



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estructura singular con elementos de madera de derribo
revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de
la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
(Acceso desde Grado I. de Obras Públicas)

AUTOR/A: Mansilla Ruiz, Roberto

Tutor/a: Payá Zaforteza, Ignacio Javier

Cotutor/a: García Castillo, Ester

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



ÍNDICE

DOCUMENTO 1. MEMORIA Y ANEJOS

MEMORIA

Anejo 1. Descripción y objetivos del TFM.

Anejo 2. Diseño conceptual. Estática Gráfica.

Anejo 3.1. Cálculo estructural. Estructura principal.

Anejo 3.2. Cálculo estructural. Uniones.

Anejo 3.3. Cálculo estructural. Cimentación.

Anejo 4. Evaluación ambiental del proyecto y relación con los ODS.

DOCUMENTO 2. PLANOS

Plano Nº1: Situación.

Plano Nº2: Emplazamiento.

Plano Nº3: Vistas 3D.

Plano Nº4: Losa de cimentación.

Plano 4.1: Definición geométrica y replanteo.

Plano 4.2: Armado.

Plano Nº5: Estructura de madera

Plano 5.1: Alineaciones.

Plano 5.2: Definición geométrica del pórtico tipo.

Plano 5.3: Definición geométrica de cubierta y arriostramiento lateral

Plano 5.4: Nomenclatura de elementos.

Plano 5.5: Despiece de montantes.

Plano 5.6: Despiece de diagonales.

Plano 5.7: Despiece de cordones superior e inferior.

Plano 5.8: Despiece de pilares.

Plano 5.9: Despiece de arriostramientos.

Plano 5.10: Despiece de cubierta.

Plano 5.11: Uniones (I).

Plano 5.12: Uniones (II).



Plano 5.13: Uniones (III).

Plano 5.14: Uniones (IV).

Plano 5.15: Detalles.

Plano 5.16: Proceso constructivo.

DOCUMENTO 3. VALORACIÓN ECONÓMICA APROXIMADA



Índice de contenido

1. Antecedentes y objeto	4
2. Situación y emplazamiento	4
3. Condicionantes de la zona.....	5
3.1 Condicionantes urbanísticos	5
3.2 Inundabilidad	6
3.3 Geología y geotecnia	7
3.4 Riesgo sísmico	8
3.5 Seguridad frente a incendio	9
4. Diseño conceptual. Estática Gráfica.	9
4.1 Repaso histórico de la Estática Gráfica.....	9
4.2 Alternativas de diseño. Diagramas de Forma y Fuerza.....	12
4.3 El Teorema de Maxwell en el diseño conceptual	16
5. Descripción de la estructura	18
5.1 Distribución en planta.....	18
5.2 Descripción del alzado y de la geometría.....	19
6. Materiales.	20
7. Acciones	21
7.1 Acciones permanentes.....	21
7.2 Acciones variables	22
7.3 Acciones accidentales.....	22
8. Descripción de los elementos de la estructura y análisis.....	22
9. Presupuesto ambiental y relación del TFM con los ODS.....	24
10. Resumen del presupuesto económico	26
11. Plazo de ejecución de obra	26

1. Antecedentes y objeto

El presente trabajo plantea el diseño estructural de un edificio polivalente en la Avenida de la Justicia, en el Barrio de Los Dolores de la Ciudad de Murcia. La estructura dota tanto a la zona en la que se ubica como a la propia ciudad de un nuevo espacio flexible, que permita el desarrollo de una variedad suficiente de actividades, desde actividades deportivas, actividades culturales y de ocio, como exposiciones o ferias. La estructura busca poseer un alto nivel de funcionalidad y una estética que resulte atractiva para su uso y visita.

En el desarrollo de este documento se tratan los puntos que se listan a continuación:

- Descripción del emplazamiento donde se sitúa la estructura y características del mismo.
- Repaso histórico del método de la estática gráfica y aplicación al presente trabajo, sirviendo como método para la conceptualización de varias alternativas de diseños, de entre la cuales se selecciona una como estructura final a diseñar. También se muestran aplicaciones recientes de este método y programas compatibles con el mismo, demostrando su aplicabilidad en la actualidad.
- La madera como material principal en estructuras, sus características y algunos ejemplos que ponen de manifiesto como este material puede volver a cobrar notoriedad sobre los otros dos materiales principales empleados en el sector de la construcción, siendo estos el acero y el hormigón.
- Propuesta de un procedimiento constructivo de la estructura.

2. Situación y emplazamiento

La estructura objeto de este trabajo se ubica en el barrio Los Dolores en la Ciudad de Murcia, dentro del parcelario que delimitan la Calle Procurador Molina Estrella y la Avenida de la Justicia. La Figura 1 muestra una vista satélite del emplazamiento.



Figura 1. Vista satélite de las parcelas del sector. Fuente: Google maps.

La parcela que se emplea para ubicar y construir la estructura es suelo urbano sin edificar, con una superficie de 8487 m². Dicha parcela linda con el vial por dos de sus laterales y con otras parcelas por los otros dos. Se corresponde con el código "02" de la Figura 2.

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)



Figura 2. Distribución de parcelas de la zona. Fuente: Visor Sede Electrónica Catastro.

3. Condicionantes de la zona

3.1 Condicionantes urbanísticos

Se describen las condiciones urbanísticas de la parcela. Como se ha mencionado ya en este texto, la parcela seleccionada está catalogada como suelo urbano sin edificar, urbanizable, como puede observarse en la Figura 3.

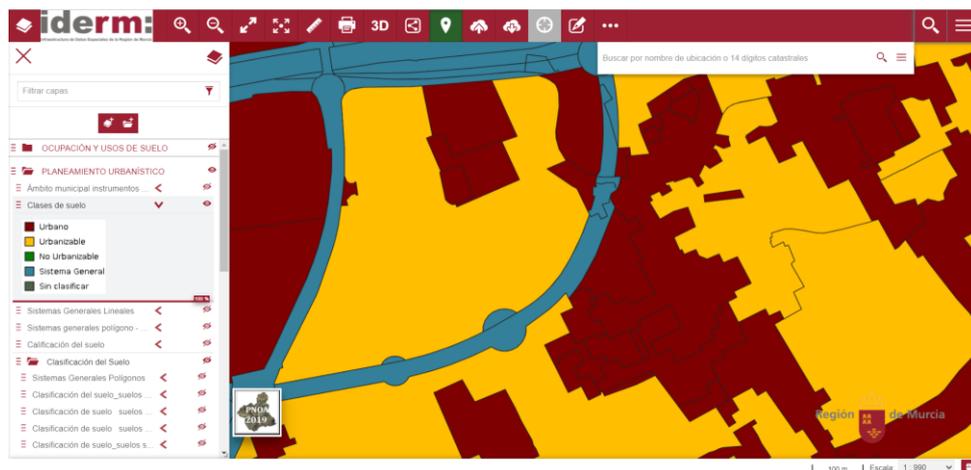


Figura 3. Clases de suelo en la zona de actuación. Fuente: Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia.

De acuerdo a la información urbanística del Organismo Municipal, el ámbito al que pertenece la parcela es el TA-301, calificado como TR, código general empleado para la ordenación remitida a las zonas de uso terciario. Las normativas de aplicación en esta parcela son las Normas Urbanísticas del Plan General de Murcia, Documento adaptado al Decreto Legislativo 1/2005 y el Plan Parcial Ciudad E Nº 4.

Los usos que puede tener la parcela se clasifican en uso principal o característico, usos compatibles y usos prohibidos. El uso global establecido para el sector es el de Equipamientos Colectivos. Los usos permitidos en el sector engloban equipamientos para administración y gobierno, equipamientos para cultura, equipamientos para la restauración, el ocio y el deporte, grandes equipamientos turísticos y comerciales. El uso residencial solo se permite si complemente a la edificación principal, es decir, al

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

propio equipamiento. Permite por tanto la Ordenación del Sector diferentes alternativas, con la intención de generar las más variadas y necesarias instalaciones posibles. Las condiciones estéticas definidas en las ordenanzas indican que el carácter que debe darse a las edificaciones es exento, refiriéndose a que ésta no debe conectar directamente con ninguna otra edificación, siendo visibles todos sus lados.

El resto de normas y condicionantes urbanísticos se enuncian a continuación:

- La ocupación de la parcela se fija, de acuerdo a las normas urbanísticas del Plan General se fija en un 70 %.
- Se fija una altura máxima de 19 metros, equivalente a 5 plantas.
- La distancia a linderos se establece en 3 metros.
- La edificabilidad media se establece en 2,52 m³/m².
- La parcela mínima es de 2000 m².
- Los aparcamientos deben ser los adecuados al uso y nunca menor a 1 por cada 100 m² de edificación. Las dimensiones de una plaza de aparcamiento estándar debe ser de 2,20 x 4,50 m, y en el caso de plazas destinadas a minusválidos las dimensiones deben ser 3,30 x 4,50 m.
- Se destina a zonas verdes o ajardinadas un 10 % de la superficie neta de la parcela.

La estructura, con su forma singular, presenta una altura máxima en coronación o cumbre de 13 m, inferior a los 19 m marcados por el planeamiento. Las dimensiones en planta de la estructura, teniendo en cuenta los voladizos de su cubierta, es de 42x50 m. Se dispondrá de 21 plazas de aparcamiento en la superficie de la parcela, en relación a la superficie ocupada por la edificación.

El acceso a la parcela se realiza a través de la Avenida de la Justicia.

3.2 Inundabilidad

Para valorar el riesgo de inundación se acude a la Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia. Por la localización de la parcela, la situación de inundación más relevante a analizar es aquella de origen fluvial. Como muestra la Figura 4, y de acuerdo a la leyenda proporcionada en los datos del visor, el color correspondiente al riesgo de inundación de la parcela es aquel asociado a un periodo de retorno T=500 años, tratándose por tanto de una situación extraordinaria la que originaría riesgo. Otras parcelas cercanas se encuentran en situación de riesgo para un periodo de retorno T=100 años. Por estos motivos se descarta la zona y la parcela como de riesgo de inundación.



