



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera  
laminada en la estación intermodal La Sagrera, en  
Barcelona.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Chust Martínez, Claudio

Tutor/a: Llopis Camps, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# TRABAJO DE FIN DE MASTER

---

Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona

---

*Presentado por*

Chust Martínez, Claudio

---

*Para la obtención del*

Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

*Curso: 2021/2022*

*Fecha: 31/07/2022*

*Tutor: Llopis Camps, Carlos*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la  
estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

**ÍNDICE GENERAL**

<b>MEMORIA.....</b>	<b>9</b>
ANTECEDENTES.....	9
ESTADO DEL ARTE.....	10
<i>La madera en la construcción</i> .....	10
Anisotropía de la madera.....	11
Contenido en humedad de la madera.....	15
La duración de las cargas.....	16
Edad de la estructura.....	17
La calidad de la madera.....	17
Ventajas de la madera en la construcción y su resistencia al fuego.....	18
<i>Contexto medioambiental en el sector de la construcción</i> .....	19
La construcción sostenible.....	19
El ciclo del carbono.....	20
Análisis del ciclo de vida.....	22
Aprovechamiento útil del recurso.....	22
Impacto de los productos derivados de la madera en el efecto de los gases invernadero.....	24
<i>La madera laminada encolada</i> .....	25
<i>Uniones en la madera</i> .....	28
Uniones carpinteras.....	29
Uniones mecánicas.....	29
Conectores tipo clavija.....	30
Conectores superficiales.....	32
Uniones encoladas.....	33
Factores que influyen en la decisión de la unión.....	34
NORMATIVA Y REFERENCIAS.....	35
<i>Normativa</i> .....	35
<i>Bibliografía</i> .....	35
<i>Programas de cálculo</i> .....	35
CONCEPTOS PREVIOS Y CONSIDERACIONES PARTICULARES DE DISEÑO.....	36
<i>De la normativa DB-SE-M</i> .....	36
Bases de cálculo.....	36
Factores de corrección de la resistencia.....	36
Clase de duración de las acciones.....	37
Clase de servicio.....	37
Valor de cálculo de las propiedades del material y las uniones.....	38
Durabilidad.....	40
Protección preventiva frente agentes bióticos.....	40
Protección preventiva frente a agentes meteorológicos.....	41
Protección contra la corrosión de los elementos metálicos.....	41
Materiales.....	43
Madera laminada encolada.....	43
Adhesivos.....	43
Uniones.....	44
Análisis estructural.....	45
Principios generales.....	45
Características de las barras.....	46
Sistemas de barras.....	46
Acciones de cálculo.....	48
Clasificación de acciones.....	48
Valores característicos de las acciones.....	48
Valores representativos de las acciones.....	49
Valores de cálculo de las acciones.....	49
Estados límite últimos.....	51
Tracción uniforme paralela a la fibra.....	51
Tracción uniforme perpendicular a la fibra.....	51

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la  
estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Compresión uniforme paralela a la fibra .....	52
Compresión uniforme perpendicular a la fibra.....	52
Flexión simple .....	53
Flexión esviada .....	53
Cortante.....	54
Torsión .....	56
Flexotracción .....	56
Flexocompresión .....	57
Comprobaciones singulares en piezas de madera laminada .....	58
Estabilidad de piezas de madera .....	59
Pandeo de columnas solicitadas a compresión y flexocompresión .....	59
Vuelco lateral de vigas.....	62
Estados límite de servicio .....	65
Deformación diferida.....	65
Deslizamiento de las uniones .....	65
Consideraciones frente al fuego.....	66
<b>ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....</b>	<b>67</b>
EMPLAZAMIENTO .....	67
DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA PREVIA .....	70
MODELAJE DE LA ESTRUCTURA .....	79
Elementos lineales .....	80
Sistema global y grados de arriostramiento .....	81
Elementos auxiliares de superficie .....	82
Definición de las secciones .....	85
Definición de las acciones de cálculo.....	85
Definición de la combinación de acciones .....	90
ESTUDIO DE SOLUCIONES DE LA CUBIERTA .....	93
<i>Cubierta sin atirantado</i> .....	93
Comprobación de flecha: Integridad .....	93
Comprobación de flecha: Apariencia.....	94
<i>Cubierta con atirantado</i> .....	96
Resultados de las propuestas Pérgola A .....	99
Resultados de la propuesta Pérgola B .....	103
DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA .....	110
Primera comprobación .....	110
Segunda comprobación .....	112
Tercera comprobación.....	114
Cuarta comprobación .....	119
Quinta comprobación .....	124
DIMENSIONAMIENTO DE LAS UNIONES .....	128
<i>Estrategias de diseño</i> .....	129
<i>Propuesta de las uniones y bases de cálculo previas</i> .....	133
Pernos.....	135
Dimensiones .....	135
Calidades.....	135
Pasadores .....	136
Dimensiones .....	136
Calidades.....	136
Cálculo de unión con pernos y pasadores .....	136
Propiedades de los materiales.....	136
Capacidad de carga axial.....	137
Capacidad de carga lateral.....	138
Capacidad de carga combinada axial y lateral .....	139
Disposiciones particulares de cálculo y constructivas .....	139
Cálculo de unión rígida con barras encoladas .....	140
Comportamiento mecánico .....	140

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la  
estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Capacidad de carga .....	141
Combinación de carga axial y lateral .....	143
Unión pilar – cimentación.....	144
Nudo metálico .....	149
Nudo metálico de la pérgola A .....	149
Nudo metálico de la pérgola B.....	150
Unión pilar – viga principal .....	152
Unión pilar – viga interior .....	157
Unión pilar – nudo metálico .....	162
Unión entre correas.....	166
Unión entre vigas de borde .....	171
<b>PLANOS.....</b>	<b>176</b>

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la  
estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

**ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

ILUSTRACIÓN 1 GRUPO DE ÁRBOLES .....	11
ILUSTRACIÓN 2 CORTE MICROSCÓPICO DE LOS VASOS DE LA MADERA .....	11
ILUSTRACIÓN 3 EJES PRINCIPALES Y PLANOS REFERIDOS A LA MADERA .....	12
ILUSTRACIÓN 4 COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS DE DISTINTAS MADERAS CON ACERO S275 .....	13
ILUSTRACIÓN 5 ANISOTROPÍA DE LA MADERA .....	15
ILUSTRACIÓN 6 FENDAS EN A) APOYO DE VIGA CON RESTRICCIÓN DE MOVIMIENTO A LO LARGO DE TODO SU CANTO; B) EMPALME RÍGIDO ENTRE DOS PIEZAS DE MADERA CON CHAPAS METÁLICAS QUE IMPIDEN LA CONTRACCIÓN; C) NUDO DE ESQUINA DE PÓRTICO CON CORONA DE PERNOS .....	16
ILUSTRACIÓN 7 DEFECTOS DE LA MADERA.....	17
ILUSTRACIÓN 8 DÍOXIDO DE CARBONO EMITIDO Y ALMACENADO DURANTE EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE VARIOS MATERIALES (WOOD HANDBOOK 2010, EPA).....	21
ILUSTRACIÓN 9 USOS DE LA MADERA.....	23
ILUSTRACIÓN 10 EJEMPLO DE ASERRADO CUADRADO Y APROVECHAMIENTO DE SECCIÓN .....	23
ILUSTRACIÓN 11 SHEFFIELD WINTER GARDEN.....	25
ILUSTRACIÓN 12 PIEZA DE MADERA LAMINADA ENCOLADA, LA DEL CENTRO CON UNA ANCHURA SUPERIOR A 220MM .....	26
ILUSTRACIÓN 13 UNIÓN CARPINTERA EMBARBILLADO DOBLE .....	29
ILUSTRACIÓN 14 NUDO DE CELOSÍA CON DOS CHAPAS Y PERNOS DE CONEXIÓN .....	31
ILUSTRACIÓN 15 UNIÓN DE MADERA LAMINADA CON VARIAS CHAPAS METÁLICAS EMBEBIDAS Y UNIDAS POR PASADORES Y ALGUNOS PERNOS .....	32
ILUSTRACIÓN 16 CONECTOR DE ANILLO .....	32
ILUSTRACIÓN 17 NUDO RIGIDIZADO DE UN PÓRTICO MEDIANTE BARRAS ENCOLADAS .....	34
ILUSTRACIÓN 18 UNIÓN A EVITAR (PLACA DENTADA) ILUSTRACIÓN 19 UNIÓN A EVITAR (CONECTORES DE ANILLO).....	43
ILUSTRACIÓN 20 MECANISMO DE FIJACIÓN EMPLEADOS.....	44
ILUSTRACIÓN 21 EJEMPLO DE DESVIACIONES INICIALES DE LA GEOMETRÍA DE UN PÓRTICO A DOS AGUAS.....	47
ILUSTRACIÓN 22 LEY DE TENSIONES NORMALES EN FLEXIÓN SIMPLE EJEY, EJEY Y FLEXIÓN ESVIADA DE AMBAS.....	54
ILUSTRACIÓN 23 TENSIONES DE CORTADURA: A) POR FLEXIÓN; B) RODADURA .....	55
ILUSTRACIÓN 24 PIEZA DE CANTO VARIABLE.....	58
ILUSTRACIÓN 25 ECUACIÓN DEL FACTOR REDUCTOR DE RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA SECCIONES DE CANTO VARIABLE CUANDO EL BORDE INCLINADO SE ENCUENTRA TRACCIONADO.....	59
ILUSTRACIÓN 26 ECUACIÓN DEL FACTOR REDUCTOR DE RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA SECCIONES DE CANTO VARIABLE CUANDO EL BORDE INCLINADO SE ENCUENTRA COMPRIMIDO.....	59
ILUSTRACIÓN 27 VALOR DEL COEFICIENTE DE INESTABILIDAD PARA LAS CLASES RESISTENTES DE MADERA LAMINADA ENCOLADA .....	61
ILUSTRACIÓN 28 VALORES DE COEFICIENTE BETA,V PARA VIGAS CON DIFERENTE CONDICIÓN DE CARGA Y RESTRICCIÓN DE LOS APOYOS .....	63
ILUSTRACIÓN 29 BARRIO DE SAN MARTÍN ILUSTRACIÓN 30 BARRIO DE SAN ANDREU .....	67
ILUSTRACIÓN 31 EJECUCIÓN DE LAS OBRAS.....	68
ILUSTRACIÓN 32 MAPA URBANO Y PERÍMETRO DEL PROYECTO .....	68
ILUSTRACIÓN 33 ESQUEMA EN ALZADO DE LA ESTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS SERVICIOS DE LA ESTACIÓN .....	69
ILUSTRACIÓN 34 ALZADO CONCEPTUAL DEL PROYECTO .....	69
ILUSTRACIÓN 35 VISTA CONCEPTUAL DEL PROYECTO EN 3D .....	70
ILUSTRACIÓN 36 PÉRGOLA A MODELADA .....	71
ILUSTRACIÓN 37 MODELAJE DEL SISTEMA ESTRUCTURAL .....	73
ILUSTRACIÓN 38 PARAGUAS INVERTIDO DE MANUEL CANDELA .....	74
ILUSTRACIÓN 39 MODELO DE VIGAS PRINCIPALES Y VIGAS DE BORDE .....	74
ILUSTRACIÓN 40 SUPERFICIE REGLADA PARABOLOIDE HIPERBÓLICO .....	76
ILUSTRACIÓN 41 MODELADO DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.....	77
ILUSTRACIÓN 42 MODELOS DE PUENTES ATIRANTADOS EN ARPA, ABANICO Y COMBINACIÓN DE AMBOS .....	78
ILUSTRACIÓN 43 VIGA INTERIOR MODELADA Y SUS EJES LOCALES.....	81
ILUSTRACIÓN 44 MODELAJE DE LA CUBIERTA (PÉRGOLA A) .....	82
ILUSTRACIÓN 45 MALLA DEL MODELO Y CORREAS DE UNO DE LOS MÓDULOS .....	83

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la  
estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

ILUSTRACIÓN 46 PATRONES DE CARGA EMPLEADOS EN EL MODELO .....	86
ILUSTRACIÓN 47 COEFICIENTES DE PRESIÓN APLICADOS A LA CARGA ESTÁTICA DE VIENTO EN PARAMENTOS VERTICALES .....	88
ILUSTRACIÓN 48 COEFICIENTES DE PRESIÓN APLICADOS A LA CARGA ESTÁTICA DE VIENTO EN PARAMENTOS HORIZONTALES (CUBIERTAS O MARQUESINAS) .....	89
ILUSTRACIÓN 49 DEFORMACIÓN DE LA CUBIERTA PARA LA COMBINACIÓN CARACTERÍSTICA ELS DE VIENTO .....	94
ILUSTRACIÓN 50 DEFORMACIÓN DE LA CUBIERTA PARA LA COMBINACIÓN CASI PERMANENTE ELS .....	95
ILUSTRACIÓN 51 CATÁLOGO DYWIDAG DE REFERENCIA PARA LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y GEOMÉTRICAS PARA LOS CABLES .....	96
ILUSTRACIÓN 52 ESTADO DE DEFORMACIÓN DE UNA CUBIERTA (PÉRGOLA B) CON ANCLAJES UBICADOS EN EL PERIMETRO DE LA CUBIERTA .....	98
ILUSTRACIÓN 53 ELECCIÓN DE REFERENCIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS CABLES .....	109
ILUSTRACIÓN 54 ALZADO DEL MODELO PÉRGOLA B - TERCERA COMPROBACIÓN .....	114
ILUSTRACIÓN 55 ALZADO DEL MODELO PÉRGOLA B - CUARTA COMPROBACIÓN .....	119
ILUSTRACIÓN 56 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS UNIONES .....	129
ILUSTRACIÓN 57 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS UNIONES .....	130
ILUSTRACIÓN 58 UTILIZACIÓN DE HERRAJES QUE COSEN LA TRACCIÓN PERPENDICULAR.....	130
ILUSTRACIÓN 59 UNIONES METÁLICAS QUE SIRVEN DE SOPORTE A BARRAS ENCOLADAS PARA PERMITIR LA CONEXIÓN RÍGIDA DE VIGAS Y PILARES .....	134
ILUSTRACIÓN 60 ALZADO DE LA UNIÓN PILAR-CIMENTACIÓN .....	144
ILUSTRACIÓN 61 PLANTA DE LA UNIÓN PILAR-CIMENTACIÓN .....	145
ILUSTRACIÓN 62 ALZADO NUDO METÁLICO A.....	149
ILUSTRACIÓN 63 PLANTA DEL NUDO METÁLICO A .....	150
ILUSTRACIÓN 64 ALZADO NUDO METÁLICO B.....	150
ILUSTRACIÓN 65 PLANTA NUDO METÁLICO B .....	151
ILUSTRACIÓN 66 DETALLE DE UNIÓN: VIGAS PRINCIPALES Y NUDO METÁLICO (ALZADO DE PÉRGOLA A) .....	152
ILUSTRACIÓN 67 DETALLE DE UNIÓN: VIGA PRINCIPAL Y NUDO METÁLICO (ALZADO DE PÉRGOLA B) .....	152
ILUSTRACIÓN 68 DETALLE DE UNIÓN: VIGA INTERIOR Y NUDO METÁLICO (ALZADO) .....	157
ILUSTRACIÓN 69 DETALLE DE UNIÓN: VIGA INTERIOR Y NUDO METÁLICO (SECCIÓN).....	158
ILUSTRACIÓN 70 ALZADO Y PLANTA DE DETALLE UNIÓN ENTRE NUDO DE ACERO Y PILARES.....	162
ILUSTRACIÓN 71 SECCIÓN DE LA UNIÓN ENTRE CORREAS .....	169
ILUSTRACIÓN 72 SECCIÓN DE LA UNIÓN ENTRE VIGAS DE BORDE .....	174
ILUSTRACIÓN 73 ALZADO DE LA UNIÓN ENTRE VIGAS DE BORDE Y PRINCIPALES.....	175
ILUSTRACIÓN 74 PLANTA DE LA UNIÓN ENTRE VIGAS DE BORDE Y VIGAS PRINCIPALES .....	175
ILUSTRACIÓN 75 MODELADO DE LA PÉRGOLA EN AUTOCAD .....	176

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la  
estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

**ÍNDICE DE TABLAS**

TABLA 1 COMPARACIÓN DE LAS TENSIONES DE CÁLCULO EN MPA ENTRE MADERAS, ACEROS Y HORMIGÓN .....	13
TABLA 2 ENERGÍA DE COMBUSTIBLES FÓSILES UTILIZADA EN LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	19
TABLA 3 DIÓXIDO DE CARBONO EMITIDO Y ALMACENADO DURANTE EL PROCESO DE FABRICACIÓN (FERGUSON ET AL. FWPRDC).....	21
TABLA 4 FACTOR DE ALTURA Y VOLUMEN APLICADOS A LA RESISTENCIA DE LA MADERA.....	37
TABLA 5 CLASE DE DURACIÓN DE LAS ACCIONES.....	37
TABLA 6 COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD .....	38
TABLA 7 VALORES DE KMOD ADOPTADOS .....	39
TABLA 8 NIVEL DE PENETRACIÓN NP .....	41
TABLA 9 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE LOS ELEMENTOS METÁLICOS .....	42
TABLA 10 TIPOS DE ADHESIVO PARA MADERA LAMINADA ENCOLADA .....	43
TABLA 11 COEFICIENTES DE SIMULTANEIDAD PARA COMBINACIÓN DE ACCIONES CONSIDERADAS EN PROYECTO .....	49
TABLA 12 COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD PARA SITUACIÓN PERSISTENTE O TRANSITORIA Y SITUACIÓN ACCIDENTAL	50
TABLA 13 COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD ELS .....	50
TABLA 14 VALOR DE BETA TEÓRICOS Y RECOMENDADOS SEGÚN VARIAS CONDICIONES DE CONTORNO .....	60
TABLA 15 VALORES DEL COEFICIENTE DE VUELCO LATERAL, KCRIT PARA VIGAS DE SECCIÓN RECTANGULAR .....	64
TABLA 16 VALOR DE KDEF PARA LA MADERA LAMINADA ENCOLADA EN FUNCIÓN DE LA CLASE DE SERVICIO .....	65
TABLA 17 VALORES DE KSER PARA ELEMENTOS DE FIJACIÓN DE TIPO CLAVIJA EN N/MM .....	65
TABLA 18 ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA, MATERIAL Y DIMENSIONES PREVIAS .....	76
TABLA 19 PROPIEDADES DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA GL26H INTRODUCIDAS EN EL MODELO SAP2000.....	84
TABLA 20 PROPIEDADES DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA GL28H INTRODUCIDAS EN EL MODELO SAP2000.....	84
TABLA 21 PROPIEDADES DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA GL32H INTRODUCIDAS EN EL MODELO SAP2000.....	84
TABLA 22 PROPIEDADES DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA GL36H INTRODUCIDAS EN EL MODELO SAP2000.....	85
TABLA 23 SECCIONES ADOPTADAS EN EL MODELO DURANTE EL PREDIMENSIONAMIENTO .....	85
TABLA 24 LISTADO DE COMBINACIONES DE ACCIONES Y COEFICIENTES APLICADOS A LOS CASOS DE CARGA.....	92
TABLA 25 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 1 – PILARES .....	111
TABLA 26 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 1 - VIGAS DE BORDE .....	111
TABLA 27 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 1- VIGAS DE BORDE .....	112
TABLA 28 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 1-VIGA PRINCIPAL (EXTERIOR) .....	112
TABLA 29 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 1-VIGA PRINCIPAL (INTERIOR).....	112
TABLA 30 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 2 - CORREAS .....	113
TABLA 31 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 2 - VIGAS PRINCIPALES .....	113
TABLA 32 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 2- CORREAS.....	114
TABLA 33 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 2- CRUCES DE SAN ANDRÉS .....	114
TABLA 34 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 3 – CORREAS .....	115
TABLA 35 SECCIÓN - COMPROBACIÓN 3 – CORREAS .....	115
TABLA 36 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 3 - CRUCES DE SAN ANDRÉS.....	116
TABLA 37 SECCIÓN - COMPROBACIÓN 3 - CRUCES DE SAN ANDRÉS .....	116
TABLA 38 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 3 – PILARES .....	116
TABLA 39 SECCIÓN - COMPROBACIÓN 3 – PILARES.....	117
TABLA 40 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 3 - VIGAS DE BORDE .....	117
TABLA 41 SECCIÓN - COMPROBACIÓN 3 - VIGAS DE BORDE .....	117
TABLA 42 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 3 - VIGAS INTERIORES .....	118
TABLA 43 SECCIÓN - COMPROBACIÓN 3 - VIGAS INTERIORES.....	118
TABLA 44 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 3 - VIGAS PRINCIPALES .....	118
TABLA 45 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 4 – CORREAS .....	120
TABLA 46 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 4 - CRUZ DE SAN ANDRÉS.....	120
TABLA 47 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 4 – PILARES .....	121
TABLA 48 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 4 - VIGAS DE BORDE .....	121
TABLA 49 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 4 - VIGAS INTERIORES .....	122
TABLA 50 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 4 - VIGAS PRINCIPALES .....	122

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la  
estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

TABLA 51 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 4 - CRUCES DE SAN ANDRÉS.....	123
TABLA 52 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 4 - VIGAS DE BORDE .....	123
TABLA 53 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 4 - VIGAS INTERNAS.....	124
TABLA 54 MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 4 - VIGA PRINCIPAL (EXTERIOR).....	124
TABLA 55MODIFICACIÓN-COMPROBACIÓN 4 - VIGA PRINCIPAL (INTERIOR).....	124
TABLA 56 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 5 - CORREAS .....	125
TABLA 57 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 5 - VIGAS PRINCIPALES .....	125
TABLA 58 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 5 - VIGAS DE BORDE .....	126
TABLA 59 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 5 - CRUCES DE SAN ANDRÉS.....	126
TABLA 60 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 5 – PILARES .....	127
TABLA 61 APROVECHAMIENTO - COMPROBACIÓN 5 - VIGAS INTERNAS.....	127
TABLA 62 ESPECIFICACIONES DE LA NORMA DIN 1052 PARA LAS ARANDELAS DE PERNOS SOBRE SUPERFICIE DE MADERA EN MM.....	135
TABLA 63 ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES PARA PERNOS Y TUERCAS .....	135
TABLA 64 UNIONES CON PERNOS. SEPARACIONES Y DISTANCIAS MÍNIMAS .....	140
TABLA 65 SEPARACIONES Y DISTANCIAS MÍNIMAS PARA PASADORES .....	140
TABLA 66 DISTANCIAS Y SEPARACIONES MÍNIMAS EN BARRAS SOMETIDAS A CARGA AXIAL POR RIBERHOLT .....	141
TABLA 67 DISTANCIAS MÍNIMAS EN BARRAS ENCOLADAS EN DIRECCION PARALELA A LA FIBRA CON CARGA LATERAL.....	142

# MEMORIA

## ANTECEDENTES

El antecedente principal que sirve de referencia a este trabajo corresponde a la parte técnica de un proyecto presentado a licitación: “Servicios para la redacción de los proyectos de construcción de la arquitectura, las instalaciones y la urbanización de la estación de la Sagrera, en Barcelona. Bloque A y Bloque B”. Con número de expediente: 2020-IN-0017.

La documentación entregada a concurso formaría parte de los criterios no evaluables mediante fórmula, y estaría elaborado por la colaboración de tres empresas en UTE: las empresas SENER, JDVDP y AUDING-INTRAESA, que elaborarían juntas un documento técnico que incluiría una memoria de proyecto y, entre otros apartados justificativos, la propuesta de una estructura alternativa a la gran pérgola de acero que iba a cubrir la estación intermodal. En este nuevo proyecto sería la madera quien cobraría un mayor protagonismo en la estructura por diversas razones. Por un lado, se lograría una solución con mejor desarrollo sostenible; por otro se aliviaría a la cimentación de cargas excesivas debidas a la densidad del acero (siendo esta cimentación un elemento importante ya que constituye la parte superior del paso subterráneo) y, finalmente, logrando una mayor integración y coherencia al corredor verde y las áreas próximas.

Sin embargo, respetar la forma de la estructura, su estilo estético y sus dimensiones haciendo uso de otro material suponen un reto. El módulo de elasticidad de la madera (más bajo que el del acero) y las elevadas dimensiones que deben alcanzar las vigas en voladizo, hacen imposible el cumplimiento de las flechas por apariencia e integridad estructural. Para superar este problema, se planteó añadir un sistema de atirantado que se alzara por encima de la cubierta y pudiera controlar los desplazamientos y las deformaciones a largo plazo.

Este trabajo toma el documento mencionado como inicio e inspiración para el cálculo, la concreción de soluciones y el diseño y optimización de la estructura y sus uniones, de modo que se cumplan las exigencias básicas de calidad que debe cumplir toda estructura en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad.

## ESTADO DEL ARTE

### La madera en la construcción

Eduardo Torroja en su libro *Razón y Ser de los tipos estructurales*, introduciría la madera estructural del siguiente modo:

*“La madera es cronológicamente el primer material capaz de resistir, por igual, a tracción y compresión, según la dirección de sus fibras. Es el único material vivo que se emplea, en grande, en la construcción, y, como todo lo que proporciona la vida, es algo más adaptable, menos rígido y esquemático que los otros. No hay dos piezas iguales en sus fibras y nudos, como no son nunca iguales las huellas de los dedos humanos; y el atractivo que tiene la madera procede, en gran parte, de esas cualidades vitales.”*

La personalidad de la madera como material de construcción (bien sea cuando nos refiramos a sus fortalezas o a sus debilidades) es debido principalmente a aquella etapa en la que la madera formaba parte del árbol.

Desde un punto de vista mecánico no hay duda de que se trata de un material eficiente. Su composición submicroscópica está formada de pequeñas fibras huecas que resultan muy útiles durante el crecimiento del árbol (hacen que estas secciones huecas aligeren el peso del tronco y son suficientes para constituir la integridad del árbol).

Las cargas principales que soporta durante esta fase de desarrollo son el propio peso del árbol y la acción del viento. Son estas últimas las más severas. Su sección se ve sometida a una flexión constante y sus fibras desarrolla una elevada rigidez para soportar tracciones y compresiones a lo largo de su directriz.

Por otro lado, (en sentido perpendicular a estas fibras) y en menor grado de importancia, las microfibrillas que presentan una menor rigidez actúan como zunchos que atan el conjunto de este haz de fibras principales y evitan el posible pandeo del árbol.

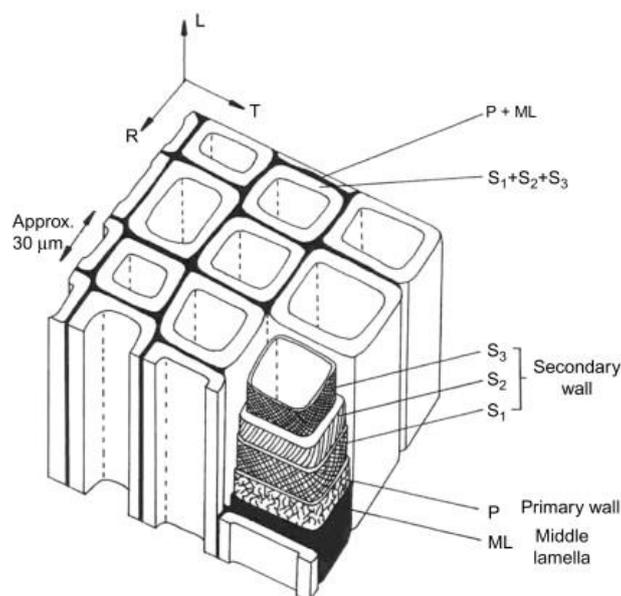
Es esta realidad la que consideramos cuando nos referimos a la madera y pretendemos llevarla al diseño y a la construcción de una estructura. La debilidad del material queda visible cuando se hace un uso distinto al que tuvo que soportar el árbol durante su vida.



*Ilustración 1 Grupo de árboles*

## Anisotropía de la madera

En esta línea de inconvenientes podemos comprobar que se produce una situación desfavorable cuando aparecen acciones concentradas y perpendiculares a las fibras. Estas acciones (si son severas) pueden causar el aplastamiento o el arranque de las fibras agotando la sección. De esto puede deducirse que la madera no es un material isótropo como lo puede ser el acero o el hormigón (materiales que presentan sus mismas capacidades físicas y mecánicas en cualquier dirección). En el estudio de una estructura de madera, además de la magnitud de los esfuerzos, también es relevante este aspecto, la dirección de las sollicitaciones.

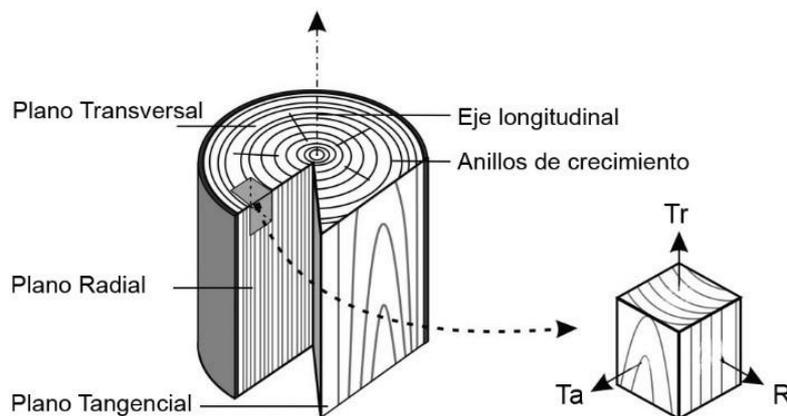


*Ilustración 2 Corte microscópico de los vasos de la madera*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Esta realidad nos lleva a una nomenclatura más extensa a la hora de comprender la resistencia del material, aunque no deja de ser una clasificación orientada a cada dirección de referencia (representada en sus ejes principales). Estos ejes son importantes y nos permitirá analizar con rigor (más tarde) la capacidad resistente de la madera:

- Eje Axial o longitudinal. Paralelo a la directriz del árbol y de sus fibras.
- Eje Radial. Transversal, perpendicular al eje Axial y al mismo tiempo corta al eje del árbol.
- Eje Tangencial. Perpendicular al eje Radial y Axial.



*Ilustración 3 Ejes principales y planos referidos a la madera*

A modo de valor porcentual se puede decir que en dirección longitudinal (axial) si la madera resistiera tensiones normales del valor del 100% (considerando que es esta la mejor de sus resistencias), en el caso de la dirección radial podría decirse que resiste un 15% de esta proporción y en el caso de la dirección tangencial, un 9%.

Es importante mencionar que, cuando realizamos un análisis estructural o dimensionamiento, se suele simplificar el problema en dos direcciones: Cuando la acción es paralela a las fibras (axiles y flexiones) y cuando la acción es perpendicular a las fibras, dirección que recoge el eje radial y eje tangencial.

De lo mencionado se desprende que el comportamiento estructural de la madera es bueno si existe un acuerdo entre su esfuerzo y la orientación de las fibras. Mientras exista una distribución paralela a ellas, tendrá buen comportamiento, pero, por el contrario, si estas acciones se desvían, su rendimiento empeorará llegando a un punto en que la disposición de la madera resulte inadecuada, sobre todo cuando estas acciones supongan la tracción perpendicular de las fibras (en cuyo caso su resistencia es muy pequeña).

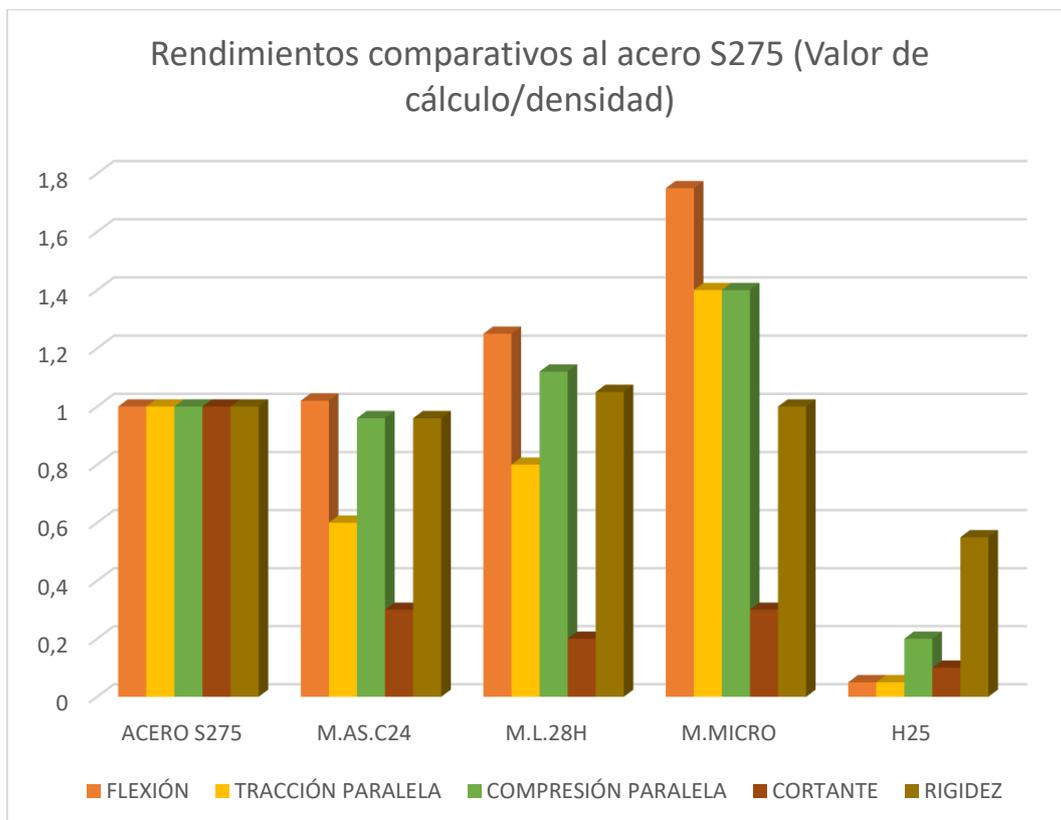
*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

La anisotropía es una realidad que impide que muchas de las soluciones constructivas más sencillas y convencionales en acero y en hormigón no puedan hacerse en madera. Sin embargo, es oportuno analizar comparativamente las resistencias de estos materiales puesto que es posible lograr estructuras con una mayor eficiencia y economía.

Material	Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Mod. Elast.
		Paral.	Perp.	Paral.	Perp.		
M. Aserrada C24	14,77	8,61	0,25	13,54	1,54	2,50	11.000,00
M. Laminada Gh28	17,92	12,48	0,29	16,96	1,92	2,50	12.600,00
Acero S275	262,00	262,00		262,00		151,00	210.000,00
Acero S355	338,00	338,00		383,00		195,00	210.000,00
Hormigón H25	1,20	1,20		16,70		1,20	37.200,00

*Tabla 1 Comparación de las tensiones de cálculo en MPa entre maderas, aceros y hormigón*

La siguiente gráfica muestra comparativamente los rendimientos de varios materiales respecto al acero S275 teniendo en cuenta la densidad de cada material. Los materiales comparados son: S275 (acero comparado consigo mismo), C24 (madera aserrada), GL28h (madera laminada encolada), M MICRO (madera microlaminada) y H25 (hormigón).



*Ilustración 4 Comparación de rendimientos de distintas maderas con acero S275*

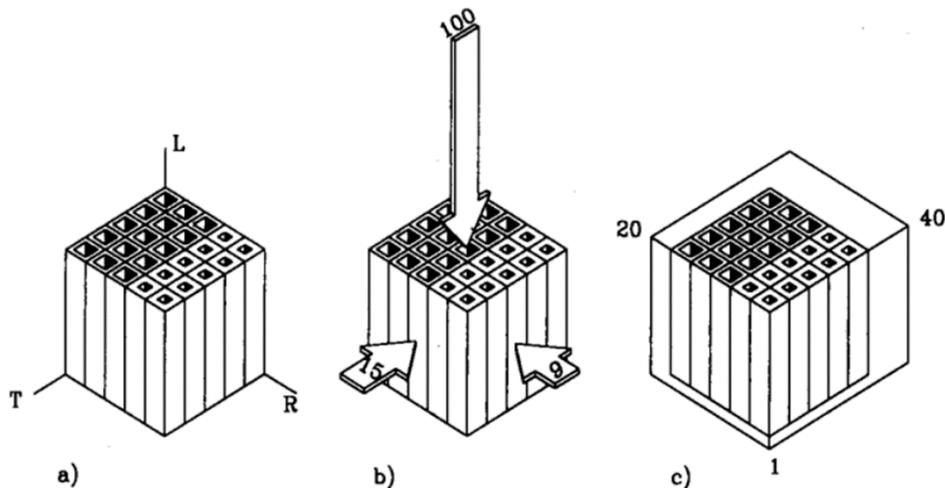
*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

De estos datos se extraen las siguientes conclusiones:

- Muy elevada resistencia a la flexión en relación con su bajo peso.
- Buena capacidad para resistir compresiones y tracciones en dirección paralela a sus fibras.
- Poca resistencia al cortante, aunque ofrece una capacidad suficiente para las exigencias estructurales que consideramos en el diseño y en la práctica.
- Escasa resistencia a la compresión y tracción perpendicular a la fibra. Especialmente escasa en el caso de la tracción.
- Bajo módulo de elasticidad. Supone la tercera parte del hormigón y es 20 veces más pequeño que el del acero. Los valores alcanzados por el módulo de elasticidad inciden sustancialmente sobre la deformación de los elementos resistentes y sus posibilidades de pandeo. Este valor neutraliza parte de la buena resistencia a la compresión paralela a la cual se ha hecho referencia antes.

## Contenido en humedad de la madera

Un factor más que limita la aplicación de este material en la construcción es su contenido en humedad y las variaciones de este durante el tiempo. La madera es un material higroscópico y según tenga o no agua, variará sus dimensiones. Normalmente la mayor variación se aprecia en la sección transversal no siendo tan significativas en la dirección longitudinal. Cuando se incrementa el contenido de humedad, la madera se hincha y cuando disminuye se merma.

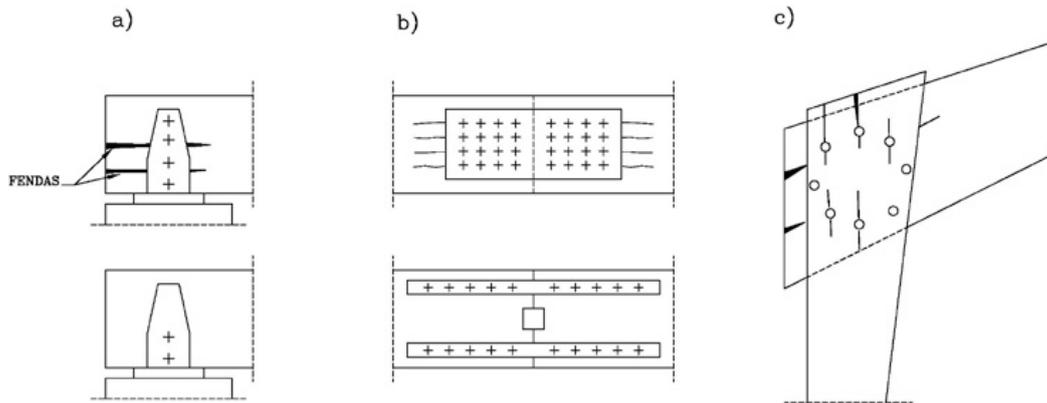


***a) Direcciones principales, b) Resistencia relativa a compresión, c) Hinchazón y merma relativa.***

*Ilustración 5 Anisotropía de la madera*

Estos ciclos de deformación perjudican al material y siempre se intenta alcanzar una humedad de equilibrio para no alterar al elemento estructural con dilataciones o compresiones adicionales. Estas deformaciones que pretendemos evitar pueden llevar a cabo tensiones en uniones bien arriostradas que, al impedir el libre movimiento de la deformación, hace que las fibras de la madera se rompan, generando fendas. También, dichas fendas pueden en un futuro reducir la calidad de la pieza, debido a que quedan expuestas rutas de ataque a organismos xilófagos, que consumen el material por dentro.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 6 Fendas en a) Apoyo de viga con restricción de movimiento a lo largo de todo su canto; b) Empalme rígido entre dos piezas de madera con chapas metálicas que impiden la contracción; c) Nudo de esquina de pórtico con corona de pernos*

La higroscopicidad es un factor importante para considerar en el cálculo de uniones y detalles constructivos, pues puede verse afectado la seguridad y la durabilidad de la estructura por no considerar este factor (al igual que el clima). Es por esta razón que, preventivamente, las uniones en la madera tratan de no ser tan rígidas. Es conveniente que permitan cierto movimiento libre para que estas deformaciones naturales no quiebren al elemento.

## La duración de las cargas

Otro aspecto que condiciona la madera es la duración de las cargas. Se ha comprobado con ensayos que la madera resiste menos (un 60% de su resistencia) ante una carga permanente que una sollicitación de duración corta (de 5 a 7 minutos).

Según Larsen y Riberholt, la explicación de estos diferentes comportamientos puede deberse a que la existencia de los nudos en la madera de baja calidad, conduce a que la rotura de la pieza (que esté sometida a una carga de corta duración como la del viento) se origine por las fuertes concentraciones de tensiones que genera su irregularidad (con un comportamiento elástico); sin embargo, cuando la carga es de larga duración (como el caso de la carga muerta) la concentración de tensiones alrededor de los nudos tiende a reducirse debido a un comportamiento viscoso, lo que favorece el comportamiento bajo cargas de larga duración frente a la madera de alta calidad, que no dispone de este recurso.

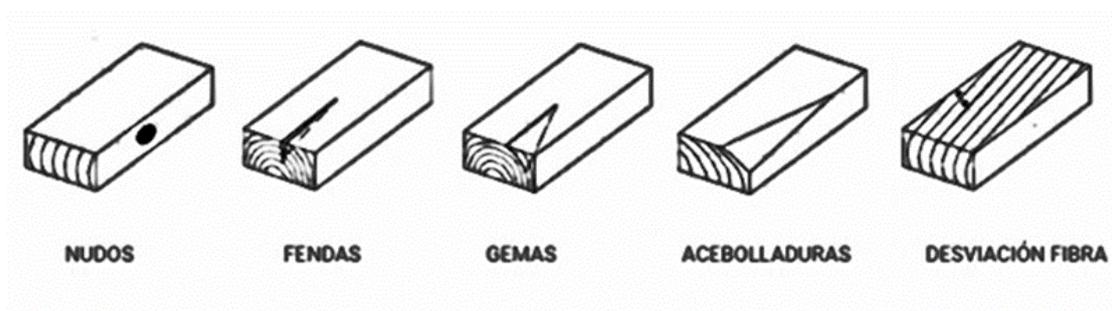
Es esta la razón por la que los ensayos de resistencia última se deban producir en este periodo de tiempo de 3 a 7 minutos. La influencia de este factor en la resistencia hace que la madera sea un material estructural eficaz ante cargas de origen dinámico como el viento o el sismo.

## Edad de la estructura

Es importante diferenciar este efecto del deterioro o vejez de la estructura. Ambas cosas no están relacionadas y se puede asegurar que, durante la restauración de antiguas estructuras de madera, se ha descubierto escasas reducciones de la capacidad portante de los elementos antiguos. No parece haber indicios de que la madera pierda su resistencia con el tiempo salvo por motivos muy evidentes como los mencionados antes, por motivo de agentes bióticos o el incremento de fendas por exposición excesiva a la intemperie y variaciones frecuentes en el contenido de humedad de la madera.

## La calidad de la madera

Por último, otro factor que se debe tener en cuenta en los cálculos es la calidad de la madera. Tratándose de un organismo vivo, durante su periodo de crecimiento se crean singularidades que, desde el punto de vista estructural, suponen pérdidas de capacidad portante. Estos defectos pueden ser los nudos, que se aprecian en la madera aserrada como ojos o manchas; desviaciones de fibras por consecuencia principal de estos nudos; fendas, por un mal secado o tratamiento de la madera aserrada; acebolladuras, producidas por la separación de los anillos de crecimiento o falta de adherencia entre capas de madera; crecimientos irregulares o gemas.



*Ilustración 7 Defectos de la madera*

## Ventajas de la madera en la construcción y su resistencia al fuego

Sin embargo, a pesar de estos condicionantes que limitan al material, la madera puede ser muy versátil ya que puede cubrir diferentes funciones bien sea para conformar elementos estructurales principales, como formar parte de un cerramiento o como aislante térmico o acústico. Es un material resistente y para su capacidad, resulta relativamente ligero y esto también es una ventaja constructiva, ya que pueden manipularse y tratarse en taller. Quedando la ejecución en obra relegado a un proceso sencillo de montaje rápido y sin otros medios auxiliares más que la asistencia de camiones y grúas. Por otro lado, y al contrario de lo que puede creerse, la madera presenta una notable resistencia al fuego.

Esta resistencia al fuego es debida a la carbonización de las capas externas de la madera, durante el proceso de combustión. Esta madera transformada pierde su oxígeno y actúa de retardante en la propagación del fuego. La sección de la madera interna sigue resistiendo y trabajando y el colapso de la estructura no se da por el fuego en sí, sino por una reducción considerable de su sección útil, la cual ha debido permanecer mucho tiempo expuesta a la acción del fuego para que se dé el colapso (y en cuyo caso, no se trataría de un colapso frágil) dando capacidad y tiempo suficientes para que la estructura pueda ser evacuada a tiempo.

Si el fuego persiste, la estructura de madera va perdiendo poco a poco las propiedades mecánicas de la sección útil, a diferencia de otros materiales como el acero que son conductores y transmiten este fuego con una mayor velocidad. Estas secciones metálicas plastifican de manera rápida frente al fuego, pudiendo llegar a un colapso repentino y frágil. En cambio, y como ya hemos mencionado, la madera no colapsaría debido al fuego, sino a su lenta reducción de sección útil que queda de la estructura tras la exposición. Hay que tener especial cuidado cuando las uniones se compongan de herrajes metálicos, ya que podrían suponer puntos de debilidad en la estructura por las razones comentadas.

Otra de las principales cualidades de este material es su gran integridad con el medio ambiente. La madera es un recurso renovable. Si se hace un uso sostenible de su aprovechamiento, el ser humano puede beneficiarse de él, además de normalizar su empleo y, en el caso de necesitar elementos estructurales de una mayor entidad que la madera aserrada, los nuevos métodos de producción pueden ofrecernos maderas de altas prestaciones como la madera laminada encolada homogénea, con un mejor comportamiento en todos sus ejes.

## Contexto medioambiental en el sector de la construcción

La construcción es un sector que requiere de un gran consumo energético y la madera se encuentra en una posición ventajosa.

- Según *Kofoworola y Gheewala*: “La industria de la construcción, a nivel mundial, utiliza el 40% de los materiales que se consumen en la economía global y genera entre el 40 y 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero y agentes causantes de la lluvia ácida. Por ello es una de las actividades menos sostenibles del planeta.”
- El *CESE (2015)*: “A nivel global los edificios son responsables del 20% del consumo total de agua, del 25 al 40% del consumo de energía y del 30 al 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero.”

Podemos mostrar una tabla de la FWPRDC “*Forest and Wood Products Research and Development Corporation*”, que refleja la energía requerida para elaborar distintos tipos de materiales de construcción, a costa del consumo de recursos fósiles.

Material	MJ/kg	MJ/m <sup>3</sup>
Madera aserrada	1,50	750,00
Acero	35,00	266.000,00
Hormigón	2,00	4.800,00
Aluminio	435,00	1.100.000,00

Tabla 2 Energía de combustibles fósiles utilizada en la fabricación de materiales de construcción

## La construcción sostenible

La construcción sostenible ha ido cobrando relevancia por motivos de la contaminación, las emisiones de CO<sub>2</sub> y su consecuente calentamiento global. La Comisión Mundial sobre Medio Ambiente trata de solucionar estos problemas creando conceptos como “la construcción sostenible” para marcar unos objetivos y unas pautas o métodos nuevos en los procedimientos futuros.

