanos isostáticos o continuos (flexión positiva):

$$\psi_{el,1} = 1 \leftrightarrow \beta \leq 0.05$$

$$\Psi_{el,1} = \frac{1}{1 + 6.4 \cdot \beta^2} \leftrightarrow 0.05 < \beta < 0.7$$

$$\Psi_{el,1} = \frac{1}{5.9 \cdot \beta} \leftrightarrow 0.7 \leq \beta$$

- En zonas de apoyos de vigas continuas o voladizos (flexión negativa):

$$\Psi_{el,2} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \left( \beta - \frac{1}{2500 \cdot \beta} \right) + 1.6 \cdot \beta^2} \leftrightarrow 0.02 < \beta < 0.7$$

$$\Psi_{el,2} = \frac{1}{8.6 \cdot \beta} \leftrightarrow 0.05 < \beta < 0.7$$

- En vanos extremos con vigas continuas (flexión positiva):

$$\Psi_{el,4} = \left( 0.55 + \frac{0.025}{\beta} \right) \cdot \Psi_{el,1} \leq \Psi_{el,1}$$

- En zonas de voladizo (flexión negativa):

$$\Psi_{el,5} = \Psi_{el,2}$$

Además, la existencia de cargas puntuales o localizadas de entidad puede reducir significativamente la anchura eficaz respecto a la que se obtendría en presencia únicamente de cargas uniformemente repartidas. En esos casos, el coeficiente reductor adopta las siguientes expresiones:

- Si la carga puntual se aplica en  $L/2$ :

$$\Psi_{el,3} \cong (1.115 - 5.74 \cdot \beta) \leftrightarrow 0.02 < \beta \leq 0.05$$

$$\Psi_{el,3} = \frac{1}{1 + 4 \cdot \beta + 3.2 \cdot \beta^2} \leftrightarrow 0.05 < \beta$$

- Si la carga puntual se aplica en  $x < L/2$ :

$$\Psi_{el,3} = 0.33 \cdot (2 \cdot \Psi_{el,3}(\beta_x^*) + \Psi_{el,3}(\beta_{L-x}^*))$$

Siendo:

$\Psi_{el,3}(\beta_x^*)$  el valor de  $\Psi_{el,3}$  obtenido para un  $\beta_x^* = 0.5 \cdot b_0/x$

$\Psi_{el,3}(\beta_{L-x}^*)$  el valor de  $\Psi_{el,3}$  obtenido para un  $\beta_{L-x}^* = 0.5 \cdot b_0/(L-x)$

- En voladizos sometidos a cargas puntuales en sus extremos:

$$\Psi_{el,5} = \Psi_{el,2}$$

Cuando el efecto de las cargas puntuales o localizadas sea suficientemente significativo en relación con el de las cargas y sobrecargas repartidas, o cuando no se cumplan las condiciones de

aplicación de las longitudes de referencia de la de la ilustración 64, puede utilizarse un coeficiente reductor global único para la sección, obtenido mediante la expresión:

$$\psi_{el} = \frac{\sum M_i}{\sum \frac{M_i}{\psi_{el,i}}}$$

Donde:

$M_i$ : Momento flector en la sección para la carga  $i$  considerada de manera aislada, con su signo algebraico correspondiente.

$\sum M_i$ : Momento flector total que solicita la sección.

$\psi_{el,i}$ : Coeficiente reductor de la anchura eficaz correspondiente a la carga  $i$  considerada aisladamente y obtenido con las expresiones antes definidas. Como longitud eficaz  $L_i$ , se tomará la distancia entre puntos de momento flector nulo para dicha carga.

Una vez conocido el  $\psi_{el}$  en una sección, la distribución transversal de tensiones normales en la anchura del ala puede estimarse de forma suficientemente aproximada como se representa en la ilustración 65:

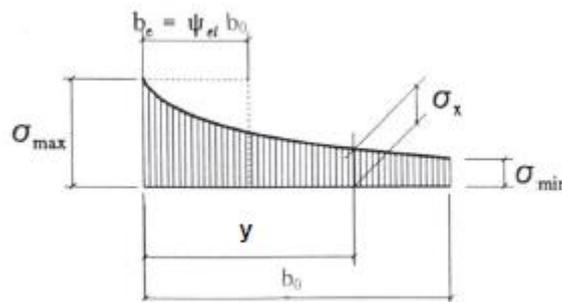


Ilustración 65. Distribución transversal de tensiones normales a lo largo de la anchura del ala.