Figura 4. Categorización de zonas inundables de origen fluvial. Fuente: Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia.

3.3 Geología y geotecnia

Desde el portal de mapas del IGME se consulta GEODE, que proporciona la cartografía digital territorial continua a escala 1:50000. De acuerdo a la zonificación del mapa, el área donde se desarrolla el proyecto es la Z2100. El código de la unidad geológica asociada a esta zona es el 208. La descripción de la unidad geológica responde a abanicos aluviales de 5^o generación, siendo tanto su edad superior como su edad inferior el pleistoceno superior. La Figura 5 proporciona un mapa geológico de la zona.

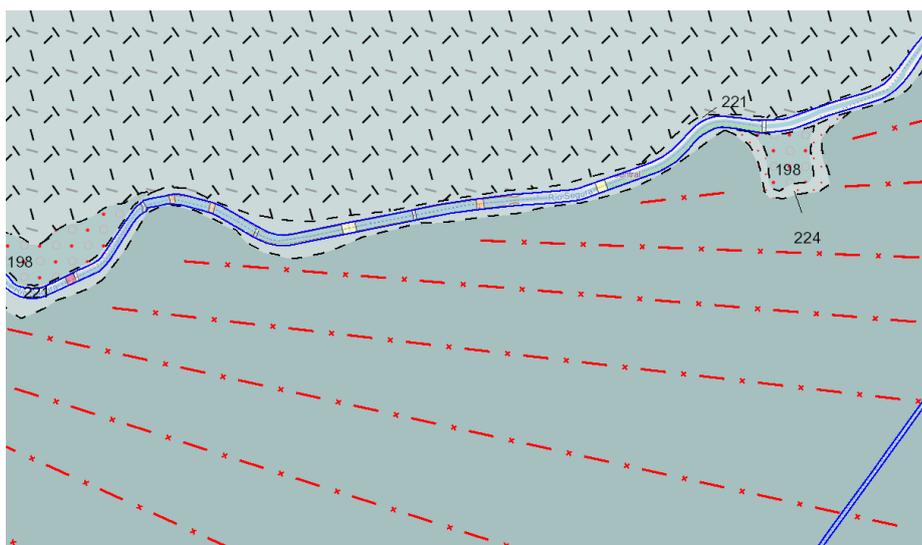


Figura 5. Zona de proyecto visualizada en el Mapa Geológico Continuo de España. Fuente: IGME.

Debido a la falta de disponibilidad de un estudio geotécnico completo, se emplean los datos del Mapa Geotécnico y de Riesgos geológicos para la ordenación urbana de Murcia. La parcela se encuentra en el Área III, Zona III₁₂, que se caracteriza por ser una zona aluvial de arcillas limosas localmente salinas con suelo vegetal potente y lentículas arenosas sobre gravas arenosas. La zona es amplia y carece de pendiente, con escasa permeabilidad y con un nivel freático alto (C:0,35). La edad geológica es del cuaternario, siendo las presiones admisibles en el terreno $\sigma_a = 1 \text{ kp/cm}^2$. Por todos estos motivos, el tipo de cimentación que se recomienda emplear es una cimentación mediante losa superficial o mediante pilotaje. En cuanto a la facilidad para la excavación, el terreno se encuentra catalogado como ripable.

El nivel freático de la zona se sitúa a una profundidad comprendida entre los 4-5 m.

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

Las características geomecánicas son las siguientes: Aparece inicialmente una capa de rellenos antrópicos de un espesor entre 3 m. Los materiales que constituyen estos terrenos antrópicos son escombros con gravas y matriz areno-arcillosa. Presentan una compacidad baja, obteniéndose unos valores de golpeo en el ensayo S.P.T comprendidos entre 10 y 30. La compresibilidad de estos materiales de relleno es alta pudiendo incluso producirse asentamientos bruscos en presencia de agua. La siguiente capa que se encuentra es una de limos arcillosos con algo de arena fina, en los siguientes 8 m, encontrándose dentro de este depósito algunos lentejones de espesor no superior a 2 m, de arena fina limosa y arena con grava fina. A una profundidad de 13 m aparece un nivel constituido por grava media y gruesa con arena. En el primer metro de este estrato empiezan a alcanzarse valores de rechazo del S.P.T.

Todo lo mencionado en este apartado se debe tener en cuenta para el diseño de la cimentación de la estructura. El tipo de cimentación que se decide ejecutar es una cimentación superficial por losa sobre la capa de rellenos, realizando una mejora previa del terreno, y siendo la tensión admisible de 1 kp/cm^2 . Se considera esta una alternativa válida debido al tipo de edificación que se diseña, cuyo material principal es madera, reduciendo significativamente el peso de la estructura frente a una alternativa en acero o en hormigón armado.

3.4 Riesgo sísmico

Para analizar la sismicidad de la zona se recurre a la Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02). La aceleración sísmica básica para la zona, identificada como parámetro " a_b ", se sitúa entre $0,12g$ y $0,16g$. La propia Normativa proporciona un valor específico de la aceleración sísmica básica para la ciudad de Murcia, siendo este de $a_b/g=0,15$. Al ser este valor claramente superior a $0,04$ resulta necesario realizar un cálculo sísmico que garantice la seguridad de la edificación frente a este tipo de acción. La Figura 6 muestra el mapa sísmico nacional.

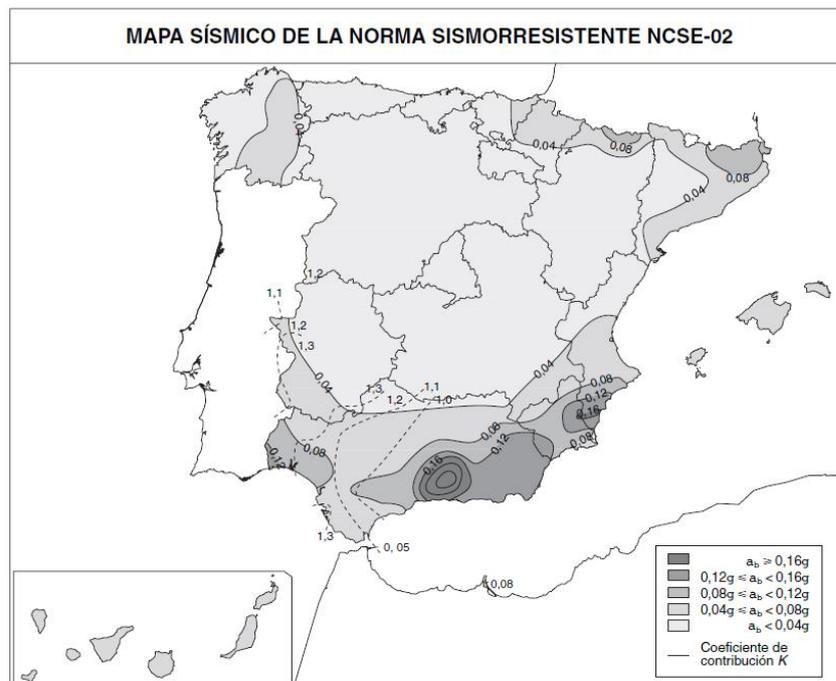


Figura 6. Mapa de Peligrosidad Sísmica. Fuente: NCSE-02.

3.5 Seguridad frente a incendio

La estructura que se diseña debe cumplir con los requisitos de seguridad frente a incendio. La resistencia al fuego exigida depende de la altura del edificio y de su uso. La altura de la misma es inferior a 15 m, y su uso es polivalente, siendo la pública concurrencia uno de ellos. Teniendo en cuenta estos dos factores se deduce una exigencia de resistencia al fuego R90.

En el establecimiento de la resistencia necesaria se ha recurrido a la Sección SI 6 “Resistencia al fuego de la estructura” del Documento Básico SI Seguridad en caso de incendio. En la Tabla 1 “Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales” se asigna un nivel de resistencia al fuego exigido en función de los parámetros ya mencionados.

Uso del sector de incendio considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante		
		altura de evacuación del edificio		
		≤15 m	≤28 m	>28 m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R 30	R 30	-	-
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120 ⁽³⁾	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)		R 90		
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)		R 120 ⁽⁴⁾		

⁽¹⁾ La resistencia al fuego suficiente R de los elementos estructurales de un suelo que separa sectores de incendio es función del uso del sector inferior. Los elementos estructurales de suelos que no delimitan un sector de incendios, sino que están contenidos en él, deben tener al menos la resistencia al fuego suficiente R que se exija para el uso de dicho sector

⁽²⁾ En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la resistencia al fuego exigible a edificios de uso Residencial Vivienda.

⁽³⁾ R 180 si la altura de evacuación del edificio excede de 28 m.

⁽⁴⁾ R 180 cuando se trate de aparcamientos robotizados.

Tabla 1. Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales. Fuente: Documento Básico SI Seguridad en caso de incendio.

4. Diseño conceptual. Estática Gráfica.

4.1 Repaso histórico de la Estática Gráfica

Como introducción a este capítulo se emplea, por su claridad y detalle, la definición de Estática Gráfica proporcionada por George Bayle en su libro *Estática Gráfica* (1930):

“La Estática Gráfica, designada también con el nombre de Grafostática, tiene por objeto representar gráficamente las condiciones de equilibrio de las fuerzas que actúan sobre un punto material o bien sobre cuerpos definidos.

Tiene igualmente por objeto determinar la magnitud y el sentido de los esfuerzos a que están sometidos diversos elementos de estos cuerpos, lo que permite seguidamente a la Resistencia de Materiales calcular las dimensiones que conviene darles para que puedan resistir a dichos esfuerzos en las debidas condiciones de seguridad.