La Comisión Mundial sobre Medio Ambiente define “construcción sostenible” como la capacidad de la humanidad para asegurar que su desarrollo cubra las necesidades del presente sin comprometer la capacidad y los recursos de las futuras generaciones.

Esta conciencia ecológica y medioambiental se está implementando convenientemente en los Códigos de la Edificación. La elaboración de Códigos de Construcción sostenible son herramientas útiles de referencia para que el gobierno, los profesionales y cualquier usuario que diseñe, se les permita mejorar o conservar el medio ambiente. Se tiene como previsión que estos

códigos de sostenibilidad vayan incorporándose en requisitos legales de obligado cumplimiento. Sin embargo, estimar el impacto ambiental de cada producto o sistema constructivo presenta ciertos retos que, una vez definidos, son difíciles de evaluar numéricamente y, en la práctica, son difíciles de cumplir. Al final se recurre a facilitar la mayor cantidad de información posible al prescriptor para que pueda escoger él (bajo su propio criterio y conciencia) la solución más adecuada, según el caso.

## El ciclo del carbono

La combustión de fósiles (como el carbón, el gas natural o el petróleo), la descomposición de materia orgánica natural y la sobreexplotación o quema de bosques son fuentes principales de dióxido de carbono. Estas emisiones se suman a los gases que refuerzan el efecto invernadero. No siendo en principio un efecto perjudicial, la concentración excesiva de estos gases tiene consecuencias negativas en la tierra. Estas consecuencias ya llevan años experimentándose en el incremento de la temperatura global.

Este gas que incrementa en exceso el efecto invernadero puede ser absorbido por la forestación y el aumento de biomasa, pudiendo compensar estas emisiones de CO<sub>2</sub> que sobresaturan a la atmósfera. El árbol lleva a cabo su crecimiento mediante la fotosíntesis. Este es un proceso que demanda el dióxido de carbono y ciertos azúcares. A cambio de esta necesidad que cubre el árbol, emite a la atmósfera oxígeno. La cantidad aproximada de oxígeno emitido por un árbol corresponde al 70% del volumen de CO<sub>2</sub> que absorbe y, dado que hay pocas maneras de absorber la fuente de estos gases, puede decirse que hay una relación directa entre los niveles de dióxido de carbono y la masa forestal del planeta.

Sin embargo, esta idea no se opone al uso de la madera como recurso. Al contrario de lo que se cree, la tala de árboles tiene efectos positivos en el medio ambiente y a nivel social, siempre que se lleve a cabo una gestión forestal sostenible. La propia necesidad del recurso fomenta la plantación forestal. De lo contrario, un bosque salvaje, sin ser tratado por la acción humana, se ve comprometido por cierta decadencia y, a la larga, incluso a la deforestación. Los árboles con mayor antigüedad terminan degradando el bosque. Dejan cubiertas zonas de tierra impidiendo el crecimiento de otros árboles más sanos y son propensos a generar plagas o incrementar la probabilidad de incendios. El sector forestal está interesado en la repoblación y regeneración del bosque. Además, los árboles más jóvenes sintetizan mejor el dióxido de carbono que otros árboles más viejos, debido principalmente a su crecimiento. Los árboles que ya han completado

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

esta etapa no absorben el dióxido de carbono en tantas cantidades y, en consecuencia, aportan una cantidad de oxígeno mucho menor.

Por otro lado, y como ya hemos comentado, la madera es el material de construcción cuya elaboración requiere del mínimo uso energético. Durante su crecimiento, el árbol sólo requiere de la energía solar y durante el proceso de tratamiento de la materia prima y el transporte, el consumo energético es menor que otros materiales más convencionales como el acero, el cemento o el aluminio. Considerar la energía consumida debido a plaguicidas y fertilizantes resulta muy inteligente y acertado, pero tiene también un peso pequeño en el consumo energético total. Sin embargo, los productos derivados, como la madera empleada en grandes luces, en los que se requiere de una madera más compleja, sometida a tratamientos adicionales como la laminada encolada, éstas pueden obtenerse a costa de un consumo energético mayor. Aun así, las emisiones siguen siendo menores que los otros materiales.

Material	CO <sub>2</sub> emitido		CO <sub>2</sub> almacenado
	Kg/t	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
Madera aserrada	30	15	250
Acero	700	5320	0
Hormigón	50	120	0
Aluminio	8700	2200	0

Tabla 3 Dióxido de carbono emitido y almacenado durante el proceso de fabricación (Ferguson et al. FWPRDC)

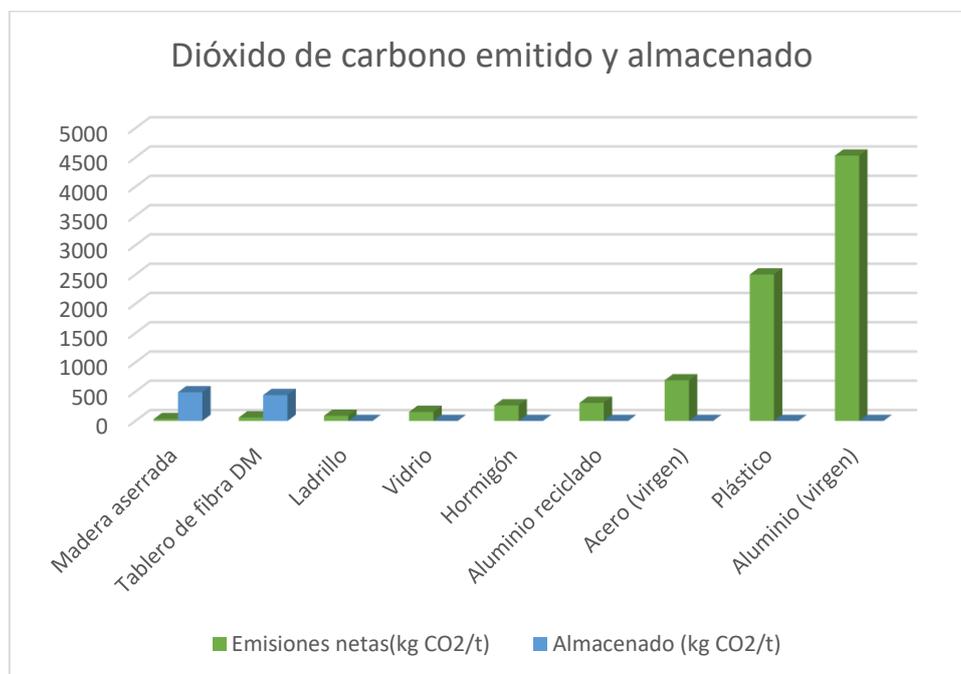


Ilustración 8 Dióxido de carbono emitido y almacenado durante el proceso de fabricación de varios materiales (Wood Handbook 2010, EPA)

## **Análisis del ciclo de vida**

Uno de los factores que pueden garantizar que un proceso constructivo sea sostenible es a través de los análisis del ciclo de vida (ACV) del material. Los productos que disponen de numerosos ACV, como es el caso de la madera, son bien recibidos por su transparencia y suelen ser materiales con un comportamiento medioambiental decente, si se compara con otros materiales como el cemento y son difíciles de estimar.

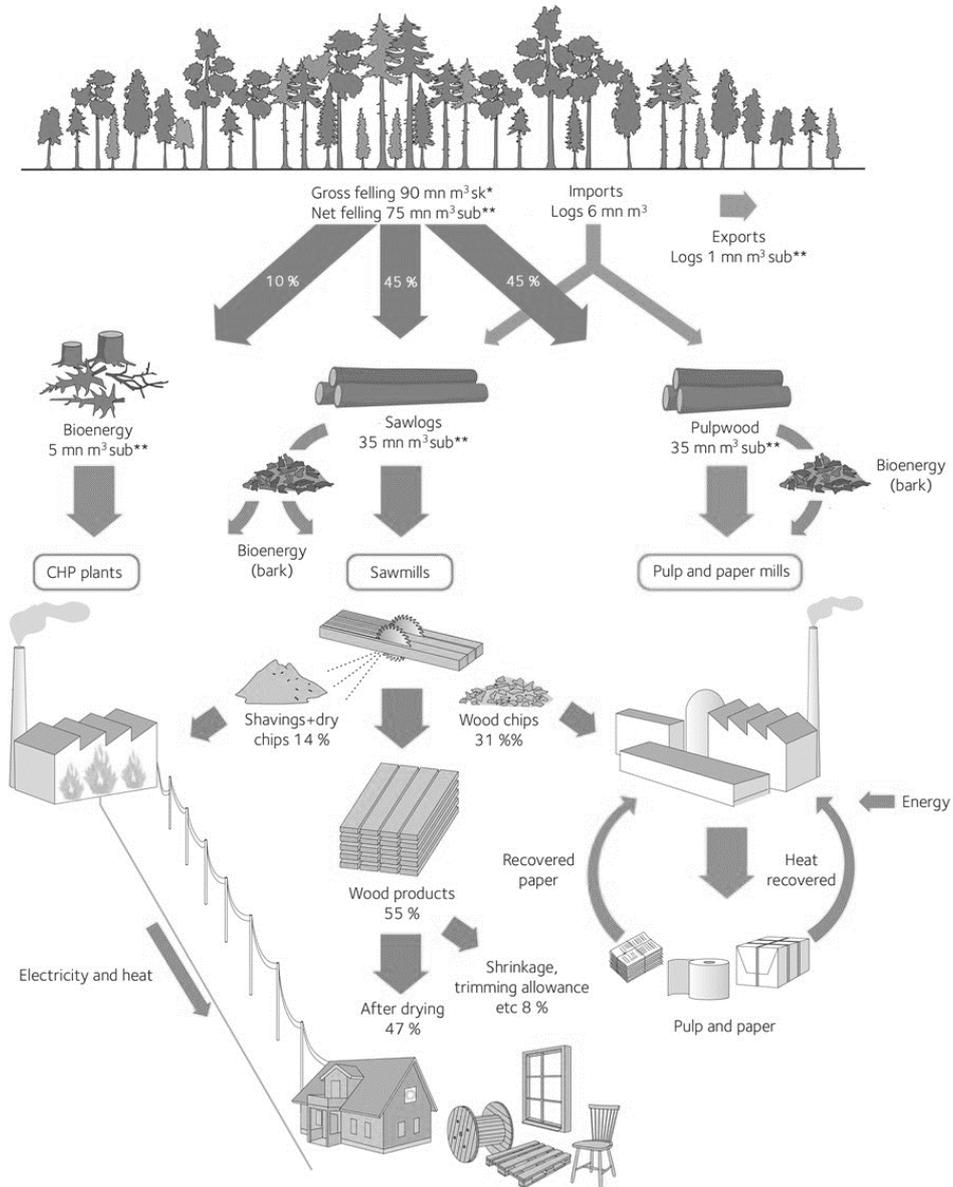
Estos análisis del ciclo de vida tratan de evaluar, desde un punto de vista medioambiental, todas las fases del producto: en ese proceso se contempla la fase de la extracción de materias primas, su fabricación y los medios empleados para determinar el producto, la puesta en obra o construcción, su mantenimiento, la reutilización o demolición final y, en su caso, la gestión de los residuos y su reciclabilidad. Este proceso debe estar claro para dar garantías de sostenibilidad de quienes hacen uso de este recurso y, a pesar de que no hay base científica para reducir los resultados de un ACS a un número concreto, la madera es un material que se sitúa en una posición ventajosa frente al resto de materiales de construcción más convencionales.

## **Aprovechamiento útil del recurso**

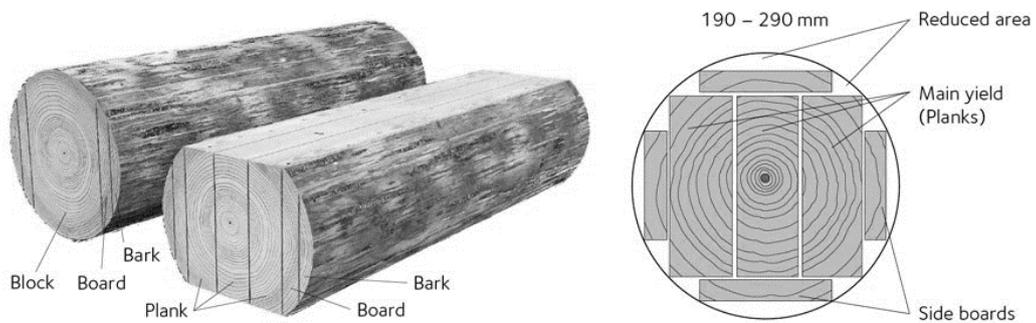
Otra razón de peso que hace a la madera una opción sostenible es el aprovechamiento óptimo de la materia prima. Prácticamente el 100% de la sección del tronco puede utilizarse. De la sección del tronco no empleada como madera aserrada, queda una parte del árbol destinada a virutas o partículas que bien pueden emplearse en tableros o en papel.

En cuanto a la reciclabilidad o el nuevo uso de la madera, aunque bien sea posible, existe cierto rendimiento límite que hay que considerar en el proceso. Sobrepassar ese límite, reutilizar el material cuando ya son muy pocas las funciones que puede dar la madera resultan absurdas.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 9 Usos de la madera*



*Ilustración 10 Ejemplo de aserrado cuadrado y aprovechamiento de sección*

## Impacto de los productos derivados de la madera en el efecto de los gases invernadero

Sin insistir más sobre esta cualidad, finalizaré el apartado medioambiental citando las conclusiones de un artículo realizado por el Instituto de Investigación de Productos Forestales de Canadá 4Sathre et al. 2010, sobre el impacto de los productos derivados de la madera en el efecto de los gases invernadero, y que no deja de ser un resumen de lo que se ha comentado antes:

“La emisión de dióxido de carbono de la madera es generalmente mucho menor que la de los otros productos no maderables. Incluso en el caso de los productos compuestos que requieren un mayor consumo de energía para la fabricación de adhesivos y aditivos” [La madera laminada encolada] “así como el proceso más complejo, todavía en general, las emisiones siguen siendo menores.”

“La utilización de la madera y productos derivados de la madera para sustituir a los productos derivados del cemento es beneficiosa como consecuencia de evitar las altas emisiones de dióxido de carbono producidas en la fabricación del cemento”

“La madera y sus productos derivados constituyen un depósito físico de dióxido de carbono que previamente se encontraba en la atmósfera. El efecto de este almacenamiento puede analizarse a corto y medio plazo con un resultado beneficioso al incrementarse la cantidad de carbono almacenado. A largo plazo la cantidad almacenada tenderá a estabilizarse hasta llegar a un depósito prácticamente constante. La madera nueva que entraría se equilibraría con la madera vieja que termine su ciclo, con el efecto beneficioso de la sustitución de las emisiones evitadas.”

“La reforestación y creación de nuevas masas de bosque, generalmente, incrementan el almacenaje de carbono en la biomasa y en el suelo, además de permitir y favorecer la producción de la madera.”

“La utilización de la biomasa como combustible contribuye beneficiosamente al ciclo de los gases invernadero.”

## La madera laminada encolada

Dadas las exigencias estructurales para la construcción de la pérgola de madera, se ha optado por un material de altas prestaciones.

La madera laminada encolada fue un material que se patentó durante el siglo XX como una evolución tecnológica de la madera aserrada. Con esta nueva madera se pueden conseguir piezas más estables con formas, longitudes, anchuras y cantos más grandes o difíciles de conseguir. Se trata de un método que permite la superposición de piezas de pequeña escuadría alcanzando grandes cantos de sección permitiendo la construcción de estructuras singulares y de mayor entidad. Esta superposición de capas puede llevarse a cabo con la ayuda de adhesivos sintéticos.



*Ilustración 11 Sheffield Winter Garden*

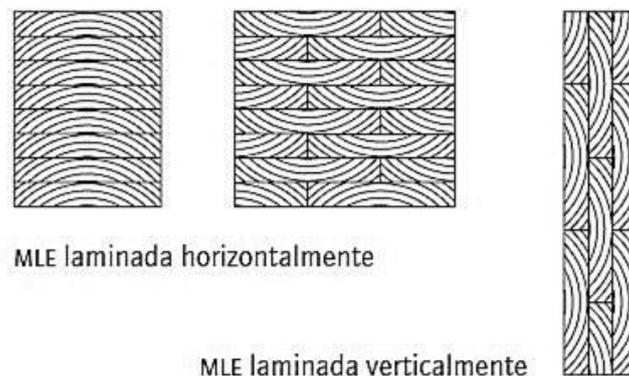
Se tiene como resultado un material que permite conformar estructuras de mayor envergadura y sin los defectos característicos de la madera maciza como la presencia de nudos o desviación de fibras. Sin embargo, aun siendo un material que nos permita cierta libertad, hay una tendencia o patrón que reduce las posibilidades. Al igual que la madera maciza, la madera laminada encolada sigue limitada por las uniones.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

En cuanto a los adhesivos necesarios para elaborar estos elementos de gran canto, existen varias posibilidades. Las resinas de resorcina formaldehído ofrecen elevadas prestaciones en situaciones de exterior como es nuestro caso, además que prestan gran comportamiento contra incendios. Sin embargo, hay otras soluciones en los adhesivos que resultan más atractivos debido a sus virtudes medioambientales. Las resinas de melamina, de aspecto traslúcido, tienen esta ventaja, sin embargo, su empleo puede encarecer al material, debido a las exigencias de fabricación y control.

La madera laminada encolada se entiende como la superposición de dos o más láminas de madera en la misma dirección paralela al eje de las láminas. Cada lámina suele tener una sección comprendida entre 6 y 45mm.

Son estas dimensiones de la madera aserrada quien, en cierto modo, terminan condicionando las dimensiones de esta madera distribuida, que presenta gamas con anchos de 80, 100, 110, 130, 140, 160, 180, 200 y 220 mm. En los casos en los que se necesitara obtener perfiles de madera con anchos superiores a 220mm, la solución más frecuente acaba siendo el acoplamiento de dos piezas, de modo que cada una de las tablas que formaran parte de una sección, quedaran contrapeadas al tresbolillo entre una sección y otra, de modo que se consiga cierto monolitismo en la superposición de las piezas.



*Ilustración 12 Pieza de madera laminada encolada, la del centro con una anchura superior a 220mm*

En cuanto a la altura máxima, suele alcanzarse los 2400mm debido al tamaño que permite las máquinas de prensado convencionales. Además, se requiere alcanzar un reparto de presiones homogénea para que el adhesivo alcance el mismo grado de adherencia en cada una de las tablas y en un tiempo limitado.

La aplicación de este material de construcción es apta para el uso de elementos lineales cuyas luces puedan alcanzar entre 30 y 70 metros en edificios de uso público, comercial o deportivo.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Para luces más modestas, también resulta adecuado de entre 8 a 14 metros. Es adecuado también para pilares, cubiertas de peso propio reducido, estructuras de las que resulte necesario una protección a la exposición ambiental más exigente y, también, para estructuras vistosas de las que se busque en ellas un acabado más estético. Al mismo tiempo, también hay una razón que justifica la solución cuando se trata de estructuras cuyo mantenimiento resulte complicado debido a su autosuficiencia estructural.

En cuanto a las clases resistentes, la norma UNE-EN 1194 identifica 4 clases de madera laminada encolada homogénea: GL24h, GL28h, GL32h, GL36h.

## Uniones en la madera

Las posibilidades creativas en el diseño de las uniones son enormes y no es posible definir una solución única para cada situación. El éxito del diseño de una unión se basa en cumplir los tres requisitos siguientes:

- **Simplicidad:** cuanto más sencilla sea la unión, mejor será el resultado estético y mecánico, así como su cálculo.
- **Mínimo material auxiliar:** cuantos menos herrajes se necesiten mejor será el comportamiento frente al fuego.
- **Fabricación y montaje:** serán preferibles soluciones que requieran un proceso de fabricación más claro y sencillo ya que estos procesos deberán realizarse mediante montaje en taller o en la obra.

En general, las uniones en estructuras de madera constituyen posibles puntos débiles que es necesario tener presente durante el estudio. El agotamiento de la estructura puede no producirse, sin embargo, si una de las uniones falla, puede llevar al colapso completo de la estructura si esta no está bien proyectada.

Se considera experimentalmente que las uniones absorben un porcentaje elevado del coste global de la estructura. En el caso de la madera laminada encolada podría ser este valor del orden del 20 o 25%.

En los últimos 20 años se ha podido observar un cierto cambio en el estilo de las uniones en estructuras de madera. De uniones con grandes herrajes vistos y muchas veces pintados para hacerse más visibles, se ha llegado a unas uniones con menor presencia del acero al exterior, con protección por galvanizado y muchas veces con clavijas ocultas o de poca presencia al exterior (pasadores, tirafondos de doble rosca). Los herrajes de apoyo de correas utilizados en las estructuras de madera laminada encolada por lo general están fabricados con chapa plegada galvanizada y vista al exterior; sin embargo, en Europa existe una tendencia al herraje oculto en la testa de la correa y posiblemente cada vez se use menos el herraje visto.

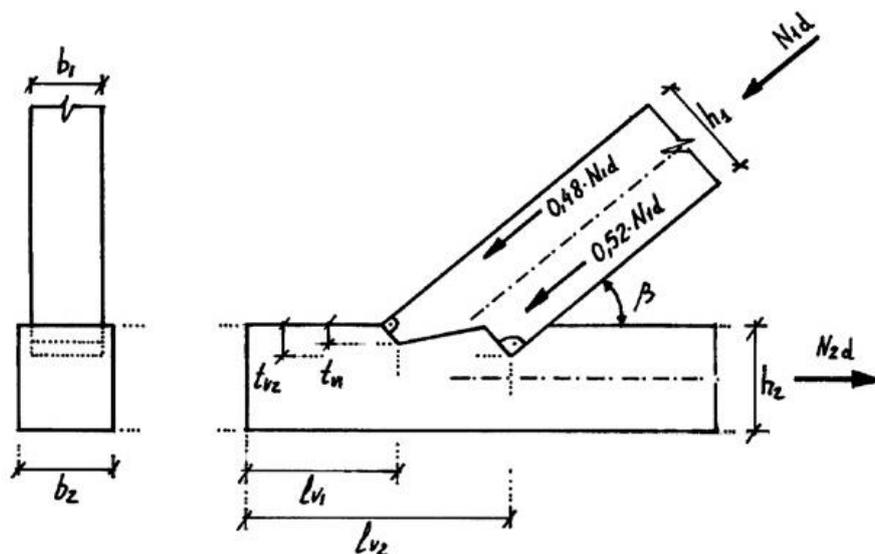
Todo este proceso de cambio viene motivado por varias razones, entre las que se encuentran las especificaciones de incendio que conducen al ocultamiento y protección del metal, a los avances técnicos de materiales empleados en los herrajes, pero también a una evolución de la estética en el diseño de la estructura, que puede interpretarse como una mayor confianza en la madera como material estructural sin recurrir a la presencia del acero como acompañante o garantía de su eficacia.

Existen diversas tipologías de medios de unión. Cada una de ellas tiene una adecuación que es necesariamente una función del tamaño de la escuadría de las piezas y del tipo estructural. A continuación, se expone la práctica más habitual:

## Uniones carpinteras

Aunque fueron las primeras formas de unión en la antigüedad, se ha perdido su uso a medida que se descubrían otros materiales de construcción más efectivos. Actualmente, una pieza de madera tallada es una también una obra artesanal que requiere de personal cualificado. Estas uniones se emplean en estructuras de luces pequeñas, 10 o 12 metros como máximo y en obras de rehabilitación. Las razones que llevan a utilizar estos métodos de unión son principalmente de carácter estético y suelen complementarse por seguridad con clavos, para asegurar que ninguna pieza tallada se deslice entre las juntas.

Estas formas de unión están principalmente ligadas a la madera aserrada. Para maderas laminadas encoladas, que requieren de mayor trabajo y proceso de elaboración, no resulta económicas ya que las cajas y otros rebajes porque obligan a sobredimensionar las secciones. En nuestro caso, las uniones carpinteras son una opción prescindible, aunque tenga un buen comportamiento contra el fuego.



*Ilustración 13 Unión carpintera embarbillada doble*

## Uniones mecánicas

Son las más empleadas actualmente. Con esta denominación se incluyen todos los sistemas de unión que emplean elementos metálicos a modo de pasadores y placas, lo que implica la

colaboración de otro material para la transmisión de los esfuerzos. Su aportación mejora sustancialmente los bajos rendimientos de las uniones tradicionales. Debe evitarse un exceso de elementos metálicos, ya que la unión estará tanto mejor resuelta cuantas menos piezas metálicas contenga y más simple sea su ejecución.

Se dividen en dos grupos:

## Conectores tipo clavija

### *Grapas*

Generalmente se emplean para la conexión entre tableros y piezas de madera aserrada de pequeña escuadría (con gruesos comprendidos entre 38 y 50 mm aproximadamente). La aplicación característica es la fabricación de entramados ligeros de muros y forjados para la construcción prefabricada.

### *Clavos*

Adecuados para la construcción ligera de madera en la unión entre tableros y piezas de madera aserrada y entre las propias piezas de madera aserrada de pequeña escuadría (grueso de 38 a 50 mm). Tienen capacidad de carga frente a esfuerzos laterales o de cortante, pero rara vez se aceptan para cargas axiales o de extracción.

También son utilizados en las uniones entre piezas de mayor escuadría como es el caso de las correas de madera laminada donde se emplean para fijar el herraje de apoyo a la viga principal. En estos casos los herrajes ya están pretaladrados para el alojamiento de los clavos.

En algunos casos se han utilizado para uniones de gran capacidad de transmisión de esfuerzos como elemento de fijación de las chapas de acero con espesores generalmente de 6 mm. En estos casos es frecuente el uso de clavos especiales de sección rectangular redondeada denominados “remaches para madera” (timber rivets).

### *Tirafondos*

Se emplean en la fijación de piezas de madera de escuadría pequeña y mediana con similares funciones a la de los clavos, pero con la ventaja de poder resistir esfuerzos axiales. Esto último los hace especialmente indicados para el anclaje de herrajes, o piezas en general, sometidas a esfuerzos de arranque además del cortante. Así, ejemplos típicos son las fijaciones de los herrajes de anclaje de tirantes de arriostamiento, fijación de las correas sobre los pares, elementos auxiliares de afianzamiento en las uniones carpinteras, etc. También se pueden

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

utilizar en las uniones entre piezas de mayor sección (por ejemplo, madera laminada encolada) como elemento de fijación de chapas de acero auxiliares.

*Pernos*

Se emplean en uniones entre piezas de madera maciza y madera laminada encolada. Por tanto, resultan adecuados para cargas pequeñas y grandes, utilizando diámetros adecuados. Permiten la conexión entre piezas de madera a través de chapas metálicas, tanto si están situadas en el interior como en el exterior. Necesitan arandelas y son estos elementos metálicos quienes comprimen las fibras de la madera. Los fustes pueden alcanzar un máximo de 600mm y son un medio de unión interesante para abordar las posibles uniones de esta gran estructura.

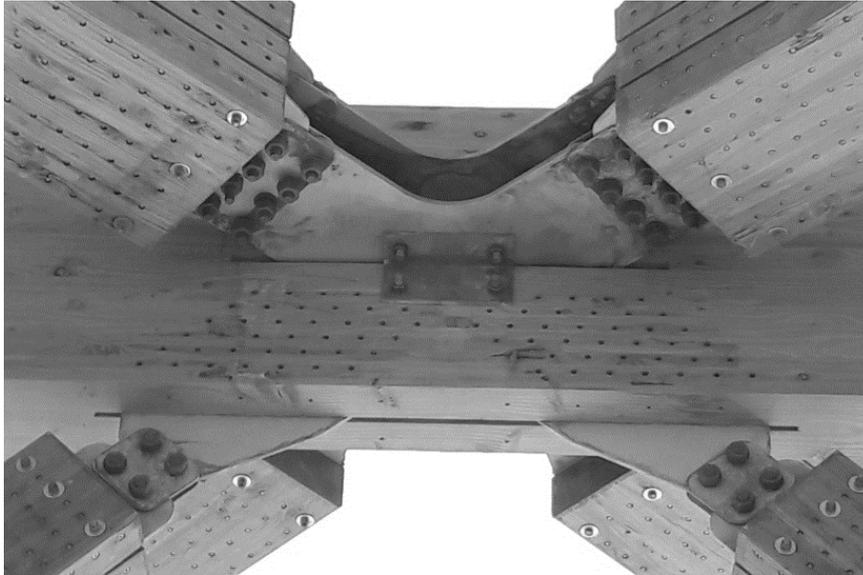


*Ilustración 14 Nudo de celosía con dos chapas y pernos de conexión*

*Pasadores*

Generalmente utilizados en las uniones entre piezas de mediana y gran escuadría. Tienen la ventaja de un mejor comportamiento al fuego, siendo más fácil su ocultación comparada con el caso de los pernos. Permiten la conexión mediante chapas de acero interiores, pero no al exterior. Se colocan con un grado de ajuste muy alto, lo que exige mucha precisión en el mecanizado de los agujeros. En uniones que puedan sufrir un esfuerzo transversal que provoque el desarmado del conjunto deberán acompañarse de algunos pernos.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



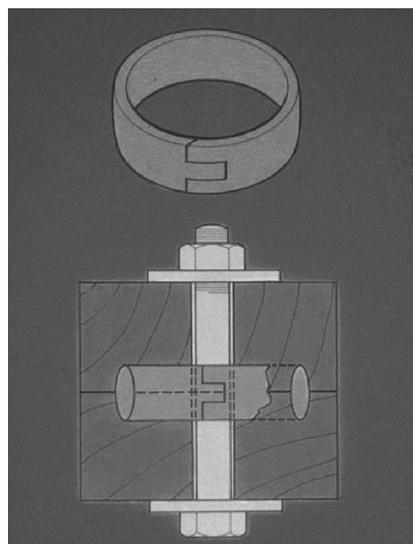
*Ilustración 15 Unión de madera laminada con varias chapas metálicas embebidas y unidas por pasadores y algunos pernos*

## Conectores superficiales

Los conectores tienen mayor capacidad de transmisión de carga que los pernos y pasadores, pero también requieren separaciones mayores. Generalmente, se recurre a ellos cuando la capacidad de los pernos por sí mismos no es suficiente.

### *Conectores de anillo*

Se emplean en uniones entre piezas de gran y mediana esquadría. El mecanizado se hace en fábrica y el montaje se puede hacer en obra. Requieren un perno para afianzar la unión, pero su capacidad portante no se suma a la del conector.



*Ilustración 16 Conector de anillo*

### *Conectores de placa*

Adecuados en uniones entre piezas de gran y mediana escuadría. Hay tipos para uniones entre madera y madera y otros para uniones entre acero y madera. El mecanizado se hace en fábrica y el montaje se puede hacer en obra. Requieren un perno para afianzar la unión, pero su capacidad portante no se suma a la del conector.

### *Conectores dentados*

Adecuados para escuadrías grandes y medianas. Se colocan en fábrica y una vez insertados no pueden desmontarse. El perno que se emplea para afianzar la unión también colabora en la transmisión de esfuerzos.

### *Placas clavo*

Son herrajes de conexión específicos para las uniones en estructuras ligeras construidas con piezas de madera aserrada de grueso reducido (38 a 45 mm). Son características de las armaduras de cubierta en la construcción prefabricada de entramado ligero.

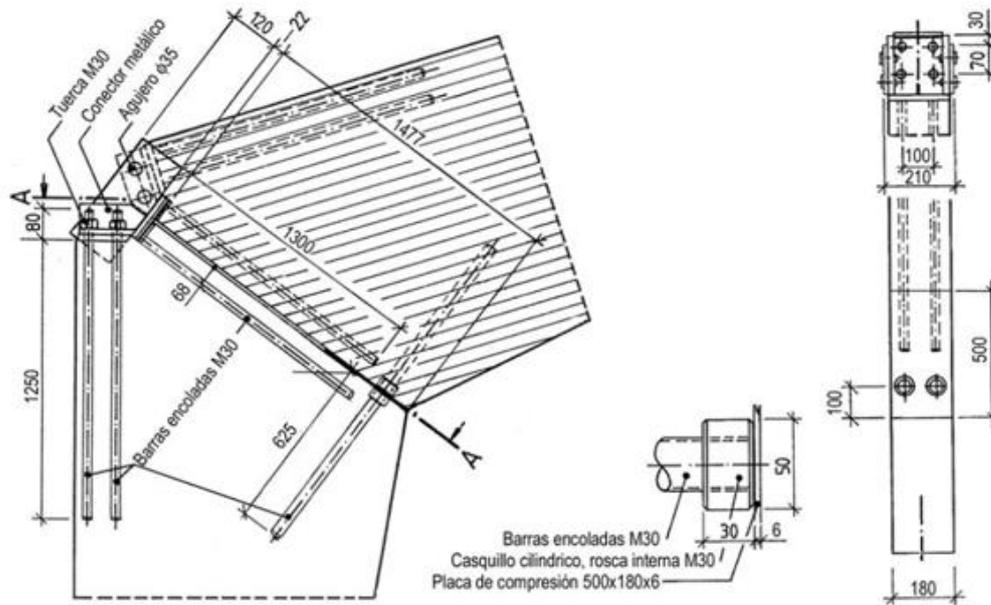
## **Uniones encoladas**

Esta forma de unión tiene la conveniencia de poder crear enlaces rígidos con plena capacidad para transmitir momentos flectores. Adicionalmente a esta ventaja, también tienen un acabado muy limpio y estético y no presentan herrajes exteriores. La única carencia que puede presentar es su singularidad. Muy pocas empresas pueden realizar este tipo de soluciones.

Generalmente, consisten en barras de acero o de materiales compuestos que se encolan a la madera en taladros interiores con formulaciones epoxi y otros adhesivos adecuados. También son uniones encoladas los enlaces entre piezas mediante un dentado múltiple de gran tamaño (macro-dentado) similar al empalme de las láminas de madera laminada encolada, pero con la posibilidad de realizar uniones en ángulo, como las uniones de esquina en pórticos.

Es una solución muy recomendable para conseguir uniones rígidas y muy adecuadas para nuestra estructura.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 17 Nudo rigidizado de un pórtico mediante barras encoladas*

## Factores que influyen en la decisión de la unión

- Especificaciones de incendio: si existen requisitos de resistencia al fuego es relativamente sencillo llegar a tiempos de 30 minutos, pero para alcanzar los 60 minutos se requiere un diseño más elaborado. Para cumplir las especificaciones con más facilidad son preferibles las uniones que no utilicen chapas metálicas expuestas al exterior, sino en todo caso situadas en el interior de las piezas y sin asomar por los bordes; también presentan mejor comportamiento los pasadores que los pernos.
- Durabilidad: en uniones entre piezas que queden expuestas al exterior es muy importante que el diseño de la unión no permita la retención de agua de lluvia con el fin de aumentar su durabilidad frente a la corrosión. Deberán utilizarse materiales metálicos adecuadamente protegidos para cada situación ambiental.
- Sismo: en localizaciones en las que la acción sísmica es relevante, la ductilidad de la estructura se consigue con facilidad utilizando uniones con elementos de tipo clavija, que presentan un comportamiento de alta ductilidad.

## NORMATIVA Y REFERENCIAS

### Normativa

- Código Técnico de la Edificación: DB-SE: seguridad estructural
- Código Técnico de la Edificación: DB-SE-AE: acciones en la edificación
- Código Técnico de la Edificación: DB-SE-M: madera
- Eurocódigo 05: Proyecto de estructuras de madera
- Instrucción de Acero Estructural EAE
- Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación NCSE-02

### Bibliografía

- Estructuras de madera. Diseño y cálculo. Argüelles Álvarez, R; Arriaga Martiegui, F; Martínez Calleja, JJ. AITIM. 2000.
- Estructuras de madera. Uniones. Argüelles Álvarez, R; Arriaga Martiegui, F; Martínez Calleja, JJ. AITIM. 2000
- Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y denominación de los valores característicos. UNE-EN 1194. Comité técnico de la madera. AITIM. 1999.

### Programas de cálculo

- SAP2000
- AutoCad
- Excel

## CONCEPTOS PREVIOS Y CONSIDERACIONES PARTICULARES DE DISEÑO

### De la normativa DB-SE-M

El ámbito de aplicación de este documento básico queda dedicado a la verificación de la seguridad estructural de los elementos de madera. El análisis relativo a la resistencia al fuego queda fuera de su alcance. Se recurrirá al Eurocódigo para este aspecto.

### Bases de cálculo

Para determinar las propiedades mecánicas del material, deberemos considerar los valores característicos y multiplicarlos por una serie de factores correctores que nos permitirá evaluar con mayor exactitud las condiciones reales del elemento. En el caso de la madera laminada encolada, existen dos factores correctores relacionados con el tamaño de la pieza:

### Factores de corrección de la resistencia

- Factor de altura  $k_h$ : factor aplicable cuando el canto de la sección sometida a tracción paralela a las fibras ya sea por tracción pura o derivada de la flexión, tiene un canto menor a 600mm. En estos casos, a menor canto tenga, mayor resistencia presentará en flexión y la tracción paralela a las fibras. Si hablamos de secciones con un canto superior, las propiedades de estas resistencias no se mayoran.

$$\text{Para } h(\text{canto}) < 150\text{mm} \quad k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^{0,2}$$

$$\text{Para } h(\text{canto}) \gg 600\text{mm} \quad k_h = 1$$

- Factor de volumen  $k_{vol}$ : Efecto considerado en las piezas sometidas a tracción perpendicular a las fibras. Cuanto mayor sea el volumen de esta madera sometida a esfuerzo, menor será la resistencia, es decir, con mayor facilidad las fibras se desprenderán entre sí. Este coeficiente minorador considera un volumen de referencia equivalente a 0,01m<sup>3</sup>. Será aplicado en el diseño de las uniones, cuando la clavija (ya sea perno o tirafondo, por su configuración, obligue al volumen de madera a trabajar a tracción perpendicular a las fibras.

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2}$$

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Este efecto es importante considerarlo, sobretodo en el caso de la madera laminada encolada, en los elementos curvos o secciones de canto variable como es el caso de las vigas principales de la pérgola, si quedaran apoyadas sobre el pilar.

<b>Factor de altura</b>	Aplicación	<240mm	300mm	400mm	+600mm
	<b>Kh</b>	<b>1,10</b>	<b>1,07</b>	<b>1,04</b>	<b>1,00</b>
<b>Factor de volumen</b>	Resistencia a flexión $f_{m,g,k}$ y Resistencia a tracción paralela a las fibras $f_{t,0,g,k}$				
	Aplicación	<0,010m <sup>3</sup>	0,015 m <sup>3</sup>	0,020m <sup>3</sup>	0,030m <sup>3</sup>
	<b>Kvol</b>	<b>1,00</b>	<b>0,92</b>	<b>0,87</b>	<b>0,80</b>
Coeficiente aplicado a $f_{t,90,g,k}$ (Resistencia a tracción perpendicular a las fibras)					

*Tabla 4 Factor de altura y volumen aplicados a la resistencia de la madera*

### Clase de duración de las acciones

Por otro lado, la resistencia de la madera es muy variable respecto al tiempo y la duración en la que aparecen las cargas. Cuanto mayor sea la duración de las solicitaciones, menor será la resistencia de cara al futuro. Por esta razón se prevé una clasificación de la duración de las acciones, para que, si fueran consideradas en los cálculos, se pueda estimar el tiempo en que estas intervienen y la resistencia requerida para esta franja de tiempo.

En nuestra estructura, presentamos una tabla en la que aparecerá las acciones que consideraremos y su duración acumulada aproximada en valor característico:

<b>Clase de duración</b>	<b>Ejemplo de Cargas</b>
Permanente	Peso Propio; Carga muerta
Corta duración	Viento; Nieve en altitud < 1000 msnm; Sobrecarga de uso en cubierta no accesible
Instantánea	Viento; Sismo

*Tabla 5 Clase de duración de las acciones*

### Clase de servicio

Uno de los aspectos que influye considerablemente en las propiedades mecánicas de la madera y en su durabilidad es la exposición ambiental. La humedad es uno de los factores que reduce la resistencia de los elementos de madera, y es esencial tener en cuenta este factor, así como las temperaturas máximas y mínimas que pudiera darse en los elementos de la estructura.

Dado que se trata de una pérgola, al igual que las estructuras expuestas a la intemperie como pasarelas o embarcaderos, se trata de la clase de servicio más severa; la clase de servicio 3. El código técnico lo define del siguiente modo:

“Clase de servicio 3: condiciones climáticas que conduzcan a contenidos de humedad superiores al de la clase de servicio 2, caracterizándose esta última por presentar un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de 20 +- 2 °C y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año.”

“En la clase de servicio 3 la humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas excede el 20%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente exterior sin cubrir.”

### Valor de cálculo de las propiedades del material y las uniones

Según lo comentado anteriormente, para considerar las propiedades resistentes de los elementos en la fase de diseño, deberemos dividir el valor característico por un coeficiente de seguridad parcial y multiplicar este resultado por un factor modificador que tiene en cuenta la clase de servicio y la duración de la carga que el elemento va a resistir en la combinación de acciones.

Como se podrá sospechar, en una combinación de acciones pueden aparecer cargas con una duración diferente. El Código Técnico considera que la duración de una combinación de acciones equivale a la menor duración de entre todas las cargas de la combinación. Por ejemplo, si la combinación de cargas considera se considera el peso propio, la sobrecarga de uso y el viento, la duración de la combinación de acciones será instantánea.

$$X_d = K_{mod} \cdot \left( \frac{X_k}{\gamma_M} \right)$$

- Siendo  $X_d$  Cualquier valor de resistencia característico del material
- Siendo  $\gamma_M$  el coeficiente parcial de seguridad
- Siendo  $K_{mod}$  el factor de modificación que considera la clase de servicio y la duración de las cargas.

Situaciones persistentes y transitorias	$\gamma_M$
Madera laminada encolada	1,25
Uniones	1,30
Situaciones extraordinarias	1,00

*Tabla 6 Coeficientes parciales de seguridad*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Y los valores de  $K_{mod}$  serán los siguientes:

Material	C.Servicio	Kmod		
		Perm.	Corta	Inst.
Madera laminada encolada	C3	0,50	0,70	0,90

*Tabla 7 Valores de  $K_{mod}$  adoptados*

En el caso de hallarse ante una unión cuyos elementos de madera tengan un comportamiento diferente con respecto al tiempo, que tengan diferentes coeficientes correctores, el cálculo de la capacidad de carga de la unión debería hacerse con un nuevo coeficiente, equivalente a la raíz cuadrada del producto de ambos factores:

$$K_{mod} = \sqrt{K_{mod,1} \cdot K_{mod,2}}$$

## Durabilidad

La estructura debe proyectarse para que la madera, durante el periodo comprendido de su vida útil, pueda cumplir con sus prestaciones. Para ello, debe controlarse el deterioro progresivo de la madera y tener en consideración todos los factores que, a largo plazo, podrían suponer dificultades en la estructura.

La mayoría de los factores o condiciones para tener en cuenta para prevenir o prever la merma del material corresponde a condicionantes tales como: el ambiente, los criterios de cálculo exigibles, el uso previsto de la estructura, la composición y propiedades de la madera seleccionada, las propiedades del suelo en el que se cimenta la estructura, la forma de los elementos e incluso la tipología de uniones empleadas.

Esto nos lleva durante la fase de proyecto a considerar una protección del material preventivo para enfrentarse al posible daño derivado por agentes bióticos y abióticos.

En esta pérgola encontramos varios elementos enmarcados en una clase de uso 3.2: cuyos elementos se encuentran al descubierto, pero no están en contacto con el suelo y aparece con frecuencia una humedad que es capaz de superar el 20%.

Por otro lado, tenemos otros elementos enmarcados en una clase de uso 4: cuyos elementos estructurales son principalmente los pilares, que se hayan en contacto con el suelo o con agua dulce debido a salpicaduras, y con un ambiente y humedad equivalentes a la clase de uso 3.2.

## Protección preventiva frente agentes bióticos

En estos casos, la normativa sugiere un tipo de protección que evite la penetración de agentes bióticos mediante un tratamiento que garantice un Nivel de penetración concreto.

En estos casos donde debe aplicarse el tratamiento, debe garantizarse que la madera resulta impregnable. Se advierte la existencia de especies de madera como el caso de abetos, piceas y cedro rojo, pues son tipos de madera difíciles de impregnar.

El nivel de penetración NP será función de la clase de uso de la estructura. En nuestro caso, la clase de uso se identifica con la 3.2 o la 3.1.

La clase de uso 3 se identifica en cualquier caso con elementos ubicados al descubierto y no están en contacto con el suelo. El contenido de humedad de la madera puede superar el 20% de manera ocasional (uso 3.1) o de manera frecuente (uso 3.2).

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Trataremos de evitar que esta variación se produzca con frecuencia y emplearemos medidas de diseño dedicadas a impedir una exposición excesiva a los efectos de la intemperie, inclemencias atmosféricas o fuentes de humedad. Por ejemplo, las vigas presentes en la cubierta podríamos protegerlas mediante piezas de sacrificio en las zonas superiores y testas o mediante albardillas.

Clase de uso	Nivel de penetración NP (UNE-EN 351-1:2008)	
3.2	NP3	Al menos 6mm de albura de todas las caras de la pieza.
3.1	NP3	Al menos 3mm de albura de todas las caras de la pieza

*Tabla 8 Nivel de penetración NP*

Como nuestra pérgola estará compuesta de elementos de madera laminada encolada, el tratamiento deberá efectuarse previamente al encolado y el fabricante deberá comprobar que el producto aplicado para la protección es compatible con el encolado y no rechaza el tratamiento.

### Protección preventiva frente a agentes meteorológicos

La normativa no da sugerencias de una protección preventiva, salvo mención del criterio empleado en el diseño constructivo y que eviten la retención de agua. Además, los elementos de nuestra cubierta, expuestas al exterior, se recomienda que sean capaces de intercambiar la humedad entre el ambiente y la madera, ya que se verán sometidas a los ciclos estacionales, al exceso calor o al frío. Esta alternancia en las condiciones, merma con mayor facilidad a la madera.

### Protección contra la corrosión de los elementos metálicos

Las uniones que vamos a implementar en la estructura serán herrajes metálicos. Tanto si las placas de acero se incorporan en el alma de las barras (a modo de unión interior) como si las cubren (a modo de unión exterior), el acero puede verse afectado por el deterioro inevitable de la corrosión. Para cubrir esta necesidad, se sigue la protección mínima fijada por la norma ISO 2081, en función de la clase de servicio.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>Elemento de fijación</b>	<b>Clase de servicio 3</b>
Clavos y tirafondos con diámetro inferior o igual a 4mm	Fe/Zn 25c
Pernos, pasadores y clavos con diámetro superior a 4mm	Fe/Zn 25c
Grapas	Acero inoxidable
Placas dentadas y chapas de acero con espesor de hasta 3mm	Acero inoxidable
Chapas de acero con espesor superior a 3mm e inferior o igual a 5mm	Fe/Zn 25c
Chapas de acero superior a 5mm	Fe/Zn 25c

*Tabla 9 Protección contra la corrosión de los elementos metálicos*

Adicionalmente a esta protección, se deberá tener en cuenta que las uniones exteriores expuestas al agua se diseñen de modo que se eviten retenciones, e incluso su evacuación rápida.

## Materiales

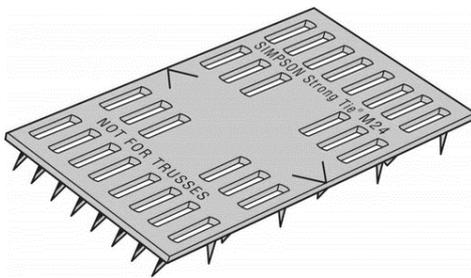
### Madera laminada encolada

Las clases de madera laminada homogénea considerada en proyecto es la GL36h.