- Si  $\psi_{el} > 0.2$ :

$$\sigma_{min} = \sigma_{max} \cdot (1.25 \cdot \psi_{el} - 0.25)$$

$$\sigma_x = \sigma_{min} + (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot (1 - y/b_0)^4$$

- Si  $\psi_{el} \leq 0.2$ :

$$\sigma_x = 0 \leftrightarrow y \geq 5 \cdot \psi_{el} \cdot b_0$$

$$\sigma_x = \sigma_{max} \cdot (1 - y/(5 \cdot \psi_{el} \cdot b_0))^4 \leftrightarrow y < 5 \cdot \psi_{el} \cdot b_0$$

La anchura eficaz de las alas se reduce en casos en los que esta se rigidice mediante elementos longitudinales; estos aumentan el efecto de arrastre por cortante. Al no estar reforzado por rigidizadores, no se plasmará el cálculo de dichas anchuras eficaces para el CLT T.

Para los Estados Límite Últimos, los efectos del arrastre por cortante pueden ser estimados, de forma conservadora, mediante los mismos coeficientes reductores elásticos de la anchura eficaz

de las alas,  $\psi_{el}$ , definidos para los ELS. Alternativamente, puede seguirse el criterio más preciso establecido seguidamente:

$$\psi_{ult} = \psi_{el}^{\beta} \geq \psi_{el} \quad \text{Para alas no rigidizadas.}$$

## 12.2. Cálculo de la interfase en el CLT T

Respecto al tipo de unión entre los elementos, se ha mencionado que el CLT MIX se encola, mientras que el CLT T se conecta mediante elementos mecánicos (normalmente, tirafondos). Esto presenta grandes cambios a nivel de cálculo: por un lado, altera la formulación de la deformación de la unión. Para uniones mecánicas, dicha deformación se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma_i = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i}{l^2} \cdot \frac{s_i}{k_i}\right)^{-1}$$

Donde:

$\gamma_i$ : factor de eficiencia de la unión.

$E_i$ : módulo de elasticidad del material de la capa longitudinal.

$A_i$ : superficie de la capa longitudinal.

$l$ : luz a cubrir por la composición.

$s_i$ : distancia entre los tirafondos.

$k_i$ : módulo de deslizamiento de los tirafondos.

Por otro lado, obliga a realizar la comprobación de la resistencia de los elementos mecánicos a rasante. Esto genera mayores complicaciones que en caso de uniones encoladas, debido a las limitaciones de cálculo que presenta Dlubal, como se verá más adelante.

Las comprobaciones de los posibles modos de fallo que puedan aparecer en los tirafondos son una parte importante en el cálculo del CLT T, que complica su estudio, en cierta medida. Los modos de fallo de los tirafondos de diámetro mayor a 6 mm (que son los que se usan para conectar el CLT T) quedan definidos mediante las ecuaciones de Johansen para uniones madera-madera. En la ilustración 66 pueden observarse los distintos modos de fallo de uniones madera-madera, mientras que en las ecuaciones que la siguen, se definen las ecuaciones de Johansen mencionadas:

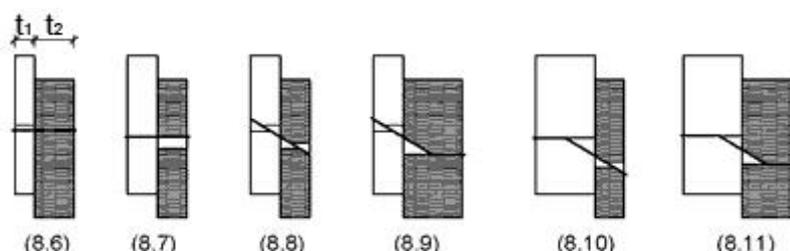


Ilustración 66. Modos de fallo de un conector en uniones entre elementos de madera según las propuestas de Johansen.