Constituye, pues, un auxiliar precioso de la Resistencia de Materiales, y si bien no da resultados tan exactos como los métodos algebraicos, presenta sobre estos la ventaja de una gran sencillez. “

El nacimiento de la estática gráfica como ciencia data de 1866, fecha en la que Karl Culmann (1821-1881) publica su *Die Graphische Statik*, obra en la que establece las bases de la disciplina gráfica.

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

Un precursor de la Estática Gráfica fue Pierre Varignon (1654-1722), que consiguió analizar el equilibrio en sistemas de fuerzas mediante el empleo del conocido polígono de fuerzas. Otro de los métodos desarrollados por Varignon y de principal importancia en la Estática Gráfica es el método de las tres fuerzas. La dirección de actuación de cada una de estas fuerzas viene representada por su línea de acción. Para que exista el equilibrio entre ellas es necesario que estas líneas de acción se intersecten en un mismo punto, y que el polígono de fuerzas que forman sea cerrado.

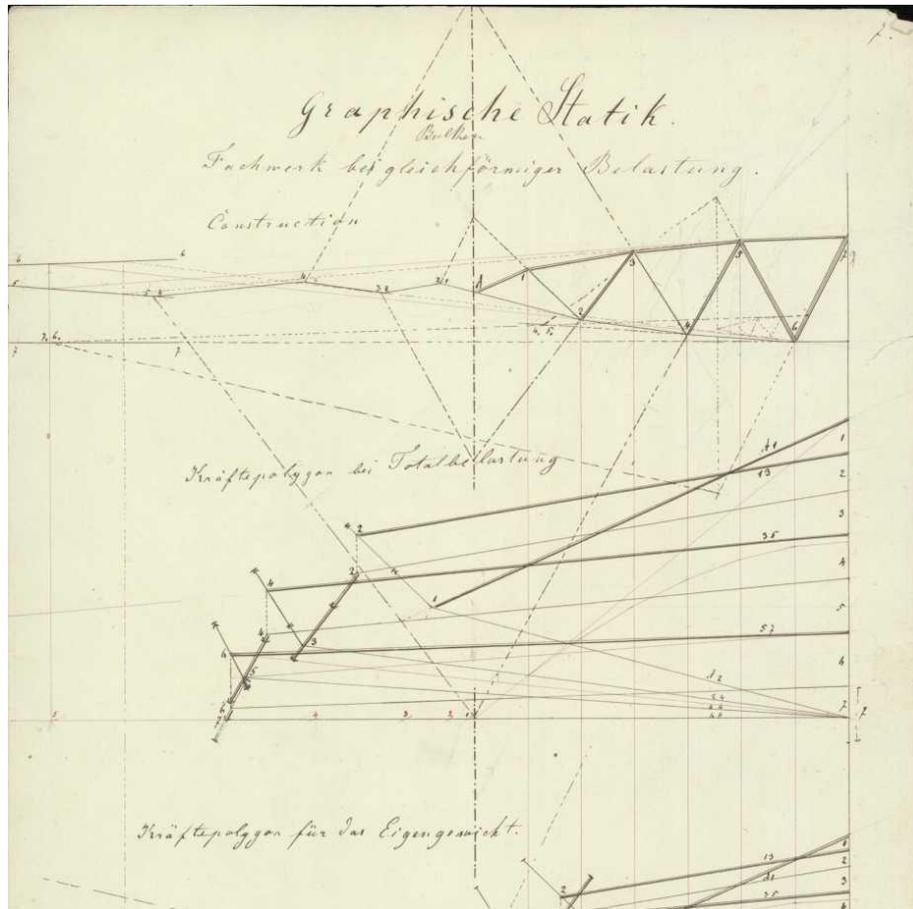


Figura 7. Die Graphische Statik, K. Culmann (1866). Fuente: Archivos ETH Zürich.

El método de Culmann se basa en realizar un corte de un sistema por un plano, sin que este plano corte más de tres barras, determinar la resultante de las fuerzas exteriores y la reacción a un lado del corte y descomponerlas según las barras cortadas.

En el año 1879, unos años después de la publicación del libro de K. Culmann, Luigi Cremona (1830-1903) publica *Le figure reciproche nella statica grafica*. Éste formula las hipótesis del método, considerando que las barras del sistema sólo están sometidas a esfuerzos axiales, es decir, compresión y tracción, y que además estas se encuentran articuladas en sus nudos. Cremona combinó los conceptos de Estática Gráfica que había establecido K. Culmann con las figuras recíprocas desarrolladas por el escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), dando como resultado los diagramas de fuerzas recíprocas a los diagramas de forma. El Método de Cremona se convirtió así en un método empleado tanto a nivel académico como a nivel profesional formando parte de los cálculos realizados en proyectos, extendiéndose su uso durante los siglos XIX y XX.

En España, algunos de las personalidades más importantes de la ingeniería estructural y la arquitectura emplearon el método en sus trabajos. El arquitecto catalán Antoni Gaudí

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

i Cornet (1852-1926) empleó en el diseño de sus obras las técnicas de la estática gráfica, en conjunto con asombrosas maquetas y modelos físicos como los de La Sagrada Familia y la Iglesia de la Colonia Güell. Don Eduardo Torroja Miret (1889-1961), Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, diseñó y calculó estructura de bóvedas y arcos, habituales en los cálculos por Estática Gráfica como el Antiguo Frontón de Recoletos de Madrid (1939). Los cálculos gráficos formaron parte de las técnicas empleadas por Torroja para el diseño de sus estructuras quedando constancia de ello en el *Fondo de Eduardo Torroja Miret* del Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU).

Desde la Escuela Politécnica Federal de Zürich, aparece la figura de Robert Maillart (1872-1940). Maillart era fue un virtuoso en el empleo del hormigón armado en sus estructuras. Las técnicas gráficas formaron parte de su proceso de concepción y cálculo estructural, buscando esa relación en la que la forma de la estructura responde a las fuerzas que sobre ella actuando, optimizando el empleo de material y el uso de elementos superfluos.

Entre las muchas obras de Maillart se decide destacar dos de ellas en este trabajo, el Puente de Salginatobel (1930) y la estructura del Magazzini Generali de Chiasso (1924).

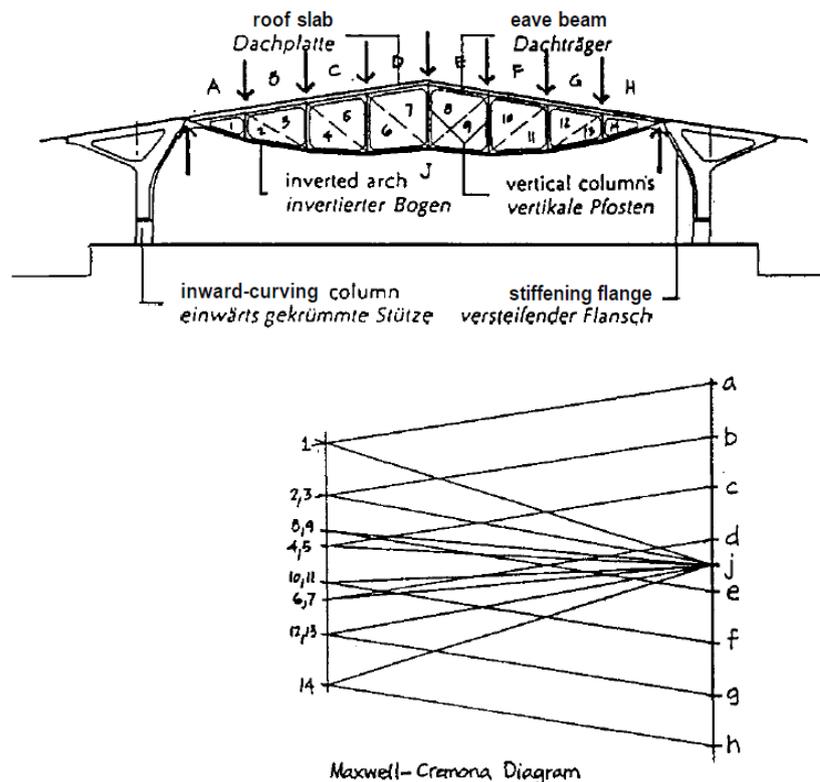


Figura 8. Figuras recíprocas de la Magazzini Generali. Fuente: *Understanding Famous Structures Through Simple Graphical Analyses*. Allen, E. Zalewski, W. Meeting anual ACSA, 1996.

Durante el siglo XX los métodos gráficos empezaron a caer en desuso en favor de los métodos analíticos, relegando a los primeros a un segundo plano, cada vez más desconocido a medida que el cálculo por métodos analíticos y computacionales

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

avanzaba. No obstante, algunas figuras del mundo de la ingeniería estructural se esforzaron en reavivar y divulgar las técnicas gráficas. Dos de ellos son Edward Allen Y Waclaw Zalewski, autores del libro *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures (2010)*, probablemente la obra más completa y didáctica en torno a la Estática Gráfica escrita. Es éste trabajo una extensa síntesis sobre la estática gráfica, la cual ya promocionaban ambos autores décadas antes, con publicaciones como *Understanding Famous Structures Through Simple Graphical Analyses*, para el meeting anual de la ACSA (1996).

4.2 Alternativas de diseño. Diagramas de Forma y Fuerza

En este apartado se presentan las alternativas de diseño contempladas. Para todas estas alternativas se elaboran diagramas de Forma y de Fuerza (figuras recíprocas), empleando por tanto la Estática Gráfica como método de diseño conceptual en este trabajo. Estos diagramas permiten determinar de manera visual qué elementos de la estructura se encuentran sometidos a mayores esfuerzos, o cómo la modificación de un parámetro, como por ejemplo la profundidad en un cercha, generan polígonos de fuerza más compactos, sinónimo éste de unos menores esfuerzos en los elementos y de un mejor aprovechamiento del material.

Se presentan en este apartado 4 de las 6 alternativas de diseño, ya que éstas son las que posteriormente se analizarán en el apartado 4.3 de este documento mediante el empleo del Teorema de Maxwell. Las otras alternativas pueden consultarse en el Anejo 2 del Documento 1.