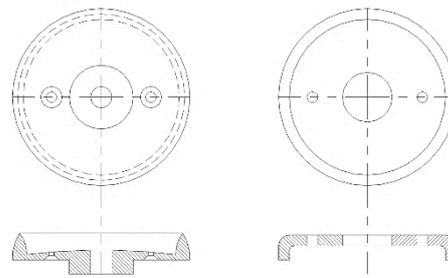
Comercialmente, aunque den una prestación menor en cuanto a su resistencia y deformabilidad, las maderas laminadas homogéneas pueden ser también las siguientes: GL24h, GL28h, GL32h y GL36h.

Se considera en esta normativa que las piezas dentadas que fueran a servir como uniones, no deben utilizarse en la clase de servicio 3 si en dicha unión se cambia la dirección de la fibra.

Es por ello por lo que, salvo uniones tipo empalme, para lograr elementos barra más esbeltos, se desaconseja y se va a prescindir en este proyecto de las uniones tipo conector de placas o dentados.



*Ilustración 18 Unión a evitar (Placa dentada)*



*Ilustración 19 Unión a evitar (Conectores de anillo)*

### Adhesivos

Los tipos de adhesivo utilizados en la madera de uso estructural queda restringido por la clase de servicio. Para la clase de servicio 3, el adhesivo Urea-formaldehído no resulta apto, pudiendo emplearse los siguientes otros:

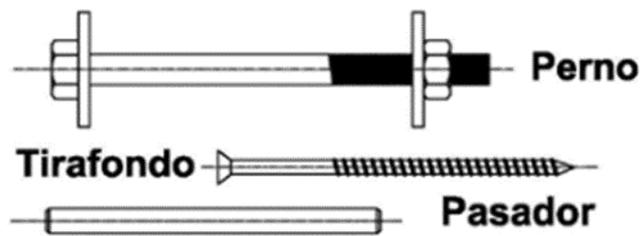
Tipo de adhesivo	Abreviatura
Fenol-formaldehído	PF
Resorcina-fenol-formaldehído	RPF
Resorcina-formaldehído	RF
Melamina-urea-formaldehído	MUF
Poliuretano	PU
Resinas epoxi	EP

*Tabla 10 Tipos de adhesivo para madera laminada encolada*

En el producto se indicará de forma visible que el adhesivo es apto para uso estructural, así como para qué clases de servicio es apto.

## Uniones

Dada la magnitud de las obras, las uniones serán a través de elementos mecánicos de fijación o barras encoladas. Los conectores de anillo, de placa o dentados quedan descartados debido a la clase de servicio que va a ofrecer la estructura.



*Ilustración 20 Mecanismo de fijación empleados*

En cuanto a los mecanismos de fijación tipo clavija, serán útiles los tirafondos, pernos o pasadores y en el proyecto se especificará para cada tipo de elemento qué mecanismo de fijación será, su resistencia característica a tracción del acero  $f_{u,k}$  y sus respectivos planos de detalle.

## Análisis estructural

Como es común en otros materiales estructurales, el método más frecuente para el cálculo de las dimensiones y la verificación de la estructura corresponde a los estados límites. Los estados límite son aquellas situaciones que, de ser superadas, puede considerarse el incumplimiento de las funciones de la estructura para la que ha sido proyectada.

Se clasifican en dos tipos:

### *Estados Límite Últimos (ELU)*

Corresponde a la situación límite que implica el inicio del fallo de la estructura. Supone el colapso total o parcial del sistema. Las causas por las que se llegaría a esta terrible situación podrían ser debidas a:

- Fallo por equilibrio de la estructura, considerada como un sólido rígido.
- Fallo por pérdida de la estabilidad de la estructura completa o para algún elemento estructural aislado.
- Fallo por agotamiento de la resistencia de la estructura o de la sección de algún elemento.
- Fallo de la resistencia de las uniones.
- Fallos debidos a fatiga o efectos que dependen del tiempo.

### *Estados Límite de Servicio (ELS)*

Corresponde a una situación límite que, a pesar de no llevar tanta severidad como una situación de ELU, su incumplimiento supone el abandono de ciertos requisitos de funcionalidad, de comodidad e incluso de apariencia que no serían tolerables en la habitabilidad de estas estructuras. En el estudio de esta situación límite, se considera la verificación de:

- El estado límite de deformaciones.
- El estado límite de vibraciones.

## Principios generales

Para el análisis relativo a situaciones de dimensionado transitorias y permanentes, se considerarán los módulos de elasticidad longitudinal  $E_d$  o transversal  $G_d$  como los valores promedios cuando realicemos comprobaciones de estado límite de servicio y último en régimen lineal. También se considerarán estos valores como tales en las comprobaciones accidentales o sísmicas.

En las comprobaciones de estado límite último relativas a estabilidad, los valores de los módulos de elasticidad en diseño serán algo mayores. Se adoptarán los valores correspondientes al 5% percentil de la propiedad de rigidez, es decir, los característicos.

## Características de las barras

Las secciones eficaces serán resultado de la reducción del área bruta de madera debido a huecos para herrajes o disposiciones constructivas. Sin embargo, en los casos donde estos agujeros se dispongan de forma simétrica para pernos pasadores o tirafondos y se encuentre la sección axialmente comprimida, despreciaremos esta reducción de sección. También no se considerará esta sección eficaz cuando tengamos la zona comprimida de la sección sometida a flexión cuando estos agujeros estén formados por un material más rígido que la madera como barras encoladas o mecanismo de unión de acero.

## Sistemas de barras

Para los modelos de estructuras en que una dimensión predomina sobre las otras dos, y ciertamente nuestra estructura puede simularse como un entramado de elementos lineales, realizaremos las siguientes comprobaciones:

### *Comportamiento de las barras*

- Análisis de primer orden, considerando la madera como un material isótropo y parámetro básico del material el módulo de deformación longitudinal  $E$ , correspondiente a la dirección de las fibras. Dicha verificación de estabilidad se realizará a través del método de longitud de pandeo equivalente.
- Análisis en primer orden similar al anterior salvo en la verificación de estabilidad, realizando un análisis global en segundo orden.

### *Uniones de apoyo y empalme de estructuras adinteladas*

- En el caso de uniones articuladas, se considerará que la unión no presenta deslizamiento.
- En el caso de uniones rígidas, se considerará la rigidez eficaz de la unión en función del deslizamiento para las uniones tipo clavija. En el caso de uniones rígidas mediante barras encoladas no será necesario.

### *Pórticos y arcos planos*

La conexión de nuestras pérgolas puede considerarse como una estructura aporticada de dos vanos internos y dos voladizos. Si en nuestros análisis los esfuerzos que soporta la estructura, como consecuencia del desplazamiento, no son despreciables, deberá comprobarse que no se alcanza la carga crítica que haga pandear los elementos. Esto se efectúa mediante un análisis de segundo orden en el que debe considerarse posibles imperfecciones geométricas y estructurales. Desviaciones de los ejes geométricos debidos a, por ejemplo, una falta de homogeneidad material. Estas imperfecciones convenientemente consideradas en el análisis para dar garantías de seguridad pueden materializarse en el modelo siguiendo unos parámetros prefijados en la normativa del CTE:

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

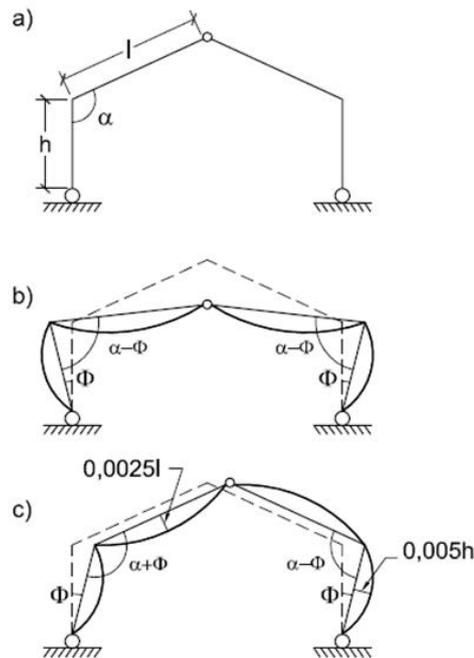
- Para estos pórticos planos: la imperfección puede simularse como una desviación inicial que se aproxime a la deformación real, mediante la aplicación de un ángulo de giro en los soportes entre nudos de la estructura definida por la excentricidad máxima.

Como la altura de nuestros pilares es de 10 metros, el valor mínimo de giro, en radianes, deberá ser de:

$$\phi = 0,005 \cdot \sqrt{\frac{5}{h}}$$

- Siendo h el valor de esta altura (longitud del soporte) en metros.
- El valor mínimo de la excentricidad deberá ser, entonces de:

$$e = 0,0025 \cdot l$$



- a) Definición de la geometría inicial  
 b) Desviación correspondiente a carga simétrica  
 c) Desviación correspondiente a carga asimétrica

*Ilustración 21 Ejemplo de desviaciones iniciales de la geometría de un pórtico a dos aguas*

## Acciones de cálculo

### Clasificación de acciones

Por su variación en el tiempo, las acciones que una estructura tendrá que soportar pueden agruparse en los siguientes grupos:

- *Acciones permanentes (G)*: Que son constantes en posición y magnitud. Será el peso propio de nuestra estructura y aquellos añadidos no estructurales que permanezcan fijados a ella como el caso de los paneles fotovoltaicos que se colocarán en la cubierta de las pérgolas. También se deberán considerar las acciones térmicas debidas a variaciones de temperatura o las debidas a la retracción.
- *Acciones permanentes de valor no constante (G\*)*: Aplicadas de manera fija en la estructura, pero de magnitud diferente con respecto al tiempo. Una posible acción permanente de valor no constante podría corresponder a movimientos diferidos de la cimentación.
- *Acciones variables*: Acciones que varían con frecuencia en el tiempo. Y presentan una variación no monótona. Estas pueden deberse a la sobrecarga de uso, acciones climáticas como la nieve o el viento, etc.
- *Acciones Accidentales*: Son aquellas cuya probabilidad de actuación a lo largo de la vida útil de la estructura es pequeña, pero tiene una magnitud importante. En estas acciones aparecen impactos, acciones sísmicas o incendios.

El valor que vamos a tomar de las acciones que resistirá la pérgola quedan definidas en la normativa UNE-EN 1991.

### Valores característicos de las acciones

Estos valores corresponden al primer valor descriptivo de dicha acción. Al margen de las condiciones particulares de la estructura, el valor característico trata de reflejar la magnitud de una acción que, antes siquiera de conocerse experimentalmente, resulta estadísticamente muy probable. Es, en las acciones permanentes, un valor promedio (siempre y cuando la variabilidad de esta acción no sea importante) y en cuanto a las acciones variables, su valor característico muestra una magnitud cuya probabilidad de ser superada en un año es muy pequeña (el 2%), es decir, un valor cuyo tiempo medio de retorno es de 50 años.

Estos valores aparecen en la normativa a modo de valores nominales.

## Valores representativos de las acciones

Tal y como hemos dejado entender, el valor representativo de una acción permanente resulta muy predecible sin entrar en evidencias experimentales, por lo que un valor característico de una acción permanente es igual al valor representativo de esta acción.

Sin embargo, en las acciones variables como el viento, que pueden estar o no y en magnitudes diferentes con respecto al tiempo, resulta complicado suponer un valor sin sobreestimar o subestimar estas acciones. Para solucionar esta condición estadística, aparecen los coeficientes de simultaneidad  $\psi$  que, combinados a la acción característica propia de la acción variable, dan como resultado unos valores muy cómodos y realistas a la hora de implantarlo en la estructura que se analiza. Estos son:

- Valor característico: Valor representativo de la acción cuando no viene acompañada por ninguna otra acción adicional.
- Valor de combinación: Valor representativo de una acción variable en combinación de otra más determinante, en una combinación de cargas poco probable.
- Valor frecuente de acción variable: Valor representativa de las acciones variables que que sólo es sobrepasado durante periodos de corta duración en la vida útil de la estructura.
- Valor casi-permanente de una acción variable: Valor representativo de la acción variable que es sobrepasado casi el 50% del tiempo de referencia.

En el caso de una acción de carácter accidental, su valor característico equivaldría al representativo, ya que se encuentra en los mismos periodos de retorno.

Acciones	Coeficientes		
	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
<i>Sobrecarga de uso según categoría DB-SE-AE</i>			
<b>G cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento</b>	0	0	0
<i>Nieve</i>			
<b>Altitud menor a 1000 msnm</b>	0,5	0,2	0
<b>Viento</b>	0,6	0,5	0
<b>Temperatura</b>	0,6	0,5	0

*Tabla 11 Coeficientes de simultaneidad para combinación de acciones consideradas en proyecto*

## Valores de cálculo de las acciones

Dejar estos resultados estadísticos sigue siendo una suposición poco segura cuando queremos diseñar, es por ello por lo que, para quedarnos del lado de la seguridad, aumentamos estos límites mediante coeficientes que se aplican a estos valores representativo. Estos coeficientes mayoran las acciones y minoramos los valores de resistencia un tanto por cien según

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

identifiquemos una carga como efecto favorable o desfavorable. Estos porcentajes que alteran de manera bruta el valor representativo son los llamados coeficientes parciales de seguridad.

La acción que consideraremos en los cálculos finalmente será este valor representativo multiplicado por el coeficiente de seguridad parcial. Este coeficiente dependerá del Estado Límite y la naturaleza de la acción.

Se debe tener en cuenta que, si analizamos varias acciones simultáneas, la probabilidad de que cada una de ellas adopte, estadísticamente hablado, su mayor valor (el valor característico) es de una probabilidad muy baja. Para adoptar los coeficientes parciales de seguridad, que irán multiplicados a cada acción, deberemos considerar lo siguiente:

- Si la situación es permanente: relativas a los estados de carga habituales de la estructura, correspondientes a las condiciones normales de uso.
- Si la situación es transitoria: relativa a condiciones aplicables durante un tiempo limitado (no se incluyen las acciones accidentales). Puede citarse como ejemplo la fase de construcción o de reparación de la obra.
- Si la situación es extraordinaria: relativa a condiciones excepcionales en las que se puede encontrar o puede estar expuesto el edificio (acciones accidentales).

*Coefficientes parciales de seguridad ELU*

Situaciones de proyecto	Tipo de acción	Efecto desfavorable	Efecto favorable
Situación Persistente o Transitoria	Permanente	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 0,80$
	Variable	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$
	Accidental	$\gamma_a = 1,00$	$\gamma_a = 0,00$
Situación Accidental	Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 0,80$
	Variable	$\gamma_Q = 1,00$	$\gamma_Q = 0,00$
	Accidental	$\gamma_a = 1,00$	$\gamma_a = 1,00$

*Tabla 12 Coeficientes parciales de seguridad para situación persistente o transitoria y situación accidental*

*Coefficientes parciales de seguridad ELS*

Comprobación	Tipo de acción	Efecto desfavorable	Efecto favorable
Estado Límite de Servicio	Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
	Variable	$\gamma_Q = 1,00$	$\gamma_Q = 0,00$

*Tabla 13 Coeficientes parciales de seguridad ELS*

## Estados límite últimos

Para las secciones de la pérgola de sección constante como las correas, vigas de borde y transición, así como los pilares, se podrá realizar las comprobaciones mediante las siguientes fórmulas:

### Tracción uniforme paralela a la fibra

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

Siendo:

- $\sigma_{t,0,d}$  la tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra
- $f_{t,0,d}$  la resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra

La tensión de cálculo será el resultado del axil de cálculo centrado Nd dividido entre el área neta, que es un área equivalente a la sección bruta descontando los huecos y agujeros destinados a las uniones.

El índice de agotamiento tiene la expresión:

$$I_{t,0} = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}, \quad I_{t,0} \leq 1$$

### Tracción uniforme perpendicular a la fibra

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}$$

Siendo:

- $\sigma_{t,90,d}$  la tensión de cálculo a tracción perpendicular a la fibra
- $f_{t,90,d}$  la resistencia de cálculo a tracción perpendicular a la fibra
- $K_{vol}$  factor de volumen
- $K_{dis}$  es un factor que modifica la resistencia siendo función de la distribución de las tensiones de tracción sobre la sección. El valor es conocido en algunos casos. Si se trata de vigas a dos aguas o curvas valdrá 1,4 y para vigas a dos aguas con intradós curvo será 1,7

El factor  $k_{vol}$  tiene su origen en el efecto del tamaño de la pieza en la resistencia. La resistencia a tracción perpendicular de la madera laminada se deduce del ensayo de una probeta cuyo volumen equivale a 0,01 metros cúbicos, valor que adoptamos en  $V_0$ .

Cuanto mayor sea el volumen de la pieza sometida a tracción menor es la resistencia, ya que existen mayores probabilidades de que se presenten defectos que conduzcan al fallo local y por extensión al fallo total de la pieza.

En piezas curvas de madera laminada encolada solicitadas a flexión resulta inevitable esta presencia. Aunque no tengamos ningún elemento curvo, ya que conseguimos que los módulos con forma de paraboloides hiperbólicos puedan ejecutarse mediante una superficie reglada de elementos rectos, la tracción perpendicular a las fibras se deberá evitar ya que esta resistencia es muy escasa.

### Compresión uniforme paralela a la fibra

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

Siendo:

- $\sigma_{c,0,d}$  la tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra
- $f_{c,0,d}$  la resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra

La tensión de cálculo será el resultado del axil de cálculo centrado  $N_d$  dividido entre el área neta, que es un área equivalente a la sección bruta descontando los huecos y agujeros destinados a las uniones y la sección neta no tendrá en cuenta la reducción de estos agujeros sin presentar un diámetro inferior a 6 o si estos agujeros están rellenos por un material más rígido que la propia madera.

El índice de agotamiento tiene la expresión:

$$I_{c,0} = \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}, \quad I_{c,0} \leq 1$$

### Compresión uniforme perpendicular a la fibra

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

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

Siendo:

- $\sigma_{c,90,d}$  la tensión de cálculo a compresión perpendicular a la fibra
- $f_{c,90,d}$  la resistencia de cálculo a compresión perpendicular a la fibra
- $F_{c,90,d}$  Valor de cálculo de la carga de compresión perpendicular a la fibra
- $A_{ef}$  Área de contacto eficaz en compresión perpendicular a la fibra

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

- $k_{c,90}$  un factor que considera la distribución de carga, la posibilidad de hienda y la deformación máxima por compresión perpendicular.

En el caso de la madera laminada encolada, el coeficiente  $K_{c90}$  valdrá 1,5 si se trata de un elemento durmiente o 1,75 si se trata de una pieza situada sobre un apoyo aislado.

## Flexión simple

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

Siendo:

- $\sigma_{m,d}$  la tensión de cálculo a flexión
- $F_{m,d}$  la resistencia de cálculo a flexión

Para el análisis de las tensiones provocadas por la flexión son válidas las expresiones habituales de la Resistencia de Materiales para secciones homogéneas e isotrópicas. Así, para una sección solicitada por un momento flector  $M_d$ , tenemos:

$$\sigma_{max} = \frac{M_d}{W}$$

Siendo  $W$  el módulo resistente de la sección.

En cuanto al índice de aprovechamiento, la expresión es:

$$I_m = \frac{\sigma_{md}}{f_{md}}, \quad I_m \leq 1$$

## Flexión esviada

En cada punto de la sección se debe comprobar que la tensión aplicada no supera la resistencia.

La expresión de las tensiones es el resultado combinado de las tensiones debidas a los momentos flectores de cada eje principal:

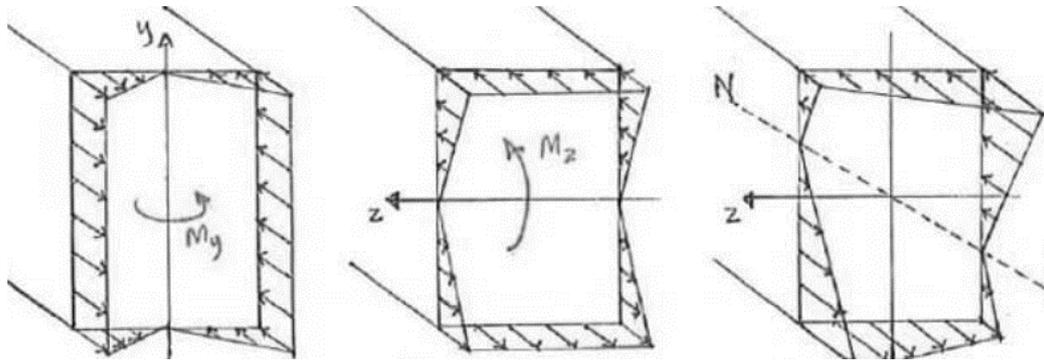
$$\sigma_{max} = \frac{M_{y,d}}{I_y} z + \frac{M_{z,d}}{I_z} y$$

Siendo:

- $M_y$ : momento flector respecto al eje principal y-y de la sección.
- $M_z$ : momento flector respecto al eje principal z-z de la sección.
- $I_y$ : momento de inercia respecto al eje principal y-y de la sección
- $I_z$ : momento de inercia respecto al eje principal z-z de la sección

Si la sección fuera rectangular, estas tensiones máximas se producirían en dos esquinas opuestas con respecto al centro de gravedad de la sección.

El índice de aprovechamiento o valor de agotamiento viene a adoptarse una expresión combinada de la flexión simple en la que uno de los dos ejes viene reducido por un coeficiente  $k_m$ . La justificación de este coeficiente reductor se debe al hecho de que en la flexión esviada la tensión máxima se sitúa en un solo punto, mientras que en la flexión simple la tensión máxima queda distribuida sobre todo el borde y resulta más severo.



*Ilustración 22 Ley de tensiones normales en flexión simple eje y, eje z y flexión esviada de ambas*

$$I_{m,y} + I_{m,z} \cdot k_m = \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \cdot k_m \leq 1$$

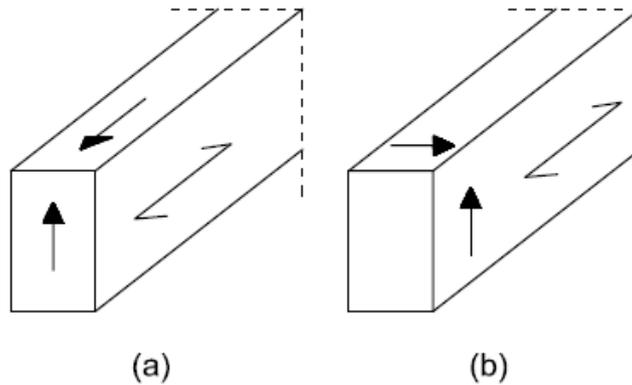
$$I_{m,z} + I_{m,y} \cdot k_m = \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} + \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} \cdot k_m \leq 1$$

Debiendo cumplirse las dos ecuaciones. Estas comprobaciones no tienen en cuenta la posibilidad del pandeo lateral, por lo que, si se tratara de una viga sometida a flexión, se deberá hacer.

El valor del coeficiente  $k_m$  es de 0,7 en secciones rectangulares y 1 en el resto de los casos.

### Cortante

Para solicitaciones de cortante con una de las componentes paralela a la dirección de la fibra (a), y para solicitaciones de cortante con ambas componentes perpendiculares a la dirección de la fibra, también llamada rodadura, (b), debe cumplirse la condición siguiente:



*Ilustración 23 Tensiones de cortadura: a) por flexión; b) rodadura*

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

Siendo:

- $\tau_d$  la tensión de cálculo de cortante.
- $f_{v,d}$  la resistencia de cálculo considerada ya sea paralela a la fibra o por rodadura. La resistencia a cortante por rodadura podrá considerarse el doble de la resistencia a tracción perpendicular a las fibras y es menor a la resistencia por cortante por flexión.

Hay algunos expertos que consideran excesiva una medida de seguridad empleada que tiene en cuenta la influencia de las fendas que reducen el ancho eficaz de la pieza debida al posible deslizamiento de las fibras.

En el proyecto se ha considerado este ancho eficaz como la dimensión geométrica en la cual el cortante es predominante, pudiendo considerar situaciones en la que fuera el canto y no el ancho quien debiera aplicarse esta reducción.

En cualquier caso, se trata de un coeficiente que, en madera laminada encolada, corresponde a 0,67.

El valor del aprovechamiento será entonces de:

$$I_v = \frac{\tau_d}{f_{vd}}, \quad I_v \leq 1$$

## Torsión

$$\tau_{tor,d} \leq f_{v,d} \cdot k_{form}$$

Siendo:

- $\tau_{tor,d}$  tensión tangencial de cálculo debida a la torsión
- $f_{v,d}$  resistencia de cálculo a cortante debida a flexión.
- $k_{forma}$ , factor que depende de la sección transversal y es igual al valor mínimo entre 2 y  $(1+0.15 \cdot h/b)$  en secciones rectangulares donde  $h$  (canto) sea una dimensión mayor a  $b$  (ancho).

En secciones rectangulares, el valor de la tensión tangencial máxima se haya en el centro del lado mayor. Su expresión es:

$$\tau_{max} = \frac{T}{\alpha \cdot h \cdot b^2}$$

Siendo:

- $T$  el momento torsor de diseño.
- $\alpha$ , un coeficiente adimensional que considera la relación canto y ancho y que permite estimar de forma aproximada el punto de inflexión de las tensiones del torsor.
- $h$  y  $b$  son respectivamente el canto y el ancho.

El valor de aprovechamiento de la sección tiene la expresión:

$$I_{tor} = \frac{\tau_{tor,d}}{f_{vd} \cdot k_{forma}}, \quad I_v \leq 1$$

## Flexotracción

Esta comprobación es una combinación de la comprobación a tracción centrada y flexión esviada. La flexión esviada obligaba a realizar dos comprobaciones en los que intervenía el coeficiente  $k_m$  debido a que la tensión máxima se producía en un punto y no en todo el ancho de la sección. Las condiciones que deben cumplirse entonces son:

$$I_{t,0} + I_{m,y} + I_{m,z} \cdot k_m = \frac{\sigma_{t0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \cdot k_m \leq 1$$

$$I_{t,0} + I_{m,z} + I_{m,y} \cdot k_m = \frac{\sigma_{t0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} + \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} \cdot k_m \leq 1$$

## Flexocompresión

Esta comprobación es una combinación de la comprobación a compresión centrada y flexión esviada. La flexión esviada obligaba a realizar dos comprobaciones en las que intervenía el coeficiente  $k_m$  debido a que la tensión máxima se producía en un punto y no en todo el ancho de la sección. Las condiciones que deben cumplirse entonces son:

$$I_{c,0}^2 + I_{m,y} + I_{m,z} \cdot k_m = \left( \frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \cdot k_m \leq 1$$

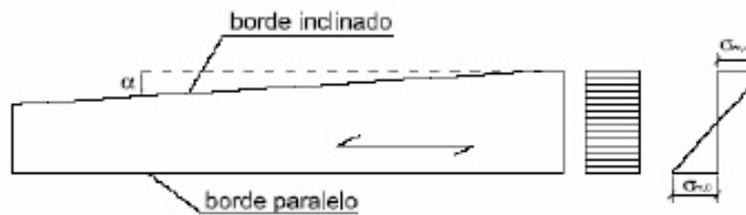
$$I_{c,0}^2 + I_{m,z} + I_{m,y} \cdot k_m = \left( \frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \cdot k_m \leq 1$$

Como se puede comprobar en la ecuación el índice de compresión paralela se suma elevado al cuadrado. Esta es una medida menos restrictiva ya que el valor menor a la unidad elevado al cuadrado hace que este cobre menos protagonismo en la expresión. Esta medida se justifica debido a que el fallo por compresión paralela a la directriz de una pieza poco esbelta tiene lugar siempre que se alcance la plastificación de las fibras y, dado que se trata de madera, todas las comprobaciones que estamos realizando tratamos de no superar el estado elástico del material.

## Comprobaciones singulares en piezas de madera laminada

Además de las comprobaciones anteriores que serán tenidas en cuenta en las secciones de dimensión constante ( que serán la mayoría de los elementos de nuestra estructura) también se contempla que las vigas principales sean secciones de canto variable para optimizar el nivel de solicitaciones y ahorrar material. Sin embargo, esta disposición hace que la directriz de las fibras sea ligeramente inclinada con respecto a las caras internas o externas de estas vigas.

En cubiertas, es habitual considerar que el borde paralelo corresponde a la cara vista de la viga desde el interior y que sea la oculta la cara con inclinación.



*Ilustración 24 Pieza de canto variable*

Si se considera una cuña extraída del borde inclinado de una rebanada con anchura  $dx$ , se entenderá que existen tensiones normales  $y$ , adicionalmente habrá tensiones tangenciales  $y$  perpendiculares a la fibra para alcanzar el estado de equilibrio.

Para realizar la comprobación de este elemento deberá considerarse cada borde por separado. El borde paralelo a las fibras es similar a la comprobación de las secciones constantes mientras que el borde inclinado deberá llevar un coeficiente minorador de resistencia.

$$I_{m,0} = \frac{\sigma_{md}}{f_{md}}, \quad I_m \leq 1$$

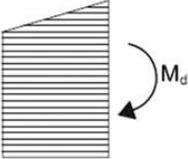
Esta anterior expresión será la comprobación a flexión del borde paralelo, mientras que para el borde inclinado será el siguiente:

$$I_{m,\alpha} = \frac{\sigma_{md}}{f_{md} \cdot k_{m\alpha}}, \quad I_{m,\alpha} \leq 1$$

Siendo el valor  $k_{m\alpha}$  un factor que penaliza la resistencia a flexión por el efecto de la desviación de la fibra. Este valor dependerá de si el borde quede traccionado o comprimido.

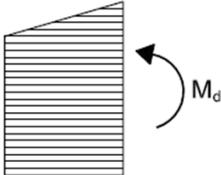
En caso de que el borde inclinado esté sometido a tensión de tracción:

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{m,d}}{0,75 \cdot f_{v,d}} \cdot \operatorname{tg}\alpha \right)^2 + \left( \frac{f_{m,d}}{f_{t,90,d}} \cdot \operatorname{tg}^2\alpha \right)^2}}$$


*Ilustración 25 Ecuación del factor reductor de resistencia a flexión para secciones de canto variable cuando el borde inclinado se encuentra traccionado*

En caso de que el borde inclinado esté sometido a tensión de compresión:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \operatorname{tg}\alpha \right)^2 + \left( \frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \operatorname{tg}^2\alpha \right)^2}}$$


*Ilustración 26 Ecuación del factor reductor de resistencia a flexión para secciones de canto variable cuando el borde inclinado se encuentra comprimido*

## Estabilidad de piezas de madera

### Pandeo de columnas solicitadas a compresión y flexocompresión

Una pieza comprimida axialmente, fabricada con un material como la madera (cuyo comportamiento es elástico-lineal) que sea perfectamente recto y de sección circular o cuadrada, biarticulada en sus extremos, pandeará cuando la carga axial supere el valor crítico de la carga de Euler.

Esta carga teórica tiene en cuenta una longitud y unas condiciones concretas. Sin embargo, es probable que las condiciones de restricción sean diferentes y aquí interviene un coeficiente beta que nos permite valorar la longitud efectiva que es susceptible de deformarse y la comprometería al elemento a pandear. Esta carga crítica se obtendría con esta dimensión efectiva y por tanto, podríamos comprobar la capacidad de las columnas frente el pandeo.

Las comprobaciones de inestabilidad de las piezas se llevan a cabo con las acciones mayoradas y los coeficientes empleados en la combinación de acciones de los Estados Límite Últimos que ya hemos mencionado.

### Longitud de pandeo

Las esbelteces mecánicas  $\lambda_y$  y  $\lambda_z$  para la barra patrón de Euler se obtienen dividiendo la longitud teórica de la barra por los radios de giro respectivamente y, como ya hemos mencionado, si las

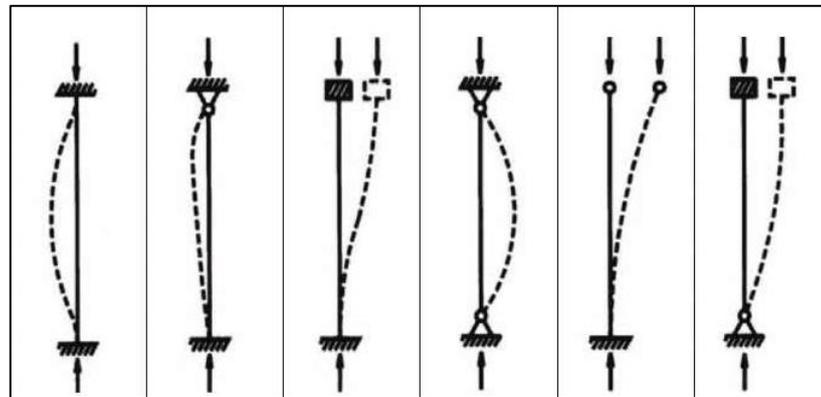
*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

condiciones de los apoyos son diferentes al contorno mencionado, el valor de la carga crítica también lo será:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{(\beta \cdot l)^2}$$

Siendo:

- Beta el coeficiente que depende de las condiciones de restricción de los extremos de la barra para el movimiento.
- L la longitud de la barra. Siendo el producto de beta por esta longitud la distancia ideal a la que, aplicando la fórmula de Euler, proporciona la carga crítica real. Esta longitud de pandeo coincide con la distancia entre puntos de inflexión de la deformada de la columna cuando inicia el pandeo.



Valor teórico	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valor recomendado	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.0

*Tabla 14 Valor de beta teóricos y recomendados según varias condiciones de contorno*

En las clases de enlace o longitudes de arriostramiento de la columna pueden diferir según los planos principales de la sección en general y es por ello que debemos considerar dos valores de beta para el eje y y el eje z.

### *Coefficiente de inestabilidad*

Para la comprobación a flexocompresión de la columna, será necesario obtener el coeficiente de inestabilidad  $k_c$ . Este coeficiente, al igual que el parámetro beta, deberá hallarse para cada plano principal y,z.

Estos coeficientes se determinan en función de una esbeltez relativa definida por la expresión:

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}}$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}}$$

Siendo:

- $\sigma_{c,crit,y} = \text{Pi}^2 * E_{0,k} / \lambda_y^2$
- $E_{0,k}$  módulo de elasticidad característico paralelo a las fibras
- $\lambda_y$  esbelteces mecánicas

Finalmente, el coeficiente de inestabilidad puede obtenerse en la siguiente tabla. Estos coeficientes dependen de la clase resistente de la madera y de su esbeltez mecánica.

Clase Resistente	Esbeltez mecánica de la pieza																			
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
<b>C14</b>	0,98	0,93	0,86	0,74	0,60	0,48	0,39	0,31	0,26	0,22	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07	
<b>C16</b>	0,99	0,94	0,87	0,77	0,64	0,51	0,41	0,34	0,28	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	
<b>C18</b>	0,99	0,94	0,88	0,78	0,65	0,53	0,43	0,35	0,29	0,24	0,21	0,18	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>C20</b>	0,99	0,94	0,88	0,78	0,66	0,54	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>C22</b>	0,99	0,94	0,88	0,78	0,66	0,53	0,43	0,35	0,29	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>C24</b>	0,99	0,95	0,89	0,80	0,68	0,55	0,45	0,37	0,31	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>C27</b>	0,99	0,95	0,89	0,80	0,69	0,57	0,46	0,38	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	
<b>C30</b>	0,99	0,95	0,88	0,79	0,67	0,55	0,44	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>C35</b>	0,99	0,95	0,88	0,79	0,67	0,55	0,45	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>C40</b>	0,99	0,95	0,89	0,80	0,69	0,56	0,46	0,38	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	
<b>C45</b>	0,99	0,95	0,89	0,81	0,69	0,57	0,47	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	
<b>C50</b>	0,99	0,95	0,89	0,81	0,69	0,57	0,47	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,09	
<b>D30</b>	0,99	0,95	0,88	0,79	0,67	0,55	0,44	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>D35</b>	0,99	0,95	0,88	0,79	0,67	0,55	0,45	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	
<b>D40</b>	0,99	0,95	0,89	0,80	0,69	0,56	0,46	0,38	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	
<b>D50</b>	1,00	0,96	0,91	0,83	0,73	0,61	0,50	0,42	0,35	0,29	0,25	0,21	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	
<b>D60</b>	1,00	0,96	0,92	0,85	0,76	0,65	0,54	0,45	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	
<b>D70</b>	1,00	0,97	0,93	0,87	0,79	0,69	0,58	0,49	0,41	0,35	0,30	0,26	0,22	0,20	0,17	0,16	0,14	0,13	0,11	
<b>GL24h</b>	1,00	0,98	0,95	0,89	0,80	0,66	0,54	0,44	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	
<b>GL28h</b>	1,00	0,98	0,95	0,89	0,79	0,65	0,53	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	
<b>GL32h</b>	1,00	0,98	0,94	0,89	0,79	0,65	0,52	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	
<b>GL36h</b>	1,00	0,98	0,94	0,89	0,79	0,65	0,53	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	
<b>GL24c</b>	1,00	0,98	0,96	0,91	0,84	0,72	0,60	0,49	0,41	0,34	0,29	0,25	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	
<b>GL28c</b>	1,00	0,98	0,95	0,91	0,82	0,70	0,57	0,47	0,39	0,32	0,27	0,24	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	
<b>GL32c</b>	1,00	0,98	0,95	0,90	0,82	0,69	0,57	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	

*Ilustración 27 Valor del coeficiente de inestabilidad para las clases resistentes de madera laminada encolada*

Entonces, la comprobación de la inestabilidad de columnas sometidas a flexo-compresión ha de efectuarse según dos planos principales de inercia. Para ello deberán cumplirse las dos condiciones siguientes:

$$\frac{I_{c,0}}{k_{c,y}} + I_{m,y} + I_{m,z} \cdot k_m = \frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d} \cdot k_{c,y}} + \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \cdot k_m \leq 1$$
$$\frac{I_{c,0}}{k_{c,z}} + I_{m,z} + I_{m,y} \cdot k_m = \frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d} \cdot k_{c,z}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} + \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} \cdot k_m \leq 1$$

## Vuelco lateral de vigas

Al igual que existe una carga crítica de pandeo para las piezas comprimidas se puede hablar de un momento flector crítico, en piezas sometidas a flexión.

Son las secciones esbeltas las que pueden presentar problemas de inestabilidad por vuelco. Si una sección fuera esbelta, la relación entre las inercias del eje débil y eje fuerte son muy pequeñas y frente a la unidad podría llegar a ser casi nulas. En el eurocódigo se admite esta simplificación pudiendo sintetizarse más aún la expresión del momento crítico (valor del momento flector que, de ser superado, se produciría el vuelco lateral de la viga).

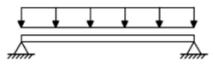
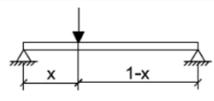
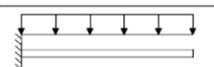
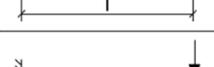
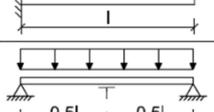
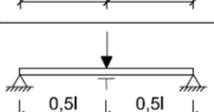
$$M_{Y,crit} = \frac{\pi}{l} + \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_{tor}}$$

Y de la misma manera en que se habla de una tensión crítica de pandeo, también existe una expresión tensional que relaciona este fenómeno y que para obtenerse se tiene en cuenta dicho momento crítica y el módulo resistente de la sección:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{Y,crit}}{W_y}$$

Y cuando las condiciones de carga y tipos de apoyo son diferentes al modelo teórico, al igual que sucede en el pandeo aparecen coeficientes beta que modifican la longitud efectiva de la barra de modo que se pueda estimar qué magnitud longitudinal es susceptible del vuelco lateral. Se adjunta una tabla con distintos arquetipos y valores beta que ofrece la normativa CTE:

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Tipo de carga y viga	$\beta_v = L_{ef} / L$
	$\beta_v = 1,00$
	$\beta_v = 0,95$
	$\beta_v = 0,8/\alpha$ $\alpha = 1,35 - 1,4 x(L - x)/L^2$
	$\beta_v = 2,00$
	$\beta_v = 1,20$
	$\beta_v = 1,70$
	$\beta_v = 0,40$
	$\beta_v = 0,25$

*Ilustración 28 Valores de coeficiente beta,v para vigas con diferente condición de carga y restricción de los apoyos*

Los ejemplos indicados en la imagen tienen impedido el desplazamiento lateral en los apoyos y en los dos últimos casos representados, también, en un punto intermedio. Generalmente, el sistema de arriostramiento en vigas de cierta luz inmoviliza varios puntos intermedios y no son aplicables directamente estos casos. En el caso de vigas biapoyadas esta comprobación se realiza para el tramo arriostrado, donde el momento es mayor, tomándose como distancia entre secciones arriostradas la correspondiente al tramo central, con  $\beta_{v,v}=1$ , como si el momento fuera constante.

Si la esbeltez relativa fuera inferior a 0,75 no será necesario realizar la comprobación a vuelco ya que será más influyente la comprobación de agotamiento frente a flexión.

Para comprobar el vuelco lateral ante la flexión simple, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{md} = k_{crit} \cdot f_{md}$$

Siendo:

- $\sigma_{md}$  tensión de cálculo a flexión
- $f_{md}$  resistencia de cálculo a flexión
- $k_{crit}$  coeficiente de vuelco lateral, obtenido en función de la esbeltez relativa.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

$$k_{crit} = 1.56 - 0.75\lambda_{rel,m} \quad \text{para } 0.75 < \lambda_{rel,m} \leq 1$$

$$k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \quad \text{para } 1.4 < \lambda_{rel,m}$$

En el caso de la flexocompresión, se deberá cumplir la siguiente condición (considerar  $M_{yd}$  como el momento flector respecto al eje fuerte):

$$\left( \frac{\sigma_{md}}{k_{crit} \cdot f_{md}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c0d}}{\chi_{cz} \cdot f_{c0d}} \leq 1$$

Siendo:

- $\sigma_{c0d}$  tensión de cálculo a compresión
- $F_{c0d}$  resistencia de cálculo a compresión
- $\chi_{cz}$  coeficiente de pandeo por flexión respecto al eje débil (eje z)

$$\chi_{cz} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

Clase Resistente	Coeficiente de esbeltez geométrica $C_e$															
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	
C14	1,00	1,00	0,91	0,82	0,73	0,63	0,54	0,45	0,39	0,33	0,29	0,26	0,23	0,20	0,18	
C16	1,00	1,00	0,91	0,82	0,73	0,64	0,54	0,46	0,39	0,34	0,29	0,26	0,23	0,20	0,18	
C18	1,00	1,00	0,91	0,82	0,72	0,63	0,54	0,45	0,38	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18	
C20	1,00	0,99	0,90	0,80	0,71	0,61	0,52	0,43	0,37	0,32	0,28	0,24	0,22	0,19	0,17	
C22	1,00	0,98	0,88	0,78	0,68	0,59	0,49	0,41	0,35	0,30	0,26	0,23	0,21	0,18	0,16	
C24	1,00	0,98	0,88	0,79	0,69	0,59	0,50	0,42	0,36	0,31	0,27	0,23	0,21	0,19	0,17	
C27	1,00	0,97	0,87	0,77	0,67	0,57	0,48	0,40	0,34	0,29	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16	
C30	1,00	0,94	0,83	0,73	0,62	0,52	0,43	0,36	0,31	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	
C35	1,00	0,91	0,81	0,70	0,59	0,48	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	
C40	1,00	0,90	0,78	0,67	0,56	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	
C45	0,99	0,88	0,76	0,65	0,53	0,43	0,36	0,30	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	
C50	0,98	0,86	0,75	0,63	0,52	0,42	0,34	0,29	0,25	0,21	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12	
D30	1,00	0,94	0,83	0,73	0,62	0,52	0,43	0,36	0,31	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	
D35	1,00	0,91	0,81	0,70	0,59	0,48	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	
D40	1,00	0,90	0,78	0,67	0,56	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	
D50	1,00	0,90	0,79	0,68	0,57	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	
D60	1,00	0,90	0,79	0,68	0,57	0,46	0,38	0,32	0,28	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	
D70	1,00	0,90	0,79	0,68	0,57	0,47	0,39	0,33	0,28	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	
GL24h-c	1,00	1,00	0,96	0,87	0,79	0,70	0,62	0,53	0,45	0,39	0,34	0,30	0,26	0,24	0,21	
GL28h-c	1,00	1,00	0,94	0,85	0,76	0,67	0,58	0,49	0,42	0,36	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20	
GL32h-c	1,00	1,00	0,92	0,83	0,74	0,65	0,56	0,47	0,40	0,35	0,30	0,26	0,23	0,21	0,19	
GL36h-c	1,00	1,00	0,91	0,81	0,72	0,63	0,53	0,45	0,38	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18	

Tabla 15 Valores del coeficiente de vuelco lateral,  $k_{crit}$  para vigas de sección rectangular

## Estados límite de servicio

### Deformación diferida

Para comprobar las deformaciones, debemos tener en cuenta las deformaciones instantáneas y diferidas por motivo de la duración de las acciones, la clase de servicio de la estructura, factores de fluencia y posibles deslizamientos en las uniones.

La deformación total será resultado de ambas deformaciones y para calcular la deformación diferida, bastará con obtener la instantánea y multiplicarle una serie de coeficientes que nos lleguen a aclarar qué orden de magnitud es acertado suponer con respecto a nuestra deformación inicial.

La componente diferida de un desplazamiento,  $\delta_{dif}$ , se determina a partir de la expresión:

$$\delta_{dif} = \delta_{ini} \cdot \psi_2 \cdot k_{def}$$

Siendo:

- $\delta_{ini}$  desplazamiento elástico
- $\psi_2$  coeficiente de simultaneidad para cargas permanentes
- $k_{def}$  factor de fluencia en función de la clase de servicio

Material	C1	C2	C3
Madera laminada encolada	0,6	0,8	2,0

Tabla 16 Valor de  $k_{def}$  para la madera laminada encolada en función de la clase de servicio

### Deslizamiento de las uniones

Para uniones de tipo clavija, aquellas en la que instalemos pernos o pasadores y que estén dispuestas ortogonalmente a las piezas a unir (además de sus fibras) se considerará un módulo de deslizamiento  $K_{ser}$  por plano de cortadura y por elemento de fijación. Estos valores se pueden adoptar si se conoce el tipo de unión, la densidad de la madera media y conociendo el diámetro de la clavija.

En nuestro caso, ya que no podemos emplear conectores de placa o anillo, se adjunta únicamente el valor que adoptaremos durante el proyecto:

Tipo de elemento de fijación	Madera-madera
Pasadores	$\rho_m^{1.5} \cdot d/23$
Tirafondos	
Pernos	

Tabla 17 Valores de  $K_{ser}$  para elementos de fijación de tipo clavija en N/mm

## Consideraciones frente al fuego

Para tener en cuenta la situación de la estructura frente al fuego la normativa da por válido llevar a cabo las comprobaciones y la formulación que se ha seguido hasta ahora aplicando en las secciones resistentes una reducción debida a tales efectos.

Además, las resistencias en estas comprobaciones no se reducen por el coeficiente de seguridad del material. Las secciones netas que el fuego teórico producen se pueden obtener a través del coeficiente de carbonización Beta 1, cuyo valor es función del material empleado y del tipo de sección.

Durante este incendio teórico, las piezas de madera sufren una carbonización en las superficies expuestas al fuego que reducen su sección de forma continuada y constante de modo que resulta sencillo estimar la sección eficaz al cabo de un tiempo de incendio. La profundidad de carbonización se define como esta distancia entre la superficie original de la pieza a la superficie que el fuego ha consumido.