$F_{v,Rk}$  es el mínimo de los siguientes:

$$f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d$$

$$f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d$$

$$\frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$1.05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4.5 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$1.05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4.5 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Donde:

$F_{v,Rk}$ : capacidad de carga de los tirafondos por plano de corte y por cada elemento de fijación, en N.

$f_{h,1,k}$ : valor característico de la resistencia al aplastamiento en la pieza de madera 1, en N/mm<sup>2</sup>.

$t_1$ : espesor de la pieza de madera 1, en mm.

$d$ : diámetro del tirafondo, en mm.

$f_{h,2,k}$ : valor característico de la resistencia al aplastamiento en la pieza de madera 2, en N/mm<sup>2</sup>.

$t_2$ : espesor de la pieza de madera 2, en mm.

$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$ : relación entre las resistencias a aplastamiento de las piezas.

$F_{ax,Rk}$ : valor característico de la capacidad de carga al arranque del tirafondo, en N.

$M_{y,Rk} = 0.3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2.6}$ : valor característico del momento plástico del perno.

$f_{u,k}$ : valor característico de la resistencia a tracción, en N/mm<sup>2</sup>.

Para la determinación de los valores  $f_{h,1,k}$  y  $f_{h,2,k}$ , se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$
$$f_{h,0,k} = 0.082 \cdot (1 - 0.01 \cdot d) \cdot \rho_k$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de la fibra,  $d$  es el diámetro del perno y  $\rho_k$  es la densidad de la madera.

### 12.3. Factor de carga compartida en el CLT T

. Para el cálculo del CLT T, puede considerarse en los cálculos el factor de carga compartida ( $k_{sys}$ ) en situaciones no accidentales, en las que la sección no se consume parcialmente, ya que en esos casos la transferencia de esfuerzos hacia las vigas de MLE queda asegurada; en cambio, para casos en los que las capas superior e inferior del CLT estén alineadas con las direcciones de las vigas, en caso de incendio, esta transmisión no podría asegurarse, y el CLT T sufriría un efecto parecido al estudiado en el CLT MIX, donde el efecto de tecleo, agravado por la sección reducida, puede limitar la resistencia del conjunto mediante la aparición de fallos locales.

Debido a la ayuda que aporta al cálculo contar con un coeficiente de mayoración de la resistencia, se recomienda que sea considerado en los cálculos. Dlubal permite solamente modificar el valor de  $\gamma_M$ , por lo que este factor de carga compartida deberá considerarse mediante una modificación de la norma, en la que se debe dividir el valor de  $\gamma_M = 1.3$  por el  $k_{sys}$ ; esto da un valor de  $\gamma_M$  de 1.182.

### 12.4. Comportamiento frente al fuego del CLT T

Existía un problema en el comportamiento frente al fuego del CLT MIX: la falta de ensayos en torno a esta composición hacía complicado anticipar el comportamiento en este tipo de situaciones. Por ello, se han propuesto dos alternativas de comportamiento, entre las cuales se espera que se halle el comportamiento real del CLT MIX. La resistencia al fuego real dependía, principalmente, del comportamiento de la cola una vez las capas inferiores se hubiesen quemado. Esto suponía una gran incógnita en su estudio.

De la misma manera, para el CLT T tampoco se han realizado ensayos a fuego, pero su comportamiento es más predecible: el CLT T se comporta como lo haría el conjunto de una viga de MLE y un panel de CLT unidos mecánicamente, que es, en definitiva, lo que es el CLT T. Deben estudiarse dos mecanismos de fallo:

- El fallo ocurre debido al debilitamiento de la composición en su dirección longitudinal, y todo el conjunto falla entre los puntos de apoyos por medio de un fallo global.
- Ocurre un fallo local entre dos vigas de MLE, debido a que el panel de CLT se ha consumido lo suficiente como para que aparezca el efecto de tecleo, y de este modo las tablas longitudinales no son capaces de transmitir los esfuerzos generados por las cargas a las vigas ni soportar estas por sí mismas.