Para elaborar los diagramas se emplea software de dibujo asistido por ordenador (CAD). Su uso elimina los problemas de exactitud en el dibujo consiguiendo que ésta sea total, y también los problemas asociados al espacio, proporcionando diagramas nítidos y precisos.

Las diferentes alternativas mostradas en este capítulo se encuentran todas ellas sometidas a una hipótesis de cargas actuando en la dirección de la gravedad. Comparar los diagramas de Fuerza de cada una de ellas permite realizar una primera valoración para decidir qué alternativa es superior. Esta comparativa se basa en observar la compacidad del diagrama de Fuerza. A mayor compacidad del diagrama menores son los esfuerzos en las barras de la estructura. Las siguientes Figuras presentan los diagramas de Forma y Fuerza de las alternativas 3 (Figuras 9 y 10), 4.1 (Figuras 11 y 12), 4.2 (Figuras 13 y 14), 5 (Figuras 15 y 16). Para todos los diagramas las compresiones se identifican por el color azul y a las tracciones por el color rojo.

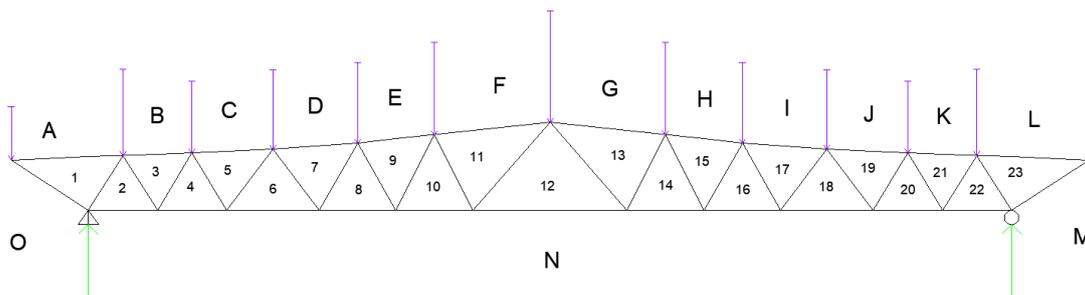


Figura 9. Diagrama de Forma Alternativa 3. Fuente: elaboración propia.

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

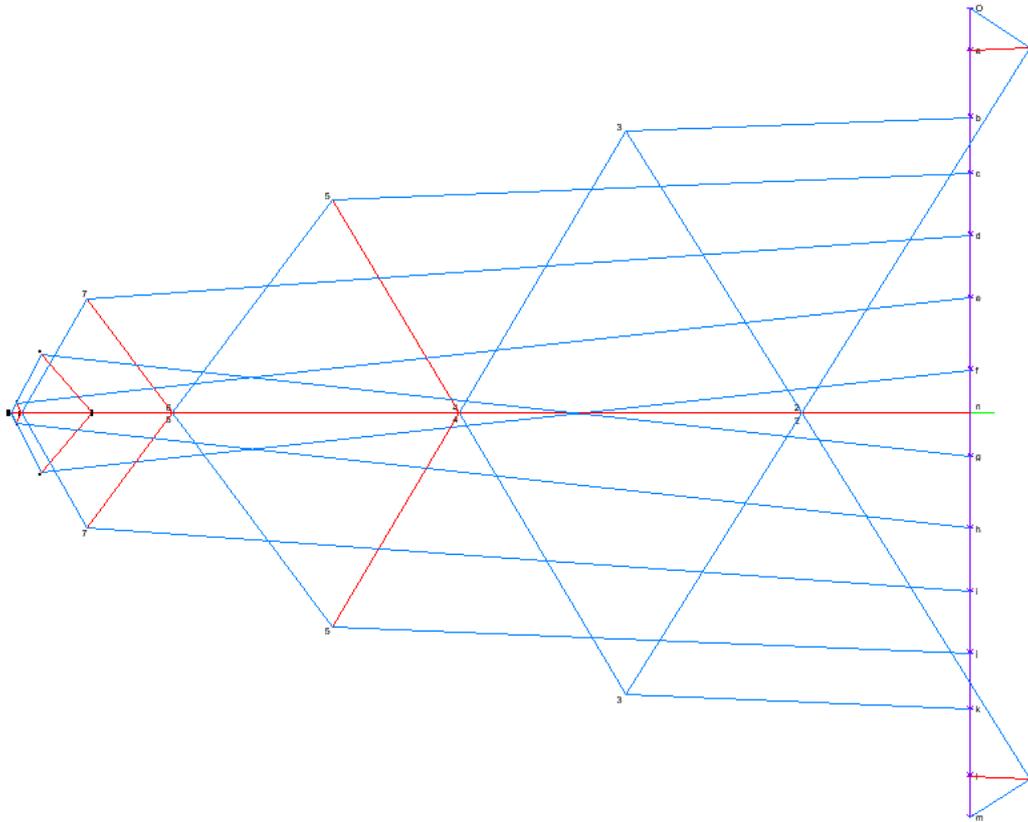


Figura 10. Diagrama de Fuerza Alternativa 3. Fuente: elaboración propia.

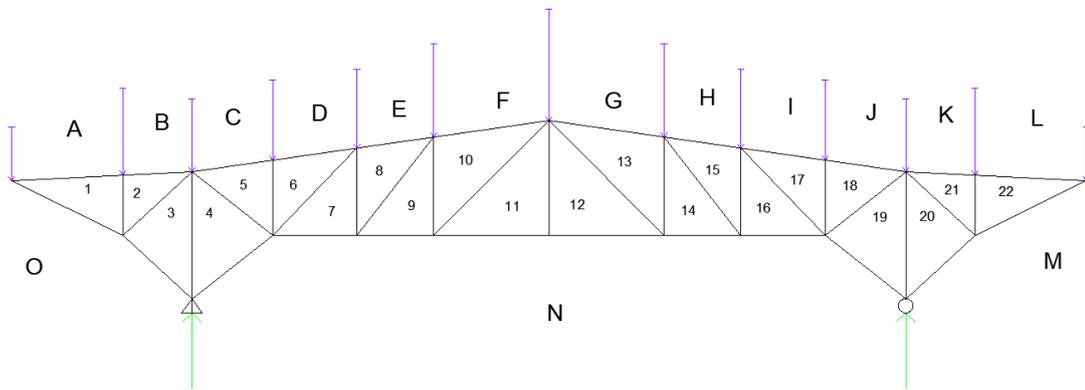


Figura 11. Diagrama de Forma Alternativa 4.1. Fuente: elaboración propia.

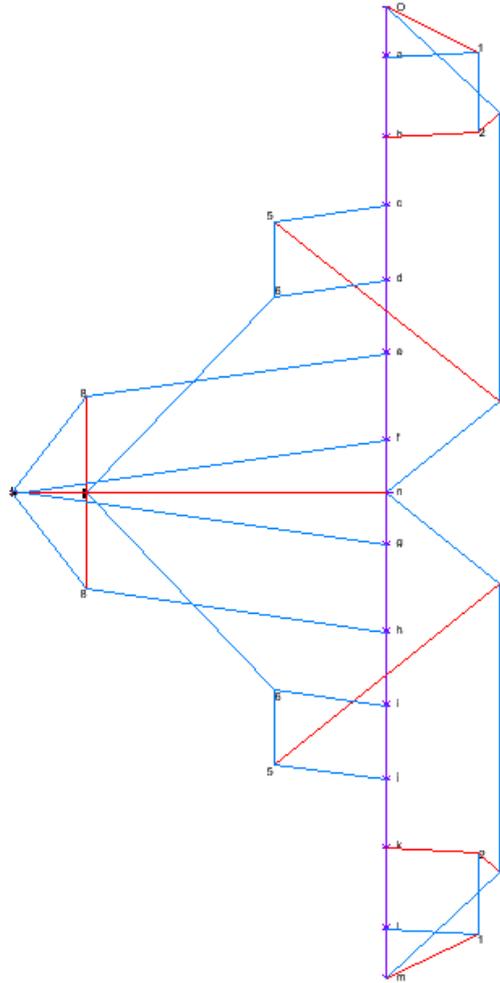


Figura 12. Diagrama de Fuerza Alternativa 4.1. Fuente: elaboración propia.

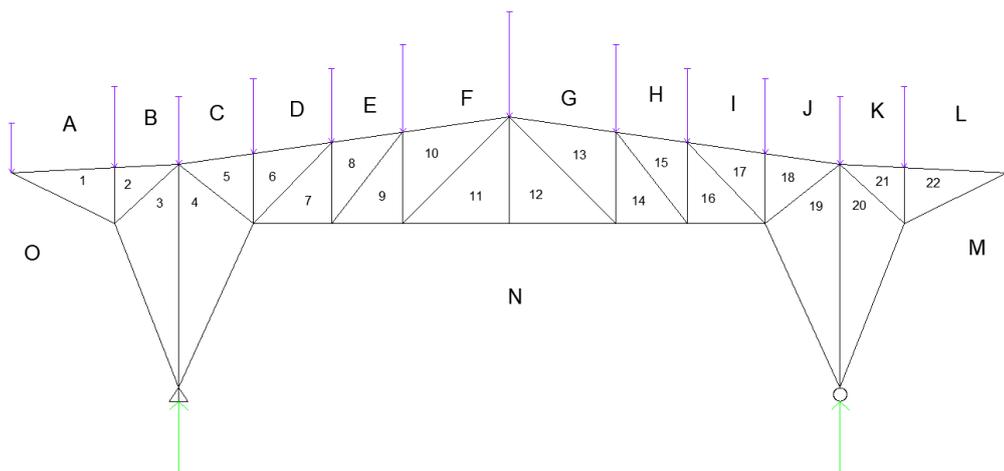


Figura 13. Diagrama de Forma Alternativa 4.2. Fuente: elaboración propia.