La combinación de acciones que hemos empleada considera como acción variable principal el viento, por lo que su coeficiente de persistencia  $\chi_{i,sub,1}$  es de 0,5. El resto de las cargas variables van multiplicadas por el coeficiente de persistencia  $\chi_{i,sub,2}$  igual a 0.

Además, el valor de  $k_{mod}$  y los coeficientes de seguridad para la madera no se tienen en cuenta o valen la unidad.

El incremento de la temperatura produce una reducción de 1cm de espesor en cada sección.

Finalmente, la verificación se lleva a cabo con la formulación:

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

$$\sigma_{fi,d} \leq k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$\sigma_{fi,d} \leq k_{fi} \cdot k_{mod,fi} \cdot \frac{f_k}{\gamma_{M,fi}}$$

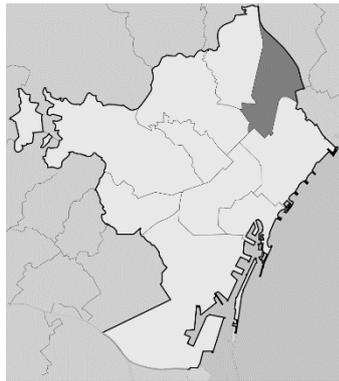
Siendo:

- $f_{20}$  La resistencia a temperatura normal con un percentil del 20%
- $k_{fi}$  El coeficiente para la conversión del percentil de 5% característico al percentil 20% que estudiamos.

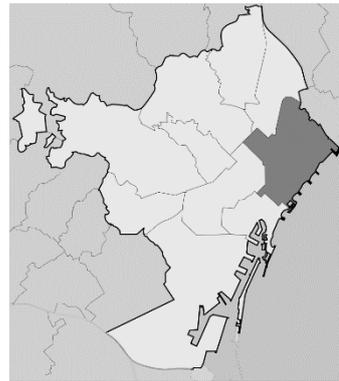
# ANÁLISIS ESTRUCTURAL

## EMPLAZAMIENTO

La Sagrera es una estación ferroviaria intermodal que se encuentra actualmente en construcción. Está ubicada en la capital de la comunidad autónoma de Cataluña, en las zonas de San Andrés y San Martín. Su diseño tiene como objetivo ser un nexo para los servicios de alta velocidad, larga y media distancia, así como cercanías, metros y autobuses interurbanos.



*Ilustración 29 Barrio de San Martín*



*Ilustración 30 Barrio de San Andreu*

La idea de la estación se remonta a 1996 mediante una modificación del plan general metropolitano. El proyecto de una estación para la línea de alta velocidad entre Madrid, Barcelona y Francia no se proyectó hasta finales de los años 90 y no se iniciaron las obras hasta 2009. Sin embargo, la crisis financiera de 2008 no se libró de los recortes en inversiones. El Ministerio de Fomento llegó a un acuerdo con el ayuntamiento de Barcelona para reducir las inversiones de la estación de modo que de 820 millones de euros previstos fueran finalmente 650. Esta medida de ahorro se trasladó a la infraestructura con un presupuesto más elevado (un andén de alta velocidad de 200 metros, la omisión de elementos ornamentales, así como la modificación de la cubierta que pretendemos calcular).

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 31 Ejecución de las obras*

En el año 2015 la obra tuvo que paralizarse y no hubo actividad hasta pasados 3 años. Teniendo en cuenta los trabajos que han realizado hasta ahora, se prevé la inauguración el año que viene, 2023. Sin embargo, se cree que el proyecto no quedará finalizado completamente hasta el año 2030.



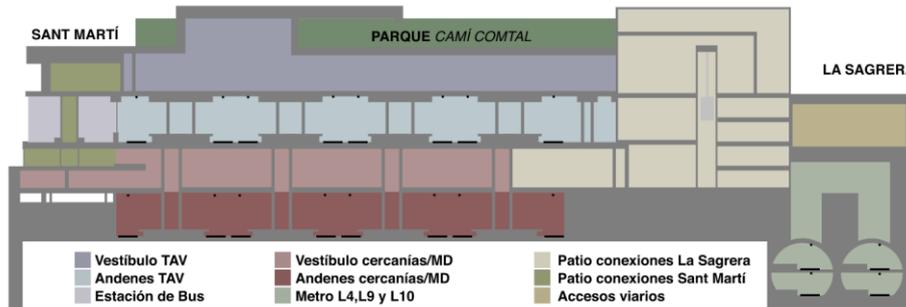
*Ilustración 32 Mapa urbano y perímetro del proyecto*

La construcción de la estación está incluida dentro de un gran proyecto de transformación urbanística que afecta a ciento sesenta y cuatro hectáreas de los distritos de San Andrés y San Martín. Esta transformación pretende conectar estos dos barrios que están separados actualmente por las vías de ferrocarril que discurren a cielo abierto, mediante la cobertura de 38 hectáreas de vías.

De las ciento sesenta y cuatro hectáreas que se van a reformar, un 80 % se dedicarán a zonas verdes y equipamientos, y un 20 % a zonas residenciales. Se prevén construir 13 000 viviendas nuevas, de las cuales el 43 % serán de protección oficial, en las que vivirán un total de veinticinco

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

mil personas. Se edificarán comercios y oficinas que ocuparán una superficie de 140 000 m<sup>2</sup> y hoteles con ochocientas camas aproximadamente, en una superficie de 35 000 m<sup>2</sup>.

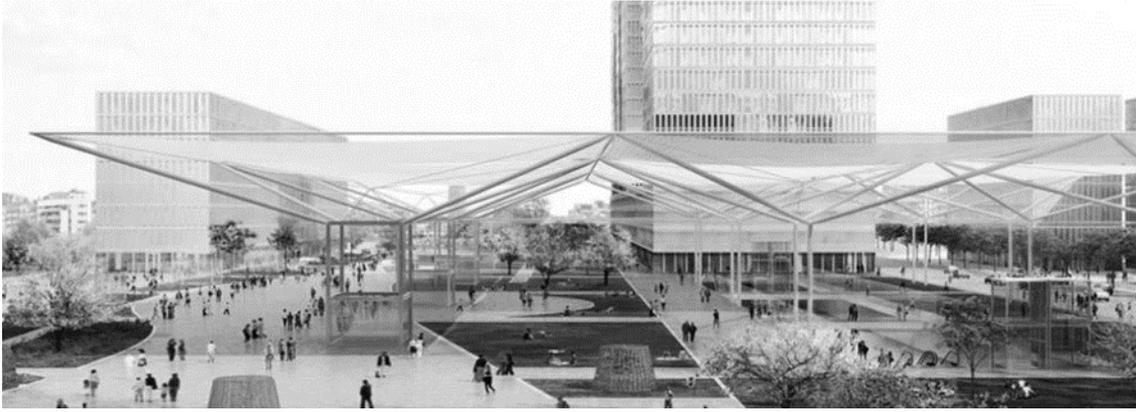


*Ilustración 33 Esquema en alzado de la estación y distribución de los servicios de la estación*

La pérgola que pretendemos analizar se ubica en el parque Camí Comtal, como se puede observar en la anterior ilustración (en el esquema de distribución de servicios). Este parque forma parte de una reforma urbanística que será la mayor zona verde de la ciudad y en ella se dispondrá varios accesos desde el parque a la estación. El parque, que ocupará una superficie de 40 hectáreas repartidas a lo largo de una franja de cuatro kilómetros sobre la cubierta de las vías del tren en la Sagrera y San Andrés de Palomar, tendrá cinco paisajes con bosques, huertos, fuentes, equipamientos y áreas de descanso.



*Ilustración 34 Alzado conceptual del proyecto*



*Ilustración 35 Vista conceptual del proyecto en 3D*

## DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA PREVIA

Resumiendo lo escrito en el anterior apartado y según el proyecto de referencia, la nueva pérgola de madera persigue una solución:

- **Eficiente** estructuralmente, con una reducción de las dimensiones de sus elementos.
- **Económica**, fundamentada en una optimización de los materiales y ahorro en los procedimientos constructivos.
- **Elegante**, con una cubierta singular de doble curvatura, formada por paraboloides hiperbólicos, ubicados sobre pilares centrales que recrean un tejido más natural.
- **Sostenible**, por razón y uso de la madera, con un equilibrado balance de emisiones de dióxido de carbono.

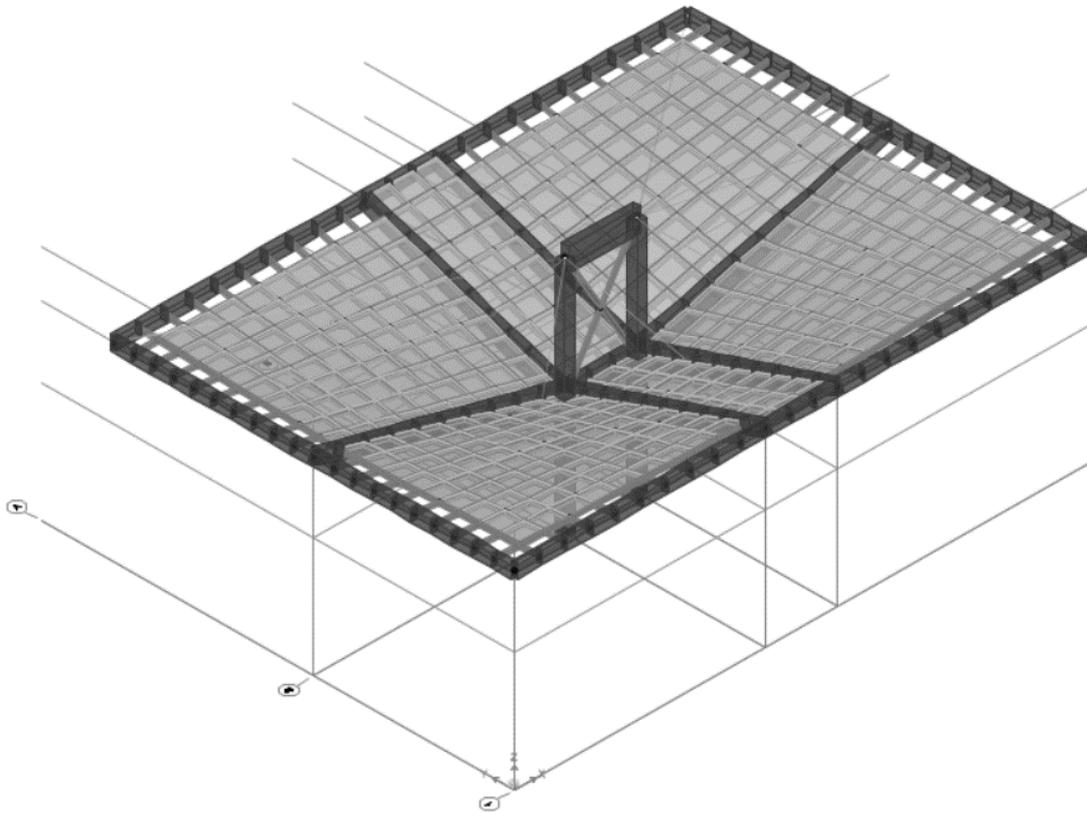
Del proyecto de referencia “Servicios para la redacción de los proyectos de construcción de la arquitectura, las instalaciones y la urbanización de la estación de La Sagrera” tenemos la información relativa al predimensionamiento de la estructura. Esta información será la que tomemos de inicio y que deberemos comprobar mediante el cálculo de los Estado Límite. La información no facilitada, como la estructura auxiliar y el atirantado, deberán suponerse. Siempre bajo un criterio de semejanza y proporción a la estructura definida en el documento.

El sistema estructural se compone de nueve pérgolas. Todas siguen uno de estos dos modelos:

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

*Modelo de pérgola A*

- La cubierta de la pérgola abarca en planta una superficie de 48x33,50 m<sup>2</sup>.
- La cubierta es apoyada en dos pilares.
- Tres pérgolas tienen este modelo.

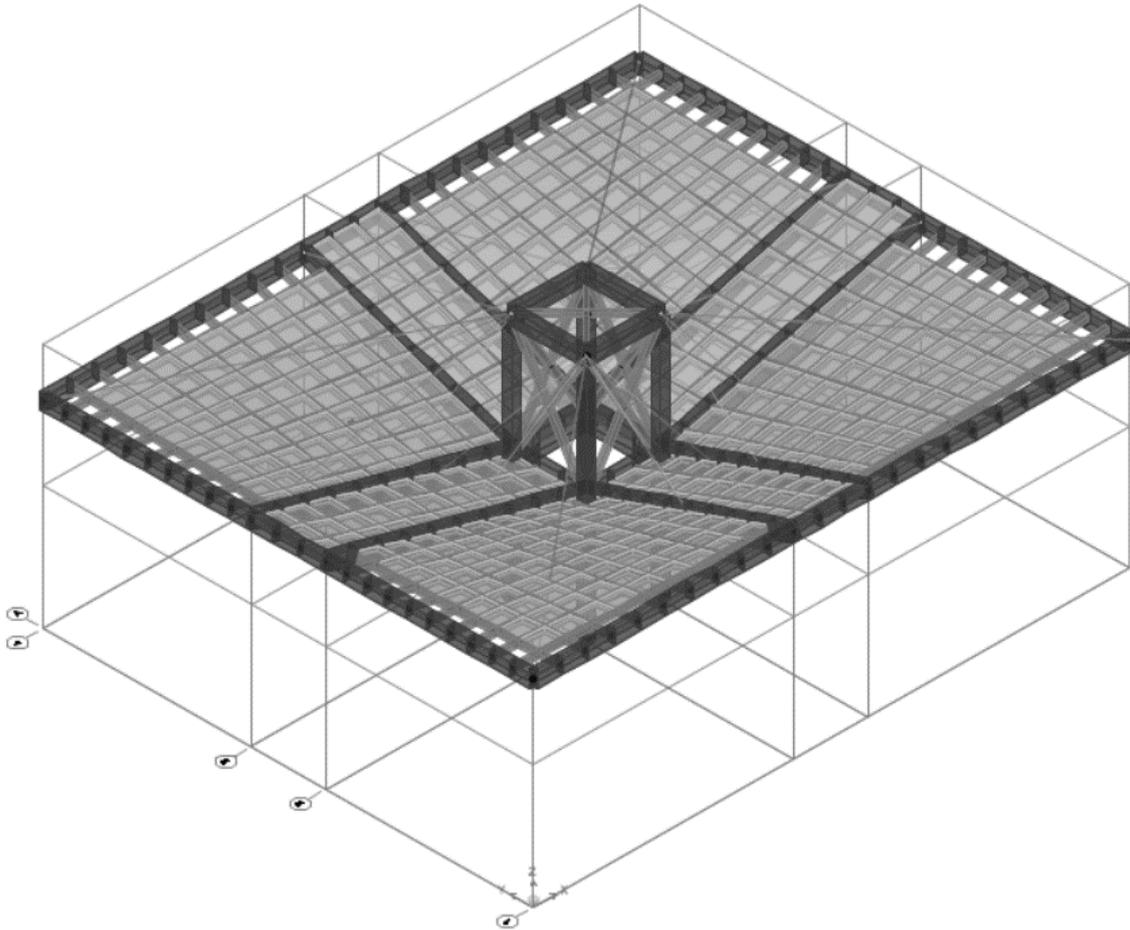


*Ilustración 36 Pérgola A modelada*

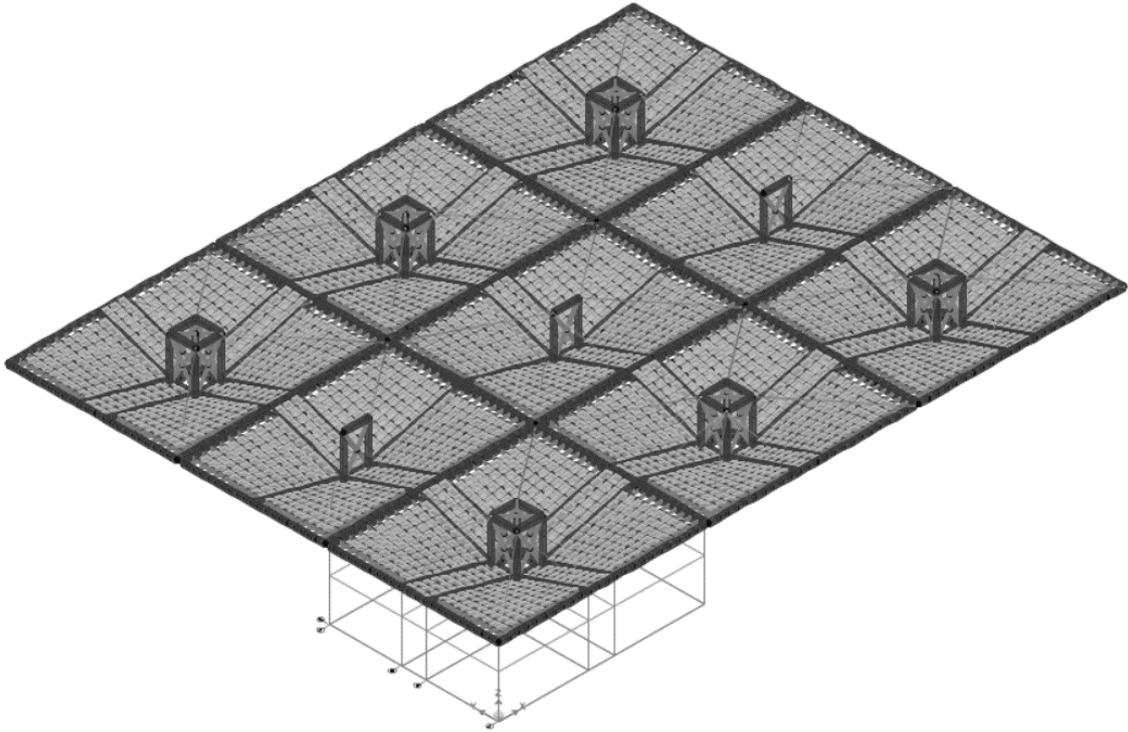
*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

*Modelo de pérgola B*

- La cubierta de la pérgola abarca en planta una superficie de 48x39,50 m2.
- La cubierta es apoyada en cuatro pilares.
- Seis pérgolas tienen este modelo.



En planta, estas nueve pérgolas se agrupan en tres filas. Cada fila posee tres pérgolas de mismo modelo como se observa en la siguiente imagen:



*Ilustración 37 Modelaje del sistema estructural*

La unión que permite la conexión entre una cubierta y otra se materializa como un elemento lineal rectilíneo y que es afín a ambas pérgolas. Este elemento barra recibe el nombre de viga de transición. A priori, estos elementos tienen las mismas dimensiones que las vigas de borde (que son elementos que delimitan el exterior de las cubiertas).

Si tomamos el nivel del suelo como cota 0, la cubierta inicia su recorrido en un punto intermedio de los pilares, a la cota +10m. La cubierta parte de estos puntos, que sirven de apoyo y (desde una vista en planta) se encuentran ubicados en la zona central de la pérgola. Se puede decir que la pérgola sigue una geometría similar al del “paraguas invertido”.

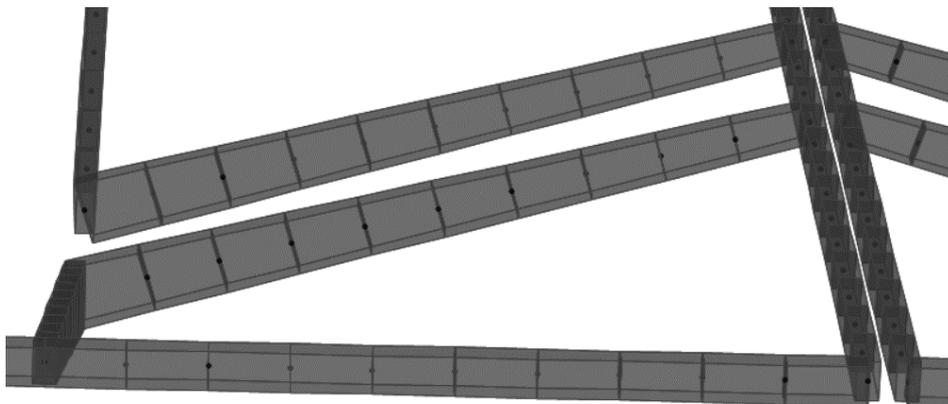
*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 38 Paraguas invertido de Manuel Candela*

Y a medida que la superficie de la cubierta se aleja de su zona de apoyo, esta tiende a ascender describiendo una doble curvatura. Cuando dicha superficie alcanza los límites de la pérgola, la cubierta se topa con la viga de borde o la viga de transición. Ambos elementos lineales están distribuidos sin inclinación, horizontalmente, a 6 metros por encima de la cota en que se encuentra el apoyo de la cubierta, es decir, a +16m.

Los elementos lineales que sustentan la cubierta son vigas de canto variable (llamadas vigas principales) que parten de los pilares hasta alcanzar las vigas de borde y de transición.



*Ilustración 39 Modelo de vigas principales y vigas de borde*

En planta, y salvando las singularidades de cada modelo de pérgola, podemos observar que las vigas principales y las vigas de borde dividen la cubierta en cuatro cuadrantes, como hemos visto en el ejemplo del “paraguas invertido”. Cada cuadrante está formado por una serie de placas que son llamadas módulo. Cada módulo sigue la geometría de una superficie de doble curvatura, el paraboloides hiperbólico. Estas superficies están delimitadas por 4 lados rectos. Dos de estos lados extremos se disponen de forma horizontal y corresponden a las vigas de borde y las vigas de transición. Los dos lados restantes tienen una posición inclinada y permiten la sujeción de la cubierta con el pilar. Estas son las vigas principales.

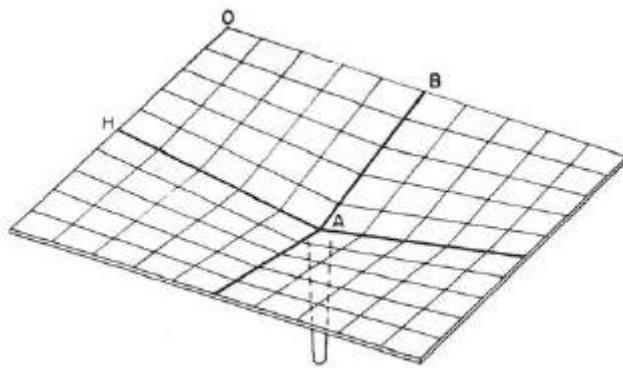
La siguiente imagen muestra en planta la distribución de las pérgolas, su tipología y la posición de los pilares.

Cada superficie parabólica se encuentra nervada por vigas secundarias que se unen entre sí como un emparrillado y quedan sujetas a las vigas principales y las vigas de borde o transición. Estas vigas secundarias (llamadas “correas”) permiten distribuir las acciones a estos elementos principales y soportan los módulos curvos. Aunque resulte extraño de comprender, y tratándose de una superficie curva, estos elementos secundarios son, a pesar de todo, elementos lineales y rectilíneos. Parten de un extremo del cuadrante a otro sin alterar su directriz. Esto es debido principalmente, a una de las características singulares del paraboloides hiperbólico.

El paraboloides hiperbólico es una superficie que, aunque ya era conocida en la antigua Grecia, no fue hasta el siglo XX que se incorporó al sector de la construcción, sobretodo en la implementación de tejados y cubiertas. Esta superficie, a pesar de aparentar cierta complejidad matemática y de cálculo, en la práctica no es así. Se trata de una superficie reglada y aunque resulte curva, a la hora de implementar los elementos secundarios, estos no requieren curvatura ni un proceso elaborado que dificulte los encofrados en caso de que la cubierta fuera de hormigón.

En la siguiente imagen podemos observar esta superficie elaborada a partir de un sistema de referencia y el trazado de unas líneas auxiliares rectas. En el caso de nuestra pérgola, dos las líneas exteriores formarían las vigas principales y las otras dos líneas contiguas serían las vigas de borde o transición. Las rectas del interior formarían el emparrillado de las correas que sustentan la lámina de la cubierta.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 40 Superficie reglada paraboloidal hiperbólico*

La superficie reglada de un cuadrante posee un emparrillado de 9x9 correas, cuyo inicio y final se encuentra en las vigas principales y las vigas de borde o transición.

Hasta aquí, la información geométrica que puede intuirse en el documento de la pérgola. Adicionalmente se sabe que cada elemento tipo barra está compuesto por madera laminada encolada homogénea con una resistencia característica a flexión de 36,00 MPa (GL36h).

Se adjunta una tabla con la definición seccional y el material.

<b>Elemento</b>	<b>Sección</b>	<b>Dimensiones (cmxcm)</b>	<b>Material</b>
Vigas principales	Rectangular, canto variable	200/100 (canto) x 60 (ancho)	GL36h
Vigas de borde	Rectangular, canto constante	100 (canto) x 60 (ancho)	GL36h
Vigas de transición	Rectangular, canto constante	100 (canto) x 60 (ancho)	GL36h
Correas	Rectangular, canto constante	30 (canto) x 20 (ancho)	GL36h
Pilares	Rectangular, canto constante	80 (canto) x 80 (ancho)	GL36h

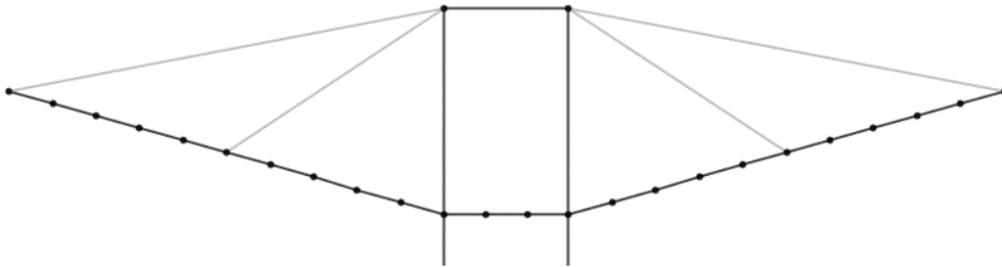
*Tabla 18 Elementos de la estructura, material y dimensiones previas*

Hasta aquí, habría que comprobar que los elementos de la estructura descrita son suficientes para cumplir todas las comprobaciones de resistencia de materiales, inestabilidad y deformaciones. Dado que en el proyecto de referencia se menciona un sistema de atirantado para limitar y controlar los excesivos desplazamientos y deformaciones de la cubierta, debemos suponer que esta comprobación inicial con los elementos descritos hasta ahora no serían suficientes. En cualquier caso, la estructura que deberíamos proyectar debería tener una altura suficiente (superando la cota de la cubierta varios metros) y asignar el número de cables con una dimensión capaz de resistir las tracciones debidas a la combinación de acciones más

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

desfavorable. Antes de describir estos elementos y sus dimensiones, resulta más conveniente primero adjuntar una imagen del trazado que debería seguir estos elementos.

Vemos una prolongación de las pilas, vigas que unen los extremos superiores y un sistema de atirantado que parte de la coronación del pilar a las esquinas de las vigas de borde y al extremo final e intermedio de cada viga principal.



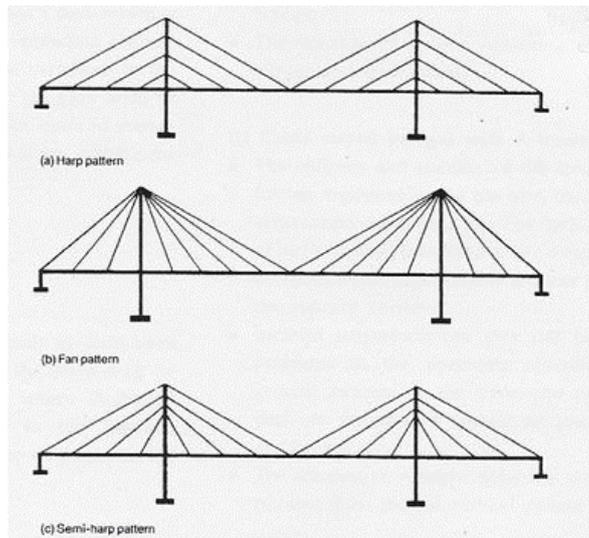
*Ilustración 41 Modelado de la estructura superior*

Aquí se puede observar que los pilares deben prolongarse más allá de la cota +10m. Dado que no se especifica la altura, y teniendo en cuenta que las vigas principales pueden cubrir una distancia en proyección horizontal de 24 o 16,75m y que las vigas de borde se sitúan a la cota +16m, deberemos considerar el final de los pilares a una altura que supere la anterior.

Aquí surge cierto compromiso de diseño. Cuanto menos se exceda la cota final de los pilares, más enrasado quedará los tirantes a los bordes y mayores tensiones horizontales en los cables para dar con la condición de equilibrio. Por el contrario, a mayor altura de los pilares, menor tensión se requerirá en el cableado, o menor número de tirantes, pero mayor será el coste de la estructura auxiliar y más débil serán los pilares frente al pandeo. En estos casos merece la pena partir de una solución intermedia y, a medida que se aprecie el comportamiento y la sollicitación de acciones, estimar la prioridad de un criterio sobre otro.

A pesar de todo, existen muchos modos de distribuir los tirantes en un sistema estructural, pero dado que se trata de una estructura auxiliar de baja altura, es conveniente disponer los cables desde un punto concreto, a la manera de un puente atirantado en abanico. En caso de observarse excesivas tensiones, podrá valorarse aumentar la altura de estas torres y distribuir el atirantado a lo largo del fuste del pilar, como sucede con los puentes atirantados en arpa.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 42 Modelos de puentes atirantados en arpa, abanico y combinación de ambos*

Para iniciar el predimensionamiento, el final de estos pilares se alcanzará en la cota +18m, aunque esto será una decisión que deberemos analizar en el planteamiento de los tirantes. Cada pilar perteneciente a una pérgola común dispondrá de vigas horizontales para rigidizar los elementos y evitar excesivas deformaciones. Estos elementos horizontales se dispondrán al inicio de la cubierta (cota +10m) y al final de los pilares (cota +18m). Estos elementos lineales presentarán las mismas dimensiones que las vigas de borde y las vigas exteriores.

En cuanto a los tirantes, supondremos barras de acero que trabajarán a tracción. La dimensión de estas secciones al igual que el número de tirantes será una comprobación que haremos antes de iniciar los modelos de las pérgolas.

## MODELAJE DE LA ESTRUCTURA

La primera comprobación que necesitamos averiguar es el Estado Límite de Servicio. Su incumplimiento será una justificación de que necesitamos incorporar la estructura auxiliar y el sistema de atirantado.

La cubierta además de alcanzar las luces que exige el proyecto, también se desearía que pudiera soportar el peso de placas fotovoltaicas que aporten energías limpias a la instalación. La necesidad de incorporar estos elementos en la cubierta nos obliga a ser más restrictivos y considerar más limitaciones en la comprobación de los Estado Límite de Servicio. Debemos garantizar que la cubierta no supere la condición de integridad estructural en la cual, de ser superada, dañaría estas placas solares.

El cálculo de la deformación en piezas de madera presenta algunas particularidades con respecto a otros materiales estructurales. El primero es la mayor influencia del efecto del cortante en la deformación, comparada con otros materiales. Sin embargo, en las situaciones habituales su influencia es muy baja y es frecuente que se desprecie en el cálculo. El segundo es el derivado de la deformación diferida o fluencia, presente también en el hormigón y que no debe ignorarse en los cálculos. Este fenómeno de la fluencia está condicionado por el contenido de humedad de la madera y de las variaciones higrotérmicas ambientales. Finalmente, las uniones que decidamos incorporar, hay que tener presente que puede ocasionar el aplastamiento de la madera y, en consecuencia, crear una traslación o giro relativo entre las piezas que también pueden ser significativas, sobre todo si se hace uso de herrajes metálicos en la unión.

Una vez modelemos la estructura, los resultados que obtengamos serán las deformaciones instantáneas. Este es el método más sencillo de obtener estas deformaciones ya que consideran el efecto del cortante sobre la estructura y el programa puede realizar cálculos matriciales de todos los elementos de la estructura.

En cuanto a las deformaciones diferidas debidas a la fluencia y a las uniones, deberemos obtenerlas por separado. En el caso de la deformación por fluencia (que son deformaciones debidas a la exposición continua de cargas permanentes) éstas serán fáciles de estimar, ya que existen expresiones en el Eurocódigo que nos permiten calcularla conociendo las deformaciones instantáneas y sabiendo el ambiente externo al que se encuentra expuesto la madera.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

En cuanto a las deformaciones diferidas debidas a las uniones, éstas dependerán del tipo de fijación que sea. Dado que aún no hemos podido decidir qué tipo serán exactamente, podemos suponer que haremos uso de pasadores o pernos ya que se trata de soluciones adecuadas para cantos de gran tamaño.

Estados Límite de Servicio (ELS): corresponde a una situación límite cuyo incumplimiento supone el abandono de ciertos requisitos de funcionalidad, de comodidad e incluso de apariencia que no serían tolerables en la habitabilidad de estas estructuras. En el estudio de esta situación límite, se considera la verificación de:

- El estado límite de deformaciones.
- El estado límite de vibraciones.

En nuestro caso, tendremos en cuenta una serie de limitaciones que se encuentran recogidas en la normativa de aplicación:

- Limitación de la deformación por integridad: valor que, de ser superado, supone que los elementos no estructurales como falsos techos, tabiquería o incluso los paneles fotovoltaicos de la pérgola queden dañados durante el funcionamiento de la estructura.
- Limitación de la deformación por apariencia: valor que tiene en cuenta efectos estéticos visuales de flecha y desplome que pueden crear sensación de inseguridad.

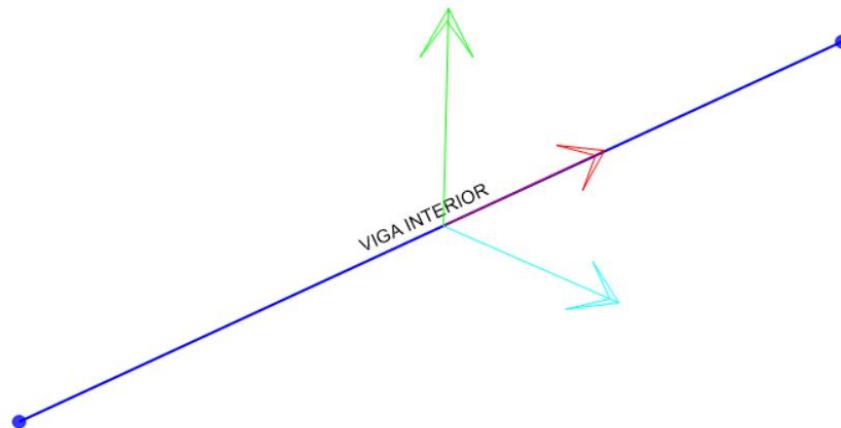
Entonces, para incorporar el atirantado, primero debemos realizar una comprobación de la cubierta y contemplar las flechas en los voladizos para una situación de carga permanente y a largo plazo bastará con modelar la cubierta de paraboloides hiperbólicos. Para esto recurriremos al programa SAP2000. Este programa no nos servirá para el dimensionamiento de las uniones. Es uno de los principales inconvenientes del programa, ya que resultaría muy laborioso introducir una geometría compleja como tornillos y soldaduras en este programa de elementos finitos. Para cubrir el análisis pormenorizado de las uniones, recurriremos al cálculo manual y a la herramienta Excel para sistematizar y agilizar el proceso.

## Elementos lineales

La estructura se construye principalmente por elementos lineales tipo barra. Estos elementos resultan muy eficaces a la hora de modelar emparrillados y entramados de pilares y vigas. Se compone por un segmento, de longitud a determinar, que finaliza en dos extremos llamados nudos o articulaciones. El segmento comprendido por estos dos nudos conserva las propiedades mecánicas y geométricas de una sección, definida previamente y a la que se le ha asignará al

elemento lineal. Esta sección puede adquirir un aspecto cualquiera, bien sea simple o complejo, según se considere (normalmente secciones rectangulares o perfiles normalizados), aunque se tiene una herramienta adicional para editar su geometría.

Cada elemento barra (al igual que cada nudo) posee 3 ejes principales locales. El primero hace referencia a la dirección del elemento y se materializa en el programa con un vector de color rojo. Los otros ejes, transversales y contenidos en la sección, son de color verde y azul.

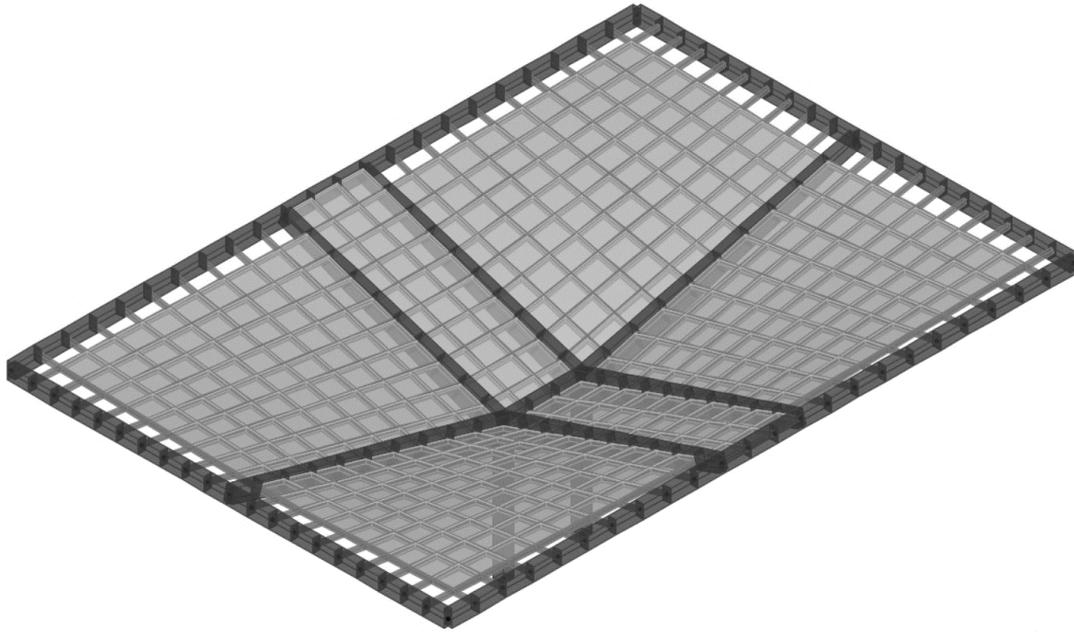


*Ilustración 43 Viga interior modelada y sus ejes locales*

Sobre cada extremo de la barra se puede determinar el grado de arriostramiento mediante la modificación de los 6 grados de libertad existentes en cada articulación de la barra. De forma predefinida, el programa interpreta el nudo como un empotramiento entre el elemento y el resto de la estructura. Estas barras, propias de un pórtico, utilizan una formulación general que incluye los efectos de deformación axil, flexión biaxial, torsión y deformaciones por cortante biaxial.

## Sistema global y grados de arriostramiento

El comportamiento global previsto para la estructura es la de un pórtico de dos vanos rematado en voladizos extremos. Esto es así, ya que las tres pérgolas que forma una fila constituyen la estructura interna del pórtico.



*Ilustración 44 Modelaje de la cubierta (pérgola A)*

Siendo la realidad de la pérgola distinta del arriostramiento más rígido, y pudiendo alcanzarse distintos grados de arriostramiento según la elección de la unión considerada, se va a suponer un sistema estructural que garantice la estabilidad, a falta de plantear excesivas articulaciones.

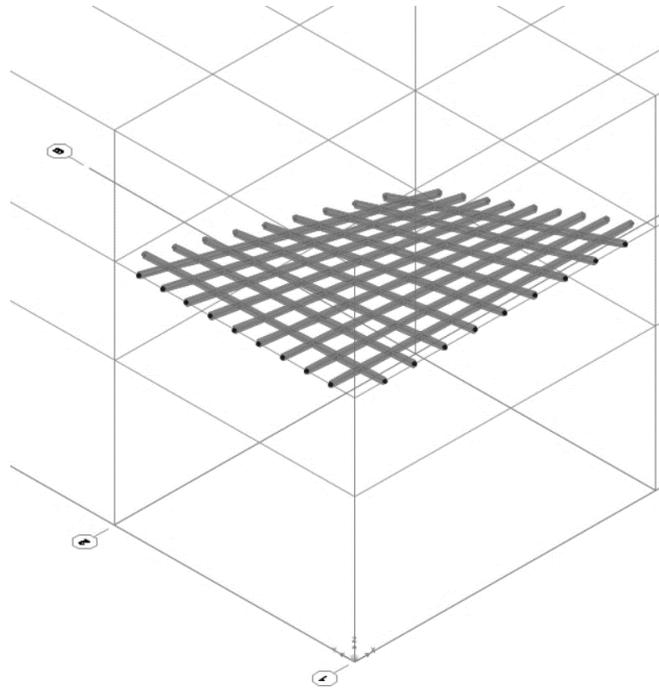
Las 6 vigas principales permanecen arriostradas a los extremos superiores de cada pilar. La unión de estos dos pilares es gracias a una viga interna que podría estar empotrada o articulada en sus extremos. Se ha supuesto rígida. La unión de la estructura al terreno puede considerarse articulada o empotrada. Se ha supuesto empotrada. La unión entre los elementos secundarios y correas, que permiten crear la superficie de los 4 módulos del paraboloides hiperbólico pueden considerarse articulados.

### Elementos auxiliares de superficie

Por otro lado, también será necesario incorporar a este modelo elementos superficiales. Estos elementos superficiales se consideran elementos tipo lámina y corresponden a las placas de la cubierta. Estas placas pretenden asignarse entre las directrices de las correas y vigas para emular una superficie capaz de transmitir las cargas superficiales de diseño a los elementos lineales. Como se comenta en el anterior proyecto, estas superficies son elementos auxiliares que no aportan rigidez alguna a la estructura. Consideramos que no tienen peso, pues ya se supondrá a modo de acción externa como carga muerta.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Además, estas superficies nos resultan de gran utilidad, ya que podemos aplicar otras acciones como nieve, sobrecarga de uso o las cargas de viento de manera superficial, sin realizar sobre cada viga un proceso más laborioso como lo sería repartir linealmente las cargas sobre las vigas principales y secundarias considerando el área tributaria de cada elemento por separado.



*Ilustración 45 Malla del modelo y correas de uno de los módulos*

Antes de definir todas las secciones, se elabora una malla que sirva de guía para la creación de barras y delimitar la estructura en el espacio 3D. El siguiente paso es introducir los materiales que vayan a constituir los elementos lineales y la placa tipo Shell. Para valorar las diferentes calidades de la madera, hemos introducido distintas categorías aunque se ha adoptado la que mejores prestaciones tiene.

- GL26h
- GL28h
- GL32h
- GL36h

Dado que no hay en SAP2000 un cuadro de materiales con las propiedades de la madera, deberemos introducirlas manualmente, considerando la opción que estime la anisotropía del material. Estas son:

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

GL26h

<b>Propiedad mecánica GL26h</b>	<b>Nomenclatura</b>	
Resistencia característica a flexión	$F_{m,k}$	26,00 MPa
Resistencia característica a tracción paralela a las fibras	$F_{t,0,k}$	20,80 MPa
Resistencia característica a tracción perpendicular a las fibras	$F_{t,90,k}$	0,50 MPa
Resistencia característica a compresión paralela a las fibras	$F_{c,0,k}$	26,00 MPa
Resistencia característica a compresión perpendicular a las fibras	$F_{c,90,k}$	2,50 MPa
Resistencia característica a cortante	$F_{v,k}$	3,50 MPa
Módulo de elasticidad medio paralelo a las fibras	$E_{0,m}$	12.100 MPa
Módulo de elasticidad característico paralelo a las fibras	$E_{0,k}$	10.100 MPa
Módulo de elasticidad medio perpendicular a las fibras	$E_{90,m}$	300,00 MPa
Módulo de cortante medio	$G_m$	650,00 MPa
Densidad característica	$dk$	405 kg/m <sup>3</sup>

*Tabla 19 Propiedades de la madera laminada encolada GL26h introducidas en el modelo SAP2000*

GL28h

<b>Propiedad mecánica GL28h</b>	<b>Nomenclatura</b>	
Resistencia característica a flexión	$F_{m,k}$	28,00 MPa
Resistencia característica a tracción paralela a las fibras	$F_{t,0,k}$	22,30 MPa
Resistencia característica a tracción perpendicular a las fibras	$F_{t,90,k}$	0,50 MPa
Resistencia característica a compresión paralela a las fibras	$F_{c,0,k}$	28,00 MPa
Resistencia característica a compresión perpendicular a las fibras	$F_{c,90,k}$	2,50 MPa
Resistencia característica a cortante	$F_{v,k}$	3,50 MPa
Módulo de elasticidad medio paralelo a las fibras	$E_{0,m}$	12.600 MPa
Módulo de elasticidad característico paralelo a las fibras	$E_{0,k}$	10.500 MPa
Módulo de elasticidad medio perpendicular a las fibras	$E_{90,m}$	300,00 MPa
Módulo de cortante medio	$G_m$	650,00 MPa
Densidad característica	$dk$	425 kg/m <sup>3</sup>

*Tabla 20 Propiedades de la madera laminada encolada GL28h introducidas en el modelo SAP2000*

GL32h

<b>Propiedad mecánica GL32h</b>	<b>Nomenclatura</b>	
Resistencia característica a flexión	$F_{m,k}$	32,00 MPa
Resistencia característica a tracción paralela a las fibras	$F_{t,0,k}$	25,60 MPa
Resistencia característica a tracción perpendicular a las fibras	$F_{t,90,k}$	0,50 MPa
Resistencia característica a compresión paralela a las fibras	$F_{c,0,k}$	32,00 MPa
Resistencia característica a compresión perpendicular a las fibras	$F_{c,90,k}$	2,50 MPa
Resistencia característica a cortante	$F_{v,k}$	3,50 MPa
Módulo de elasticidad medio paralelo a las fibras	$E_{0,m}$	14.200 MPa
Módulo de elasticidad característico paralelo a las fibras	$E_{0,k}$	11.800 MPa
Módulo de elasticidad medio perpendicular a las fibras	$E_{90,m}$	440,00 MPa
Módulo de cortante medio	$G_m$	650,00 MPa
Densidad característica	$dk$	490 kg/m <sup>3</sup>

*Tabla 21 Propiedades de la madera laminada encolada GL32h introducidas en el modelo SAP2000*

GL36h

<b>Propiedad mecánica GL36h</b>	<b>Nomenclatura</b>	
Resistencia característica a flexión	$F_{m,k}$	36,00 MPa
Resistencia característica a tracción paralela a las fibras	$F_{t,0,k}$	26,00 MPa
Resistencia característica a tracción perpendicular a las fibras	$F_{t,90,k}$	0,60 MPa
Resistencia característica a compresión paralela a las fibras	$F_{c,0,k}$	31,00 MPa
Resistencia característica a compresión perpendicular a las fibras	$F_{c,90,k}$	3,60 MPa
Resistencia característica a cortante	$F_{v,k}$	4,30 MPa
Módulo de elasticidad medio paralelo a las fibras	$E_{0,m}$	14.700 MPa
Módulo de elasticidad característico paralelo a las fibras	$E_{0,k}$	11,90 MPa
Módulo de elasticidad medio perpendicular a las fibras	$E_{90,m}$	490,00 MPa
Módulo de cortante medio	$G_m$	910,00 MPa
Densidad característica	$dk$	450 kg/m <sup>3</sup>

*Tabla 22 Propiedades de la madera laminada encolada GL36h introducidas en el modelo SAP2000*

Y para el acero de los cables, en el caso de instalarlos, adoptaremos una solución con una resistencia a tracción de 500Mpa.