Las comprobaciones del primer caso son sencillas y directas: bastaría con utilizar el modelo mismo para estudiar la posible aparición de fallos globales del conjunto. Pero al igual que con el CLT MIX, el estudio de la aparición de fallos locales tiene gran importancia, ya que los errores podrían ser locales y aun así condicionar los requisitos resistentes por normativa del forjado en situación de fuego. En la ilustración 67 se observa la sección reducida del CLT que, junto con las vigas, conforma el CLT T:



*Ilustración 67. Comportamiento frente al fuego del CLT T: sección reducida del CLT.*

## 12.5. Fenómeno de tecleo en situación de uso y en situación de incendio en el CLT T

El estudio de fallos locales es, nuevamente, el estudio del tecleo: cuando los tabloncillos transversales no sean capaces de transmitir los esfuerzos generados por las cargas a las vigas de MLE, el forjado no podrá cumplir su función estructural debidamente. En las composiciones de CLT T, las luces que cubren los tabloncillos transversales y que, por tanto, separan las vigas de MLE unas de otras se duplican respecto a las del CLT MIX.

Realizando cálculos parecidos a los realizados en el apartado del CLT MIX se concluye que la transferencia de esfuerzos queda asegurada para una altura de sección del tabloncillo transversal de 19 mm, para situaciones de uso normal, y que, en caso de fallar, fallará primero por ELU.

En situación de incendio, las capas de tabloncillos inferiores se van consumiendo a medida que pasan los minutos, lo que asimismo hace decrecer la sección resistente del CLT.

Para cargas concentradas en el centro del vano que cubren los tabloncillos transversales de 2 kN (valor fijado por el CTE para la categoría de uso A), el efecto del tecleo no aparece. De hecho, hay que alcanzar cargas concentradas de 6 kN para que este efecto empiece a manifestarse con tabloncillos de 30 mm de espesor (los más estrechos utilizados para configuraciones de CLT T), casos en los cuales habría que aumentar el grosor de tabloncillo; el fallo a cortante de los tabloncillos transversales, en este caso, aparecerá al aplicar sobrecargas puntuales de 5 kN cerca del extremo de dichos tabloncillos.

En la ilustración 68 se muestra una imagen del modelo utilizado para realizar los cálculos de tecleo en situación de uso y en situación de incendio.

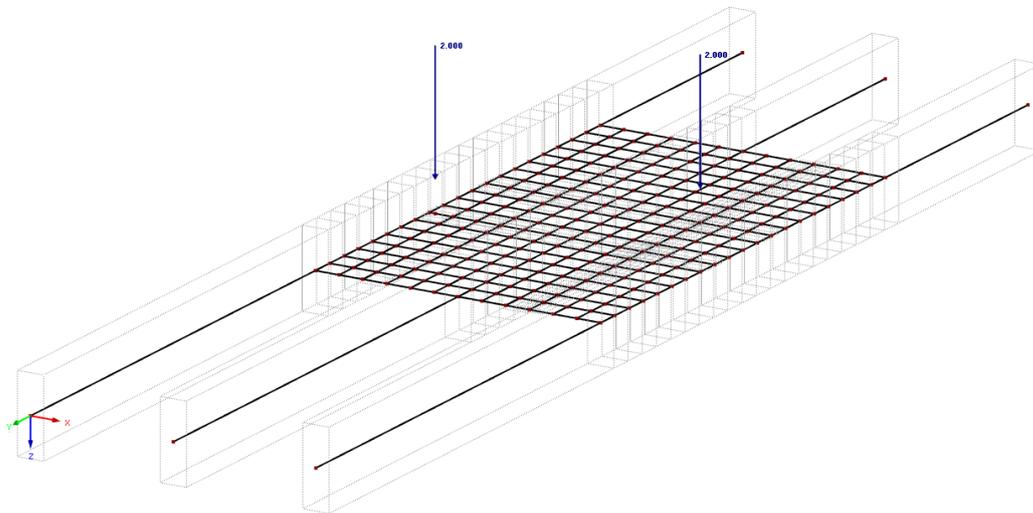


Ilustración 68. Modelo utilizado para estudiar el comportamiento del CLT T a tecleo en situación de uso y en situación de incendio.