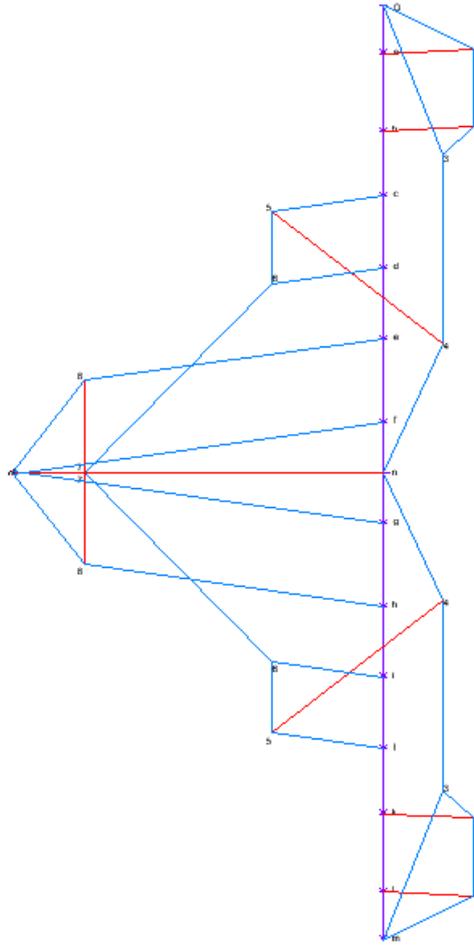


Figura 14. Diagrama de Fuerza Alternativa 4.2. Fuente: elaboración propia.

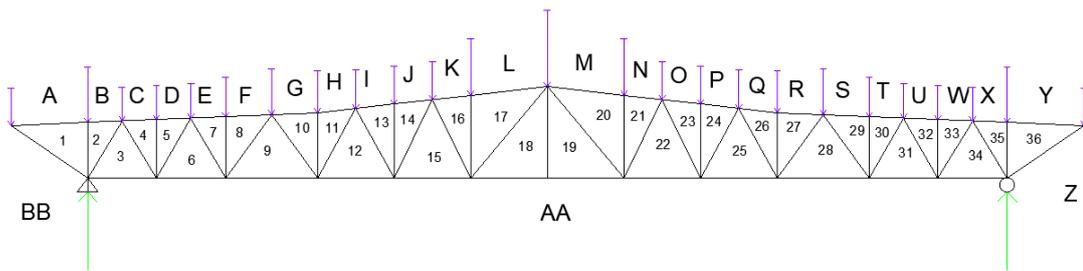


Figura 15. Diagrama de Forma Alternativa 5. Fuente: elaboración propia.

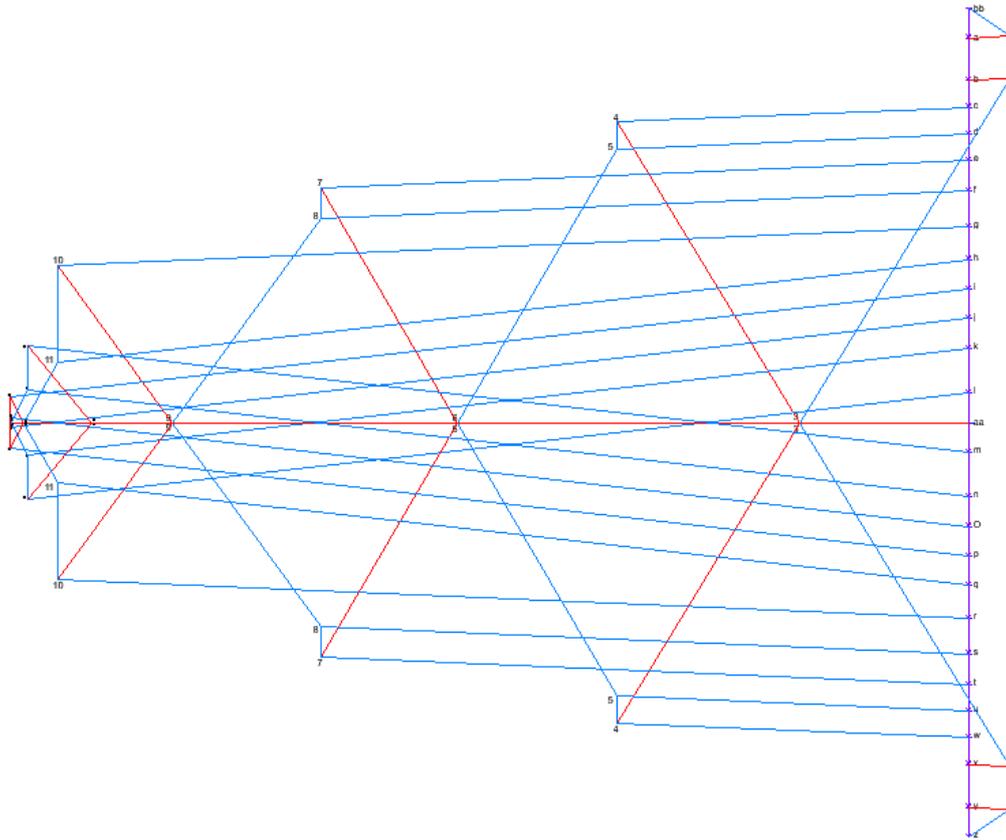


Figura 16. Diagrama de Fuerza Alternativa 5. Fuente: elaboración propia.

4.3 El Teorema de Maxwell en el diseño conceptual

El Teorema de Maxwell se emplea para realizar una comparación cuantitativa entre las alternativas presentadas. En este capítulo se hace uso de este teorema en la manera expuesta por William F. Baker en el artículo titulado “*Structural Innovation: combining classic theories with new technologies*”. El teorema enuncia que el sumatorio del camino de las cargas de tracción en una estructura menos el sumatorio del camino de las cargas de compresión es equivalente al trabajo necesario para que las fuerzas exteriores del sistema cancelen a las reacciones. La expresión del teorema es la siguiente:

$$\sum F_T L_T - \sum F_C L_C = \sum P_i \cdot \vec{r}_i$$

El primer conjunto de la ecuación, $\sum F_T L_T$, es el sumatorio de las fuerzas (axiales) de tracción en cada miembro de la estructura por su longitud correspondiente. El segundo conjunto es el sumatorio para las compresiones. El término a la derecha de la igualdad es el sumatorio del producto vectorial de las fuerzas exteriores por un vector de posición respecto a un origen.

Una de las principales ventajas del teorema de Maxwell cuando se emplea en el diseño preliminar o conceptual de una estructura es que permite determinar el volumen de material de la misma. Una vez conocido el camino total de las cargas, que se define como $\sum F_T L_T + \sum F_C L_C$ es posible obtener el volumen total de material dividiendo a este por el valor de tensión característica del material, σ_k , cuyo valor viene expresado frecuentemente en N/mm². Puede deducirse de aquí que minimizar el camino total de las cargas implica minimizar el volumen de la estructura.

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

El Teorema de Maxwell resulta especialmente potente al combinarlo con la Estática Gráfica, ya que ésta permite obtener de forma directa la longitud de todos los miembros de la estructura midiéndolos sobre el diagrama de forma, y del mismo modo pueden obtenerse los esfuerzos en todos los miembros midiendo sobre el diagrama de fuerza. A partir de los datos obtenidos de los diagramas recíprocos puede determinarse el camino de las cargas de tracción, compresión y total.

Se proporciona una Tabla comparativa entre todas las alternativas (Tabla 2). Esta Tabla proporciona los valores de camino de las cargas de cada una de las alternativas y un ratio de camino de cargas para el cual se ha tomado como alternativa base o de comparación la 4.1.

La última columna de la Tabla proporciona el volumen total asociado a cada estructura. El volumen puede obtenerse dividiendo el camino de las cargas por la resistencia característica del material empleado. Se debe tener en cuenta que se trata de estructuras de madera, y que la resistencia característica es diferente según la dirección en la que actúen las cargas en relación a la dirección de las fibras del material. Por ello, si se busca obtener el volumen asociado al camino de las cargas en compresión, es necesario emplear la resistencia característica a compresión paralela del material. Para la clase resistente de madera GL24h, la resistencia característica a tracción paralela es $\sigma_t = f_{t,0,g,k} = 16,5 \text{ N/mm}^2$, y la resistencia característica a compresión paralela es $\sigma_c = f_{c,0,g,k} = 24 \text{ N/mm}^2$. La expresión utilizada para calcular el volumen total de material de cada alternativa es la siguiente:

$$V_{\text{total}} = \frac{1}{\sigma_t} \sum F_t L_t + \frac{1}{\sigma_c} \sum F_c L_c$$

Alternativa de diseño	Camino de cargas en tracción (kN·m) $\sum F_t L_t$	Camino de cargas en compresión (kN·m) $\sum F_c L_c$	Diferencia entre caminos de carga (kN·m) $\sum F_t L_t - \sum F_c L_c$	Camino de cargas total (kN·m) $\sum F_t L_t + \sum F_c L_c$	Ratio camino de cargas	V_{total} (m ³)
Alternativa 4.1	5405,87	-7168,04	-1762,17	12573,91	1	0,626
Alternativa 4.2	4812,10	-8930,50	-4118,40	13742,60	1,09	0,664
Alternativa 3	14945,38	-17734,48	-2789,09	32679,86	2,60	1,645
Alternativa 5	15606,69	-19827,50	-4220,81	35434,20	2,82	1,772

Tabla 2. Caminos de cargas de las alternativas presentadas y ratios. Fuente: elaboración propia

De la Tabla anterior puede observarse que la alternativa con el menor camino de cargas total es también la alternativa con el menor volumen de material. Los resultados expuestos demuestran como el Teorema de Maxwell constituye una potente herramienta en el diseño conceptual e inicial de una estructura.