## Definición de las secciones

Una vez definido el material, las secciones serán las del predimensionamiento:

Para las vigas principales de canto variable es necesario definir dos secciones. Una para el tramo inicial y otra para el final. Tras esto, se define una nueva del tipo NonPrismatic Section, esta sección considera de extremo inicial a extremo final una variación del canto lineal. El ancho permanece constante, por lo que la variación de inercia en el eje débil será lineal mientras que en el eje fuerte será parabólica.

<b>Elemento</b>	<b>Sección</b>	<b>Dimensiones (cmxcm)</b>	<b>Material</b>
Vigas principales	Rectangular, canto variable	200/100 (canto) x 60 (ancho)	GL36h
Vigas de borde	Rectangular, canto constante	100 (canto) x 60 (ancho)	GL36h
Vigas de transición	Rectangular, canto constante	100 (canto) x 60 (ancho)	GL36h
Correas	Rectangular, canto constante	30 (canto) x 20 (ancho)	GL36h
Pilares	Rectangular, canto constante	80 (canto) x 80 (ancho)	GL36h

*Tabla 23 Secciones adoptadas en el modelo durante el predimensionamiento*

## Definición de las acciones de cálculo

Una vez elaborado el modelo previo de la estructura, debemos asignar las acciones de diseño que permitirán comprobar el predimensionamiento y su posterior optimización. Para asignar estas cargas al modelo, debe definirse los casos de cargas.

### *Patrones de Carga*

Los casos de cargas que van a incluirse en el modelo son:

- Peso propio
- Carga muerta
- Sobrecarga de uso
- Viento
  - Viento en dirección x (presión)
  - Viento en dirección x (succión)
  - Viento en dirección y (presión)
  - Viento en dirección y (succión)
- Acción térmica
  - Verano
  - Invierno
- Nieve
- Sismo

Cada patrón se ha considerado como un caso de carga con un factor de escala de uno, teniendo en cuenta que los factores de volumen y los coeficientes de seguridad serán aplicados posteriormente en la combinación de acciones de los estados límite. También hay que mencionar que cada caso de carga se ha considerado de tipo estático en análisis lineal.

Tras este paso, podremos desarrollar posibles combinaciones de acciones y comprobar la capacidad de la estructura frente a ellas.

#### **S** Define Load Patterns

Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern
DEAD	Dead	1	
DEAD	Dead	1	
CM	Other	0	
SCU	Other	0	
NIEVE	Other	0	
AT.verano	Other	0	
AT.invierno	Other	0	
VX	Other	0	
VY	Other	0	
SISMO	Other	0	

*Ilustración 46 Patrones de carga empleados en el modelo*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

*Acciones permanentes*

El programa SAP2000 permite estimar el peso propio de los elementos estructurales si están definidos en el apartado de materiales. Como es este el caso, el programa considera el peso propio de forma automática, y en función de las secciones de cada elemento barra.

En el caso de los paneles fotovoltaicos, ya que no hemos descrito su peso y su finalidad es la de facilitar la distribución de acciones superficiales, va a tener que considerarse su peso como una carga externa de “Carga Muerta” y aplicada superficialmente sobre las superficies tipo “Shell”.

La carga equivalente de la cubierta es, según el documento de referencia, 0,30 kN/m<sup>2</sup>.

*Sobrecarga de uso*

Como se trata de pérgolas cuya cubierta no es transitable, la categoría de uso según la CTE-AE es la G1 (Cubiertas accesibles únicamente para conservación cuya inclinación es inferior a 20°).

La carga uniforme que debe aplicarse debido a la sobrecarga de uso es de 1kN/m<sup>2</sup>. Esta carga distribuida se refiere a la proyección horizontal de la superficie de la cubierta.

La carga concentrada para cualquier comprobación local será de 2kN.

*Viento*

Se ha introducido dos casos de carga. Viento en dirección x y viento en dirección y.

La succión y la presión se han considerado simultáneamente teniendo en cuenta la inclinación de la superficie y la dirección y sentido del viento en la que podría incidir sobre estos elementos.

Para la definición de estas cargas, hemos tenido en cuenta el DB SE-AE acciones en la edificación, anejo D. Acción del viento.

Se debe hallar:

- Presión dinámica
  - Un valor básico de 0.553 kN/m<sup>2</sup> teniendo en cuenta la densidad del aire en Barcelona estos últimos años y el valor básico de la velocidad del viento en la zona C.
- Coeficiente de exposición
  - Aquí si distinguen 3 zonas en el modelo:
    - La parte inferior entre el pilar y la cimentación (z=+10m)
    - La parte de la cubierta (z=+16m)

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

- La parte superior a la cubierta (z=+20m)
- Estas tres zonas comparten el mismo grado de aspereza del entorno: nivel IV zona urbana en general o zona forestal.

$$C_e = F \cdot (F + 7k)$$

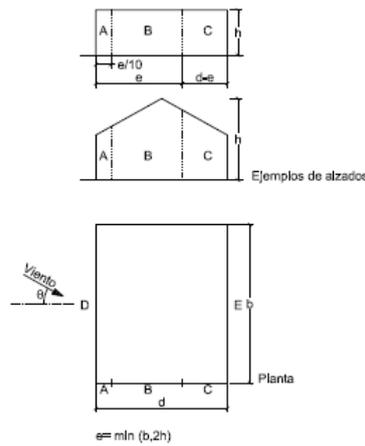
$$F = k \ln (\max(z, Z) / L)$$

Siendo k, L, Z parámetros característicos de cada tipo de entorno y z la altura de la estructura sobre el terreno.

En entorno IV: k, L y Z son, respectivamente: 0.22, 0.3m y 5.0m

- Coeficiente de presión exterior:

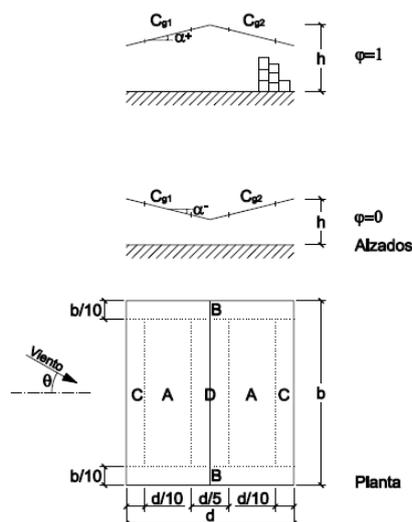
Se plantea este coeficiente según se trate de paramentos verticales u horizontales. Se adjuntan varias imágenes y se debe interpretar la estructura por analogía. Si existiera algún parámetro intermedio entre dos valores de la tabla, se puede interpolar linealmente.



A (m <sup>2</sup> )	h/d	Zona (según figura), -45° < θ < 45°				
		A	B	C	D	E
≥ 10	5	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	0,7	-0,3
5	5	-1,3	-0,9	-0,5	0,9	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	0,8	-0,3
2	5	-1,3	-1,0	-0,5	0,9	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	0,7	-0,3
≤ 1	5	-1,4	-1,1	-0,5	1,0	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	"	-0,3

*Ilustración 47 Coeficientes de presión aplicados a la carga estática de viento en paramentos verticales*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



		Coeficientes de presión				
		$C_{p,10}$				
Pendiente de la cubierta $\alpha$	Efecto del viento hacia	Factor de obstrucción $\varphi$	Zona (según figura)			
			A	B	C	D
-20°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	0,8	1,6	0,6	1,7
	Arriba	0	-0,9	-1,3	-1,6	-0,6
	Arriba	1	-1,5	-2,4	-2,4	-0,6
-15°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	0,6	1,5	0,7	1,4
	Arriba	0	-0,8	-1,3	-1,6	-0,6
	Arriba	1	-1,6	-2,7	-2,6	-0,6

*Ilustración 48 Coeficientes de presión aplicados a la carga estática de viento en paramentos horizontales (cubiertas o marquesinas)*

*Acción térmica*

Siguiendo la normativa DB SE-AE podemos considerar que la parte superior de la cubierta está bajo una temperatura media de 42 grados en verano. Suponiendo que la madera de la pérgola fuera de tonos claros, se deberá aumentar este umbral 30 grados más en verano.

En las zonas cubiertas, sobre todo los pilares y los elementos que queden resguardados de la cubierta, se supondrá el valor medio entre la temperatura máxima y la mínima llegando a los 46 grados.

En invierno afrontará el umbral de los 11 grados bajo cero.

Estas cargas se introducen en el modelo como gradientes térmicos de temperatura en cada uno de los elementos lineales.

*Nieve*

La acción de la nieve aparecerá cuando se considere situación de invierno y será una carga repartida superficialmente aplicada en la cubierta. Al igual que el viento, se trata de una carga en la que intervienen distintos parámetros.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

- Coeficiente de forma: 1,25 ya que se trata de un faldón similar al arquetipo b) de la normativa DBSE-AE en la cual la cubierta se opone al deslizamiento de la nieve en 15 grados, una inclinación inferior a la semisuma de 30.
- Carga de nieve sobre un terreno horizontal, en Barcelona es de 0,4kN/m<sup>2</sup>.

La tensión de la nieve es entonces de 0,5kN/m<sup>2</sup> sobre la cubierta.

### *Acción sísmica*

La acción sísmica se debe evaluar en el proyecto. Barcelona tiene una aceleración básica equivalente a 0.04g (siendo g la aceleración de la gravedad). Es a partir de este valor de aceleración básica cuando es de obligado cumplimiento analizar en proyecto una situación accidental debida a sismo.

Para estimar estas acciones, se ha considerado la estructura general de las 9 pérgolas unidas entre sí bajo cargas permanentes (peso propio y carga muerta exclusivamente, ya que el coeficiente de persistencia del resto de acciones para una situación sísmica es 0) y se ha introducido un espectro de respuesta para simular la acción del sismo.

### *Definición de la combinación de acciones*

Una vez construido el modelo de la estructura previa, asignado los casos de carga y aplicado sobre cada elemento las acciones de diseño, es importante definir la combinación de acciones para estimar qué situación es la más desfavorable y dimensionar los elementos a sabiendas de que existe un extremo límite que no deberá rebasar en ninguna circunstancia ni considerando estadísticamente la combinación simultánea de varias acciones.

Para realizar la comprobación ELU, necesitaremos asegurarnos de que se cumplen las siguientes pruebas:

- Comprobación de resistencia de secciones
- Comprobación de estabilidad frente al pandeo y vuelco lateral
- Comprobación de agotamiento de secciones de canto variable para vigas principales
- Comprobación de agotamiento de piezas rebajadas si se diseñan uniones carpinteras en las que debemos recortar la dimensión de los cantos para unir las piezas entre sí.

Para realizar la comprobación ELS, necesitaremos asegurarnos de que se cumplen las siguientes pruebas:

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

- Flechas y deformaciones para el cumplimiento de integridad de los elementos y placas solares ubicadas en la cubierta, cuya comprobación corresponde a una combinación característica de Estado Límite de Servicio
- Flechas y deformaciones para el cumplimiento de la apariencia de la cubierta, cuya comprobación corresponde a una combinación en la que intervienen sólo las cargas permanentes de peso propio y carga muerta más la parte de las acciones variables que sean persistentes a lo largo de toda la vida útil de la estructura (si las hubiera). Esta combinación de acciones corresponde a la quasi-permanente.

La situación accidental de incendio o sismo se comprueba como una prueba del Estado Límite Último, aunque no se mayoran las cargas a considerar entre favorable y desfavorable.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Según esto, las combinaciones de acciones que se han definido en el modelo son:

<b>Combinación</b>	<b>Estado Límite</b>	<b>Peso Propio</b>	<b>Carga Muerta</b>	<b>SCU</b>	<b>Vientox/ Vientoy</b>	<b>Verano</b>	<b>Invierno</b>	<b>Nieve</b>
1.SCU.vx.A	ELU	1.35	1.35	1.5	1.5*0.6	0	1.5*0.6	1.5*0.5
1.SCU.vx.B	ELU	1.35	1.35	1.5	1.5*0.6	1.5*0.6	0	0
1.SCU.vy.A	ELU	1.35	1.35	1.5	1.5*0.6	0	1.5*0.6	1.5*0.5
1.SCU.vy.B	ELU	1.35	1.35	1.5	1.5*0.6	1.5*0.6	0	0
2.VX.A	ELU	1.35	1.35	0	1.5	0	1.5*0.6	1.5*0.5
2.VX.B	ELU	1.35	1.35	0	1.5	1.5*0.6	0	0
2.VY.A	ELU	1.35	1.35	0	1.5	0	1.5*0.6	1.5*0.5
2.VYB	ELU	1.35	1.35	0	1.5	1.5*0.6	0	0
SISMO	ELU	1	1	0	0	0	0	0
1.SCU.vx.A	ELS	1	1	1	0.6	0	0.6	0.5
1.SCU.vx.B	ELS	1	1	1	0.6	0.6	0	0
1.SCU.vy.A	ELS	1	1	1	0.6	0	0.6	0.5
1.SCU.vy.B	ELS	1	1	1	0.6	0.6	0	0
2.VX.A	ELS	1	1	0	1	0	0.6	0.5
2.VX.B	ELS	1	1	0	1	0.6	0	0
2.VY.A	ELS	1	1	0	1	0	0.6	0.5
2.VYB	ELS	1	1	0	1	0.6	0	0
ELS.qp	ELS	1	1	0	0	0	0	0

*Tabla 24 Listado de combinaciones de acciones y coeficientes aplicados a los casos de carga*

## ESTUDIO DE SOLUCIONES DE LA CUBIERTA

Una vez modelada las cubiertas de la pérgola en SAP2000 e introducidas las acciones de cálculo y propuesta la combinación de acciones, necesitaremos comprobar el Estado Límite de Servicio para la comprobación de integridad y apariencia.

### *Comprobación de integridad ELS y Flecha activa*

Cuando consideramos la integridad de los elementos constructivos admitimos que la estructura de la cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación característica que hemos propuesto y considerando sólo las deformaciones a partir de la puesta en servicio, la flecha relativa es menor que  $L/300$ . Esta flecha activa la calculamos con la combinación característica y no incluye la deformación instantánea debida a la carga permanente.

### *Comprobación de apariencia ELS y Flecha neta final*

Cuando consideremos la apariencia de la obra, admitimos que la estructura de la cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones cuasi-permanente, la flecha relativa es menor a  $L/300$ . Esta flecha relativa también se conoce como flecha neta final y equivale a la deformación resultante de una combinación casi permanente que incluye la componente instantánea y diferida de las cargas permanentes (peso propio y carga muerta).

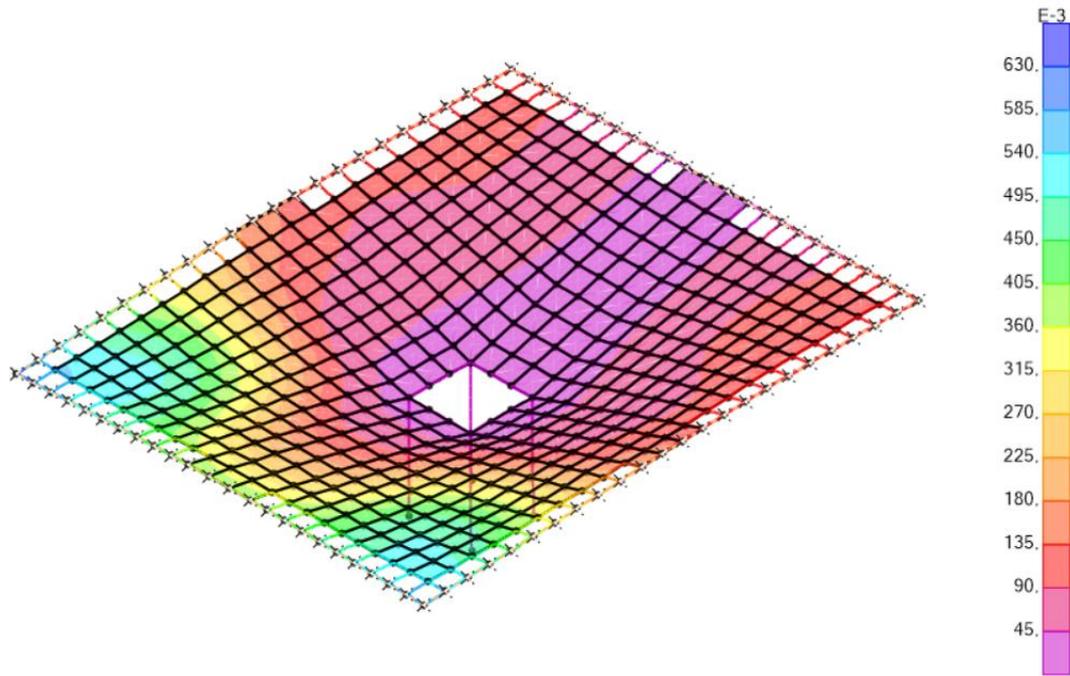
## Cubierta sin atirantado

### Comprobación de flecha: Integridad

La combinación más desfavorable se produce en los nudos 22 y 23, que coincide en las esquinas de la cubierta.

TABLE: Joint Displacements							
Joint	OutputCase	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
22	2.ELS.VY.B	-0,095005	0,002272	0,09932	-0,004366	-0,002511	-0,002036
23	2.ELS.VY.A	-0,10097	0,019294	-0,599091	-0,014885	-0,019611	0,000432

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 49 Deformación de la cubierta para la combinación característica ELS de viento*

COMPROBACIONES DE FLECHA					
INTEGRIDAD ESTRUCTURAL					
Longitud de la viga	L (m)=	26,86	L (m)=	26,86	
Flecha activa	<=	l/300			
La flecha activa no considera la deformación instantánea de cargas permanentes					
ELS característico					
23	2. ELS. VY. A	U3 =	-0,599	m	1. Comprob
22	2. ELS. VY. B	U3 =	0,09932	m	2. Comprob
Flecha activa =	0,59900	m			
Restricción max =	0,17908	m			
	INCUMPLE				
Flecha activa =	0,09932	m			
Restricción max =	0,17908	m			
	CUMPLE				
			Aprov.	Aprov.	
			334%	55%	

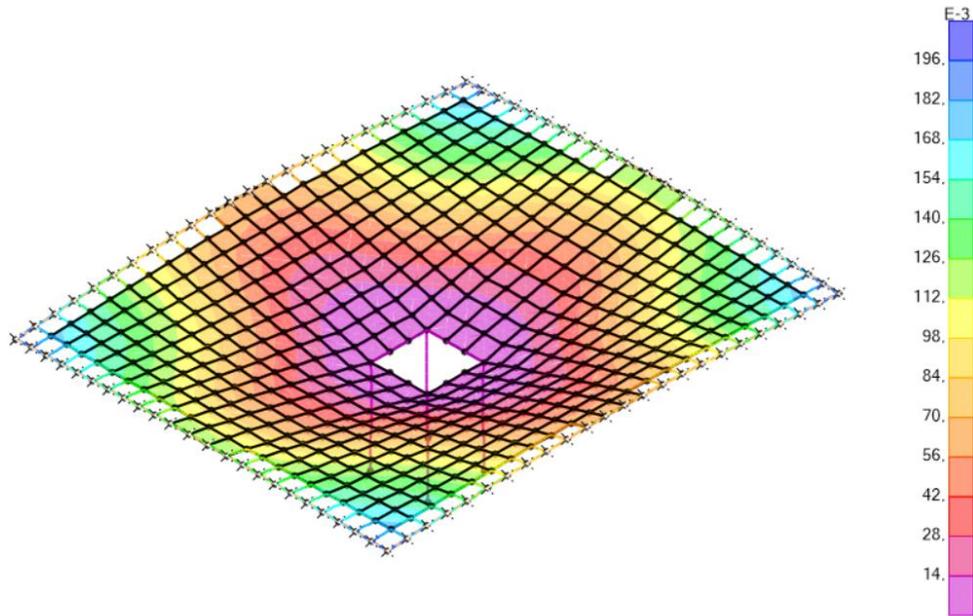
Incumple por integridad. La cubierta es insuficiente sin el atirantado para soportar las cargas de presión de viento.

### Comprobación de flecha: Apariencia

La única comprobación desfavorable se produce en las esquinas de la cubierta. Su magnitud es idéntica ya que se trata de una combinación de acciones casi-permanente en la que intervienen sólo el peso propio y la carga muerta. Obviamente no hay ninguna flecha (U3) positiva pues no interviene ningún tipo de succión debida al viento.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

TABLE: Joint Displacements							
Joint	OutputCase	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
258	3.ELS.QP	-0,000035	-0,024112	-0,066267	0,005807	-0,000749	0,000069
22	3.ELS.QP	0,000518	-0,000386	-0,1957	0,004989	0,006817	-0,000423



*Ilustración 50 Deformación de la cubierta para la combinación casi permanente ELS*

COMPROBACIONES DE FLECHA							
APARIENCIA ESTRUCTURAL							
Longitud de la viga		L (m)= 26,86		L (m)= 26,86			
Flecha neta		<= l/300					
La flecha neta considera la deformación instantánea y diferida de cargas permanentes (U3 mayorado X3)							
ELS quasi permanente							
22	ELS.qp	U3 =	-0,5871	m	1.Comprob		
24	ELS.qp	U3 =	-0,5871	m	2.Comprob		
Flecha neta =		0,58710	m				
Restricción max =		0,17908	m				
INCUMPLE					Aprov.		Aprov.
Restricción max =		0,17908	m		328%		328%

Incumple por apariencia. La cubierta es insuficiente sin el atirantado para soportar las cargas permanentes a largo plazo.

## Cubierta con atirantado

Hemos seguido una metodología para proponer el predimensionamiento de los cables y su distribución.

Primero hemos optado por tomar ciertas zonas de la estructura como lugares aptos para el anclaje. Hemos descartado la posibilidad de ubicar estas zonas de arriostamiento a las vigas secundarias que constituyen los módulos del paraboloide y las correas, ya que tienen un espesor más reducido, no son elementos estructurales primarios y podría darse el agotamiento de la sección. Hemos preferido optar por las vigas de borde (en esquinas y a media madera) y vigas principales (tanto en los extremos como en media madera) como la posición de estos lugares de anclaje. El cable deberá trazar un recorrido desde esta posición hasta la coronación de la estructura, siendo este punto la parte más alta de la estructura y que formará parte del pilar (una altura que por el momento se desconoce).

Para este apartado se ha modelado distintas cubiertas, sometidas a acciones de peso propio y carga muerta donde se proponen distintas distribuciones de los anclajes. Estas ubicaciones se han representado aplicando una condición de contorno tipo “carrito”.

Esta propuesta trata de obtener un valor de referencia por el cual podamos, por una parte, comprobar si existe algún incumplimiento de deformaciones en cada uno de los 4 módulos de la cubierta y, por otro lado, estimar la componente vertical que deberían asumir los cables. Esta carga, obviamente, no será la tensión real, sin embargo, teniendo en cuenta la ubicación de cada anclaje y la coordenada donde los cables deberán llegar a la coronación del pilar. Sobre esta directriz se proyectaría esta carga vertical y sería la altura de esta coronación una variable a considerar para la efectividad del tirante.

### **BARRAS GEWI®**

Designación	Resistencia a la fluencia	Resistencia a la ruptura	Carga de fluencia	Carga de ruptura	Elongación	Área de sección transversal (As)	Peso nominal (b)
	[MPa]	MPa	[kN]	[kN]	[%]	[mm <sup>2</sup> ]	[kg/m]
Propiedades de los sistemas GEWI®							
GEWI® 28	500	550	310	340	6%	616	4.83
GEWI® 32	500	550	405	440	6%	804	6.31
GEWI® 40	500	550	630	690	6%	1,260	9.87
GEWI® 50	500	550	980	1,080	6%	1,960	15.40
GEWI® 57,5	555	700	1,441	1,818	5%	2,597	20.38
GEWI® 63,5	555	700	1,760	2,215	5%	3,167	24.86

*Ilustración 51 Catálogo DYWIDAG de referencia para las propiedades mecánicas y geométricas para los cables*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Antes de presentar estos cálculos, tenemos la intención de colocar unos cables con unas propiedades resistentes similares a los anclajes aplicados para la estabilidad de taludes. Estos tirantes tipo DYWIDAG tienen un acero con una resistencia a la fluencia de 500MPa y una resistencia a rotura de 550Mpa. Y, como ya hemos comentado, el área de estos cables lo estimaríamos en función de la carga de estos carritos, para que cumpla la comprobación a tracción máxima del cable más solicitado.

La siguiente imagen muestra varios nudos de referencia del modelo de la pérgola A que al que podríamos aplicar el anclaje de los cables (se hizo un procedimiento análogo con el modelo de la pérgola B). Esta tabla, además de incluir una descripción del nudo al que se refiere, incluye la posición en el eje de coordenadas. Esta información será útil a la hora de sistematizar un proceso de cálculo que nos permita hallar la tensión en los cables.

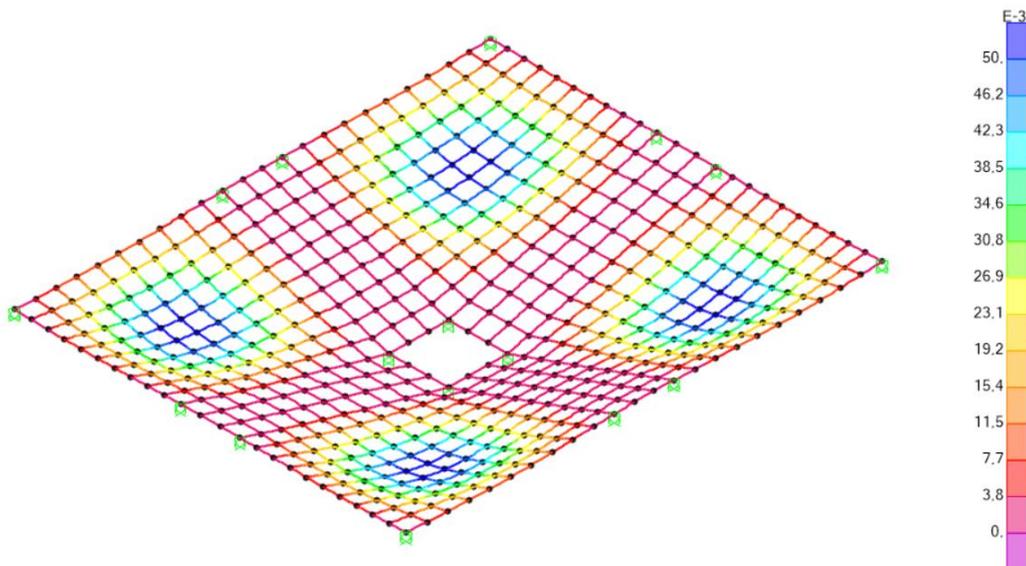
<b>NUDO CUB.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Posición.X</b>	<b>Posición.Y</b>	<b>Posición.Z</b>
5	Coronación Pilar Izq.	21	16,75	20
6	Coronación Pilar Der.	27	16,75	20
25	Extremo viga principal Der.	48	16,75	16
26	Extremo viga principal Izq.	0	16,75	16
27	Extremo viga principal Izq.Inferior	27	0	16
28	Extremo viga principal Der.Inferior	21	0	16
29	Extremo viga principal Izq.Superior	27	33,5	16
30	Extremo viga principal Der.Superior	21	33,5	16
31	Esquina de cubierta Izq.Inferior	0	0	16
32	Esquina de cubierta Der.Inferior	48	0	16
33	Esquina de cubierta Der.Superior	48	33,5	16
34	Esquina de cubierta Der.Superior	0	33,5	16
120	Mediana viga principal izquierda	37,5	16,75	13
129	Mediana viga principal derecha	10,5	16,75	13
138	Mediana viga principal derecha inferior	27	8,375	13
147	Mediana viga principal izquierda inferior	21	8,375	13
156	Mediana viga principal derecha superior	27	25,125	13
165	Mediana viga principal izquierda superior	21	25,125	13

La siguiente imagen trata de esquematizar la distribución de los tirantes en ocho soluciones. Puede observarse que la primera columna corresponde a cada nudo del estudio mientras que en las siguientes 8 columnas vemos las 8 propuestas de atirantado. Si en la celda no contiene número, no hay cable que una al nudo con la coronación. Si la celda contiene 1, por el contrario, sí que lo hay.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

N	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Afinidad	INC.X	INC.Y	INC.Z	Rad	Grad
5	1	1	1	1	1	1	1	1	5	0	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	1	6	0	0	0	0	0
25		1	1				1	1	6	21	0	4	0,1882	10,78
26		1	1				1	1	5	21	0	4	0,1882	10,78
27			1				1	1	6	0	16,75	4	0,2344	13,43
28			1				1	1	5	0	16,75	4	0,2344	13,43
29			1				1	1	6	0	16,75	4	0,2344	13,43
30			1				1	1	5	0	16,75	4	0,2344	13,43
31	1	1	1	1	1			1	5	21	16,75	4	0,1478	8,47
32	1	1	1	1	1			1	6	21	16,75	4	0,1478	8,47
33	1	1	1	1	1			1	6	21	16,75	4	0,1478	8,47
34	1	1	1	1	1			1	5	21	16,75	4	0,1478	8,47
120				1		1		1	6	10,5	0	7	0,5880	33,69
129				1		1		1	5	10,5	0	7	0,5880	33,69
138					1	1		1	6	0	8,375	7	0,6962	39,89
147					1	1		1	5	0	8,375	7	0,6962	39,89
156					1	1		1	6	0	8,375	7	0,6962	39,89
165					1	1		1	5	0	8,375	7	0,6962	39,89

La imagen siguiente muestra un ejemplo de una solución posible para la pérgola B. En ella vemos el estado de deformación y los carritos aplicados en los extremos de las vigas principales y en las esquinas de las vigas de borde.



*Ilustración 52 Estado de deformación de una cubierta (pérgola B) con anclajes ubicados en el perímetro de la cubierta*

## Resultados de las propuestas Pérgola A

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato)	REAC Vx,y	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 1</b>				
25		0	0	kN
26		0	0	kN
27		0	0	kN
28		0	0	kN
29		0	0	kN
30		0	0	kN
31	98,043	658,4056934	665,6654467	kN
32	98,043	658,4056934	665,6654467	kN
33	98,043	658,4056934	665,6654467	kN
34	98,043	658,4056934	665,6654467	kN
120		0	0	kN
129		0	0	kN
138		0	0	kN
147		0	0	kN
156		0	0	kN
165		0	0	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 1</b>				
Nº de cables		4		
Tensión máxima		665,6654467 KN		
Tensión media		665,6654467 KN		
Incumplimientos de flecha		6		
NOTA: se incumplen zonas no atirantadas casi por muy poco				
NOTA: viable esta solución ofreciendo una contraflecha				

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato)	REAC Vh	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 2</b>				
25	140,205	736,07625	749,3101413	kN
26	140,205	736,07625	749,3101413	kN
27		0	0	kN
28		0	0	kN
29		0	0	kN
30		0	0	kN
31	68,299	458,6604903	463,7178008	kN
32	68,299	458,6604903	463,7178008	kN
33	68,299	458,6604903	463,7178008	kN
34	68,299	458,6604903	463,7178008	kN
120		0	0	kN
129		0	0	kN
138		0	0	kN
147		0	0	kN
156		0	0	kN
165		0	0	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 2</b>				
Nº de cables		6		
Tensión máxima		749,3101413		
Tensión media		558,9152476		
Incumplimientos de flecha		4		
NOTA: se incumplen zonas no atirantadas casi por muy poco				
NOTA: Es una solución peor que S1				

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato	REAC Vh	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 3</b>				
25	149,5	784,875	798,9862425	kN
26	149,5	784,875	798,9862425	kN
27	101,696	425,852	437,8264523	kN
28	101,696	425,852	437,8264523	kN
29	101,696	425,852	437,8264523	kN
30	101,696	425,852	437,8264523	kN
31	58,994	396,1729596	400,5412662	kN
32	58,994	396,1729596	400,5412662	kN
33	58,994	396,1729596	400,5412662	kN
34	58,994	396,1729596	400,5412662	kN
120		0	0	kN
129		0	0	kN
138		0	0	kN
147		0	0	kN
156		0	0	kN
165		0	0	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 3</b>				
Nº de cables	10			
Tensión máxima	798,9862425			
Tensión media	495,1443359			
Incumplimientos de flecha	0			
NOTA: no hay incumplimiento de flecha. Los tirantes 25 y 26 trabajan el doble que el resto				

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato	REAC Vh	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 4</b>				
25		0	0	kN
26		0	0	kN
27		0	0	kN
28		0	0	kN
29		0	0	kN
30		0	0	kN
31	80,115	538,0105885	543,9428339	kN
32	80,115	538,0105885	543,9428339	kN
33	80,115	538,0105885	543,9428339	kN
34	80,115	538,0105885	543,9428339	kN
120	321,721	482,5815	579,9907809	kN
129	321,721	482,5815	579,9907809	kN
138		0	0	kN
147		0	0	kN
156		0	0	kN
165		0	0	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 4</b>				
Nº de cables	6			
Tensión máxima	579,9907809			
Tensión media	555,9588162			
Incumplimientos de flecha	4			
NOTA: se incumplen zonas no atirantadas casi por muy poco				
NOTA: Es una solución muy próxima a S1, sin embargo, tienes resultados				

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato	REAC Vh	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 5</b>				
25	147,791	775,90275	789,8526807	kN
26	147,791	775,90275	789,8526807	kN
27		0	0	kN
28		0	0	kN
29		0	0	kN
30		0	0	kN
31	61,741	414,62038	419,1920927	kN
32	61,741	414,62038	419,1920927	kN
33	61,741	414,62038	419,1920927	kN
34	61,741	414,62038	419,1920927	kN
120		0	0	kN
129		0	0	kN
138	262,362	313,8973929	409,103156	kN
147	262,362	313,8973929	409,103156	kN
156	262,362	313,8973929	409,103156	kN
165	262,362	313,8973929	409,103156	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 5</b>				
Nº de cables	10			
Tensión máxima	789,8526807			
Tensión media	489,2886356			
Incumplimientos de flecha	0			
NOTA: se incumple la flecha de 25 y 26 por poco				
NOTA: por el número de tirantes y por los resultados tan parecidos a otras				

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato	REAC Vh	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 6</b>				
25		0	0	kN
26		0	0	kN
27		0	0	kN
28		0	0	kN
29		0	0	kN
30		0	0	kN
31		0	0	kN
32		0	0	kN
33		0	0	kN
34		0	0	kN
120	544,531	816,7965	981,6672208	kN
129	544,531	816,7965	981,6672208	kN
138	309,949	370,8318393	483,3059441	kN
147	309,949	370,8318393	483,3059441	kN
156	309,949	370,8318393	483,3059441	kN
165	309,949	370,8318393	483,3059441	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 6</b>				
Nº de cables	6			
Tensión máxima	981,6672208 KN			
Tensión media	649,4263697 KN			
Incumplimientos de flecha	6			
NOTA: se incumple la flecha de esquinas varias veces				
NOTA: Demasiadas tensiones en la estructura, aunque se optimice la forma				

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato	REAC Vh	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 7</b>				
25	228,795	1201,17375	1222,769614	kN
26	228,795	1201,17375	1222,769614	kN
27	118,667	496,9180625	510,890808	kN
28	118,666	496,913875	510,8865028	kN
29	118,666	496,913875	510,8865028	kN
30	118,667	496,9180625	510,890808	kN
31		0	0	kN
32		0	0	kN
33		0	0	kN
34		0	0	kN
120		0	0	kN
129		0	0	kN
138		0	0	kN
147		0	0	kN
156		0	0	kN
165		0	0	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 7</b>				
Nº de cables	6			
Tensión máxima	1222,769614		KN	
Tensión media	748,1823084		KN	
Incumplimientos de flecha	4			
NOTA: se incumplen de mucho las flechas en las esquinas				
NOTA: Demasiadas tensiones en los cables				

NUDO CUB.	REAC. Vz (Dato	REAC Vh	REAC TIRANT	Ud
<b>SOLUCIÓN 8</b>				
25	109,567	575,22675	585,5687333	kN
26	109,567	575,22675	585,5687333	kN
27	77,458	324,355375	333,4758628	kN
28	77,457	324,3511875	333,4715575	kN
29	77,457	324,3511875	333,4715575	kN
30	77,458	324,355375	333,4758628	kN
31	58,635	393,7621027	398,1038265	kN
32	58,635	393,7621027	398,1038265	kN
33	58,635	393,7621027	398,1038265	kN
34	58,635	393,7621027	398,1038265	kN
120	157,626	236,439	284,1643127	kN
129	157,626	236,439	284,1643127	kN
138	95,136	113,8234286	148,3463225	kN
147	95,136	113,8234286	148,3463225	kN
156	95,136	113,8234286	148,3463225	kN
165	95,136	113,8234286	148,3463225	kN
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS: SOLUCIÓN 8</b>				
Nº de cables	16			
Tensión máxima	585,5687333		Carga de pande	2475,543375
Tensión media	328,6975955			
Incumplimientos de flecha	0			
NOTA: Es interesante observar los resultados de tensiones en cables				
NOTA: Los cables intermedios trabajan poco, sobretodo los 4 de los lados				

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Estos resultados son para una altura en coronación de +20m. Se ha decidido optar por esta altura ya que coronar los pilares a una altura mayor supondría una mayor esbeltez y peor comportamiento frente al pandeo, además de crear visualmente cierta desproporción.

Sin embargo, tenemos el inconveniente que, para esta altura, y concretamente para el nudo más solicitado, la componente horizontal de tensión es del 90%, es decir, se trata de una altura con un aprovechamiento muy pequeño, ya que ese cable tiene una utilidad del 10%. Asumir esta solución tampoco resulta algo grave, ya que podemos asumir que los cables tendrán un mayor diámetro para cumplir con estas tensiones.

Sería a partir de la cota +24m de la coronación cuando encontraríamos un aprovechamiento del 40% y del 50% si esta ascendiera a la cota +26m. Sin embargo, estas dos opciones llevarían a una estructura sobredimensionada y más si tenemos en cuenta que un par de centímetros adicionales en los cables nos permitiría llegar a una estructura más estética y equilibrada.

## Resultados de la propuesta Pérgola B

NUDO	Descripción	Posición.X	Posición.Y	Posición.Z
13	Coronación Izq. Inferior	21	16,75	20
14	Coronación Der. Inferior	27	16,75	20
15	Coronación Izq. Superior	21	22,75	20
16	Coronación Der. Superior	27	22,75	20
9	Extremo. Viga principal Oeste Inferior	0	16,75	16
10	Extremo. Viga principal Este Inferior	48	16,75	16
12	Extremo. Viga principal Este Superior	48	22,75	16
11	Extremo. Viga principal Oeste Superior	0	22,75	16
18	Extremo. Viga principal Norte Izquierda	21	39,5	16
20	Extremo. Viga principal Norte Derecha	27	39,5	16
19	Extremo. Viga principal Sur Derecha	27	0	16
17	Extremo. Viga principal Sur Izquierda	21	0	16
21	Esquina Sur-Oeste	0	0	16
22	Esquina Sur-Este	48	0	16
24	Esquina Norte-Este	48	39,5	16
23	Esquina Norte-Oeste	0	39,5	16
29	Mediamadera Viga principal Oeste Inferior	10,5	16,75	13
38	Mediamadera Viga principal Este Inferior	37,5	16,75	13
56	Mediamadera Viga principal Este Superior	37,5	22,75	13
47	Mediamadera Viga principal Oeste Superior	10,5	22,75	13
74	Mediamadera Viga principal Norte Izquierda	21	31,125	13
92	Mediamadera Viga principal Norte Derecha	27	31,125	13
83	Mediamadera Viga principal Sur Derecha	27	8,375	13
65	Mediamadera Viga principal Sur Izquierda	21	8,375	13
200	Modulo Sur Izquierda	10,5	8,375	14,5
297	Modulo Sur Derecha	37,5	8,375	14,5
378	Modulo Norte Izquierda	10,5	31,125	14,5
459	Modulo Norte Derecha	37,5	31,125	14,5

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

S1	S2	S3	S4	Afinidad	INC.X	INC.Y	INC.Z	Alfa (Radi	Alfa (Grado
				13					
				14					
				15					
				16					
1	1		1	13	21	0	4	0,188222	10,7843
1	1		1	14	21	0	4	0,188222	10,7843
1	1		1	16	21	0	4	0,188222	10,7843
1	1		1	15	21	0	4	0,188222	10,7843
1	1		1	15	0	16,75	4	0,234416	13,43103
1	1		1	16	0	16,75	4	0,234416	13,43103
1	1		1	14	0	16,75	4	0,234416	13,43103
1	1		1	13	0	16,75	4	0,234416	13,43103
1	1	1	1	13	21	16,75	4	0,147823	8,469661
1	1	1	1	14	21	16,75	4	0,147823	8,469661
1	1	1	1	16	21	16,75	4	0,147823	8,469661
1	1	1	1	15	21	16,75	4	0,147823	8,469661
1	1	1		13	10,5	0	7	0,588003	33,69007
1	1	1		14	10,5	0	7	0,588003	33,69007
1	1	1		16	10,5	0	7	0,588003	33,69007
1	1	1		15	10,5	0	7	0,588003	33,69007
1	1	1		15	0	8,375	7	0,696205	39,88958
1	1	1		16	0	8,375	7	0,696205	39,88958
1	1	1		14	0	8,375	7	0,696205	39,88958
1	1	1		13	0	8,375	7	0,696205	39,88958
1				13	10,5	8,375	5,5	0,388671	22,26918
1				14	10,5	8,375	5,5	0,388671	22,26918
1				15	10,5	8,375	5,5	0,388671	22,26918
1				16	10,5	8,375	5,5	0,388671	22,26918

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

NUDO	CUI	REAC. Vz (kN)	REAC Vx,y (kN)	REAC TIRAJE (kN)	Ud
<b>SOLUCIÓN 1</b>					
9		68,47	359,45	<b>365,91</b>	kN
10		68,47	359,45	<b>365,91</b>	kN
12		68,47	359,45	<b>365,91</b>	kN
11		68,47	359,45	<b>365,91</b>	kN
18		72,91	305,33	<b>313,91</b>	kN
20		72,92	305,33	<b>313,92</b>	kN
19		72,92	305,33	<b>313,92</b>	kN
17		72,91	305,33	<b>313,91</b>	kN
21		58,64	393,78	<b>398,12</b>	kN
22		58,64	393,78	<b>398,12</b>	kN
24		58,64	393,78	<b>398,12</b>	kN
23		58,64	393,78	<b>398,12</b>	kN
29		106,12	159,17	<b>191,30</b>	kN
38		106,11	159,17	<b>191,30</b>	kN
56		106,11	159,17	<b>191,30</b>	kN
47		106,12	159,17	<b>191,30</b>	kN
74		93,18	111,48	<b>145,29</b>	kN
92		93,18	111,48	<b>145,29</b>	kN
83		93,18	111,48	<b>145,29</b>	kN
65		93,18	111,48	<b>145,29</b>	KN
200		57,12	139,49	<b>150,74</b>	KN
297		57,12	139,49	<b>150,74</b>	KN
378		57,12	139,49	<b>150,74</b>	KN
459		57,12	139,49	<b>150,74</b>	KN

RESUMEN DE RESULTADOS					
Nº de cables:		24,00			
Tensión máxima =		398,12 KN			
Tensión media =		260,88 KN			
CABLE:		27M			
NR,d =		237,9 KN			

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

NUDO	CUI	REAC. Vz (	REAC Vx,y	REAC TIRA	Ud
<b>SOLUCIÓN 2</b>					
9		71,219	373,90	<b>380,62</b>	kN
10		71,219	373,90	<b>380,62</b>	kN
12		71,219	373,90	<b>380,62</b>	kN
11		71,219	373,90	<b>380,62</b>	kN
18		78,406	328,33	<b>337,56</b>	kN
20		78,407	328,33	<b>337,56</b>	kN
19		78,407	328,33	<b>337,56</b>	kN
17		78,406	328,33	<b>337,56</b>	kN
21		63,61	427,17	<b>431,88</b>	kN
22		63,61	427,17	<b>431,88</b>	kN
24		63,61	427,17	<b>431,88</b>	kN
23		63,61	427,17	<b>431,88</b>	kN
29		127,256	190,88	<b>229,41</b>	kN
38		127,256	190,88	<b>229,41</b>	kN
56		127,256	190,88	<b>229,41</b>	kN
47		127,256	190,88	<b>229,41</b>	kN
74		107,754	128,92	<b>168,02</b>	kN
92		107,754	128,92	<b>168,02</b>	kN
83		107,754	128,92	<b>168,02</b>	kN
65		107,754	128,92	<b>168,02</b>	KN
200			0,00	<b>0,00</b>	KN
297			0,00	<b>0,00</b>	KN
378			0,00	<b>0,00</b>	KN
459			0,00	<b>0,00</b>	KN

RESUMEN DE RESULTADOS			
Nº de cables:		16,00	
Tensión máxima =		431,88	KN
Tensión media =		257,92	KN
	CABLE:	27M	
	NR,d =	237,9	KN

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

NUDO	CUI	REAC. Vz (	REAC Vx,y	REAC TIRA	Ud
<b>SOLUCIÓN 3</b>					
9			0,00	<b>0,00</b>	kN
10			0,00	<b>0,00</b>	kN
12			0,00	<b>0,00</b>	kN
11			0,00	<b>0,00</b>	kN
18			0,00	<b>0,00</b>	kN
20			0,00	<b>0,00</b>	kN
19			0,00	<b>0,00</b>	kN
17			0,00	<b>0,00</b>	kN
21		73,795	495,57	<b>501,03</b>	kN
22		73,795	495,57	<b>501,03</b>	kN
24		73,795	495,57	<b>501,03</b>	kN
23		73,795	495,57	<b>501,03</b>	kN
29		263,248	394,87	<b>474,58</b>	kN
38		263,248	394,87	<b>474,58</b>	kN
56		263,248	394,87	<b>474,58</b>	kN
47		263,248	394,87	<b>474,58</b>	kN
74		263,716	315,52	<b>411,21</b>	kN
92		263,716	315,52	<b>411,21</b>	kN
83		263,716	315,52	<b>411,21</b>	kN
65		263,716	315,52	<b>411,21</b>	kN
200			0,00	<b>0,00</b>	KN
297			0,00	<b>0,00</b>	KN
378			0,00	<b>0,00</b>	KN
459			0,00	<b>0,00</b>	KN

RESUMEN DE RESULTADOS			
Nº de cables:		12,00	
Tensión máxima =		501,03	KN
Tensión media =		231,14	KN
	CABLE:	36M	
	NR,d =	423,5	KN

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

NUDO	CUI	REAC. Vz (	REAC Vx,y	REAC TIRA	Ud
<b>SOLUCIÓN 4</b>					
9	109,113	572,84	<b>583,14</b>	kN	
10	109,114	572,85	<b>583,15</b>	kN	
12	109,114	572,85	<b>583,15</b>	kN	
11	109,113	572,84	<b>583,14</b>	kN	
18	111,348	466,27	<b>479,38</b>	kN	
20	111,349	466,27	<b>479,39</b>	kN	
19	111,349	466,27	<b>479,39</b>	kN	
17	111,348	466,27	<b>479,38</b>	kN	
21	64,057	430,17	<b>434,92</b>	kN	
22	64,057	430,17	<b>434,92</b>	kN	
24	64,057	430,17	<b>434,92</b>	kN	
23	64,057	430,17	<b>434,92</b>	kN	
29		0,00	<b>0,00</b>	kN	
38		0,00	<b>0,00</b>	kN	
56		0,00	<b>0,00</b>	kN	
47		0,00	<b>0,00</b>	kN	
74		0,00	<b>0,00</b>	kN	
92		0,00	<b>0,00</b>	kN	
83		0,00	<b>0,00</b>	kN	
65		0,00	<b>0,00</b>	KN	
200		0,00	<b>0,00</b>	KN	
297		0,00	<b>0,00</b>	KN	
378		0,00	<b>0,00</b>	KN	
459		0,00	<b>0,00</b>	KN	

RESUMEN DE RESULTADOS			
Nº de cables:	12,00		
Tensión máxima =	583,15 KN		
Tensión media =	249,57 KN		
CABLE:	45M		
NR,d =	583,14 KN		

Sobre estos resultados podemos concluir que la situación más restrictiva se puede dar en la pérgola A. Existen tres soluciones válidas.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

La primera sería atirantar cada uno de los nudos considerados en el estudio de soluciones. Habría un mejor reparto de las cargas y los cables no trabajarían tanto como en el resto de las soluciones, además de controlar de una mejor forma las flechas y las deformaciones futuras.