Este modelo se ha ejecutado como la unión de elementos tipo viga que se entrecruzan en direcciones ortótropas, que es, en definitiva, una manera de modelizar cada tablón y cada viga de forma individual de la misma manera en que trabajaría el CLT T en la realidad, donde podría aparecer este efecto. Así, las secciones de las vigas son de  $100 \times 400 \text{ mm}^2$ , mientras que las secciones de los tablonos son de  $30 \times 200 \text{ mm}^2$ .

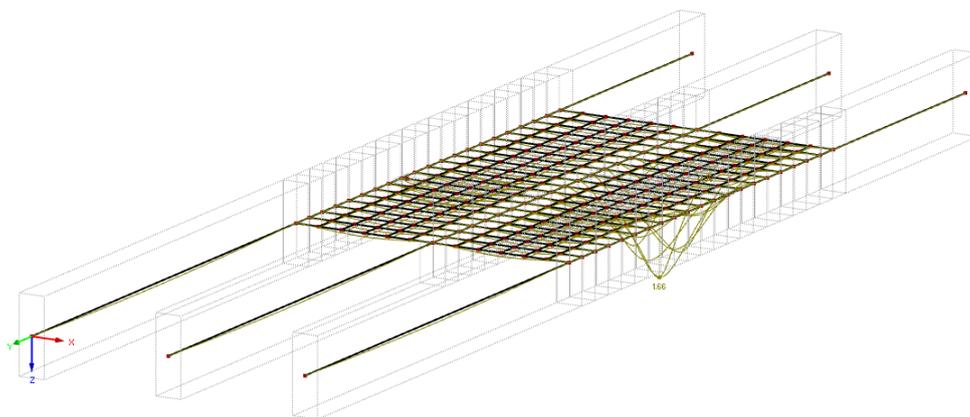
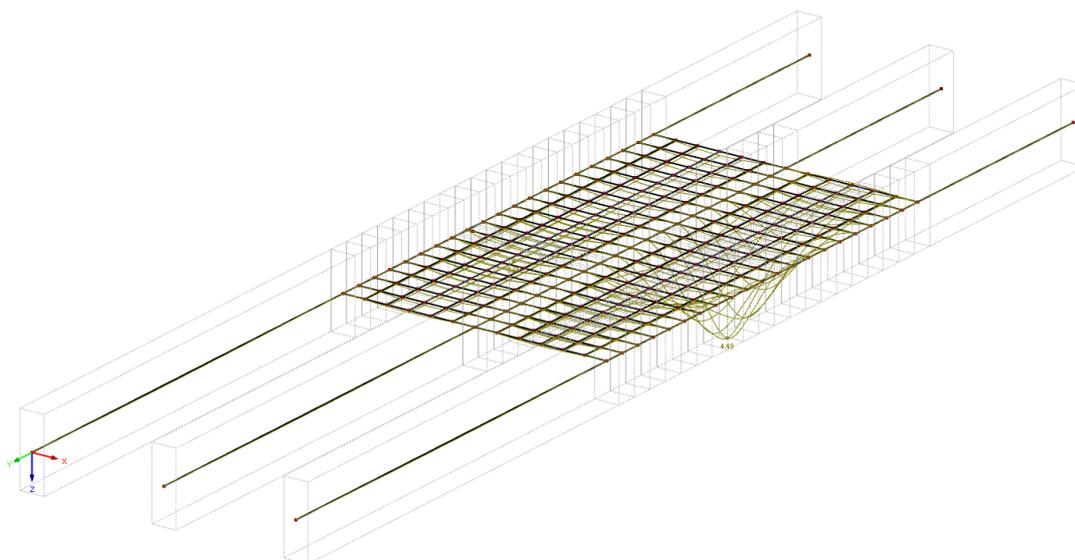


Ilustración 69. Resultados de deformación del modelo utilizado para estudiar el comportamiento del CLT T a tecleo en situación de uso.