Dentro de las alternativas comparadas la Alternativa 4.1 es la que presenta un menor camino de cargas total, y considerando que todas las alternativas se encuentran sometidas a la misma carga, esta alternativa resultaría la más eficiente. Cabe considerar que la Alternativa 4.2, al contrario que el resto, ya contabiliza los pilares del pórtico, y la diferencia respecto a la Alternativa 4.1 es de escasa magnitud analizando el ratio que relaciona los caminos de cargas, siendo el valor para la Alternativa 4.2 respecto a la Alternativa 4.1 de 1,09.

Para realizar una comparativa más precisa entre la Alternativa 4.1 y la Alternativa 4.2 sería necesario contabilizar los pilares de la Alternativa 4.1. Del propio diagrama de fuerza de esta alternativa es posible obtener el valor de la reacción en cada uno de los

apoyos, cuyo valor es de 205,16 kN. Este valor de la reacción se considera como una carga vertical actuando sobre el nudo de unión de la pareja de pilares, y su valor se descompondría de manera que cada pilar recibiese una parte de la reacción, aunque, por tratarse de una carga vertical y dado que uno de los pilares coincide exactamente en dirección con ella, se considera que éste pilar soporta por completo la carga o reacción. El esfuerzo axial en este elemento es por tanto de 205,16 kN, en compresión, y conocida su longitud de 5 m, puede determinarse que el camino de cargas de compresión correspondiente al elemento es $\sum FcLc = 205 \cdot 16 \cdot 5 = 1025,8 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Este valor se repite para al pilar del otro apoyo.

El camino total de cargas de la Alternativa 4.1 una vez contabilizados los pilares presenta un valor de 14625,51 kN·m, superior al valor del camino total de cargas de la Alternativa 4.2.

La Alternativa 3 y la Alternativa 5 quedarían descartadas a la vista de los resultados obtenidos. Estas alternativas presentan caminos de cargas totales cuyo valor duplica al de la Alternativa 4.1. Además de los resultados numéricos es preciso tener en cuenta que una alternativa como la "Alternativa 5" presenta un número de nudos muy elevado respecto al resto de alternativas, lo que la convierte en una solución más costosa a nivel constructivo por el mayor número de nudos a materializar.

5. Descripción de la estructura

5.1 Distribución en planta

La estructura que se diseña presenta unas proporciones en planta de $50 \times 42 = 2100 \text{ m}^2$. Estas son las dimensiones en planta considerando los voladizos de la estructura, mientras que las dimensiones en planta sin contar los voladizos, que generan el espacio interior de la estructura son de $50 \times 27,9 = 1395 \text{ m}^2$. Estos 27,9 m son la distancia entre los ejes de los pilares centrales de la estructura. La distancia de separación entre pórticos es de 5 m, existiendo un total de 11 pórticos. En la Figura 17 aparece la distribución de arranque de pilares (placas de anclaje) sobre la losa de cimentación, con las dimensiones expresadas en m.

Para la losa de cimentación las dimensiones son de $53 \times 30,9 = 1637,7 \text{ m}^2$, siendo esta losa de canto variable.

Los detalles geométricos de la losa pueden consultarse en los planos 4.1 y 4.2 del Documento 2 de este trabajo.

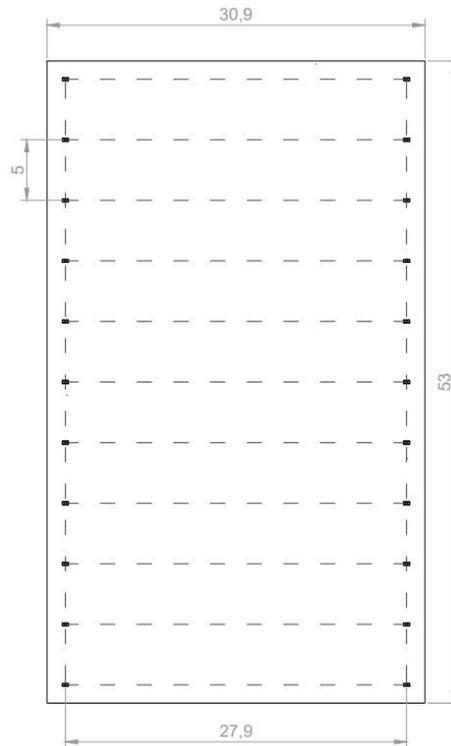


Figura 17. Esquema de la losa con placas de anclaje y ejes. Fuente: elaboración propia.

5.2 Descripción del alzado y de la geometría

El pórtico principal de la estructura se muestra en la Figura 18, donde se representa su geometría. Entre las singularidades del diseño del mismo destacan los generosos voladizos de la cubierta, con una longitud superior a 5 m desde el pilar central. Destaca también el conjunto de tres pilares, con uno vertical central y uno diagonal a cada lado, uniéndose los tres a una placa de acero que conecta con la placa de la cimentación mediante el empleo de un pasador o bulón.

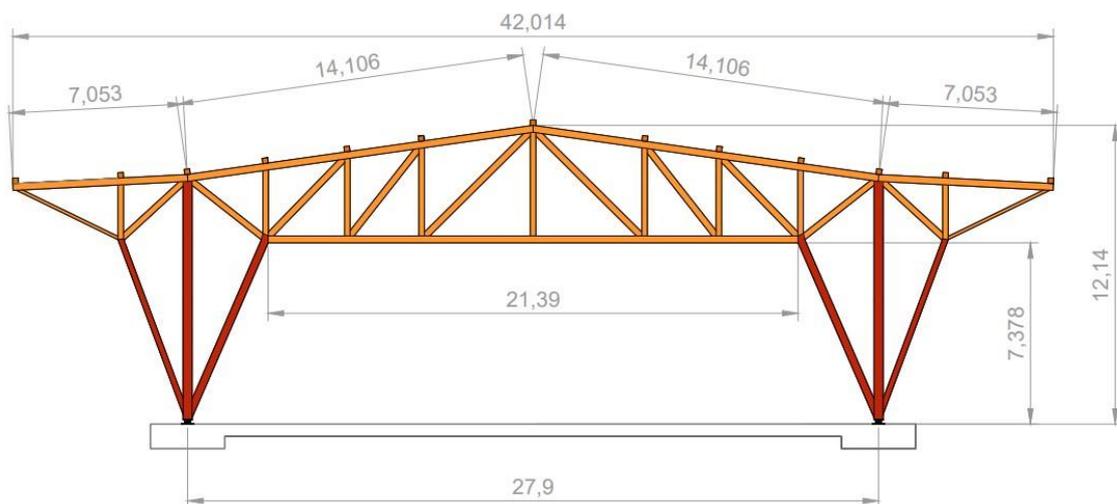


Figura 18. Geometría del pórtico tipo de la estructura. Fuente: elaboración propia.

Se muestra también una vista lateral de la estructura en la Figura 19, siendo esta un corte en sección en el plano longitudinal que pasa por el centro de la sección del pilar central. Las diagonales de la estructura funcionan como arriostramientos principales, siendo las jácenas horizontales que unen los pórticos otro componente de arriostramiento, que permite a su vez la correcta instalación de elementos como ventanas para la fachada lateral.

La Figura 20 muestra otra vista lateral de la estructura, incluyendo en este caso cerramientos, cristalería y cubierta con paneles solares.

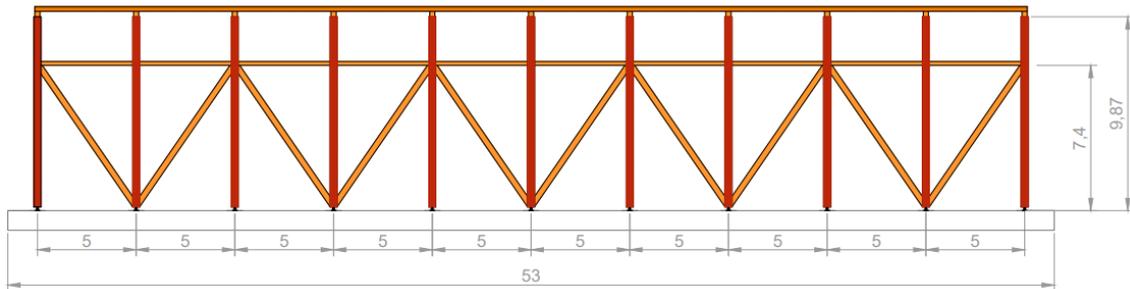


Figura 19. Vista lateral de la estructura en el plano del pilar central. Fuente: elaboración propia.

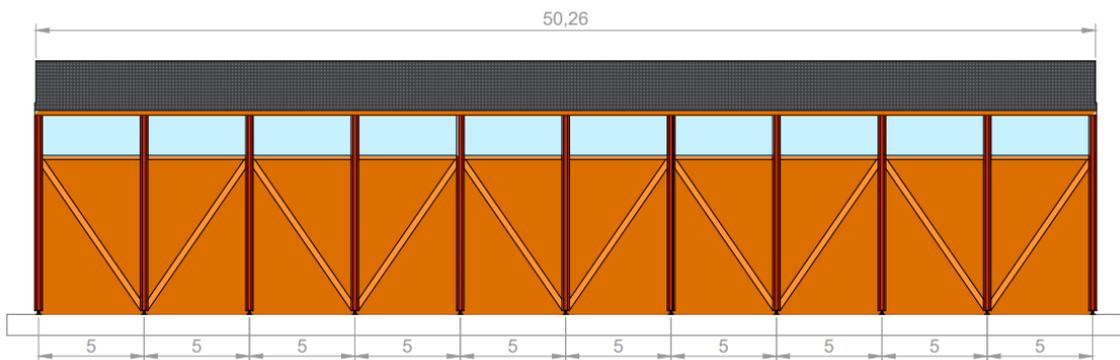


Figura 20. Vista lateral de la estructura con cerramientos. Fuente: elaboración propia.