La segunda opción sería atirantar el perímetro de la cubierta. Esta opción es muy práctica porque es igualmente efectivo en el control de deformaciones, ya que en las vigas a media madera no se manifiesta tanta flecha como en los extremos del voladizo. El inconveniente es que las cargas de estos cables serían mayores que la primera y tendríamos que sobredimensionarlos, aunque a un menor número de ellos.

Y, por último, una tercera solución, que es similar a la segunda, con la diferencia de que sólo los cables irían a anclarse a media madera y en las esquinas de las vigas de borde. Esta distribución resulta muy eficiente ya que los cables trabajan a una menor tensión que en el segundo caso debido a una menor componente horizontal. El inconveniente es que presenta una mayor flecha en los voladizos y es posible que en los cálculos de los Estados Límite de Servicio que considere combinación de acciones características e intervengan otras acciones más severas como el viento, puedan incumplirse varias comprobaciones.

Por esta misma razón, y por no sobrecargar demás la estructura, vamos a optar por una solución intermedia (la segunda) y atirantar los nudos de los extremos de vigas principales y esquinas de vigas de borde, tanto en la pérgola A como en la pérgola B.

Los tirantes tendrán unas características similares a las barras GEWI 50, con un diámetro nominal de 50mm.

**BARRAS GEWI®**

Designación	Resistencia a la fluencia	Resistencia a la ruptura	Carga de fluencia	Carga de ruptura	Elongación	Área de sección transversal (As)	Peso nominal (b)
	[MPa]	MPa	[kN]	[kN]	[%]	[mm <sup>2</sup> ]	[kg/m]
Propiedades de los sistemas GEWI®							
GEWI® 28	500	550	310	340	6%	616	4.83
GEWI® 32	500	550	405	440	6%	804	6.31
GEWI® 40	500	550	630	690	6%	1,260	9.87
GEWI® 50	500	550	980	1,080	6%	1,960	15.40
GEWI® 57,5	555	700	1,441	1,818	5%	2,597	20.38
GEWI® 63,5	555	700	1,760	2,215	5%	3,167	24.86

*Ilustración 53 Elección de referencia para el dimensionamiento de los cables*

## DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Tomando de referencia la estructura previa modificada, iniciamos las comprobaciones de cada elemento estructural de ELS y ELU. Vamos a seguir una metodología iterativa. Observaremos los resultados de las comprobaciones y en función del grado de aprovechamiento más limitante, plantearemos una nueva propuesta o modificación, bien sea de sección o inclusión de nuevos elementos. Una vez alterado el modelo se reiniciará los cálculos hasta que los aprovechamientos de todas las comprobaciones sean inferiores al 100%. Tras esto, se tratará de optimizar cada elemento para evitar una estructura de elementos sobredimensionados. Consideraremos que nuestro diseño será eficiente si los valores de aprovechamiento están comprendidos entre el 75% y el 95% de las comprobaciones.

### Primera comprobación

#### *Estado actual del modelo:*

Se ha incorporado un atirantado al modelo para evitar excesivas deformaciones de flecha en la cubierta y desplazamientos horizontales inadmisibles por integridad.

#### *Observaciones:*

El pilar tiene un elevado aprovechamiento (98%) para la comprobación del desplome (o desplazamiento horizontal de la cubierta) por integridad estructural.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS PILARES</b>	
Tracción 0º	14%
Compresión 0º	27%
Flexión Simple	29%
Flexión Esviada	36%
Tracción +Flexión Esv	31%
Compresión +Flexión Esv	41%
Cortante	48%
Torsión	1%
Torsión + Cortante	2%
Pandeo por Flexo-Compresión	57%
Pandeo por compresión	5%
Pandeo lateral	29%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	57%
Flecha. ELS.característica Integridad	14%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	2%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	98%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 25 Aprovechamiento - Comprobación 1 – Pilares*

La viga de borde incumple el Estado Límite Último con la comprobación de torsión y cortante simultáneas además de incumplir el Estado Límite de Servicio en la flecha activa para la comprobación de integridad estructural debido a la succión del viento.

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS DE BORDE</b>	
Tracción 0º	17%
Compresión 0º	8%
Flexión Simple	45%
Flexión Esviada	48%
Tracción +Flexión Esv	27%
Compresión +Flexión Esv	48%
Cortante	26%
Torsión	105%
Torsión + Cortante	111%
Pandeo por Flexo-Compresión	61%
Pandeo por compresión	18%
Pandeo lateral	45%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	61%
Flecha. ELS.característica Integridad	110%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	26%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	60%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	6%

*Tabla 26 Aprovechamiento - Comprobación 1 - Vigas de borde*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

*Medidas para el siguiente modelo:*

Aumentamos las dimensiones de las vigas de borde y vigas principales.

Viga de borde	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.6 m	0.7m
	Canto actual	Canto propuesto
	1.0m	1.1m

*Tabla 27 Modificación-Comprobación 1- Vigas de borde*

Viga principal (exterior)	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.6 m	0.7m
	Canto actual	Canto propuesto
	1.0m	1.1m

*Tabla 28 Modificación-Comprobación 1-Viga principal (exterior)*

Viga principal (interior)	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.6 m	0.7m
	Canto actual	Canto propuesto
	2.0m	2.0m

*Tabla 29 Modificación-Comprobación 1-Viga principal (interior)*

## Segunda comprobación

*Estado actual del modelo:*

Se ha incorporado un atirantado al modelo para evitar excesivas deformaciones de flecha en la cubierta y desplazamientos horizontales inadmisibles por integridad y se ha aumentado las dimensiones de las vigas de borde y las vigas principales.

*Observaciones:*

Las correas incumplen el Estado Límite último por flexión esviada y axiles combinados con momento de eje fuerte. Además, se incumple el pandeo por flexo-compresión y el vuelco lateral. La flecha incumple el Estado Límite de Servicio por integridad.

Las vigas principales cumplen con un 59% de aprovechamiento frente al pandeo por flexo-compresión. Las comprobaciones singulares debidas al canto variable de la sección cumplen con un aprovechamiento del 24%.

La estructura sigue incumpliendo la condición de integridad y apariencia en desplazamientos horizontales en las vigas de borde.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS CORREAS</b>	
Tracción 0º	2%
Compresión 0º	3%
Flexión Simple	74%
Flexión Esviada	77%
Tracción +Flexión Esv	32%
Compresión +Flexión Esv	77%
Cortante	36%
Torsión	14%
Torsión + Cortante	15%
Pandeo por Flexo-Compresión	78%
Pandeo por compresión	0%
Pandeo lateral	74%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	78%
Flecha. ELS.característica Integridad	143%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	53%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	73%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	12%

*Tabla 30 Aprovechamiento - Comprobación 2 - Correas*

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS PRINCIPALES</b>	
Tracción 0º	0%
Compresión 0º	6%
Flexión Simple	23%
Flexión Esviada	23%
Tracción +Flexión Esv	2%
Compresión +Flexión Esv	24%
Cortante	19%
Torsión	24%
Torsión + Cortante	28%
Pandeo por Flexo-Compresión	59%
Pandeo por compresión	29%
Pandeo lateral	23%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	46%
Flecha. ELS.característica Integridad	50%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	11%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	57%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	6%

*Tabla 31 Aprovechamiento - Comprobación 2 - Vigas principales*

*Medidas para el siguiente modelo:*

Modificación de la sección de las correas y añadimos en la superestructura unas cruces de San Andrés para reducir los desplazamientos horizontales frente a las cargas de viento.

Correas	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.2 m	0.3m
	Canto actual	Canto propuesto
	0.3m	0.4m

Tabla 32 Modificación-Comprobación 2- Correas

Cruces de San Andrés	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.0m	0.4m
	Canto actual	Canto propuesto
0.0m	0.5m	

Tabla 33 Modificación-Comprobación 2- Cruces de San Andrés

### Tercera comprobación

*Estado actual del modelo:*

Se ha incorporado un atirantado al modelo para evitar excesivas deformaciones de flecha en la cubierta y cruces de San Andrés de madera para rigidizar la superestructura frente a los desplazamientos horizontales inadmisibles. Se ha aumentado las dimensiones de las vigas de borde, las vigas principales y las correas canto y ancho.

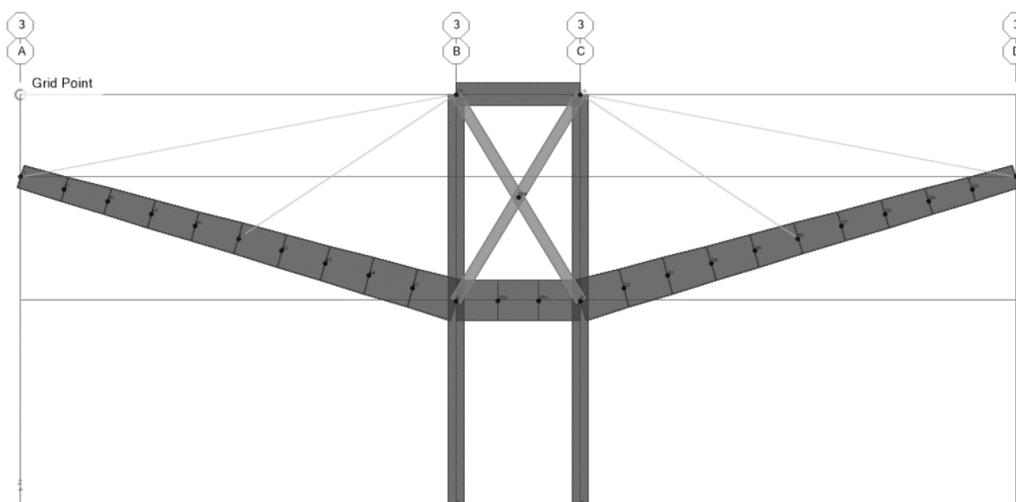


Ilustración 54 Alzado del modelo Pérgola B - Tercera comprobación

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

*Observaciones:*

Se cumplen todas las comprobaciones de la estructura, pero podemos apurar el modelo para optimizar el valor de los aprovechamientos. Podemos considerar que las correas tienen una sección adecuada para las solicitaciones, ya que el aprovechamiento más limitante es el 87%.

APROVECHAMIENTOS CORREAS	
Tracción 0º	4%
Compresión 0º	5%
Flexión Simple	83%
Flexión Esviada	85%
Tracción +Flexión Esv	85%
Compresión +Flexión Esv	85%
Cortante	56%
Torsión	23%
Torsión + Cortante	33%
Pandeo por Flexo-Compresión	87%
Pandeo por compresión	0%
Pandeo lateral	83%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	87%
Flecha. ELS.característica Integridad	60%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	14%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	54%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	7%

*Tabla 34 Aprovechamiento - Comprobación 3 – Correas*

Sección Correas	
h	0,4m
b	0,3m

*Tabla 35 Sección - Comprobación 3 – Correas*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS CRUCES DE SAN ANDRÉS</b>	
Tracción 0º	25%
Compresión 0º	21%
Flexión Simple	3%
Flexión Esviada	3%
Tracción +Flexión Esv	25%
Compresión +Flexión Esv	6%
Cortante	2%
Torsión	1%
Torsión + Cortante	1%
Pandeo por Flexo-Compresión	17%
Pandeo por compresión	5%
Pandeo lateral	3%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	17%
Flecha. ELS.característica Integridad	36%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	8%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	67%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 36 Aprovechamiento - Comprobación 3 - Cruces de San Andrés*

<b>Sección Cruces de San Andrés</b>	
h	0,5m
b	0,4m

*Tabla 37 Sección - Comprobación 3 - Cruces de San Andrés*

<b>APROVECHAMIENTOS PILARES</b>	
Tracción 0º	11%
Compresión 0º	27%
Flexión Simple	26%
Flexión Esviada	32%
Tracción +Flexión Esv	29%
Compresión +Flexión Esv	38%
Cortante	45%
Torsión	0%
Torsión + Cortante	2%
Pandeo por Flexo-Compresión	53%
Pandeo por compresión	7%
Pandeo lateral	26%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	53%
Flecha. ELS.característica Integridad	8%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	2%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	67%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 38 Aprovechamiento - Comprobación 3 – Pilares*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Sección Pilares	
h	0,8m
b	0,8m

Tabla 39 Sección - Comprobación 3 – Pilares

APROVECHAMIENTOS VIGAS DE BORDE	
Tracción 0º	14%
Compresión 0º	8%
Flexión Simple	32%
Flexión Esviada	34%
Tracción +Flexión Esv	34%
Compresión +Flexión Esv	25%
Cortante	22%
Torsión	47%
Torsión + Cortante	51%
Pandeo por Flexo-Compresión	54%
Pandeo por compresión	18%
Pandeo lateral	32%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	34%
Flecha. ELS.característica Integridad	80%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	24%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	54%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	6%

Tabla 40 Aprovechamiento - Comprobación 3 - Vigas de borde

Sección Vigas de borde	
h	1,1m
b	0,6m

Tabla 41 Sección - Comprobación 3 - Vigas de borde

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

APROVECHAMIENTOS VIGAS INTERIORES	
Tracción 0º	0%
Compresión 0º	4%
Flexión Simple	19%
Flexión Esviada	19%
Tracción +Flexión Esv	2%
Compresión +Flexión Esv	20%
Cortante	25%
Torsión	11%
Torsión + Cortante	11%
Pandeo por Flexo-Compresión	21%
Pandeo por compresión	1%
Pandeo lateral	19%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	21%
Flecha. ELS.característica Integridad	12%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	3%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	43%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 42 Aprovechamiento - Comprobación 3 - Vigas interiores*

Sección Vigas interiores	
h	2m
b	0,6m

*Tabla 43 Sección - Comprobación 3 - Vigas interiores*

APROVECHAMIENTOS VIGAS PRINCIPALES	
Tracción 0º	0%
Compresión 0º	5%
Flexión Simple	16%
Flexión Esviada	17%
Tracción +Flexión Esv	3%
Compresión +Flexión Esv	18%
Cortante	21%
Torsión	24%
Torsión + Cortante	26%
Pandeo por Flexo-Compresión	53%
Pandeo por compresión	28%
Pandeo lateral	16%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	39%
Flecha. ELS.característica Integridad	39%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	10%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	48%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	5%

*Tabla 44 Aprovechamiento - Comprobación 3 - Vigas principales*

*Medidas para el siguiente modelo:*

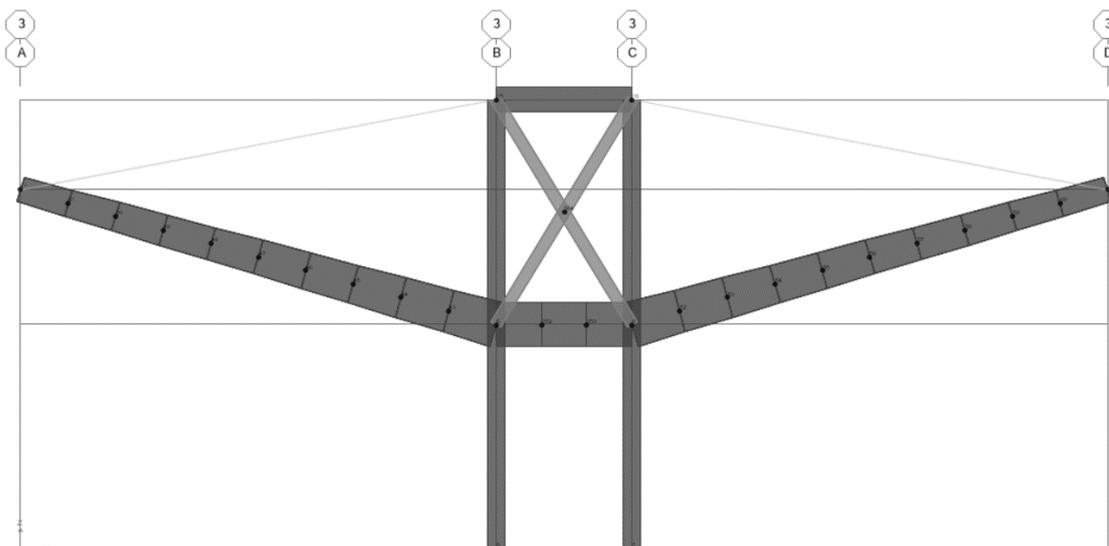
Se pretende modificar el atirantado del primer sistema y optar por el segundo. Es decir, consideramos menos cables, sólo los del perímetro de la estructura (los que conectan los extremos de las vigas principales y las esquinas en las vigas de borde). Se suprimen los cables a media madera.

Reanudamos las comprobaciones por si estos cambios fueran significativos.

### Cuarta comprobación

*Estado actual del modelo:*

Se ha sustituido el atirantado del modelo por otro. Ahora sólo disponemos de cables que anclan el perímetro de la cubierta (no hay anclajes a media madera).



*Ilustración 55 Alzado del modelo Pérgola B - Cuarta comprobación*

*Observaciones:*

Se incrementan de forma generalizada todos los aprovechamientos de las secciones y siguen cumpliendo los requisitos exigidos.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS CORREAS</b>	
Tracción 0º	2%
Compresión 0º	10%
Flexión Simple	77%
Flexión Esviada	89%
Tracción +Flexión Esv	35%
Compresión +Flexión Esv	89%
Cortante	58%
Torsión	24%
Torsión + Cortante	35%
Pandeo por Flexo-Compresión	90%
Pandeo por compresión	1%
Pandeo lateral	77%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	90%
Flecha. ELS.característica Integridad	46%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	11%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	55%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	9%

*Tabla 45 Aprovechamiento - Comprobación 4 – Correas*

<b>APROVECHAMIENTOS CRUCES DE SAN ANDRÉS</b>	
Tracción 0º	24%
Compresión 0º	18%
Flexión Simple	3%
Flexión Esviada	3%
Tracción +Flexión Esv	24%
Compresión +Flexión Esv	5%
Cortante	2%
Torsión	1%
Torsión + Cortante	1%
Pandeo por Flexo-Compresión	15%
Pandeo por compresión	5%
Pandeo lateral	3%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	15%
Flecha. ELS.característica Integridad	35%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	7%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	67%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 46 Aprovechamiento - Comprobación 4 - Cruz de San Andrés*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS PILARES</b>	
Tracción 0º	11%
Compresión 0º	27%
Flexión Simple	26%
Flexión Esviada	32%
Tracción +Flexión Esv	29%
Compresión +Flexión Esv	38%
Cortante	45%
Torsión	0%
Torsión + Cortante	2%
Pandeo por Flexo-Compresión	53%
Pandeo por compresión	7%
Pandeo lateral	26%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	53%
Flecha. ELS.característica Integridad	8%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	1%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	67%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 47 Aprovechamiento - Comprobación 4 – Pilares*

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS DE BORDE</b>	
Tracción 0º	12%
Compresión 0º	5%
Flexión Simple	32%
Flexión Esviada	33%
Tracción +Flexión Esv	34%
Compresión +Flexión Esv	14%
Cortante	22%
Torsión	51%
Torsión + Cortante	51%
Pandeo por Flexo-Compresión	37%
Pandeo por compresión	11%
Pandeo lateral	32%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	40%
Flecha. ELS.característica Integridad	72%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	32%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	57%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	7%

*Tabla 48 Aprovechamiento - Comprobación 4 - Vigas de borde*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS INTERIORES</b>	
Tracción 0º	-1%
Compresión 0º	4%
Flexión Simple	32%
Flexión Esviada	33%
Tracción +Flexión Esv	4%
Compresión +Flexión Esv	34%
Cortante	34%
Torsión	3%
Torsión + Cortante	12%
Pandeo por Flexo-Compresión	37%
Pandeo por compresión	1%
Pandeo lateral	32%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	35%
Flecha. ELS.característica Integridad	12%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	2%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	45%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 49 Aprovechamiento - Comprobación 4 - Vigas interiores*

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS PRINCIPALES</b>	
Tracción 0º	-1%
Compresión 0º	5%
Flexión Simple	44%
Flexión Esviada	48%
Tracción +Flexión Esv	5%
Compresión +Flexión Esv	48%
Cortante	43%
Torsión	21%
Torsión + Cortante	38%
Pandeo por Flexo-Compresión	77%
Pandeo por compresión	27%
Pandeo lateral	44%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	77%
Flecha. ELS.característica Integridad	39%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	13%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	50%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	7%

*Tabla 50 Aprovechamiento - Comprobación 4 - Vigas principales*

El tirante más solicitado trabaja a 720kN y el aprovechamiento para una sección de 0,05m de diámetro nominal es del 85%.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Las correas de 0,3m\*0,4m están optimizadas. Si incrementáramos 10cm el canto este rendimiento del 90% se reduciría al 66% por lo que no nos compensa modificar la sección de estos elementos.

Las vigas de borde tienen un 72% de aprovechamiento a la comprobación de integridad y resisten mejor la combinación de Estado Límite Último a torsión y cortante. Entendemos que esto puede deberse al aumento de las dimensiones de las correas o vigas secundarias. El incremento de la rigidez de los módulos ha permitido disminuir las solicitaciones de estos elementos de borde y podemos permitirnos una reducción de la sección de esta. Si redujéramos el canto de 1,1m a 0,8m, seguirían trabajando las vigas de borde al 80% frente a la torsión y el cortante. A falta de realizar otra comprobación más, es probable que planteemos este cambio de sección para el nuevo modelo.

El pilar trabaja al 67% debido a los desplazamientos. Estas comprobaciones ELS resultan más restrictivas que las comprobaciones de agotamiento de sección. La inclusión de las cruces de San Andrés ha ayudado a controlar estos desplazamientos horizontales ya que inicialmente se tenía un 98% e incumplimientos en los bordes de la cubierta. Consideramos no modificar por el momento esta sección del pilar, ya que es probable que necesitemos dimensionar una unión rígida y queremos disponer de dimensión suficiente para que cumplan disposiciones constructivas y valores de recubrimiento suficiente para contrarrestar las variaciones de humedad y evitar posibles mermas.

*Medidas para el siguiente modelo:*

Aceptamos la nueva disposición de los tirantes y modificamos las secciones de las vigas de borde, las sobredimensionadas vigas internas y las cruces de San Andrés. Las cruces de San Andrés adoptan las dimensiones de las correas.

Cruces de San Andrés	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.4 m	0.3m
	Canto actual	Canto propuesto
	0.5m	0.4m

*Tabla 51 Modificación-Comprobación 4 - Cruces de San Andrés*

Vigas de Borde	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.6m	0.6m
	Canto actual	Canto propuesto
	1.1m	0.8m

*Tabla 52 Modificación-Comprobación 4 - Vigas de borde*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

Vigas Internas	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.6m	0.6m
	Canto actual	Canto propuesto
	2.0m	1.8m

*Tabla 53 Modificación-Comprobación 4 - Vigas internas*

Viga principal (exterior)	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.6m	0.6m
	Canto actual	Canto propuesto
	1.1m	0.8m

*Tabla 54 Modificación-Comprobación 4 - Viga principal (exterior)*

Viga principal (interior)	Ancho actual	Ancho propuesto
	0.6m	0.6m
	Canto actual	Canto propuesto
	2.0m	1.8m

*Tabla 55 Modificación-Comprobación 4 - Viga principal (interior)*

## Quinta comprobación

### *Estado actual del modelo:*

Se ha sustituido el atirantado del modelo por otro. Ahora sólo disponemos de cables que anclan el perímetro de la cubierta (no hay anclajes a media madera). Se ha modificado la dimensión de todos los elementos para ajustarse a un valor óptimo de aprovechamiento. Tras aumentar las dimensiones de los elementos secundarios, hemos podido rebajar el canto de la mayoría de los elementos principales.

### *Observaciones:*

Las correas trabajan al 94%.

Las vigas principales al 87% y las condiciones particulares debidas a la variación del canto cumplen con un 53%.

Las vigas de borde trabajan al 87% por la comprobación ELS de integridad de flecha activa.

Las cruces de San Andrés al 87% por la comprobación ELS de desplome horizontal.

Los pilares trabajan al 87% por la misma comprobación de las cruces de San Andrés. Las condiciones debidas al agotamiento de la sección suponen un 53%.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS CORREAS</b>	
Tracción 0º	3%
Compresión 0º	10%
Flexión Simple	78%
Flexión Esviada	93%
Tracción +Flexión Esv	35%
Compresión +Flexión Esv	94%
Cortante	62%
Torsión	23%
Torsión + Cortante	39%
Pandeo por Flexo-Compresión	94%
Pandeo por compresión	1%
Pandeo lateral	78%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	94%
Flecha. ELS.característica Integridad	60%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	12%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	63%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	9%

*Tabla 56 Aprovechamiento - Comprobación 5 - Correas*

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS PRINCIPALES</b>	
Tracción 0º	0%
Compresión 0º	5%
Flexión Simple	51%
Flexión Esviada	56%
Tracción +Flexión Esv	5%
Compresión +Flexión Esv	56%
Cortante	46%
Torsión	20%
Torsión + Cortante	39%
Pandeo por Flexo-Compresión	87%
Pandeo por compresión	29%
Pandeo lateral	51%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	87%
Flecha. ELS.característica Integridad	48%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	13%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	58%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	7%

*Tabla 57 Aprovechamiento - Comprobación 5 - Vigas principales*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS DE BORDE</b>	
Tracción 0º	16%
Compresión 0º	6%
Flexión Simple	40%
Flexión Esviada	44%
Tracción +Flexión Esv	46%
Compresión +Flexión Esv	19%
Cortante	23%
Torsión	47%
Torsión + Cortante	47%
Pandeo por Flexo-Compresión	45%
Pandeo por compresión	14%
Pandeo lateral	40%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	53%
Flecha. ELS.característica Integridad	87%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	30%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	65%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	7%

*Tabla 58 Aprovechamiento - Comprobación 5 - Vigas de borde*

<b>APROVECHAMIENTOS CRUCES DE SAN ANDRÉS</b>	
Tracción 0º	61%
Compresión 0º	48%
Flexión Simple	4%
Flexión Esviada	4%
Tracción +Flexión Esv	61%
Compresión +Flexión Esv	23%
Cortante	2%
Torsión	1%
Torsión + Cortante	1%
Pandeo por Flexo-Compresión	69%
Pandeo por compresión	50%
Pandeo lateral	4%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	22%
Flecha. ELS.característica Integridad	36%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	13%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	87%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 59 Aprovechamiento - Comprobación 5 - Cruces de San Andrés*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>APROVECHAMIENTOS PILARES</b>	
Tracción 0º	11%
Compresión 0º	27%
Flexión Simple	26%
Flexión Esviada	32%
Tracción +Flexión Esv	29%
Compresión +Flexión Esv	38%
Cortante	45%
Torsión	0%
Torsión + Cortante	2%
Pandeo por Flexo-Compresión	53%
Pandeo por compresión	7%
Pandeo lateral	26%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	53%
Flecha. ELS.característica Integridad	8%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	1%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	87%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 60 Aprovechamiento - Comprobación 5 – Pilares*

<b>APROVECHAMIENTOS VIGAS INTERNAS</b>	
Tracción 0º	1%
Compresión 0º	4%
Flexión Simple	41%
Flexión Esviada	42%
Tracción +Flexión Esv	4%
Compresión +Flexión Esv	42%
Cortante	45%
Torsión	4%
Torsión + Cortante	21%
Pandeo por Flexo-Compresión	54%
Pandeo por compresión	1%
Pandeo lateral	41%
Pandeo por Vuelco lateral por Flexo-Compresión	44%
Flecha. ELS.característica Integridad	12%
Flecha ELS.quasi permanente Apariencia	2%
Desplazamiento horizontal ELS. Integridad	48%
Desplazamiento horizontal ELS. Apariencia	0%

*Tabla 61 Aprovechamiento - Comprobación 5 - Vigas internas*

A falta de dimensionar las uniones, podemos considerar unos valores aceptables para la geometría y aprovechamiento de estos elementos lineales de madera.

## DIMENSIONAMIENTO DE LAS UNIONES

La eficiencia de una unión entre piezas de madera puede variar mucho ya que existen numerosas formas y tipologías de uniones para abordar esta cuestión. En la práctica un tipo de solución tiene más ventajas que otras. No hay una solución única y aquella que finalmente se lleva a cabo es resultado de un proceso abierto que se fundamenta en la experiencia del proyectista.

En este trabajo no consideramos la búsqueda y optimización de la solución ideal. Esto es algo que podría estimarse a través de pruebas y comparaciones. Me he limitado a optar una solución práctica por este motivo, una que cumpla todas las comprobaciones y que se dimensione para mientras se alcanzan ciertos objetivos como la sencillez, el ahorro de material (acero), y ciertas advertencias frente al incendio, además de recomendaciones sobre disposiciones constructivas y otros conceptos de física y mecánica del material recogidos en libros y normativa.

En la imagen siguiente vemos la estructura y varias zonas de unión resaltadas que vamos a analizar. Propondremos una solución en base a la función que desempeñan los elementos y todo lo mencionado.

Necesitamos entonces definir la unión entre:

- El pilar y la cimentación
- El pilar con las vigas principales
- El pilar con las vigas interiores
- El empalme del pilar inferior con el superior
- La unión de las vigas secundarias entre sí
- La unión entre los extremos de las correas a las vigas de borde
- La unión entre vigas de borde en esquina
- El empalme entre vigas de borde
- La unión entre vigas de borde y vigas principales

## Estrategias de diseño

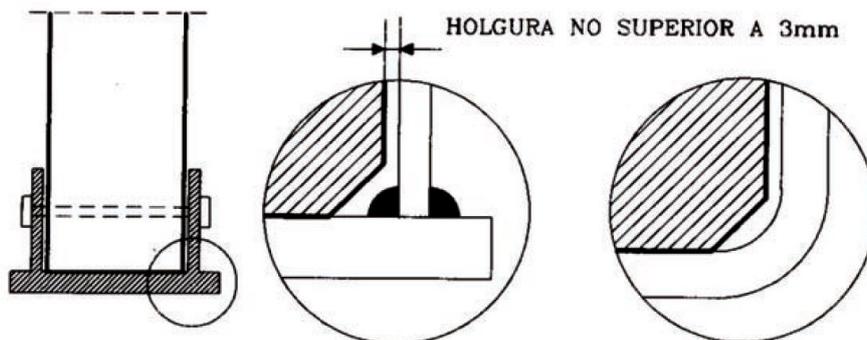
Como ya se pudo mencionar en los antecedentes del trabajo, la unión supone un punto de ruptura del material debido a presencia de taladros, huecos, hendiduras, y es frecuente acompañar la madera con otros materiales de construcción (principalmente acero).

Para la correcta ejecución de la unión se debe verificar la capacidad resistente, su comportamiento en situación de incendio y su durabilidad, además de la anisotropía, la variación transversal de la sección debido a los cambios de humedad y la escasa resistencia a tracción perpendicular.

Este apartado vamos a incluir un listado de estrategias de diseño que hemos tenido en cuenta a la hora de proponer cada una de las uniones.

### *Aspectos constructivos*

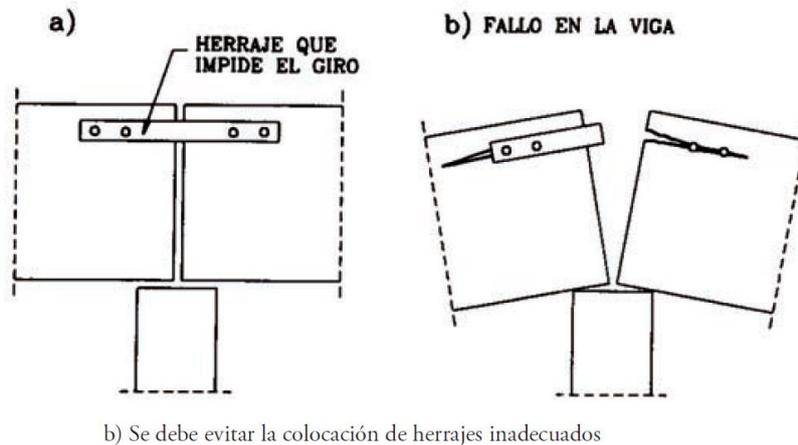
Hay que garantizar las holguras suficientes entre el herraje y la madera asegurando su asentamiento, previo a su puesta en carga. Por otro lado, se deben considerar detalles de proyecto como puede ser el impedimento que se genera al giro en el apoyo de una viga al colocar herrajes en la zona superior o la sujeción lateral en el extremo de la viga en el apoyo impidiendo su hinchazón o merma.



a) Se deben garantizar las holguras y asientos adecuados de las piezas de madera

*Ilustración 56 Aspectos constructivos de las uniones*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

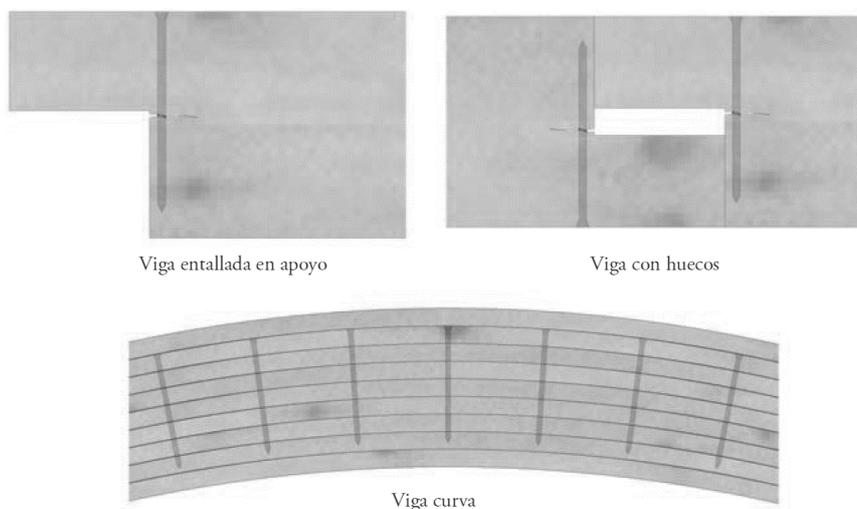


*Ilustración 57 Aspectos constructivos de las uniones*

*Soluciones que eviten o neutralicen la presencia de tracciones perpendiculares*

En todos los encuentros debe analizarse la posible presencia de la tracción perpendicular a la fibra y adoptar la solución constructiva que la resista o la evite. Para ello se proyectarán disposiciones constructivas como las elegidas para las articulaciones intermedias de las vigas gerber en las que el tramo apoyado cuelga del tramo volado y no descansa sobre él, situación en la que se presentan tracciones perpendiculares a la fibra

La otra alternativa es reforzar la resistencia a la tracción perpendicular en aquellas zonas en las que esté presente. Para ello se utilizan conectores metálicos especiales, como en los casos siguientes: vigas entalladas en apoyos, vigas con huecos y zonas de vértice de vigas curvas o a dos aguas



*Ilustración 58 Utilización de herrajes que cosen la tracción perpendicular*

### *Hinchazón y merma*

Los dispositivos de unión no deben restringir el movimiento de la madera en sentido transversal o, al menos, deben reducir su efecto al mínimo posible. Estos movimientos hacen poco adecuadas, por impedir el movimiento transversal de la madera, las fijaciones entre madera y metal que abarquen todo el canto de la pieza.

Así, si el empalme de una pieza de madera laminada encolada se realiza mediante cubrejuntas laterales metálicos que alcanzan su altura total, las contracciones por humedad pueden producir grietas longitudinales de tracción perpendicular concentradas en las líneas de los elementos de fijación más próximas al eje y orientadas en la dirección de las fibras. Estas grietas se pueden evitar sustituyendo los cubrejuntas metálicos por cubrejuntas de madera con las fibras en la misma dirección ya que toman iguales variaciones de altura. También pueden sustituirse los cubrejuntas integrales de acero por llantas, también de acero, situadas en los bordes de la viga de madera con un refuerzo central para resistir el esfuerzo cortante.

### *Durabilidad*

Es necesario impedir cualquier disposición constructiva que entrañe riesgos de infiltración de agua o posibilidad de que el agua, procedente de humedades de condensación, quede estancada. En uniones realizadas al exterior debe facilitarse su evacuación mediante desagües, drenaje y evaporación.

No se deben dañar las barreras de protección formadas por productos activos aplicados para la conservación de la madera.

En las estructuras de madera laminada encolada en clases de uso 1 y 2 no se presentan dificultades específicas ya que el tratamiento se realiza después de la fabricación sobre piezas terminadas lijadas y taladradas para el paso de los medios de unión. Como contrapartida en clases de uso 3 y 4 el tratamiento se realiza sistemáticamente, en autoclave, para las láminas antes de encolar.

La durabilidad de una construcción depende de la estrategia a seguir debiendo cuidarse la protección de la madera y dar un tratamiento adecuado a los detalles de construcción y uniones.

### *Protección contra el fuego*

La resistencia al fuego de la estructura comprende la comprobación de las piezas de madera y de las uniones. La madera tiene buen comportamiento frente al fuego, por lo que es relativamente fácil alcanzar tiempos de resistencia de 30 y 60 minutos, cuando el grueso de la pieza es de al menos 100 o 180 mm, respectivamente. Sin embargo, las uniones constituyen el punto débil de la estructura frente al fuego, particularmente en el caso de las uniones con elementos de fijación metálicos. En el caso de las uniones mecánicas, en las que se emplean elementos metálicos para realizar la conexión, la situación puede ser menos favorable. El acero sin proteger tiene una elevada conductividad térmica y sus propiedades mecánicas disminuyen con el aumento de la temperatura. El problema de la resistencia al fuego de las uniones mecánicas se puede dividir en los tres grupos siguientes: uniones entre piezas de madera (madera-madera- madera), uniones entre madera y acero al interior (madera-acero-madera) y uniones con herrajes expuestos.

- Una unión del primer caso (madera-madera-madera) realizada con elementos de fijación metálicos expuestos, dimensionados para una situación normal de cálculo, queda asignada a una resistencia al fuego de 15 a 20 minutos dependiendo del medio de fijación utilizado. Los pasadores son los que presentan un mejor comportamiento al fuego.
- Las uniones con chapas metálicas en el interior (madera-acero-madera) pueden con relativa facilidad alcanzar resistencias al fuego de R30 y R60. La normativa considera suele exigir una resistencia R30 para la mayoría de las situaciones.
- Y finalmente, el caso más desfavorable de las chapas metálicas expuestas al fuego, como es el caso de los herrajes visto de apoyo de correas requiere un estudio más detallado de su comportamiento y la norma de madera remite al cálculo siguiendo la normativa de acero en caso de incendio. En esta situación es más difícil superar la resistencia R30, salvo que se disponga de una protección añadida con otros materiales o elementos.

## Propuesta de las uniones y bases de cálculo previas

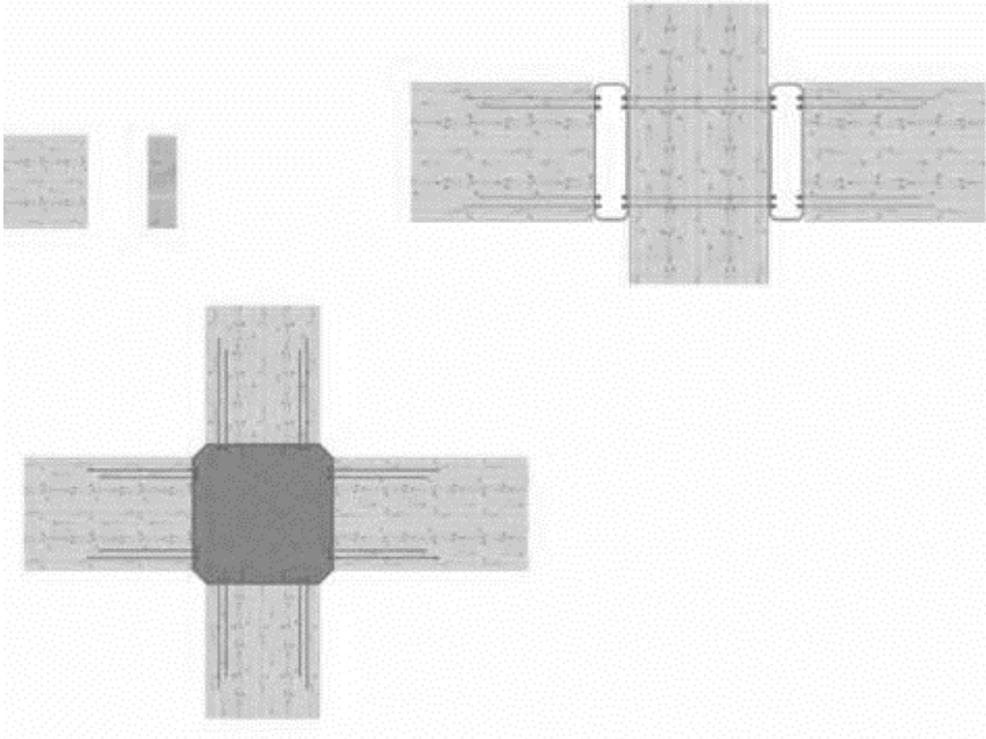
En nuestra estructura haremos uso de uniones tipo clavija, sobretodo uniones acero-madera conectadas a través de pernos y pasadores. Siempre que esto sea posible cada una de estas placas metálicas permanecerán embebidas internamente dentro del elemento de la madera para mejorar su comportamiento frente al fuego. Por otro lado, es sabido que estas uniones no son rígidas del todo. Se consigue una solución intermedia entre la articulación y el empotramiento y para evitar esta situación, he optado por las uniones de barras encoladas que garantizan la rigidez completa en aquellas uniones que enlazan más de tres o cuatro elementos o en aquellas situaciones donde, por necesidades constructivas, necesitamos rigidez.

La aplicación más relevante del empleo de estas barras encoladas es la obtención de enlaces rígidos en empotramientos de pilares, arranques de arco en la cimentación o nudos rígidos de esquina en pórticos. Las uniones de mayor importancia en nuestra estructura corresponden a estos ejemplos. Se emplearán entonces estos medios de unión en las uniones más importantes: La conexión del pilar con la cimentación, el propio pilar sobre la unión de vigas principales y las vigas principales entre sí.

Para evitar que la unión de estos elementos principales afecte a las fibras de otros elementos adyacentes (por ejemplo, a cargas de compresión debidas a las vigas, transmitiendo axiles perpendiculares a las fibras del pilar), se ha optado por crear un elemento de acero constituido por chapas soldadas que permita adecuarse a la directriz de cada elemento (pilar o viga).

Este elemento metálico nos ayudará y nos facilitará las comprobaciones en los cálculos ya que bastará con realizar una comprobación de resistencia a axil y cortante de las barras por cada uno de los elementos que fueran a conectarse. Es decir, tres comprobaciones para las vigas, uno para el pilar inferior y otro para el pilar superior. El elemento metálico se dimensionará para que pueda resistir estas cargas.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 59 Uniones metálicas que sirven de soporte a barras encoladas para permitir la conexión rígida de vigas y pilares*

En el caso de nuestro pilar-cimentación, se realizará a través de una base metálica nivelada y anclada que recibirá la pieza de madera con un solape de las caras de la base.

El resto de las uniones podrán llevarse a cabo de manera tradicional mediante una chapa metálica embebida en ambos elementos y unidas entre sí mediante el uso de pernos y pasadores.

Cuando se trate de uniones en las que sea imposible por proceso constructivo colocar una chapa en el interior de la sección, se llevará a cabo la unión mediante dos chapas exteriores. En el caso de los anclajes de los cables, se podrá disponer de una chapa metálica superficial unida a la madera mediante pernos para evitar que el arranque del cable traccione las fibras y la madera trabaje a compresión en la cara opuesta al anclaje gracias a las arandelas de los pernos.

A continuación, se cita la información previa sobre los medios de unión a utilizar y sus bases de cálculo.

## Pernos

Los pernos son elementos de fijación constituidos por barras metálicas de sección circular con cabeza hexagonal o cuadrada, en un extremo y rosca y tuerca en el otro. Se introducen en agujeros cuyo diámetro puede llegar a tener una holgura de hasta 1mm para facilitar su colocación. Bajo la cabeza y la tuerca de los pernos deberán colocarse arandelas con un diámetro o lado de al menos 3 veces el diámetro del perno y un espesor de 0,3 veces el mismo diámetro.

## Dimensiones

Según la norma, los pernos deben tener un diámetro mínimo de 6mm y máximo de 30mm. Normalmente siguen una serie de 10, 12, 16, 20 y 24mm. Es aconsejable usar una gama pequeña de ellos para no crear confusiones en obra. La longitud del perno puede variar entre 100 a 600mm, cosa que nos conviene ya que tenemos elementos de vigas secundarias o de borde dentro de este límite.

Diámetro perno	Diámetro arandela	Espesor de arandela	Diámetro de agujero
12	58	6	14
16	68	6	18
20	80	8	22
22	92	8	25
24	105	8	27

*Tabla 62 Especificaciones de la norma DIN 1052 para las arandelas de pernos sobre superficie de madera en mm*

## Calidades

Las calidades habituales son 6.8, 8.8 y 10.8. Las más empleadas son las dos primeras. Se suministran generalmente galvanizados en caliente y también en acero inoxidable.

Pernos		Tuercas	
Calidad	Norma	Calidad	Norma
4.6	UNE-EN-ISO 4016	4 d > M16	UNE-EN-ISO 4034
4.8	UNE-EN-ISO 4016	5 d < M16	
5.6	UNE-EN-ISO 4017	5	UNE-EN-ISO 4032
8.8	UNE-EN-ISO 4017	6	

*Tabla 63 Especificaciones de los materiales para pernos y tuercas*

## Pasadores

Los pasadores son barras de acero de sección generalmente circular con diámetros que cubren el rango de 8 a 24mm y que tienen sus extremos con los bordes biselados. Estos elementos los usamos en sustitución a los pernos para lograr un mejor aspecto estético ya que carecen de cabeza, tuerca y arandela. Además, tienen un mejor comportamiento frente a incendio y el agujero donde se aloja debe tener el mismo diámetro que el propio pasador o ligeramente inferior. De este modo queda introducido con cierta presión que garantiza la adecuada transmisión de esfuerzos.

## Dimensiones

Según la norma, los pasadores deben tener una forma prismática constante con un fuste circular o canalado y un diámetro de 6mm y máximo de 30mm. Generalmente los diámetros son de 8, 10, 12, 14, 16, 20 y 24mm y la longitud de 50 a 500mm. Los diámetros más frecuentes son los de 12, 16 y 20mm.

## Calidades

Los pasadores se suministran en acero laminado con calidades S235, S275 y S355 según la norma UNE-EN 10025-2. El número que sigue a la letra S indica el límite elástico del acero en Mpa. La resistencia a tracción de estos aceros es de 360, 410 y 470 Mpa respectivamente.

## Cálculo de unión con pernos y pasadores

En este apartado se explicará el método de cálculo empleado para determinar la capacidad de carga de las clavijas frente a carga axial, lateral o combinación de ambas y comentaremos las disposiciones constructivas necesarias como separación y distancias mínimas.