Se ha calculado que, en situaciones normales, el tablón transversal se deformará 0.25 mm, siendo el límite de deformación de 4 mm ( $L/300$ ); esto implica que el tablón trabaja a un 6.25 % de su ELU de apariencia. Asimismo, la sollicitación resistente (ELU) de dicho tablón asciende a un 21 %. En situaciones normales en las que la normativa exija sobrecargas de uso puntuales de incluso 7 kN los efectos del tecleo son despreciables (ilustración 69).

En situación de incendio, en cambio, la sección de los tablonos transversales se verá reducida cada vez más con el paso del tiempo de exposición al fuego, y esto hará que el estudio del tecleo cobre cada vez más importancia.

Se han hecho cálculos para situación de incendio en el modelo anteriormente descrito. Los resultados muestran que los tablonos trasversales son capaces de transferir los esfuerzos a las vigas para una carga concentrada de 2 kN siempre que la sección tenga una sección reducida de al menos 19 mm de altura. Para esa sección reducida de tablón transversal, de  $19 \times 200 \text{ mm}^2$ , la sollicitación a ELU es del 96 %, pero aumenta más allá de lo permitido por los Eurocódigos para secciones de altura inferior a 19 mm. En este caso, los tablonos se deforman una flecha de 4.49 mm (ilustración 70).



*Ilustración 70. Resultados de deformación del modelo utilizado para estudiar el comportamiento del CLT T a tecleo en situación de incendio.*

Traducido a minutos, el CLT T descrito en este apartado, con las velocidades de carbonización definidas en el apartado del CLT, y con las cargas concentradas estudiadas en el modelo, el efecto de tecleo se retrasa hasta 53 minutos y 30 segundos desde que su superficie inferior se expone al fuego; lo que daría unas configuraciones de R45 para paneles dispuestos en situaciones de uso residencial.

Para distintos espesores de tablón, categorías de uso o modelos de carbonización, habría que realizar estudios individualizados.

En caso de querer mayor seguridad en el cálculo frente al fuego, se podría integrar una capa de yeso inferior o un falso techo, que podría mejorar el comportamiento frente al fuego del conjunto.

En cualquier caso, la verdadera resistencia al fuego del CLT T queda pendiente de aprobación por medio de un ensayo de las composiciones que el fabricante produzca.

A diferencia del estudio a fuego del CLT MIX, el estudio a fuego del CLT T no presenta tantas complicaciones para ser realizado de manera bastante directa en Dlubal. Así, la sección reducida del CLT de la composición puede realizarse introduciendo la sección reducida de este en el módulo RF-LAMINATE, mientras que las vigas de MLE se pueden calcular frente al fuego directamente, siempre que estas se definan como vigas de sección rectangular, mediante el módulo RF-TIMBER. Estas modificaciones son muy rápidas de hacer, y no habría que estar realizando cálculos más allá de la sección reducida del CLT.

## 12.6. Efectos de la orientación del CLT en el CLT T

Los cálculos realizados hasta aquí se basan en las configuraciones del CLT T fabricadas por Egoín. Como alternativa para situaciones en las que se requiera una resistencia al fuego mayor, se podría girar 90° el CLT: esto haría que su resistencia como conjunto decreciese, debido a que la cantidad de capas de tablonos longitudinales alineados con las vigas es menor y las cantidad de capas que se deforman para consideraciones de cálculo (las transversales) se duplica, pero mejoraría su comportamiento ante fallos locales en situación de fuego, ya que, de la misma manera, aumentarían las capas que trabajan en sentido transversal.