6. Materiales.

El empleo de elementos de hormigón se limita a la losa de cimentación. Para ejecutar dicha losa se emplea un hormigón HA-25/B/20/XC2. La categoría según clase de exposición se selecciona empleando las especificaciones proporcionadas en el artículo 27 del Código Estructural, Tabla 27.1.a. Los recubrimientos nominales empleados son de 70 mm, y el acero empleado para las armaduras es B 500 S.

Los elementos de acero de la estructura son aquellos que se emplean para materializar las uniones de la misma. Se emplean aceros S 235 y S 275, empleándose el segundo tipo para el anclaje de pilares a la cimentación. Se emplea también acero C50 para los bulones que generan la unión entre la base de los pilares y las placas de anclaje. El acero para los pernos de las uniones es de clase 6.8.

Los elementos principales de la estructura emplean tres tipos diferentes de madera. Estos tres tipos de madera son los siguientes:

- Madera laminada encolada (Glulam) de clase resistente GL24h. Este tipo de madera es de nueva fabricación y constituye el tipo de madera principal empleado en las cerchas.
- Madera de derribo revalorizada de Azobe (equivalente a Hardwood timber D70). Se trata de un tipo de madera maciza con elevadas propiedades mecánicas y resistentes. Es el tipo de madera empleada para los pilares de la estructura.
- Madera de derribo revalorizada C27. Se trata de madera maciza, y su empleo principal en la estructura es en correas y arriostramientos adicionales.
- El resto de madera empleadas son tableros de madera maciza para cerramientos de fachada, tableros de OSB para cubierta y madera C24 para elementos adicionales de soporte de estos cerramientos. La Figura 21 muestra un esquema del tipo de panel empleado en cubierta.

Las características de los materiales de madera, acero y hormigón para la cimentación están descritas en mayor detalle en los Anejos 3.1, 3.2 y 3.3.

Resulta de interés mencionar aquí la naturales ortótropa de la madera. Se proporciona en la Tabla 3 Las características de la madera laminada encolada GL24h, que se obtienen del apartado E.2 del Documento Básico SE-M Madera. Puede observar de la Tabla de propiedades la marcada anisotropía de la madera, presentándose valores diferentes de resistencia característica en función del tipo de esfuerzo al que esté sometida una pieza.

Propiedades		Clase Resistente			
		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Resistencia (característica), en N/mm²					
- Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
- Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
- Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
- Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
- Cortante	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Rigidez, en kN/mm²					
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	11,6	12,6	13,7	14,7
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o -percentil	$E_{0,g,k}$	9,4	10,2	11,1	11,9
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	0,39	0,42	0,46	0,49
- Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	0,72	0,78	0,85	0,91
Densidad, en kg/m³					
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabla 3. Madera laminada encolada homogénea. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente. Fuente: Tabla E.3 Documento Básico SE-M Madera.



Figura 21. Panel sándwich portante tipo (SIP). Fuente: leanhouse.

7. Acciones

7.1 Acciones permanentes.

Se contemplan las siguientes acciones permanentes

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

- Peso propio de los elementos principales de la estructura de madera (GL24h, D70, C27): 4,2 kN/m³; 9,6 kN/m³; 4,30 kN/m³.
- Peso del panel de cerramiento OSB-2 y de las vigas adicionales sobre las que se monta: Peso de paneles 0,2065 kN/m² y 4,12 kN/m³.
- Placas solares tipo “peel-stick”: 0,06 kN/m

7.2 Acciones variables

Dentro de las acciones consideradas como variables se encuentran las siguientes:

- Sobrecarga de uso: sobrecarga con subcategoría de uso G1 (cubiertas accesibles únicamente para conservación), de acuerdo al CTE-DB-SE-AE de valor 0,4 kN/m².
- Sobrecarga de nieve de 0,2 kN/m², de acuerdo al CTE-DB-SE-AE.
- Sobrecarga de viento: presión dinámica de 0,455 kN/m², para una zona de viento B, de acuerdo al CTE-DB-SE-AE.

7.3 Acciones accidentales

Las acciones accidentales contempladas son el sismo, por tratarse de una zona sísmica, y el incendio, especialmente relevante en estructuras de madera. Ambas acciones se detallan en el Anejo 3.1 del Documento 1

8. Descripción de los elementos de la estructura y análisis

La descripción de todos los elementos de la estructura se proporciona en los Anejos 3.1, 3.2 y 3.3. En ellos se dan las dimensiones y características materiales de cada elemento.

Para el cálculo de la estructura ha resultado necesario el empleo de varios métodos o softwares. En el caso de la estructura principal, compuesta por las vigas y pilares y las uniones, el cálculo se aborda principalmente mediante el software RSTAB. Las Figuras 22 y 23 una vista 3D de la estructura completa y de la unión superior central del pórtico.

En el caso del cálculo de la cimentación se combina el empleo de hojas de datos de Excel con un modelado mediante elementos finitos en el software SAP2000. La Figura 24 muestra la malla de elementos finitos empleada para modelar la cimentación.

En todos los casos se ha empleado durante el cálculo, y de manera complementaria, el cálculo manual.

La Figura 25 muestra una vista 3D, de un modelo de la estructura elaborado en Revit. En el Documento 2 se dedica un plano completo a este tipo de vistas de la estructura.

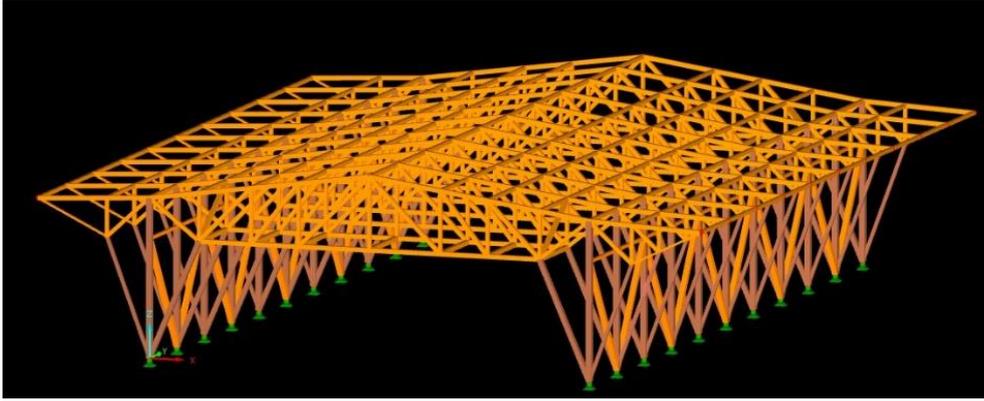


Figura 22. Vista 3D de la estructural (modelo de cálculo). Fuente: elaboración propia.

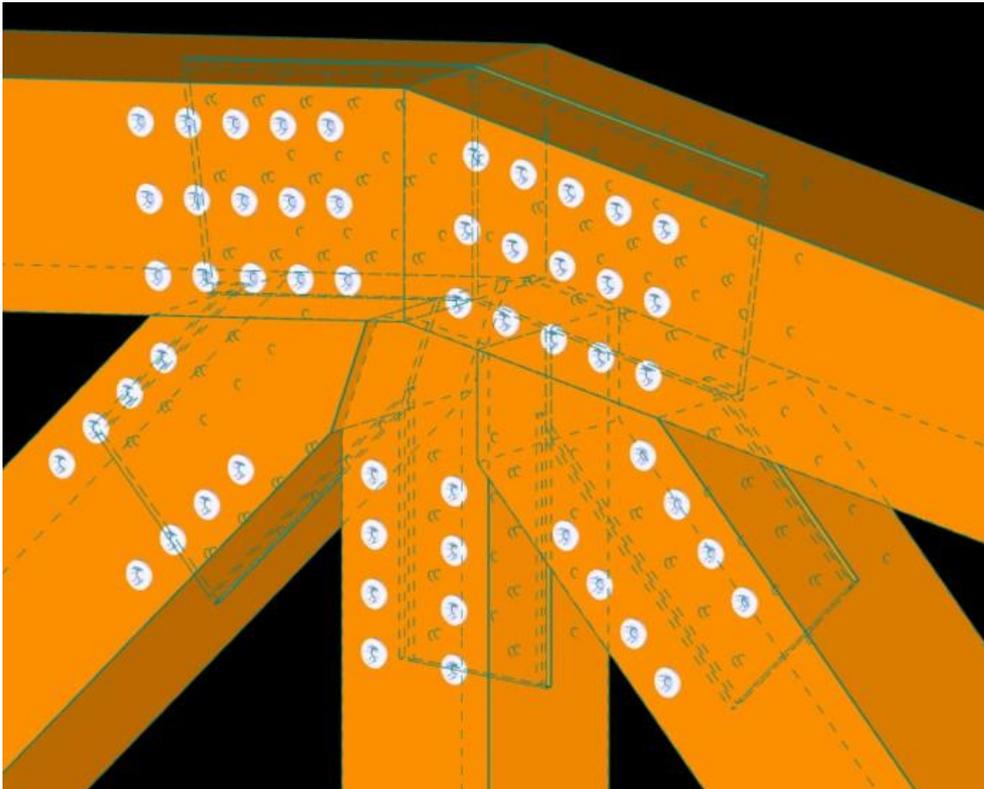


Figura 23. Unión tipo para nudo superior central de la cercha del pórtico. Fuente: elaboración propia.