## Propiedades de los materiales

### *Resistencia al aplastamiento de la madera (Pernos)*

La resistencia al aplastamiento de la madera es la tensión última de compresión que es capaz de soportar la pieza de madera sometida a un elemento lineal rígido que atraviesa la sección, en nuestro caso un perno o un pasador de acero. La normativa recoge una serie de fórmulas obtenidas a través de experimentación y ensayos para cada tipo de clavija. En el caso de pernos, esta resistencia característica al aplastamiento con diámetros no superiores a 30mm y un ángulo alfa (ángulo entre la dirección de las fibras y la dirección de las solicitaciones) se tiene la expresión:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

Siendo:

- $f_{h,0,k}$  la resistencia al aplastamiento en dirección paralela a las fibras en N/mm<sup>2</sup>, con la siguiente expresión:

$$f_{h,0,k} = 0.082 (1 - 0.01) \cdot \rho_k$$

- Y  $k_{90}$  un factor que depende de la clase de madera. Para frondosas:  $0.9+0.015 \cdot d$ ; y para coníferas:  $1.35+0.015 \cdot d$ .

### *Resistencia al aplastamiento de la madera (Pasadores)*

Para el caso de los pasadores se aplican las mismas expresiones que en los pernos.

### *Resistencia a la flexión de la clavija. Momento plástico (Pernos y pasadores)*

El momento plástico es el momento flector que produce la plastificación completa de la sección de un elemento de fijación de tipo pasante o perno. En este caso, y al igual que los pasadores, el valor característico del momento plástico tiene la misma expresión:

$$M_{y,Rk} = 0.3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$$

Siendo  $f_{u,k}$  la resistencia a tracción característica del acero que compone al pasador o al perno y  $d$  su diámetro en mm.

## Capacidad de carga axial

### *Pernos con carga axial*

Los elementos de fijación que tienen capacidad axial son principalmente los pernos y los tirafondos. En el caso de los pernos, cuentan con esta capacidad gracias al anclaje que aporta la arandela bajo la tuerca.

Los pasadores no tienen capacidad de carga axial, sólo lateral.

El esfuerzo axial que soporta el perno se transforma en una tensión de compresión bajo la superficie de la arandela o chapa.

La capacidad de anclaje de la arandela se calcula admitiendo un valor característico de la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra en el área de contacto igual a tres veces dicho valor. Debe tenerse en cuenta que el área de contacto bajo la arandela está reducida por el área destinada al hueco del perno. Si en lugar de esta arandela fuera una placa metálica, la

capacidad de anclaje se calculará como si se tratara de una arandela circular con un diámetro elegido como el valor menor de los siguientes:

- $12t$ , donde  $t$  es el espesor de la placa
- $4d$  donde  $d$  es el diámetro del perno

Esta compresión perpendicular que transmite la arandela al elemento implica que el tornillo esté trabajando a tracción, comprobación que también debe evaluarse:

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

### Capacidad de carga lateral

Las expresiones de cálculo de la capacidad de carga lateral que se proponen en el Eurocódigo 5 son las propuestas desarrolladas por Johansen. Sus ecuaciones permiten obtener la carga última de la unión considerando el fallo por una tensión de aplastamiento en la madera o por la formación de rótulas plásticas en el medio de unión, por sollicitaciones de flexión. Este procedimiento de cálculo se conoce como el modelo plástico europeo.

Estas ecuaciones abarcan diferentes ámbitos

- Unión entre madera-madera
  - Simple cortadura
  - Doble cortadura
- Unión entre madera-acero
  - Simple cortadura
  - Doble cortadura con pieza de acero central
  - Doble cortadura con pieza de madera central

En el caso de evaluar pernos y pasadores, los valores  $t_1$  y  $t_2$  hacen referencia a los espesores de las piezas en caso de simple cortadura y en caso de cortadura doble  $t_1$  espesor de la pieza lateral y  $t_2$  espesor de la pieza central.

### Efecto soga

En las uniones con clavijas que resisten cargas laterales existe un efecto que aumenta la capacidad resistente. Este efecto soga se da en elementos que tienen resistencia frente a fuerzas axiales como es el caso de los pernos. El efecto de colaboración se produce como consecuencia del inicio del deslizamiento de la clavija. Este valor corresponde al 25% de la Capacidad de carga axial del perno.

En el caso de los pasadores, este valor es nulo.

El efecto sogas es un parámetro que se incluye en las ecuaciones de Johansen.

### *Unión madera-acero*

Ya que vamos a aplicar herrajes metálicos, nos interesa considerar la unión madera-acero.

En estas ecuaciones se diferencian dos situaciones, cuando la placa de acero sea delgada y cuando es gruesa. Una placa de espesor suficiente es capaz de impedir el giro libre de la clavija funcionando como un empotramiento y por tanto puede llegar a formar una rótula plástica. Por el contrario, si la placa es delgada, la unión permitirá el giro libre.

Las placas con un espesor de 0.5d o menor, se consideran placas delgadas mientras que, si exceden el valor de d, se pueden considerar placas gruesas. Soluciones intermedias se admite una interpolación lineal.

## Capacidad de carga combinada axial y lateral

El eurocódigo 5 incluye reglas para la comprobación de una situación combinada entre sollicitaciones de axil y lateral.

Si se trata de elementos lisos:

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^1 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^1 \leq 1$$

Mientras que si se trata de elementos que no son lisos:

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

Siendo las capacidades de carga axil y laterales los denominadores de estas dos ecuaciones y los numeradores las cargas de diseño aplicadas en cada clavija.

## Disposiciones particulares de cálculo y constructivas

Las separaciones y distancias mínimas entre uniones clavadas de acero y madera son las mismas que en los casos madera-madera.

### *Uniones con pernos*

Separaciones y distancias	Ángulo	Separación o distancia mínima
Alfa1 (paralela a la fibra)	$0^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	$(4 +  \cos \text{Alfa} ) \cdot d$
Alfa2 (perpendicular a fibra)	$0^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	4d
Alfa3,t testa cargada	$-90^\circ \leq \text{Alfa} \leq 90^\circ$	Max(7d; 80mm)
Alfa3,c testa no cargada	$90^\circ \leq \text{Alfa} < 150^\circ$	$(1+6 \cdot \text{sen}(\text{alfa})) \cdot d$
	$150^\circ \leq \text{Alfa} < 210^\circ$	4d
	$210^\circ \leq \text{Alfa} \leq 270^\circ$	$(1+6 \cdot \text{sen}(\text{alfa})) \cdot d$
Alfa4,t borde cargado	$0^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	Max( $(2+2 \cdot \text{sen}(\text{alfa})) \cdot d$ ; 3d)
Alfa4,c borde no cargado	$180^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	3d

*Tabla 64 Uniones con pernos. Separaciones y distancias mínimas*

### *Uniones con pasadores*

Separaciones y distancias	Ángulo	Separación o distancia mínima
Alfa1 (paralela a la fibra)	$0^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos \text{Alfa} ) \cdot d$
Alfa2 (perpendicular a fibra)	$0^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	3d
Alfa3,t testa cargada	$-90^\circ \leq \text{Alfa} \leq 90^\circ$	Max(7d; 80mm)
Alfa3,c testa no cargada	$90^\circ \leq \text{Alfa} < 150^\circ$	Max( $(a_{3,t} \cdot \text{sen}(\text{alfa})) \cdot d$ ; 3d)
	$150^\circ \leq \text{Alfa} < 210^\circ$	3d
	$210^\circ \leq \text{Alfa} \leq 270^\circ$	Max( $(a_{3,t} \cdot \text{sen}(\text{alfa})) \cdot d$ ; 3d)
Alfa4,t borde cargado	$0^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	Max( $(2+2 \cdot \text{sen}(\text{alfa})) \cdot d$ ; 3d)
Alfa4,c borde no cargado	$180^\circ \leq \text{Alfa} \leq 360^\circ$	3d

*Tabla 65 Separaciones y distancias mínimas para pasadores*

## **Cálculo de unión rígida con barras encoladas**

### **Comportamiento mecánico**

Para describir las leyes que rigen el comportamiento de las uniones encoladas se pueden distinguir tres enfoques: análisis tradicional de tensiones, análisis basado en mecánica de fracturas lineal y elástica y, por último, análisis de fractura no lineal.

El método tradicional de análisis resulta adecuado para casos de anclajes dúctiles y la mecánica de fracturas lineal para el caso de las frágiles. El método no lineal puede ser adecuado para ambos casos, pero nos bastará con realizar comprobaciones del método tradicional.

### *Barras sometidas a cargas axiales*

De este apartado puede decirse lo siguiente:

La resistencia de las barras sometidas a axil es igual, indistintamente si se tratan de tracción o de compresión.

Se obtienen resistencias superiores cuando se disponen estas barras perpendicularmente a la fibra que en dirección paralela generalmente.

La resistencia de la unión depende también de la densidad de la madera.

### *Barras sometidas a cargas de corte*

La capacidad de carga de un perno sometido a carga de corte depende principalmente de la resistencia a aplastamiento. Una barra encolada se comporta frente a cargas de corte como un perno encolado, con la ventaja de que el ajuste no tiene holgura, lo que implica un incremento de la capacidad resistente.

El factor que define el incremento de resistencia varía en función del diámetro del perno (12 a 25mm) y de la dirección de la fibra, alcanzando valores comprendidos entre 1,25 y 1,96. Y el factor del incremento de la rigidez es mucho mayor, desde 4,98 a 11,9.

## Capacidad de carga

No hay en la actualidad una norma internacional para el cálculo de estas uniones. Sin embargo, se ha preparado mediante investigación unas reglas de cálculo para barras encoladas comunes.

### *Capacidad de carga axial*

Según la propuesta de Riberholt, las expresiones que definen la capacidad de carga axial para esfuerzos de tracción y compresión dependen de la longitud efectiva de estas barras.

$$F_{ax,Rk} = f_{ws} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{l_g} \quad \text{para } l_g \geq 200\text{mm}$$

$$F_{ax,Rk} = f_{ws} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g \quad \text{para } l_g < 200\text{mm}$$

Siendo:

- $F_{ax,Rk}$  la capacidad de carga característica axial en newtons.
- $f_{ws}$  parámetro de resistencia en N/mm<sup>1,5</sup> que, en adhesivos frágiles como resinas epoxi su valor es de 0.52 y en adhesivos no frágiles como los de poliuretano tiene el valor de 0.65.
- $\rho_k$  corresponde a la densidad característica de la madera.
- $d$  el valor mayor de dos parámetros: el diámetro del agujero o el diámetro de la barra.
- $l_g$  la longitud encolada en mm

Estas expresiones tendrán validez siempre y cuando se respeten las distancias mínimas:

<b>Distancias mínimas</b>		
<b>A1</b>	2d	Separación entre barras
<b>A2</b>	1,5d	Recubrimiento en disposición paralela a las fibras
<b>A4</b>	2d	Recubrimiento en la dimensión del canto para la disposición perpendicular
<b>A5</b>	2,5d	Recubrimiento en la dimensión del ancho para la disposición perpendicular

*Tabla 66 Distancias y separaciones mínimas en barras sometidas a carga axial por Riberholt*

Además, se deberá tener en cuenta las siguientes limitaciones:

- En las barras paralelas a la dirección de la fibra la fuerza total resistida por un grupo de barras deberá ser menor que la resistencia a tracción del área eficaz que queda detrás de las barras.
- La tensión axial en una barra comprimida no será superada por los 400Mpa para evitar el posible fallo por pandeo.
- La distribución de la fuerza en un grupo de barras resulta estáticamente indeterminada y tenemos como longitud mínima para las barras un valor igual al cuadrado de su diámetro.
- Se deberá comprobar la capacidad resistente de la barra de acero.

### *Capacidad de carga lateral*

La capacidad de carga de las barras encoladas en dirección perpendicular a la fibra puede calcularse como si se tratara de pernos sometidos a una carga lateral. El efecto del encolado permite incrementar la resistencia al aplastamiento de la madera.

Por la norma DIN 1052, se especifica un valor mínimo de la longitud eficaz de anclaje, el valor mayor de dos números:  $0.5 \cdot d^2$  o  $10 \cdot d$ .

Según la propuesta de Riberholt, el valor característico de la capacidad de carga de una barra sometida a una fuerza que actúa a una distancia “e” de la superficie de la madera es:

$$F_{v,Rk} = \left( \sqrt{e^2 + \frac{2M_{y,Rk}}{d \cdot f_{h,k}}} - e \right) \cdot d \cdot f_{h,k}$$

Siendo:

- $M_{y,Rk}$  el valor característico del momento plástico de la barra de acero en N\*mm
- $d'$  el valor mayor en mm de, o bien el diámetro del agujero, o el diámetro de la barra
- $f_{h,k}$  el parámetro de resistencia al aplastamiento, que sigue la expresión:

$$f_{h,k} = (0.0023 + 0.75 \cdot d^{-1.5}) \cdot \rho_k$$

Estas expresiones tendrán validez siempre y cuando se respeten las distancias mínimas:

<b>Distancias mínimas</b>		
<b>A1</b>	2d	Separación entre barras
<b>A2</b>	2d	Recubrimiento para barra no solicitada a cortante
<b>A3</b>	4d	Recubrimiento para barra solicitada a cortante

*Tabla 67 Distancias mínimas en barras encoladas en dirección paralela a la fibra con carga lateral*

## Combinación de carga axial y lateral

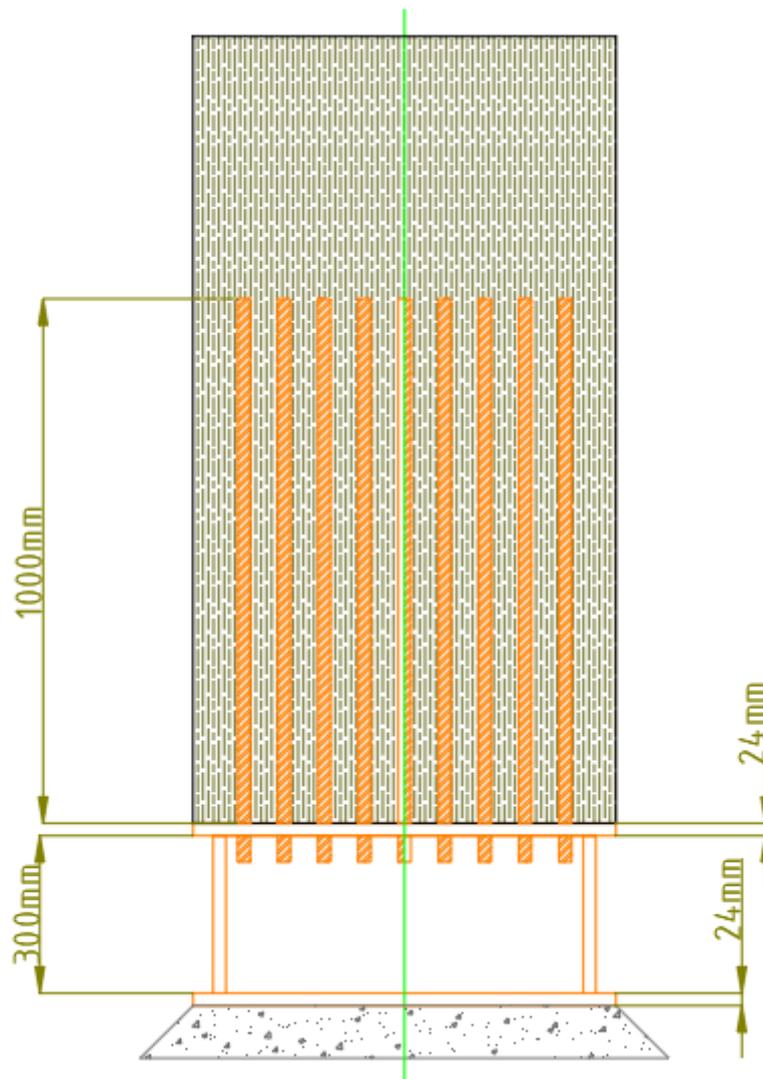
Para la comprobación de una situación donde exista simultáneamente esfuerzos axiales y de cortante, se podrá hacer una comprobación de estas sollicitaciones combinadas.

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

## Unión pilar – cimentación

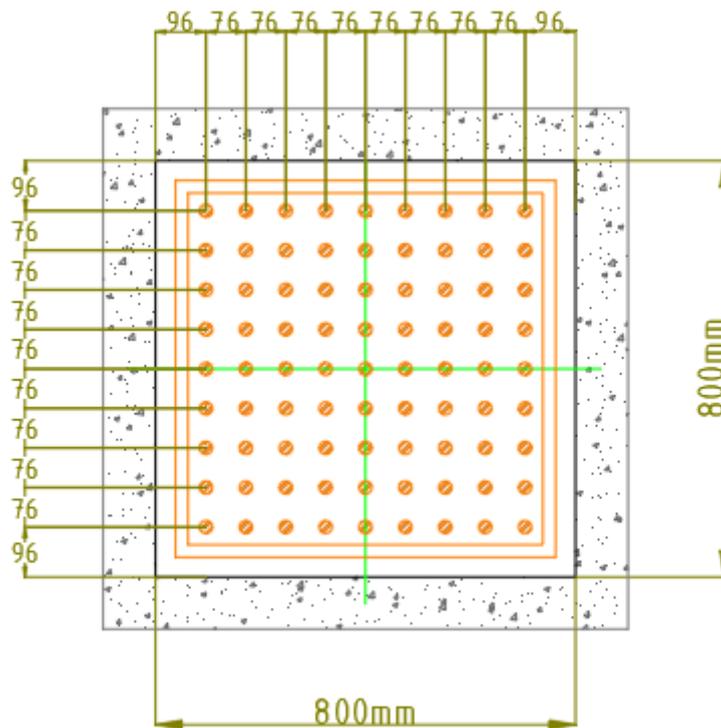
Esta unión se ha resuelto mediante barras encoladas en predisposición paralela a las fibras.

En la siguiente tabla podemos ver los datos de entrada resaltados en gris. Tenemos una longitud de barras efectiva de 1 metro. Se ha propuesto un diámetro de 24mm para las barras y los agujeros. La calidad del adhesivo se ha supuesto frágil ya que corresponde a las resinas epoxi o fenol-resorcinol.



*Ilustración 60 Alzado de la unión pilar-cimentación*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 61 Planta de la unión pilar-cimentación*

La combinación más desfavorable corresponde a un ELU con carga de viento por lo que es considerado una combinación a plazo instantáneo y  $k_{mod}$  de 0,9. El valor de  $P_d$  corresponde al axil distribuido en la barra más solicitada. La resultante de  $P_d$  es debido al esfuerzo simultáneo del axil y los momentos flectores. Esta flexión es un esfuerzo que perjudica de manera más severa a las barras perimetrales.

<b>UNIÓN CON BARRAS ENCOLADAS</b>			
<b>PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA</b>			
lg =	1000	mm	Longitud encolada
d =	24	mm	Diámetro de barra
d0 =	24	mm	Diámetro de agujero
ro,k =	450	kg/m <sup>3</sup>	Densidad característica de la madera
<b>CAPACIDAD DE CARGA AXIAL</b>			
Adhesivo	Frágil	Frágil	Dúctil
fws =	0,52 N/mm <sup>1,5</sup>		
fwl =	0,037 N/mm		
Fax,Rk (1) =	177593,5 N	Para lg >= 200mm	1
Fax,Rk (2) =	399600 N	Para lg < 200mm	0
Fax,Rk =	177,5935 kN	Capacidad de carga axial para tracción	
<b>Fax,Rd =</b>	<b>122,95 kN</b>	y compresión	Kmod = 0,9
<b>Pd =</b>	<b>111,31 kN</b>	<b>Aprov =</b>	<b>91%</b> <b>CARGA AXIAL</b>
Distancias mínimas (mm)			
min,a1 =	48	Ancho =	800 mm
min,a2 =	36	rm,a2 =	96 mm
min,a4 =	48	Filas de barras =	9 ud
min,a5 =	60	a1 =	76 mm
min,a3 =	96		

La siguiente tabla muestra el proceso de cálculo que nos ha permitido estimar el axil de la barra más solicitada. Se ha sistematizado un método de cálculo para obtener las tensiones en cada barra debida a la flexión. Las barras más solicitadas son las más alejadas del centro de referencia de esfuerzos (A1). Su carga deberá ser distribuida en toda la columna, ya que se presupone una hilera de barras (en este caso 9).

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A CARGA AXIL**

nº total de barras =	81	ud
Carga Axil de diseño =	3884,3	kN
<b>Pi,n (debido al axil) =</b>	<b>47,95432 kN</b>	

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A MOMENTO FLECTOR**

Carga Momento flector =		650	kN*m			
1	d1 =	0,608	608		A1 =	0,004072 m2
2	d2 =	0,456	456		A2 =	0,004072 m2
3	d3 =	0,304	304		A3 =	0,004072 m2
4	d4 =	0,152	152		A4 =	0,004072 m2
5	d5 =	0	0		A5 =	0 m2
6	d6 =	0	-152		A6 =	0 m2
7	d7 =	0	-304		A7 =	0 m2
8	d8 =	0	-456		A8 =	0 m2
9	d9 =	0	-608		A9 =	0 m2
10	d10 =	0	-760		A10 =	0 m2
		m			X =	0,002475

**AXIL SOBRE ALINEACIÓN (TRACCIÓN/COMPRESIÓN)**

x1	0,002475	P1 =	570,1754	Pi,1 =	63,35283 KN
x2	0,001392	P2 =	427,6316	Pi,2 =	47,51462 KN
x3	0,000619	P3 =	285,0877	Pi,3 =	31,67641 KN
x4	0,000155	P4 =	142,5439	Pi,4 =	15,83821 KN
x5	0	P5 =	0	Pi,5 =	0 KN
x6	0	P6 =	0	Pi,6 =	0 KN
x7	0	P7 =	0	Pi,7 =	0 KN
x8	0	P8 =	0	Pi,8 =	0 KN
x9	0	P9 =	0	Pi,9 =	0 KN
x10	0	P10 =	0	Pi,10 =	0 KN
Xtotal =		0,004642			
<b>Pi,n (debido a flexión) =</b>		<b>63,35283 kN</b>			

PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA			
CAPACIDAD DE CARGA LATERAL (PARA BARRAS PARALELAS A LA FIBRA)			
Momento plástico de la barra	$M_{y,Rk} =$	930594,5	N*mm
Resistencia al aplastamiento	$f_{h,k} =$	3,905496	N/mm <sup>2</sup>
CONDICIONES		Valor de e (mm) =	30
Distancia mínima $a_3 \geq a_1$ :	CUMPLE		
$l_g \geq 10d$ :	CUMPLE		
CORTANTE =	79,16 KN	Repartido en :	81 barras
$F_{v,Rk} =$	10692,11 N	<b>Aprov de la capacidad del cortante</b>	
$F_{v,Rd} =$	<b>7402,231 N</b>	<b>13%</b>	$V_d =$ 977,2601 N

CONDICIONES ADICIONALES			
RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL GRUPO DE BARRAS DEBE SER MENOR A LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL ÁREA EFICAZ QUE QUEDA ATRÁS DE LAS BARRAS UNIÓN METÁLICA			
TENSIÓN AXIAL EN CADA BARRA COMPRIMIDA DEBE SER INFERIOR A 400N/mm <sup>2</sup>			
CUMPLE	246,0428	N/mm <sup>2</sup>	Tensión en barra
LONGITUD DEL ENCOLADO DEBE SER COMO MÍNIMO IGUAL A $d^2$ SI LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FUERZAS EN UN GRUPO DE BARRAS RESULTA ESTÁTICAMENTE INDETERMINADA			
CUMPLE	$l_g$ (mm) =	1000	576 mm
LA CAPACIDAD RESISTENTE DE LAS BARRAS DE ACERO DE LA PROPUESTA DIN1052 DEBE			
CUMPLE	COMPROBARSE:		
PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008			
Fax,Rd = mínimo valor de: agotamiento acero o anclaje			
Agotamiento del acero =	$f_{yd} * A_{ef}$	222,7148 KN	
Agotamiento del anclaje =	$P_i() * d * l_g * f_{kl,d}$	150,7964 KN	
Acero 8.8; $f_{y,k} = 640$ N/mm <sup>2</sup> ; $f_{u,k} = 800$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{y,k} =$	640	$f_{u,k} =$ 800
Para $l_g \leq 250$ mm; $f_{kl,k} = 4$ N/mm <sup>2</sup>	4	0	
Para $250 < l_g \leq 500$ mm; $f_{kl,k} = 5,25 - 0,005 * l_g$	0,25	0	
Para $500 < l_g \leq 1000$ mm; $f_{kl,k} = 3,5 - 0,0015 * l_g$	2	1	

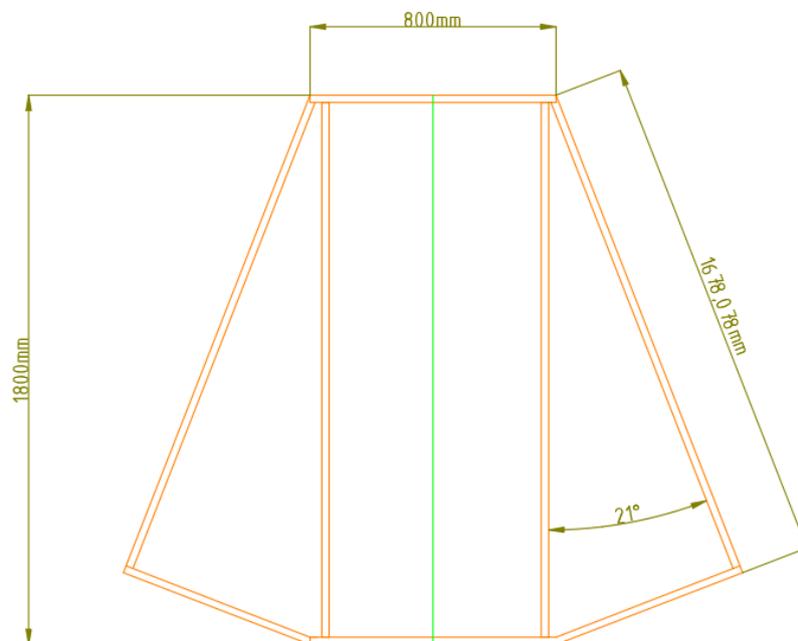
PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008			
COMPROBACIÓN CONJUNTA DE BARRAS ENCOLADAS SOMETIDAS A AXIL Y CORTE			
Se procede a elevar al cuadrado los aprovechamientos de cada comprobación.			
El criterio se cumple si la suma es inferior a 1	$(F_{ax,Ed}/F_{ax,Rd})^2 =$	82%	
	$(F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2 =$	2%	
CUMPLE	COMPROBACIÓN =	84%	

## Nudo metálico

Para poder ejecutar las uniones principales entre la cubierta y los pilares se ha necesitado acudir a un nudo metálico compuesto de perfiles dobles y chapas de 24mm de espesor. La geometría que presenta permite que en cada una de sus 4 caras se puedan ejecutar barras encoladas en la chapa metálica logrando así obtener una unión rígida entre vigas principales y el pilar, evitando el riesgo de esfuerzos perpendiculares a la fibra en la madera.

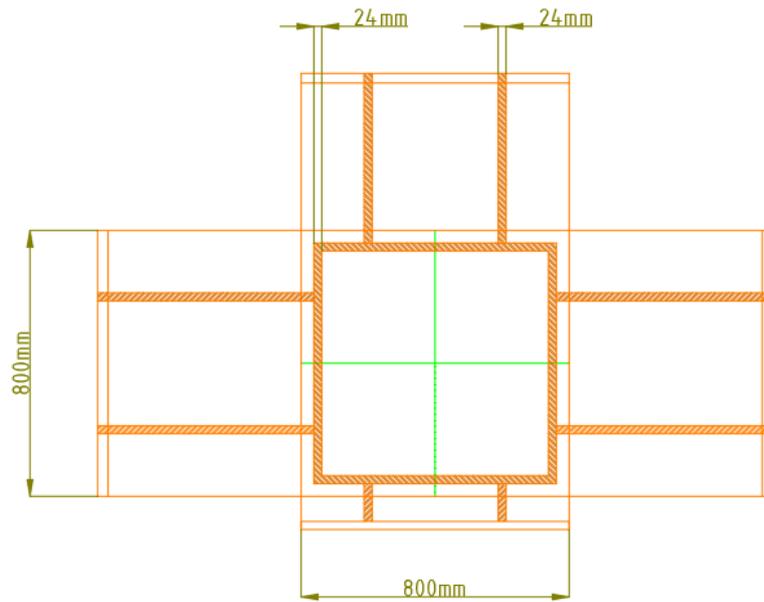
Debido a la configuración de las pérgolas, el número de pilares y la longitud de las vigas principales, se deberán realizar dos tipos de nudos metálicos.

### Nudo metálico de la pérgola A



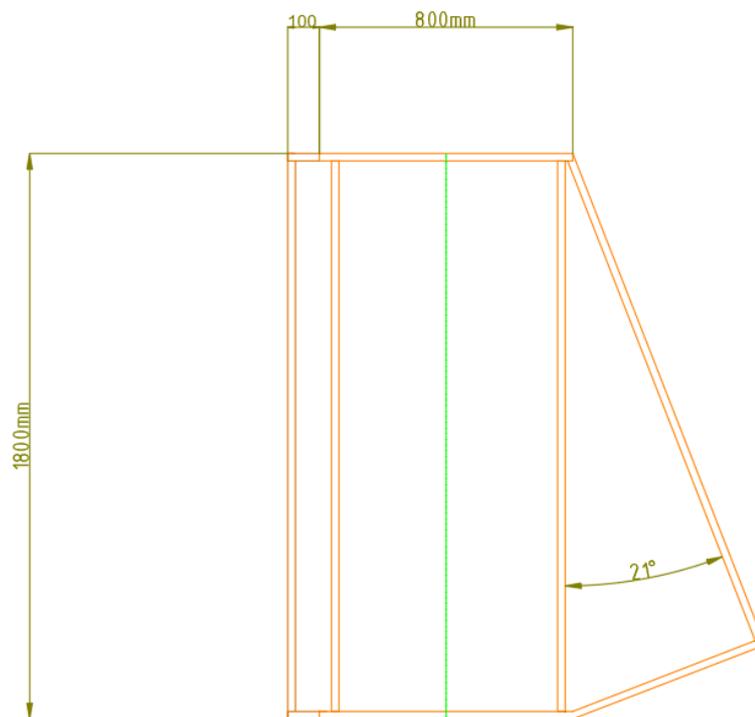
*Ilustración 62 Alzado nudo metálico A*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



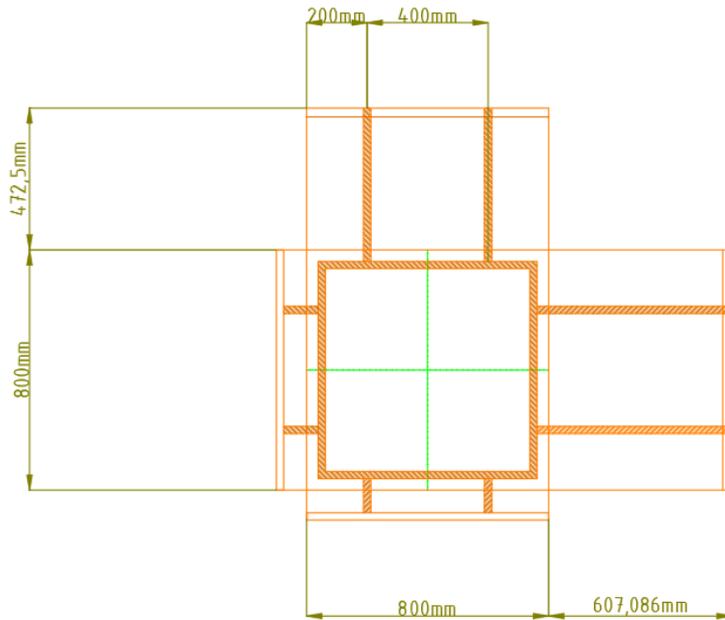
*Ilustración 63 Planta del nudo metálico A*

### Nudo metálico de la pérgola B



*Ilustración 64 Alzado nudo metálico B*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

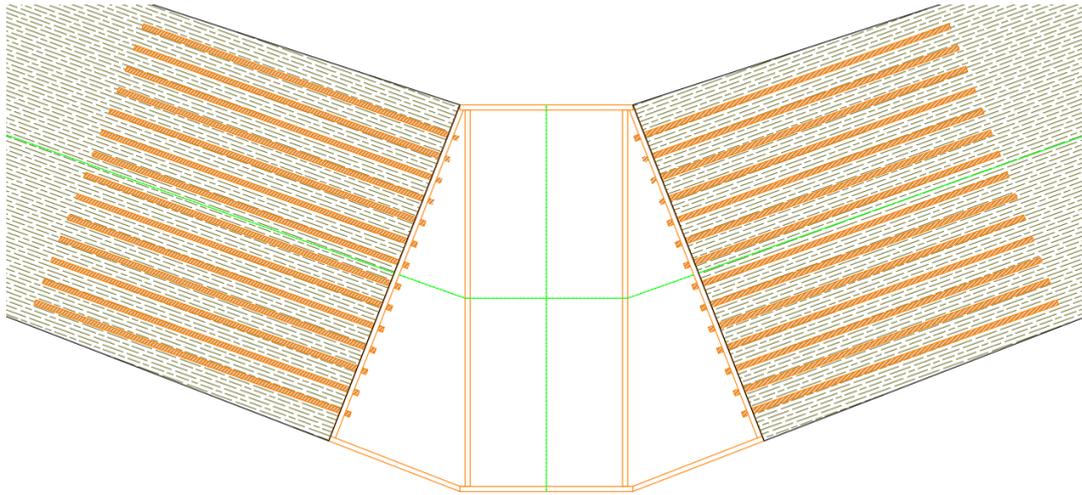


*Ilustración 65 Planta nudo metálico B*

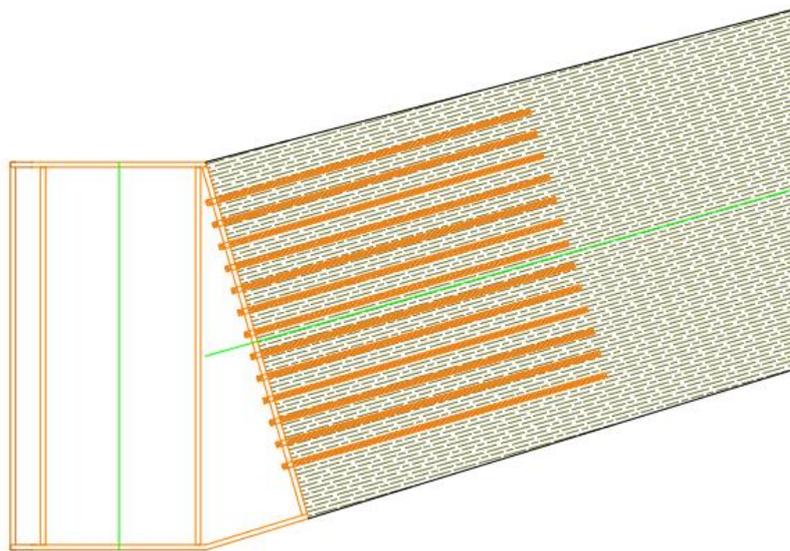
En estas imágenes se tiene un nudo con dos caras inclinadas. Una de 21 grados para la viga principal corta (la que cubre 16,75 metros en proyección horizontal) y otra de 16 grados (la viga que cubre 21 metros en proyección horizontal). Las otras dos caras restantes corresponden a vigas interiores horizontales, por lo que se prolonga el perfil metálico 10cm.

## Unión pilar – viga principal

Esta unión se ha resuelto mediante barras encoladas paralelas a las fibras. Para poder ejecutar esta unión se ha necesitado la ejecución de un nudo metálico. Este nudo metálico está compuesto por perfiles en I dobles y chapas de 24mm de espesor que crean una cara en la cual se arriostran los extremos de las barras encoladas. Se adjunta varias imágenes.



*Ilustración 66 Detalle de unión: vigas principales y nudo metálico (Alzado de pérgola A)*



*Ilustración 67 Detalle de unión: viga principal y nudo metálico (Alzado de pérgola B)*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

En la siguiente tabla podemos ver los datos de entrada resaltados en gris. Tenemos una longitud de barras efectiva de 1 metro y medio. Se ha propuesto un diámetro de 24mm para las barras y los agujeros. La calidad del adhesivo se ha supuesto frágil ya que corresponde a las resinas epoxi o fenol-resorcinol.

La combinación más desfavorable corresponde a un ELU con sobrecarga de uso por lo que es considerado una combinación a corto plazo y  $k_{mod}$  de 0,7. El valor de  $P_d$  corresponde al axil distribuido en la barra más solicitada. La resultante de  $P_d$  es debido al esfuerzo simultáneo del axil y los momentos flectores. Esta flexión es un esfuerzo que perjudica de manera más severa a las barras perimetrales.

<b>UNIÓN CON BARRAS ENCOLADAS</b>			
<b>PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA</b>			
$l_g =$	1500	mm	Longitud encolada
$d =$	24	mm	Diámetro de barra
$d_0 =$	24	mm	Diámetro de agujero
$\rho_{0,k} =$	450	kg/m <sup>3</sup>	Densidad característica de la madera
<b>CAPACIDAD DE CARGA AXIAL</b>			
Adhesivo	Frágil	Frágil	Dúctil
$f_{ws} =$	0,52 N/mm <sup>1,5</sup>		
$f_{wl} =$	0,037 N/mm		
$F_{ax,Rk} (1) =$	217506,7 N	Para $l_g \geq 200\text{mm}$	1
$F_{ax,Rk} (2) =$	599400 N	Para $l_g < 200\text{mm}$	0
$F_{ax,Rk} =$	217,5067 kN	Capacidad de carga axial para tracción y compresión	
<b><math>F_{ax,Rd} =</math></b>	<b>117,12 kN</b>	$k_{mod} =$	0,7
<b><math>P_d =</math></b>	<b>85,05 kN</b>	<b>Aprov =</b>	<b>73%</b>
		<b>CARGA AXIAL</b>	
Distancias mínimas (mm)			
$min,a1 =$	48	Ancho =	1678 mm
$min,a2 =$	36	$r_{m,a2} =$	150 mm
$min,a4 =$	48	Filas de barras =	14 ud
$min,a5 =$	60	$a1 =$	106 mm
$min,a3 =$	96		

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A CARGA AXIL**

nº total de barras =	140	ud
Carga Axil de diseño =	1028	kN

**P<sub>i,n</sub> (debido al axil) = 7,342857 kN**

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A MOMENTO FLECTOR**

Carga Momento flector =		3356,13	kN*m
1	d1 =	1,378	1378
2	d2 =	1,166	1166
3	d3 =	0,954	954
4	d4 =	0,742	742
5	d5 =	0,53	530
6	d6 =	0,318	318
7	d7 =	0,106	106
8	d8 =	0	-106
9	d9 =	0	-318
10	d10 =	0	-530
		m	
A1 =	0,006333		m <sup>2</sup>
A2 =	0,006333		m <sup>2</sup>
A3 =	0,006333		m <sup>2</sup>
A4 =	0,006333		m <sup>2</sup>
A5 =	0,006333		m <sup>2</sup>
A6 =	0,006333		m <sup>2</sup>
A7 =	0,006333		m <sup>2</sup>
A8 =	0		m <sup>2</sup>
A9 =	0		m <sup>2</sup>
A10 =	0		m <sup>2</sup>
X =	0,008727		

**AXIL SOBRE ALINEACIÓN (TRACCIÓN/COMPRESIÓN)**

x1	0,008727	P1 =	904,6173	P <sub>i,1</sub> =	64,61552 KN
x2	0,006249	P2 =	765,4454	P <sub>i,2</sub> =	54,67467 KN
x3	0,004183	P3 =	626,2735	P <sub>i,3</sub> =	44,73382 KN
x4	0,00253	P4 =	487,1016	P <sub>i,4</sub> =	34,79297 KN
x5	0,001291	P5 =	347,9297	P <sub>i,5</sub> =	24,85212 KN
x6	0,000465	P6 =	208,7578	P <sub>i,6</sub> =	14,91127 KN
x7	5,16E-05	P7 =	69,58594	P <sub>i,7</sub> =	4,970424 KN
x8	0	P8 =	0	P <sub>i,8</sub> =	0 KN
x9	0	P9 =	0	P <sub>i,9</sub> =	0 KN
x10	0	P10 =	0	P <sub>i,10</sub> =	0 KN
Xtotal =	0,023497				

**P<sub>i,n</sub> (debido a flexión) = 77,70925 kN**

**INCREMENTO POR MOMENTO FLECTOR CONCOMITANTE**

Distancias mínimas (mm)		
$min,a1 = 48$	Ancho =	600 mm
$min,a2 = 36$	$rm,a2 =$	39 mm
$min,a4 = 48$	Filas de barras =	10 ud
$min,a5 = 60$	$a1 =$	58 mm
$min,a3 = 96$		

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A CARGA AXIL**

nº total de barras =	140	ud
Carga Axil de diseño =	1028	kN
<b>Pi,n (debido al axil) =</b>	<b>7,342857</b>	<b>kN</b>

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A MOMENTO FLECTOR**

Carga Momento flector =		139,23	kN*m		
1	d1 =	0,522	522	A1 =	0,004524 m <sup>2</sup>
2	d2 =	0,406	406	A2 =	0,004524 m <sup>2</sup>
3	d3 =	0,29	290	A3 =	0,004524 m <sup>2</sup>
4	d4 =	0,174	174	A4 =	0,004524 m <sup>2</sup>
5	d5 =	0,058	58	A5 =	0,004524 m <sup>2</sup>
6	d6 =	0	-58	A6 =	0 m <sup>2</sup>
7	d7 =	0	-174	A7 =	0 m <sup>2</sup>
8	d8 =	0	-290	A8 =	0 m <sup>2</sup>
9	d9 =	0	-406	A9 =	0 m <sup>2</sup>
10	d10 =	0	-522	A10 =	0 m <sup>2</sup>
		m		X =	0,002361

**AXIL SOBRE ALINEACIÓN (TRACCIÓN/COMPRESIÓN)**

x1	0,002361472	P1 =	130,9373	Pi,1 =	13,09373 KN
x2	0,001428545	P2 =	101,8401	Pi,2 =	10,18401 KN
x3	0,000728849	P3 =	72,74295	Pi,3 =	7,274295 KN
x4	0,000262386	P4 =	43,64577	Pi,4 =	4,364577 KN
x5	2,9154E-05	P5 =	14,54859	Pi,5 =	1,454859 KN
x6	0	P6 =	0	Pi,6 =	0 KN
x7	0	P7 =	0	Pi,7 =	0 KN
x8	0	P8 =	0	Pi,8 =	0 KN
x9	0	P9 =	0	Pi,9 =	0 KN
x10	0	P10 =	0	Pi,10 =	0 KN
Xtotal =	0,004810407				
<b>Pi,n (debido a flexión) =</b>	<b>13,09373</b>	<b>kN</b>			

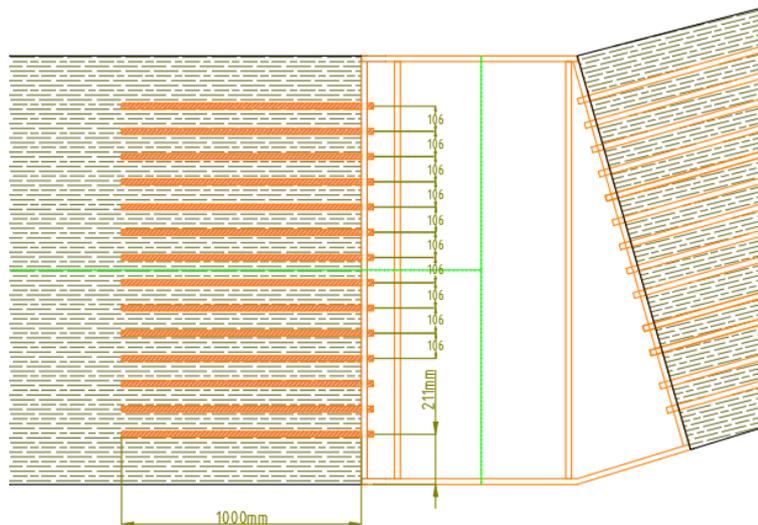
PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA			
CAPACIDAD DE CARGA LATERAL (PARA BARRAS PARALELAS A LA FIBRA)			
Momento plástico de la barra	$M_{y,Rk} =$	930594,5	N*mm
Resistencia al aplastamiento	$f_{h,k} =$	3,905496	N/mm <sup>2</sup>
CONDICIONES		Valor de e (mm) =	30
Distancia mínima $a_3 \geq a_1$ :	CUMPLE		
$l_g \geq 10d$ :	CUMPLE		
CORTANTE = 539936,80 N	Repartido en :	140	barras
$F_{v,Rk} =$	10692,11 N	<b>Aprov de la capacidad del cortante</b>	
$F_{v,Rd} =$	<b>5757,291 N</b>	67%	$V_d =$ 3856,691 N

CONDICIONES ADICIONALES			
RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL GRUPO DE BARRAS DEBE SER MENOR A LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL ÁREA EFICAZ QUE QUEDA ATRÁS DE LAS BARRAS UNIÓN METÁLICA			
TENSIÓN AXIAL EN CADA BARRA COMPRIMIDA DEBE SER INFERIOR A 400N/mm <sup>2</sup>			
CUMPLE	188,0064	N/mm <sup>2</sup>	Tensión en barra
LONGITUD DEL ENCOLADO DEBE SER COMO MÍNIMO IGUAL A $d^2$ SI LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FUERZAS EN UN GRUPO DE BARRAS RESULTA ESTÁTICAMENTE INDETERMINADA			
CUMPLE	$l_g$ (mm) =	1500	576 mm
LA CAPACIDAD RESISTENTE DE LAS BARRAS DE ACERO DE LA PROPUESTA DIN1052 DEBE			
CUMPLE	COMPROBARSE:		
PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008			
Fax,Rd = mínimo valor de: agotamiento acero o anclaje			
Agotamiento del acero =	$f_{yd} * A_{ef}$	222,7148 KN	
Agotamiento del anclaje =	$P_i() * d * l_g * f_{kl,d}$	141,3717 KN	
Acero 8.8; $f_{y,k} = 640$ N/mm <sup>2</sup> ; $f_{u,k} = 800$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{y,k} =$	640	$f_{u,k} =$ 800
Para $l_g \leq 250$ mm; $f_{kl,k} = 4$ N/mm <sup>2</sup>	4	0	
Para $250 < l_g \leq 500$ mm; $f_{kl,k} = 5,25 - 0,005 * l_g$	-2,25	0	
Para $500 < l_g \leq 1000$ mm; $f_{kl,k} = 3,5 - 0,0015 * l_g$	1,25	1	

PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008			
COMPROBACIÓN CONJUNTA DE BARRAS ENCOLADAS SOMETIDAS A AXIL Y CORTE			
Se procede a elevar al cuadrado los aprovechamientos de cada comprobación.			
El criterio se cumple si la suma es inferior a 1	$(F_{ax,Ed}/F_{ax,Rd})^2 =$	53%	
	$(F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2 =$	45%	
CUMPLE	COMPROBACIÓN =	98%	

## Unión pilar – viga interior

Esta unión se ha resuelto mediante barras encoladas de modo afín a las vigas principales, aunque podría diseñarse como una unión articulada. Sigue un procedimiento de cálculo muy similar.



*Ilustración 68 Detalle de unión: viga interior y nudo metálico (Alzado)*

Tenemos una longitud de barras efectiva de 100 cm. Se ha propuesto un diámetro de 24mm para las barras y los agujeros. La calidad del adhesivo se considera frágil ya que corresponde a las resinas epoxi o fenol-resorcinol.