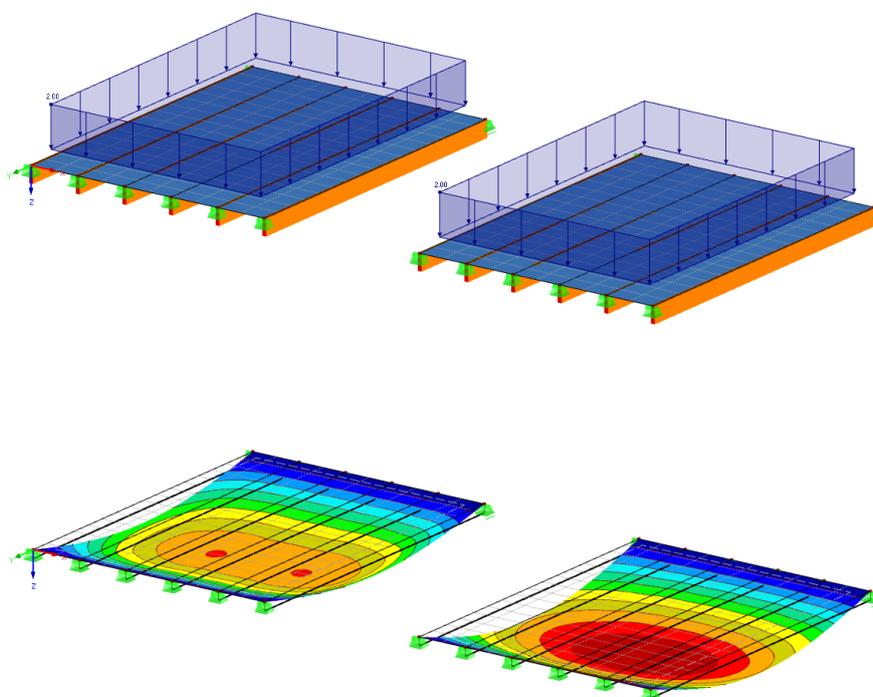


Ilustración 71. Resultados de las deformaciones del CLT T dependiendo de la orientación del CLT (izqda., orientado en el mismo sentido que las vigas; dcha. orientado en sentido contrario a las vigas).

Se han comparado dos modelos de CLT T: uno con la dirección principal del CLT coincidente con la dirección longitudinal de las vigas y otro, con la dirección principal del CLT cruzada con la dirección longitudinal de las vigas. Para ambos casos, la luz considerada ha sido 8 m. En la ilustración 71 los modelos (arriba) y los resultados (abajo) de la situación más limitante observada: la deformación en ELS de apariencia.

Se ha observado que, para la configuración en que la dirección dominante del CLT coincide con la dirección de las vigas, las deformaciones máximas alcanzan los 18.5 mm (69.4 % de su ELS de apariencia), mientras que para la configuración en que la dirección dominante del CLT es perpendicular a la dirección de las vigas, las deformaciones máximas son de 22.5 mm (84.4 % del ELS de Apariencia). Esto muestra el precio a pagar por tener un mejor comportamiento frente al fuego: una pérdida de propiedades en situación de uso. El error ronda el 17.8 %.

El estudio de fallos locales muestra un comportamiento mejor, debido a que la cantidad de madera que resiste este tipo de efecto se ha duplicado respecto a las configuraciones anteriores. Dado que el estudio de tecleo en situaciones de uso ha demostrado carecer de interés en las comprobaciones de tecleo para las configuraciones que cuentan con una sola capa para soportar dichos esfuerzos, no se recalcularán las solicitaciones para configuraciones de dos capas transversales. La situación de fuego, en cambio, es beneficioso estudiarla para obtener las resistencias frente al fuego de estas configuraciones. Sobre un modelo parecido al utilizado para el estudio de las configuraciones de una sola capa transversal, se ha concluido que la resistencia al fuego añadida de estas composiciones es de 4.5 minutos, debido a que la capa transversal superior no sería capaz de aguantar por sí misma las sobrecargas puntuales de 2 kN, sino que necesitaría, además, de una capa longitudinal intermedia con una sección reducida de al menos 14 mm (en el caso anterior, la sección necesaria para la capa intermedia era 19 mm). Esto supone una mejora del 8.2 % en situaciones de cálculo frente al fuego.

Es decisión del autor de cada proyecto decidir si es beneficioso realizar este cambio en la dirección principal del CLT, considerando los beneficios y las desventajas.