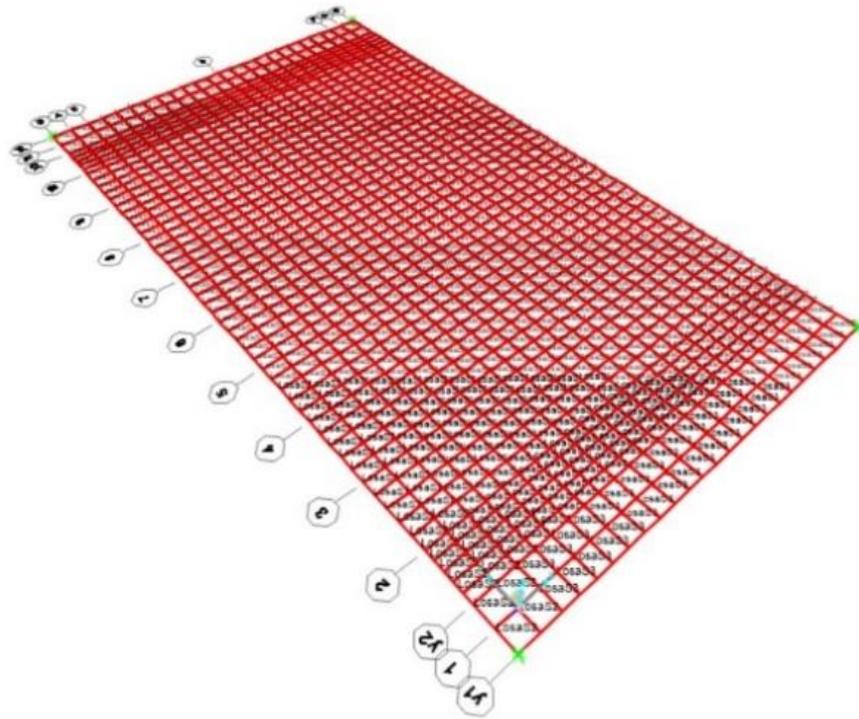


Figura 24. Malla empleada para el modelado y cálculo de la cimentación. Fuente: elaboración propia.

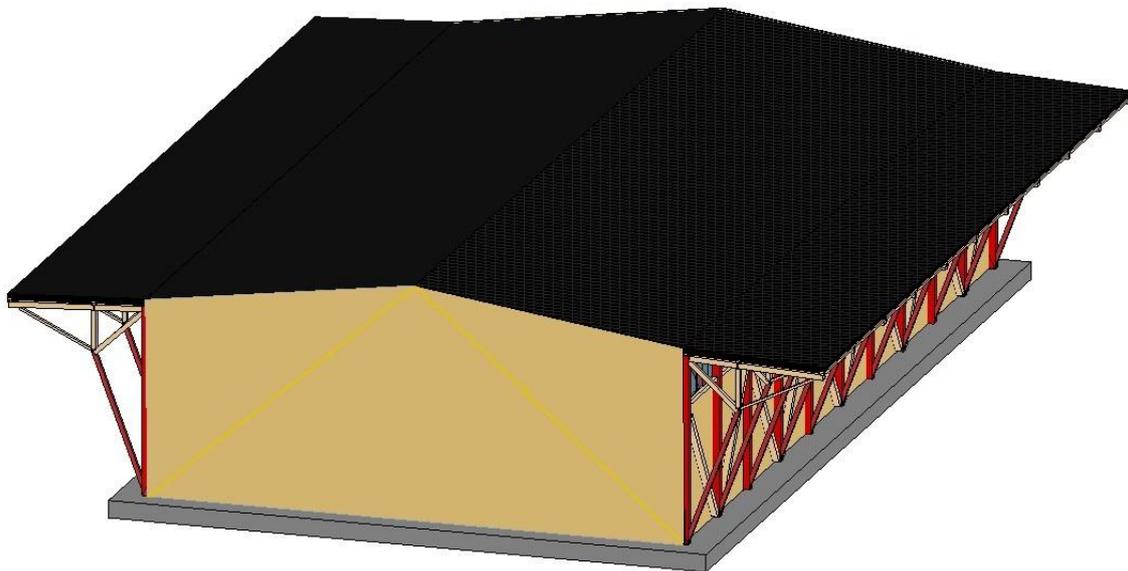


Figura 25. Vista 3D de la estructura, con cerramientos y placas solares. Fuente: elaboración propia.

9. Presupuesto ambiental y relación del TFM con los ODS

Se proporciona en este apartado la relación del TFM con los ODS y un presupuesto ambiental, ambos en formato Tabla (Tabla 4). La valoración y evaluación ambiental, en la cual se emplea el método propuesto por The Institution of Structural Engineers para

Estructura singular con elementos de madera de derribo revalorizada para un espacio polivalente en la Avenida de la Justicia en el Barrio de Los Dolores (Murcia)

la misma en el documento *How to calculate embodied carbon*, puede ser consultada de manera más extensa en el Anejo 5 del Documento 1, donde también se proporciona una explicación completa del valor asignado a cada objetivo.

Material	Componente	Cantidades	Unidades	A1-A3 (tCO ₂ e)	A4 (tCO ₂ e)	A5w (tCO ₂ e)	B4 (tCO ₂ e)	C2-C4 (tCO ₂ e)	D (tCO ₂ e)	Carbón biogénico (tCO ₂ e)	Emisión de carbono (tCO ₂ e)
HA-25	Cimentación	889	m ³	417	29	26		40	-81		512
Glulam GL24h	Vigas y pilares	124	m ³	30	9			97	-31	-96	41
Reuso Madera C27	Vigas y pilares	38	m ³	2	3			27	-9	-27	5
Reuso Madera Azobe	Vigas y pilares	49	m ³	6	8			78	-25	-77	15
Panel Madera "softwood"	Cerramientos	164	m ³	21	13	4		131	-41	-129	39
Panel OSB	Cerramientos	381	m ³	85	30	13		312		-307	134
Cristalería	Cerramientos	4	m ³	14		1					16
Acero S235	Conectores	5273	kg	13					-6		13
Aluminio	Conectores	20	kg								
Productos intumescentes	Protecciones	174	kg				2				3
Paneles solares	Instalaciones	13083	kg	4					-2		5
Excavación	Cimentación	1600200	kg			9					
Madera C24	Cerramientos	8	m ³	1	1			6	-2	-6	2

Tabla 4. Presupuesto ambiental (emisiones de carbono). Fuente: elaboración propia.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.		X		
ODS 4. Educación de calidad.		X		
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.	X			
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.		X		
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.	X			
ODS 12. Producción y consumo responsables.	X			
ODS 13. Acción por el clima.	X			
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.			X	
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.			X	

Tabla 5. Relación del proyecto con los objetivos ODS. Fuente: elaboración propia.

10. Resumen del presupuesto económico

Se proporciona en este apartado un resumen del presupuesto económico del trabajo. El desglose completo de la medición de unidades de obra y los precios de cada una de ésta pueden ser consultados en el Documento 3 de este trabajo.

Capítulo	Importe (Euros)
Capítulo 1. Acciones previas	26735,58
Capítulo 2. Cimentaciones	235217,33
Capítulo 3. Estructura	282021,14
Capítulo 4. Cerramientos	431647,02
Capítulo 5. Elementos de acero	178280,04
Capítulo 6. Sistemas complementarios	258022,91
Presupuesto de ejecución material	1411924,04
13% gastos generales	183550,12
6 % de beneficio industrial	84715,44
1 % seguridad y salud	14119,24
Total	1694308,84
21 % IVA	355804,86
Presupuesto de ejecución por contrata	2050113,70

Tabla 5. Resumen de valoración económica. Fuente: elaboración propia.

11. Plazo de ejecución de obra

Se proporciona en este apartado una Tabla, con las actividades a realizar y su duración estimada, con su correspondiente diagrama de Gantt. Estas actividades se corresponden con las descritas en el “Plano 5.16: Proceso constructivo” del Documento 2 de este trabajo.

Actividades	Inicio	Duración (días)	Fin
1-Despeje y desbroce	24/12/2023	5	29/12/2023
2-Excavación	30/12/2023	7	06/01/2024
3-Ejecución de losa	07/01/2024	20	27/01/2024
4-Prefabricación de elementos	01/11/2023	65	05/01/2024
5-Ejecución pilares pórticos iniciales	27/01/2024	3	30/01/2024
6-Montaje en suelo de cerchas de pórticos iniciales	30/01/2024	2	01/02/2024
7-Montaje Cerchas pórticos iniciales	30/01/2024	2	01/02/2024
8-Montaje resto pórticos	02/02/2024	27	29/02/2024

9-Montaje cerramientos e instalaciones	01/03/2024	30	31/03/2024
10-Seguridad y salud	01/11/2023	151	31/03/2024

Tabla 6. Actividades y duración. Fuente: elaboración propia.

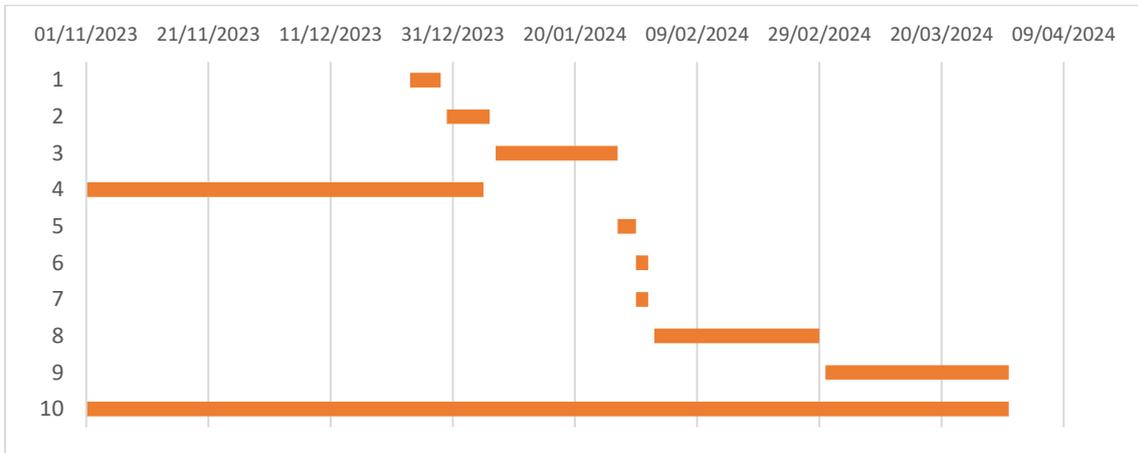


Figura 26. Diagrama de Gantt para las actividades del proceso constructivo. Fuente: elaboración propia.