La combinación más desfavorable corresponde a un ELU de viento por lo que la combinación instantánea y  $k_{mod}$  es de 0,9. El valor de  $P_d$  es el axil distribuido en la barra más solicitada. La resultante de  $P_d$  es debido al esfuerzo simultáneo del axil y los momentos flectores. Esta flexión es un esfuerzo que perjudica de manera más severa a las barras perimetrales, y ya que existen dos momentos flectores, se ha considerado también la participación de ambos simultáneamente. La distribución de barras no es homogénea. Una de las caras tiene 14 filas de barras (el canto) y el ancho 7 filas de barras.

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



*Ilustración 69 Detalle de unión: viga interior y nudo metálico (Sección)*

<b>UNIÓN CON BARRAS ENCOLADAS</b>			
<b>PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA</b>			
$l_g =$	1000	mm	Longitud encolada
$d =$	24	mm	Diámetro de barra
$d_0 =$	24	mm	Diámetro de agujero
$\rho_{0,k} =$	450	kg/m <sup>3</sup>	Densidad característica de la madera
CAPACIDAD DE CARGA AXIAL			
Adhesivo	Frágil	Frágil	Dúctil
$f_{ws} =$	0,52 N/mm <sup>1,5</sup>		
$f_{wl} =$	0,037 N/mm		
$F_{ax,Rk} (1) =$	177593,5 N	Para $l_g \geq 200\text{mm}$	1
$F_{ax,Rk} (2) =$	399600 N	Para $l_g < 200\text{mm}$	0
$F_{ax,Rk} =$	177,5935 kN	Capacidad de carga axial para tracción y compresión	
<b><math>F_{ax,Rd} =</math></b>	<b>122,95 kN</b>	$K_{mod} =$	0,9
<b><math>P_d =</math></b>	<b>85,17 kN</b>	<b>Aprov =</b>	<b>69% CARGA AXIAL</b>
Distancias mínimas (mm)			
$min,a1 =$	48	Ancho =	1800 mm
$min,a2 =$	36	$r_{m,a2} =$	211 mm
$min,a4 =$	48	Filas de barras =	14 ud
$min,a5 =$	60	$a1 =$	106 mm
$min,a3 =$	96		

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A CARGA AXIL**

nº total de barras =	98	ud
Carga Axil de diseño =	825	kN
<b>P<sub>i,n</sub> (debido al axil) =</b>	<b>8,418367 kN</b>	

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A MOMENTO FLECTOR**

Carga Momento flector = 3179,81 kN*m				
1	d1 =	1,378	1378	A1 = 0,006333 m2
2	d2 =	1,166	1166	A2 = 0,006333 m2
3	d3 =	0,954	954	A3 = 0,006333 m2
4	d4 =	0,742	742	A4 = 0,006333 m2
5	d5 =	0,53	530	A5 = 0,006333 m2
6	d6 =	0,318	318	A6 = 0,006333 m2
7	d7 =	0,106	106	A7 = 0,006333 m2
8	d8 =	0	-106	A8 = 0 m2
9	d9 =	0	-318	A9 = 0 m2
10	d10 =	0	-530	A10 = 0 m2
			m	X = 0,008727

**AXIL SOBRE ALINEACIÓN (TRACCIÓN/COMPRESIÓN)**

x1	0,008727	P1 =	857,0916	P <sub>i,1</sub> =	61,22083 KN
x2	0,006249	P2 =	725,2314	P <sub>i,2</sub> =	51,80224 KN
x3	0,004183	P3 =	593,3711	P <sub>i,3</sub> =	42,38365 KN
x4	0,00253	P4 =	461,5109	P <sub>i,4</sub> =	32,96506 KN
x5	0,001291	P5 =	329,6506	P <sub>i,5</sub> =	23,54647 KN
x6	0,000465	P6 =	197,7904	P <sub>i,6</sub> =	14,12788 KN
x7	5,16E-05	P7 =	65,93013	P <sub>i,7</sub> =	4,709295 KN
x8	0	P8 =	0	P <sub>i,8</sub> =	0 KN
x9	0	P9 =	0	P <sub>i,9</sub> =	0 KN
x10	0	P10 =	0	P <sub>i,10</sub> =	0 KN
Xtotal =	0,023497				
<b>P<sub>i,n</sub> (debido a flexión) = 76,75204 kN</b>					

**INCREMENTO POR MOMENTO FLECTOR CONCOMITANTE**

Distancias mínimas (mm)		
$min,a1 =$ 48	Ancho =	600 mm
$min,a2 =$ 36	$rm,a2 =$	96 mm
$min,a4 =$ 48	Filas de barras =	7 ud
$min,a5 =$ 60	$a1 =$	68 mm
$min,a3 =$ 96		

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A CARGA AXIL**

nº total de barras =	98	ud
Carga Axil de diseño =	825	kN
<b>Pi,n (debido al axil) =</b>	<b>8,418367 kN</b>	

**TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A MOMENTO FLECTOR**

Carga Momento flector =		69	kN*m		
1	d1 =	0,408	408	A1 =	0,003167 m <sup>2</sup>
2	d2 =	0,272	272	A2 =	0,003167 m <sup>2</sup>
3	d3 =	0,136	136	A3 =	0,003167 m <sup>2</sup>
4	d4 =	0	0	A4 =	0 m <sup>2</sup>
5	d5 =	0	-136	A5 =	0 m <sup>2</sup>
6	d6 =	0	-272	A6 =	0 m <sup>2</sup>
7	d7 =	0	-408	A7 =	0 m <sup>2</sup>
8	d8 =	0	-544	A8 =	0 m <sup>2</sup>
9	d9 =	0	-680	A9 =	0 m <sup>2</sup>
10	d10 =	0	-816	A10 =	0 m <sup>2</sup>
		m		X =	0,001292

**AXIL SOBRE ALINEACIÓN (TRACCIÓN/COMPRESIÓN)**

x1	0,001292024	P1 =	108,7185	Pi,1 =	15,53121 KN
x2	0,000574233	P2 =	72,47899	Pi,2 =	10,35414 KN
x3	0,000143558	P3 =	36,2395	Pi,3 =	5,177071 KN
x4	0	P4 =	0	Pi,4 =	0 KN
x5	0	P5 =	0	Pi,5 =	0 KN
x6	0	P6 =	0	Pi,6 =	0 KN
x7	0	P7 =	0	Pi,7 =	0 KN
x8	0	P8 =	0	Pi,8 =	0 KN
x9	0	P9 =	0	Pi,9 =	0 KN
x10	0	P10 =	0	Pi,10 =	0 KN
Xtotal =	0,002009815				
<b>Pi,n (debido a flexión) =</b>	<b>15,53121 kN</b>				

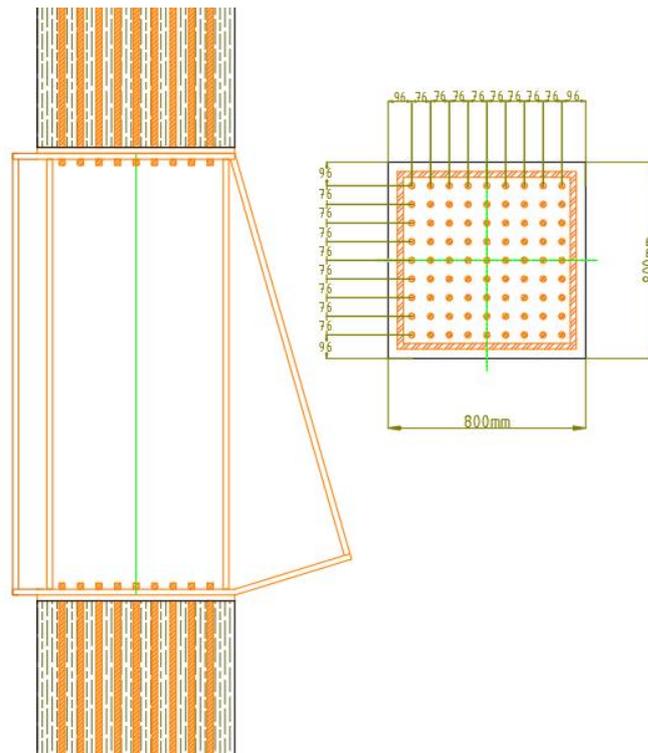
PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA			
CAPACIDAD DE CARGA LATERAL (PARA BARRAS PARALELAS A LA FIBRA)			
Momento plástico de la barra	$M_{y,Rk} =$	930594,5	N*mm
Resistencia al aplastamiento	$f_{h,k} =$	3,905496	N/mm <sup>2</sup>
CONDICIONES		Valor de e (mm) =	30
Distancia mínima $a_3 \geq a_1$ :	CUMPLE		
$l_g \geq 10d$ :	CUMPLE		
CORTANTE = 424609,23 N	Repartido en :	98	barras
$F_{v,Rk} =$	10692,11 N	<b>Aprov de la capacidad del cortante</b>	
$F_{v,Rd} =$	<b>7402,231 N</b>	59%	$V_d =$ <b>4332,747 N</b>

CONDICIONES ADICIONALES			
RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL GRUPO DE BARRAS DEBE SER MENOR A LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL ÁREA EFICAZ QUE QUEDA ATRÁS DE LAS BARRAS UNIÓN METÁLICA			
TENSIÓN AXIAL EN CADA BARRA COMPRIMIDA DEBE SER INFERIOR A 400N/mm <sup>2</sup>			
CUMPLE	188,2679 N/mm <sup>2</sup>	Tensión en barra	
LONGITUD DEL ENCOLADO DEBE SER COMO MÍNIMO IGUAL A $d^2$ SI LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FUERZAS EN UN GRUPO DE BARRAS RESULTA ESTÁTICAMENTE INDETERMINADA			
CUMPLE	$l_g$ (mm) =	1000	576 mm
LA CAPACIDAD RESISTENTE DE LAS BARRAS DE ACERO DE LA PROPUESTA DIN1052 DEBE			
CUMPLE	COMPROBARSE:		
PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008			
Fax,Rd = mínimo valor de: agotamiento acero o anclaje			
Agotamiento del acero =	$f_{yd} * A_{ef}$	222,7148 KN	
Agotamiento del anclaje =	$P_i() * d * l_g * f_{kl,d}$	150,7964 KN	
Acero 8.8; $f_{y,k} = 640$ N/mm <sup>2</sup> ; $f_{u,k} = 800$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{y,k} =$	640	$f_{u,k} =$ 800
Para $l_g \leq 250$ mm; $f_{kl,k} = 4$ N/mm <sup>2</sup>	4	0	
Para $250 < l_g \leq 500$ mm; $f_{kl,k} = 5,25 - 0,005 * l_g$	0,25	0	
Para $500 < l_g \leq 1000$ mm; $f_{kl,k} = 3,5 - 0,0015 * l_g$	2	1	

PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008			
COMPROBACIÓN CONJUNTA DE BARRAS ENCOLADAS SOMETIDAS A AXIL Y CORTE			
Se procede a elevar al cuadrado los aprovechamientos de cada comprobación.			
El criterio se cumple si la suma es inferior a 1	$(F_{ax,Ed}/F_{ax,Rd})^2 =$	48%	
	$(F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2 =$	34%	
CUMPLE	COMPROBACIÓN =	82%	

## Unión pilar – nudo metálico

Esta unión se ha resuelto mediante barras encoladas con una dirección paralela a las fibras. Para poder ejecutar esta unión se ha necesitado recurrir a un nudo metálico. Este nudo metálico está compuesto por perfiles en I dobles y chapas de 24mm de espesor que crean una cara en la cual se arriostran las barras encoladas.



*Ilustración 70 Alzado y planta de detalle unión entre nudo de acero y pilares*

Tenemos una longitud de barras efectiva de 1 metro. Se ha propuesto un diámetro de 24mm para las barras y los agujeros. La calidad del adhesivo se ha supuesto frágil ya que corresponde a las resinas epoxi o fenol-resorcinol.

La combinación más desfavorable corresponde a un ELU con viento por lo que es considerado una combinación de plazo instantáneo y  $k_{mod}$  de 0,9. El valor de  $P_d$  corresponde al axil distribuido en la barra más solicitada. La resultante de  $P_d$  es debido al esfuerzo simultáneo del axil y los momentos flectores. Esta flexión es un esfuerzo que perjudica de manera más severa a las barras perimetrales.

UNIÓN CON BARRAS ENCOLADAS			
PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA			
lg =	1000	mm	Longitud encolada
d =	24	mm	Diámetro de barra
d0 =	24	mm	Diámetro de agujero
ro,k =	450	kg/m <sup>3</sup>	Densidad característica de la madera
CAPACIDAD DE CARGA AXIAL			
Adhesivo	Frágil	Frágil	Dúctil
fws =	0,52 N/mm <sup>1,5</sup>		
fwl =	0,037 N/mm		
Fax,Rk (1) =	177593,5 N	Para lg >= 200mm	1
Fax,Rk (2) =	399600 N	Para lg < 200mm	0
Fax,Rk =	177,5935 kN	Capacidad de carga axial para tracción	
<b>Fax,Rd =</b>	<b>122,95 kN</b>	y compresión	Kmod = 0,9
<b>Pd =</b>	<b>95,64 kN</b>	<b>Aprov =</b>	<b>78% CARGA AXIAL</b>
Distancias mínimas (mm)			
min,a1 =	48	Ancho =	800 mm
min,a2 =	36	rm,a2 =	100 mm
min,a4 =	48	Filas de barras =	9 ud
min,a5 =	60	a1 =	75 mm
min, a3 =	96		

TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A CARGA AXIL					
nº total de barras =	81	ud			
Carga Axil de diseño =	1267	kN			
<b>Pi,n (debido al axil) = 15,64198 kN</b>					
TRACCIÓN/COMPRESIÓN DEBIDO A MOMENTO FLECTOR					
Carga Momento flector =		810	kN*m		
1	d1 =	0,6	600	A1 =	0,004072 m2
2	d2 =	0,45	450	A2 =	0,004072 m2
3	d3 =	0,3	300	A3 =	0,004072 m2
4	d4 =	0,15	150	A4 =	0,004072 m2
5	d5 =	0	0	A5 =	0 m2
6	d6 =	0	-150	A6 =	0 m2
7	d7 =	0	-300	A7 =	0 m2
8	d8 =	0	-450	A8 =	0 m2
9	d9 =	0	-600	A9 =	0 m2
10	d10 =	0	-750	A10 =	0 m2
		m			X = 0,002443
AXIL SOBRE ALINEACIÓN (TRACCIÓN/COMPRESIÓN)					
x1	0,002443	P1 =	720	Pi,1 =	80 KN
x2	0,001374	P2 =	540	Pi,2 =	60 KN
x3	0,000611	P3 =	360	Pi,3 =	40 KN
x4	0,000153	P4 =	180	Pi,4 =	20 KN
x5	0	P5 =	0	Pi,5 =	0 KN
x6	0	P6 =	0	Pi,6 =	0 KN
x7	0	P7 =	0	Pi,7 =	0 KN
x8	0	P8 =	0	Pi,8 =	0 KN
x9	0	P9 =	0	Pi,9 =	0 KN
x10	0	P10 =	0	Pi,10 =	0 KN
Xtotal =		0,00458			
<b>Pi,n (debido a flexión) = 80 kN</b>					

<b>PROPUESTA DE RIBERHOLT (1998) BARRA PARALELA A LA FIBRA</b>			
<b>CAPACIDAD DE CARGA LATERAL (PARA BARRAS PARALELAS A LA FIBRA)</b>			
Momento plástico de la barra	$M_{y,Rk} =$	930594,5	N*mm
Resistencia al aplastamiento	$f_{h,k} =$	3,905496	N/mm <sup>2</sup>
<b>CONDICIONES</b>		Valor de e (mm) =	30
Distancia mínima $a_3 \geq a_1$ :	CUMPLE		
$l_g \geq 10d$ :	CUMPLE		
CORTANTE =	127,78 KN	Repartido en :	81 barras
$F_{v,Rk} =$	10692,11 N	<b>Aprov de la capacidad del cortante</b>	
$F_{v,Rd} =$	<b>7402,231 N</b>	<b>21%</b>	$V_d =$ 1577,494 N

<b>CONDICIONES ADICIONALES</b>			
RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL GRUPO DE BARRAS DEBE SER MENOR A LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL ÁREA EFICAZ QUE QUEDA ATRÁS DE LAS BARRAS			
UNIÓN METÁLICA			
TENSIÓN AXIAL EN CADA BARRA COMPRIMIDA DEBE SER INFERIOR A 400N/mm <sup>2</sup>			
CUMPLE	211,4152	N/mm <sup>2</sup>	Tensión en barra
LONGITUD DEL ENCOLADO DEBE SER COMO MÍNIMO IGUAL A $d^2$ SI LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FUERZAS EN UN GRUPO DE BARRAS RESULTA ESTÁTICAMENTE INDETERMINADA			
CUMPLE	$l_g$ (mm) =	1000	576 mm
LA CAPACIDAD RESISTENTE DE LAS BARRAS DE ACERO DE LA PROPUESTA DIN1052 DEBE			
CUMPLE	COMPROBARSE:		
<b>PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008</b>			
Fax,Rd = mínimo valor de: agotamiento acero o anclaje			
Agotamiento del acero =	$f_{yd} * A_{ef}$	222,7148 KN	
Agotamiento del anclaje =	$P_i() * d * l_g * f_{kl,d}$	150,7964 KN	
Acero 8.8; $f_{y,k} = 640$ N/mm <sup>2</sup> ; $f_{u,k} = 800$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{y,k} =$	640	$f_{u,k} =$ 800
Para $l_g \leq 250$ mm; $f_{kl,k} = 4$ N/mm <sup>2</sup>	4	0	
Para $250 < l_g \leq 500$ mm; $f_{kl,k} = 5,25 - 0,005 * l_g$	0,25	0	
Para $500 < l_g \leq 1000$ mm; $f_{kl,k} = 3,5 - 0,0015 * l_g$	2	1	

<b>PROPUESTA DE LA NORMA DIN 1052:2008</b>			
<b>COMPROBACIÓN CONJUNTA DE BARRAS ENCOLADAS SOMETIDAS A AXIL Y CORTE</b>			
Se procede a elevar al cuadrado los aprovechamientos de cada comprobación.			
El criterio se cumple si la suma es inferior a 1	$(F_{ax,Ed}/F_{ax,Rd})^2 =$	61%	
	$(F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2 =$	5%	
CUMPLE	COMPROBACIÓN =	65%	

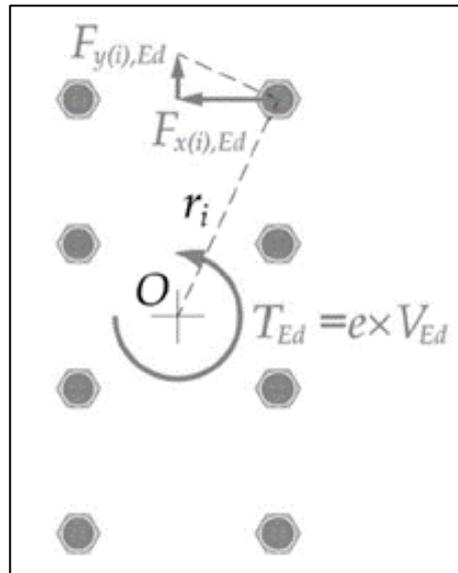
## Unión entre correas

Esta unión se ha resuelto mediante placas de acero internas y pernos. La situación más desfavorable corresponde al segundo caso (ELU.SCU.VY.A). Se disponen dos filas de pernos con 3 pernos cada una fijando la pieza de madera a una placa interna de acero de 10mm de espesor.

OutputCase	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem
Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	Text
1.ELU.SCU.V	-210,832	-7,824	4,291	3,5631	-5,9495	10,5579	727-1
<b>1.ELU.SCU.V</b>	<b>-7,035</b>	<b>56,893</b>	<b>36,232</b>	<b>-0,3833</b>	<b>-28,7395</b>	<b>-130,004</b>	<b>596-1</b>
1.ELU.SCU.V	-6,784	57,084	-37,946	0,4052	30,5559	-129,634	212-1

Fax,Ed =	6039 N	Fv,Ed =	18588	<b>APROVECHAMIENTO GLOBAL</b>
Fax,Rd =	53443 N	Fv,Rd =	22834 N	
kmod =	0,7	kmod =	0,7	
Aprovechamiento =	11%	Aprovechamiento =	81%	
Filas de pernos		2 ud		
Columnas de pernos		3 ud		
nº de pernos =		6 ud		

PARA AXIL		
V3 (N) =	36232	
PARA CORTANTE		
P (N) =	-7035	
V2 (N) =	56893	
M3 (N*m) =	-130004300	
lx* =	60000	mm <sup>2</sup>
ly* =	57600	mm <sup>2</sup>
Fx,M3,Ed=	110547,87	N
Fy,M3,Ed=	-132657,45	N
Yi =	100	mm
Xi =	120	mm
	Xi	Yi
PERNO 1	-120	100
PERNO 2	-120	-100
PERNO 3	120	100
PERNO 4	120	-100
PERNO 5	0	100
PERNO 6	0	-100
PERNO 7		
PERNO 8		
PERNO 9		
PERNO 10		



DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS		
a1	120	mm
a2	96	mm
a3,t	168	mm
a3,c	96	mm
a4,t	96	mm
a4,c	72	mm

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

**UNIÓN DE CLAVIJA: PERNOS**

**1. RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LA MADERA**

d =	24	mm	diámetro del perno	*No debe superar los 30mm para que la ecuación sea válida
d0 =	26	mm	diámetro de hueco	
Alfa 1 =	0	º		
Alfa 2 =	90	º		
Madera =	coníferas	Tipo:	coníferas frondosas	
ro,k =	450	kg/m3	densidad de madera	
fh,0,k =	28,044	N/mm2	0,082*(1-0,01*d)*ro,k	
k90 =	1,71			
fh,alfa1,k =	28,044	N/mm2	fh,alfa,k / [(k90*seno(alfa)^2+coseno(alfa)^2]	
fh,alfa2,k =	16,4	N/mm2	fh,alfa,k / [(k90*seno(alfa)^2+coseno(alfa)^2]	

**2. RESISTENCIA A FLEXIÓN DE LA CLAVIJA**

Acero =	8.8	4.6	4.8	5.6	8.8
fy,k (N/mm2)	640	240	320	300	640
fu,k (N/mm2)	800	400	400	500	800
<b>My,Rk =</b>	<b>930594,48 N/mm2</b>		0,3*fu,k*d^2,6		

**3. CAPACIDAD DE CARGA AXIAL**

\*Los pernos presentan capacidad de carga axial gracias al anclaje que aporta la arandela o la chapa metálica. El esfuerzo axial se traduce a una tensión de compresión bajo esta superf

CAPACIDAD DE ANCLAJE:			d	da	espesor
Tipo de anclaje =	arandela	arandela chapa met	12	58	6
	d (mm) = 24	24 24	16	68	6
	da,e (mm) = 105	105 96	20	80	8
	da,i (mm) = 26	26 26	22	92	8
		t (mm) = 10	24	105	8

**1. Capacidad de anclaje de la arandela:**

fc,90,k (N/mm2)	3,6	<b>3*fc,90,k *Area de contacto = 99.251,39 N</b>
Área de contacto (de la arandela/chapa metálica) =	9189,944 mm2	

**2. Capacidad de tracción del tornillo no pretensado:**

Ft,Rd (N) =	254.160,00	0,9*fub*As / Gama,m2
-------------	------------	----------------------

*Si los tornillos son de cabeza avellanada, la capacidad se reduce 30% (Ft,Rd*0,7)	d	As (mm2)
	12	84,3
	16	157
	20	245
	22	303
	24	353

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

3. CAPACIDAD DE CARGA LATERAL	
Efecto soga: Fax,k/4 =	24812,85 N
<b>Efecto soga neto:</b>	<b>6203,212 N</b>
Coeficiente limitador del efecto soga para pernos: (25%)	
<b>Fv,Rk =</b>	<b>42405,881 N</b>
alfa =	-50,19443 °
fh,alfa,k =	19,762985 N/mm2
fh,alfa,k / [(k90*seno(alfa)^2+coseno(alfa)^2]	
(1) fh,alfa,k * t1 * d =	65455,01 N
(2) fh,alfa,k*t1*d*[RAIZ(2+4*My,Rk/(fh,alfa,k*d*t^2))-1]+(Efecto Soga)	42405,88 N
(3) 2,3*RAIZ(My,Rk*fh,alfa,k*d)+(Efecto Soga) =	54524,66 N

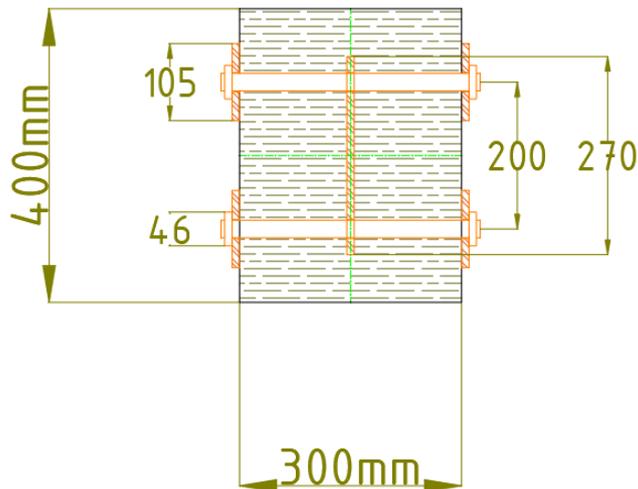
RESISTENCIA A PUNZONAMIENTO DE LA CHAPA ANTE LAS CARGAS AXILES DEL PERNO	
<b>Bp,Rd =</b>	<b>170098,393 N</b>
Ancho de correa =	300 mm
t =	10 mm
t1 =	145 mm
fu =	470 N/mm2
	4%

COMPROBACIÓN DEL FALLO EN BLOQUE	
<b>Fbs,Rk =</b>	<b>1040520 N</b>
	2%
1,5 * Anet,t * ft,0,k =	1040520
0,7 * Anet,v * fv,k =	151884,6
ft,0,k	26 Mpa
Anet,t =	26680 mm2
fv,g,k	4,3 Mpa
Anet,v =	50460 mm2
Lnet,t =	184 mm
Lnet,v =	348 mm
(1) Lnet,v * t:	50460 mm2
(2) Lnet,v/2 *(Lnet,v + 2*tef) =	86001,13 mm2
*¿Cuanto vale tef (espesor eficaz)?	
tef =	73,12969 mm

CAPACIDAD RESISTENTE DE LA CHAPA DE ACERO Y CORTADURA	
dagujero =	26 mm
Requisitos para dibujar la sección	
e1	31,2 mm
e2	31,2 mm
p1	57,2 mm
p2	62,4 mm
m	sin valor mm
	Obligatorio Mínimo
	Máximo

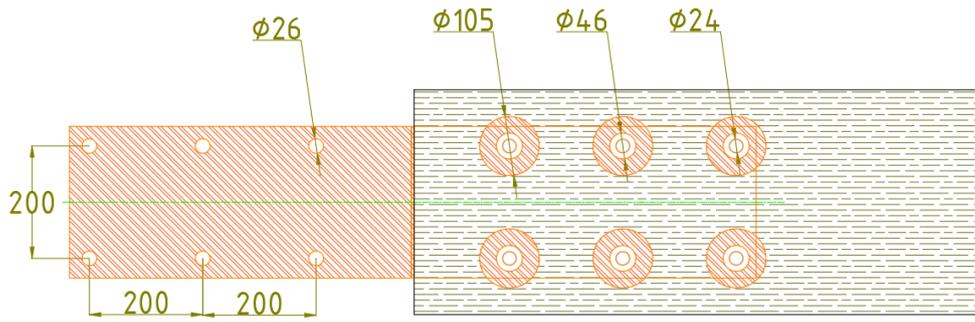
*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>*CAPACIDAD DE CORTADURA:</b>																							
$F_v, R_d =$	$\beta_{v,lf} \cdot n \cdot \alpha_{v,y} \cdot f_{ub} \cdot A_c / \gamma_{m2}$	<b>225920 N</b>																					
$\alpha_{v,y} =$	0,5 CTE	<b>8%</b>																					
$f_{ub} =$	800 N/mm <sup>2</sup>																						
$n =$	2 doble cortadura																						
$A_c =$	353 mm <sup>2</sup>																						
$\beta_{lf} =$	1																						
<b>*CAPACIDAD DE APLASTAMIENTO DE LA CHAPA</b> <span style="float: right;"><b>PG376</b></span>																							
$F_b, R_d =$	$\alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{m2}$	<b>83787,929 N</b>																					
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">alfa 1</td> <td style="width: 25%;">0,4487179</td> <td style="width: 25%;">beta 1</td> <td style="width: 25%;">2,069231</td> </tr> <tr> <td>alfa 2</td> <td>2,3141026</td> <td>beta 2</td> <td>9,069231</td> </tr> <tr> <td>alfa 3</td> <td>1,7021277</td> <td>beta 3</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>alfa 4</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>alfa =</td> <td>0,4487179</td> <td>beta =</td> <td>2,069231</td> </tr> </table>	alfa 1	0,4487179	beta 1	2,069231	alfa 2	2,3141026	beta 2	9,069231	alfa 3	1,7021277	beta 3	2,5	alfa 4	1			alfa =	0,4487179	beta =	2,069231	<b>22%</b>	
alfa 1	0,4487179	beta 1	2,069231																				
alfa 2	2,3141026	beta 2	9,069231																				
alfa 3	1,7021277	beta 3	2,5																				
alfa 4	1																						
alfa =	0,4487179	beta =	2,069231																				
<b>*CAPACIDAD DE CARGA POR ROTURA DE LA CHAPA</b>																							
$N_{pl,Rd} =$	912857,143 N	<b>23%</b>	$N_{u,R} =$ 557208 N <span style="float: right;"><b>38%</b></span>																				
$A_{bruta} =$	2700 mm <sup>2</sup>		$A_{neta} =$ 2180																				
$t =$	10 mm		$t =$ 10 mm																				
$canto =$	270 mm		$canto\ ef =$ 218 mm																				
<b>*CAPACIDAD DESGARRO DE LA CHAPA DE ACERO</b>																							
$F_{bc,Rd} =$	$f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{m2} + f_y \cdot A_{nv} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{m2})$	<b>1244522,92 N</b>	<b>17%</b>																				
	$A_{nt} =$ 1740																						
	$A_{nv} =$ 3600																						



*Ilustración 71 Sección de la unión entre correas*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



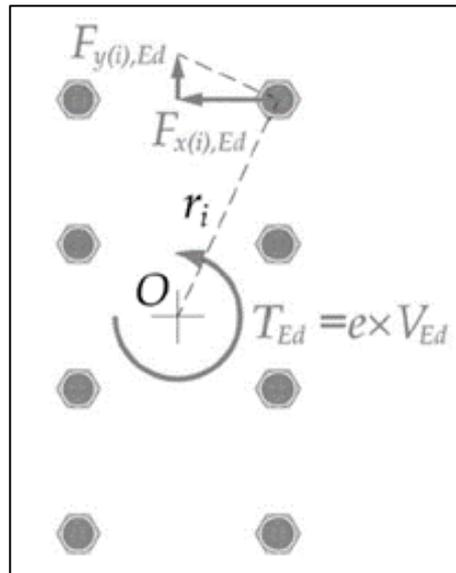
## Unión entre vigas de borde

Esta unión se ha resuelto mediante placas de acero internas y pernos como en el caso de las correas. Se disponen tres filas de pernos con 3 pernos cada una fijando la pieza de madera a una placa interna de acero de 10mm de espesor.

OutputCase	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem
Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	Text
1.ELU.SCU.V	116,098	-181,398	40,512	47,4801	-52,8225	153,2498	596-1

Fax,Ed =	4501 N	Fv,Ed =	17716	<b>APROVECHAMIENTO GLOBAL</b>
Fax,Rd =	53443 N	Fv,Rd =	32344 N	
kmod =	0,7	kmod =	0,7	
Aprovechamiento =	8%	Aprovechamiento =	55%	
Filas de pernos		3 ud		
Columnas de pernos		3 ud		
nº de pernos =		9 ud		

PARA AXIL		
V3 (N) =	40512	
PARA CORTANTE		
P (N) =	116098	
V2 (N) =	-181398	
M3 (N*m) =	153249800	
ix* =	240000	mm <sup>2</sup>
Iy* =	60000	mm <sup>2</sup>
Fx,M3,Ed=	-102166,53	N
Fy,M3,Ed=	51083,267	N
Yi =	200	mm
Xi =	100	mm
	Xi	Yi
PERNO 1	-100	200
PERNO 2	-100	0
PERNO 3	-100	-200
PERNO 4	0	200
PERNO 5	0	0
PERNO 6	0	-200
PERNO 7	100	200
PERNO 8	100	0
PERNO 9	100	-200
PERNO 10		



DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS		
a1	120	mm
a2	96	mm
a3,t	168	mm
a3,c	96	mm
a4,t	96	mm
a4,c	72	mm

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

**UNIÓN DE CLAVIJA: PERNOS**

**1. RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LA MADERA**

d =	24	mm	diámetro del perno	*No debe superar los 30mm para que la ecuación sea válida
d0 =	26	mm	diámetro de hueco	
Alfa 1 =	0	º		
Alfa 2 =	90	º		
Madera =	coníferas	Tipo:	coníferas frondosas	
ro,k =	450	kg/m3	densidad de madera	
fh,0,k =	28,044	N/mm2	0,082*(1-0,01*d)*ro,k	
k90 =	1,71			
fh,alfa1,k =	28,044	N/mm2	fh,alfa,k / [(k90*seno(alfa)^2+coseno(alfa)^2]	
fh,alfa2,k =	16,4	N/mm2	fh,alfa,k / [(k90*seno(alfa)^2+coseno(alfa)^2]	

**2. RESISTENCIA A FLEXIÓN DE LA CLAVIJA**

Acero =	8.8	4.6	4.8	5.6	8.8
fy,k (N/mm2)	640	240	320	300	640
fu,k (N/mm2)	800	400	400	500	800
<b>My,Rk =</b>	<b>930594,48 N/mm2</b>		0,3*fu,k*d^2,6		

**3. CAPACIDAD DE CARGA AXIAL**

\*Los pernos presentan capacidad de carga axial gracias al anclaje que aporta la arandela o la chapa metálica. El esfuerzo axial se traduce a una tensión de compresión bajo esta superf

CAPACIDAD DE ANCLAJE:			d	da	espesor
Tipo de anclaje =	arandela	arandela	chapa met		
	d (mm) =	24	24	24	6
	da,e (mm) =	105	105	96	8
	da,i (mm) =	26	26	26	8
	t (mm) =		10	24	8

**1. Capacidad de anclaje de la arandela:**

fc,90,k (N/mm2)	3,6	<b>3*fc,90,k *Area de contacto = 99.251,39 N</b>
Área de contacto (de la arandela/chapa metálica) =	9189,944 mm2	

**2. Capacidad de tracción del tornillo no pretensado:**

Ft,Rd (N) =	254.160,00	0,9*fub*As / Gama,m2
*Si los tornillos son de cabeza avellanada, la capacidad se reduce 30% (Ft,Rd*0,7)	d	As (mm2)
	12	84,3
	16	157
	20	245
	22	303
	24	353

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

3. CAPACIDAD DE CARGA LATERAL	
Efecto sogá: $F_{ax,k}/4 =$	24812,85 N
<b>Efecto sogá neto:</b>	<b>6203,212 N</b>
Coeficiente limitador del efecto sogá para pernos: (25%)	
<b><math>F_v, R_k =</math></b>	<b>60067,462 N</b>
$\alpha =$	-26,56505 °
$f_{h,\alpha,k} =$	24,556918 N/mm <sup>2</sup>
$f_{h,\alpha,k} / [(k90 \cdot \text{seno}(\alpha)^2 + \text{coseno}(\alpha)^2)]$	
(1) $f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d =$	173863 N
(2) $f_{h,\alpha,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot [\text{RAIZ}(2 + 4 \cdot M_y, R_k / (f_{h,\alpha,k} \cdot d \cdot t^2)) - 1] + (\text{Efecto Soga})$	82641,08 N
(3) $2,3 \cdot \text{RAIZ}(M_y, R_k \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d) + (\text{Efecto Soga}) =$	60067,46 N

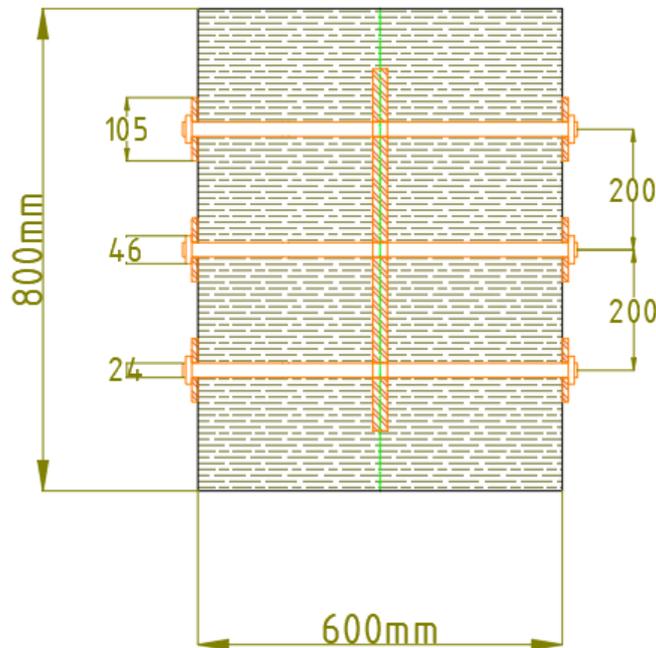
RESISTENCIA A PUNZONAMIENTO DE LA CHAPA ANTE LAS CARGAS AXILES DEL PERNO	
<b><math>B_p, R_d =</math></b>	<b>170098,393 N</b>
Ancho de viga =	600 mm
t =	10 mm
t <sub>1</sub> =	295 mm
f <sub>u</sub> =	470 N/mm <sup>2</sup>
	3%

COMPROBACIÓN DEL FALLO EN BLOQUE	
<b><math>F_{bs}, R_k =</math></b>	<b>2024880 N</b>
	1%
$1,5 \cdot A_{net,t} \cdot f_{t,0,k} =$	2024880
$0,7 \cdot A_{net,v} \cdot f_{v,k} =$	394249,8
$f_{t,0,k}$	26 Mpa
$f_{v,g,k}$	4,3 Mpa
$A_{net,t} =$	51920 mm <sup>2</sup>
$A_{net,v} =$	130980 mm <sup>2</sup>
$L_{net,t} =$	176 mm
$L_{net,v} =$	444 mm
(1) $L_{net,v} \cdot t:$	130980 mm <sup>2</sup>
(2) $L_{net,v}/2 \cdot (L_{net,v} + 2 \cdot t_{ef}) =$	155741,6 mm <sup>2</sup>
*¿Cuanto vale t <sub>ef</sub> (espesor eficaz)?	pg200
t <sub>ef</sub> =	128,7695 mm

CAPACIDAD RESISTENTE DE LA CHAPA DE ACERO Y CORTADURA	
dagujero =	26 mm
Requisitos para dibujar la sección	
e1	31,2 mm
e2	31,2 mm
p1	57,2 mm
p2	62,4 mm
m	sin valor mm
	Obligatorio Mínimo
	Máximo

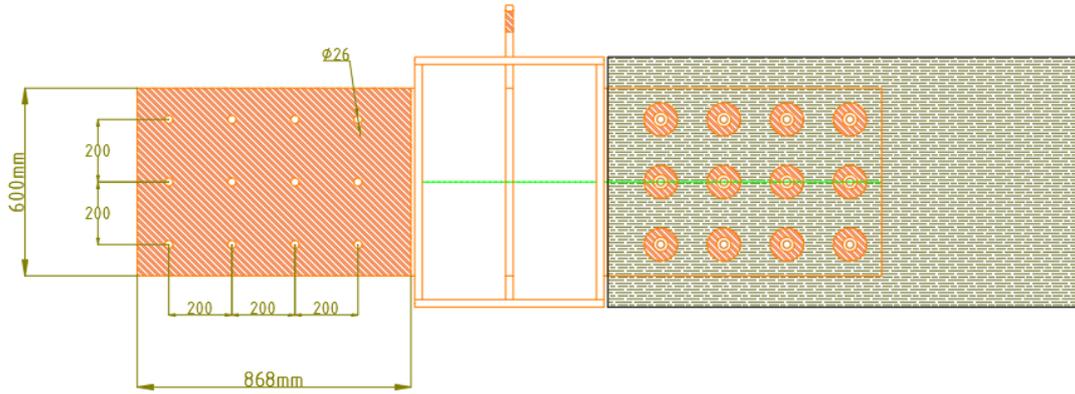
*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*

<b>*CAPACIDAD DE CORTADURA:</b>																						
$F_v, R_d =$	$\beta_{lf} \cdot n \cdot \alpha_{fv} \cdot f_{ub} \cdot A_c / \gamma_{m2}$		<b>214624 N</b>																			
$\alpha_{fv} =$	0,5 CTE		8%																			
$f_{ub} =$	800 N/mm <sup>2</sup>																					
$n =$	2 doble cortadura																					
$A_c =$	353 mm <sup>2</sup>																					
$\beta_{lf} =$	0,95																					
<b>*CAPACIDAD DE APLASTAMIENTO DE LA CHAPA</b>			<b>PG376</b>																			
$F_b, R_d =$	$\alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{m2}$		<b>83787,929 N</b>																			
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">alfa 1</td> <td style="width: 25%;">0,4487179</td> <td style="width: 25%;">beta 1</td> <td style="width: 25%;">2,069231</td> </tr> <tr> <td>alfa 2</td> <td>2,3141026</td> <td>beta 2</td> <td>9,069231</td> </tr> <tr> <td>alfa 3</td> <td>1,7021277</td> <td>beta 3</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>alfa 4</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>alfa =</td> <td>0,4487179</td> <td>beta =</td> <td>2,069231</td> </tr> </table>	alfa 1	0,4487179	beta 1	2,069231	alfa 2	2,3141026	beta 2	9,069231	alfa 3	1,7021277	beta 3	2,5	alfa 4	1			alfa =	0,4487179	beta =	2,069231	21%
alfa 1	0,4487179	beta 1	2,069231																			
alfa 2	2,3141026	beta 2	9,069231																			
alfa 3	1,7021277	beta 3	2,5																			
alfa 4	1																					
alfa =	0,4487179	beta =	2,069231																			
<b>*CAPACIDAD DE CARGA POR ROTURA DE LA CHAPA</b>																						
$N_{pl, R_d} =$	912857,143 N	13%	$N_{u, R} =$ 557208 N <span style="float: right; background-color: #d9ead3;">21%</span>																			
$A_{bruta} =$	2700 mm <sup>2</sup>		$A_{neta} =$ 2180																			
$t =$	10 mm		$t =$ 10 mm																			
$canto =$	270 mm		$canto_{ef} =$ 218 mm																			
<b>*CAPACIDAD DESGARRO DE LA CHAPA DE ACERO</b>																						
$F_{bc, R_d} =$	$f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{m2} + f_y \cdot A_{nv} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{m2})$		1244522,92 N <span style="float: right; background-color: #d9ead3;">9%</span>																			
	$A_{nt} =$ 1740																					
	$A_{nv} =$ 3600																					

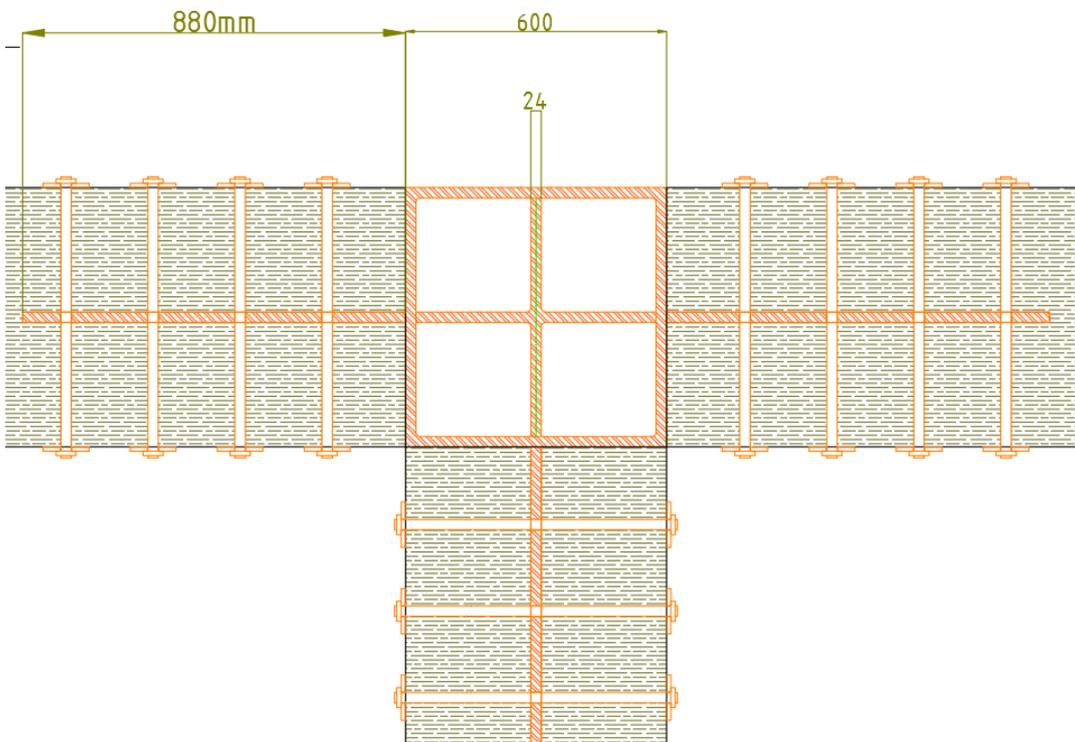


*Ilustración 72 Sección de la unión entre vigas de borde*

*Diseño y cálculo estructural de una pérgola de madera laminada en la estación intermodal La Sagrera, en Barcelona*



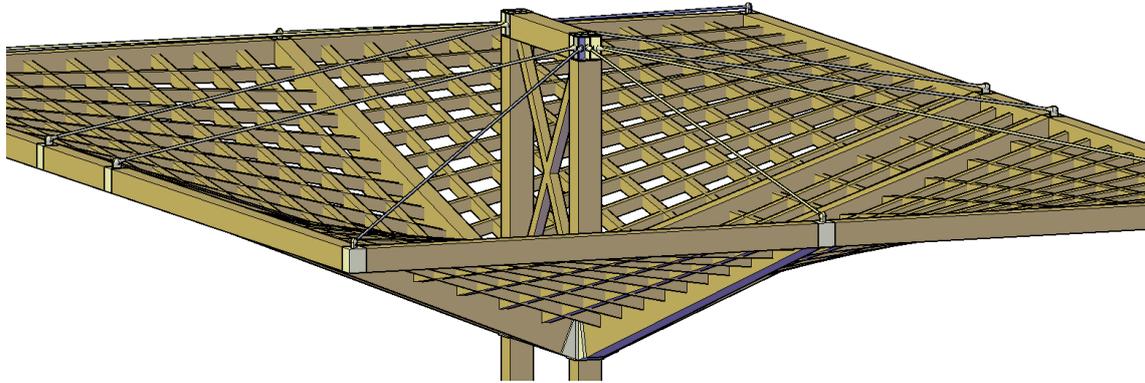
*Ilustración 73 Alzado de la unión entre vigas de borde y principales*



*Ilustración 74 Planta de la unión entre vigas de borde y vigas principales*

## PLANOS

Se ha hecho uso del programa AutoCad para el modelado de la estructura. Los planos generales y de detalle se adjuntan en el anejo.



*Ilustración 75 Modelado de la pérgola en Autocad*