

Hipótesis sobre el proceso constructivo de la armadura de cubierta del convento de Gracia en Ávila S.XVI

Construction process hypothesis on 16th century Gracias' s convent roof framing in Ávila. S.XVI

M. Ángeles Benito Pradillo 

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, ETSAM, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. España.
ma.benito@upm.es

Sofía Carabaña Lozano 

Departamento de Estructuras y Física de edificación, ETSAM, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. España.
s.carabana.l@gmail.com

Autor de contacto: ma.benito@upm.es

RESUMEN

El Convento de Nuestra Señora de Gracia, situado en Ávila, tiene una cubierta única sobre dos edificios construidos con más de 400 años de diferencia: el bloque Sur construido en el siglo XVI y el bloque Oeste construido a mediados del siglo XX. El objetivo de este artículo es detallar las etapas en el proceso constructivo de esta cubierta. Para ello se plantea una hipótesis de los pasos en los que se ha realizado la construcción de la misma. La metodología utilizada ha sido, en primer lugar, la consulta de planimetría y fotografías existentes y levantamiento de la planimetría detallada de la cubierta. En segundo lugar, se han realizado ensayos no destructivos (END) in situ. Por último, se han realizado análisis en laboratorio y análisis estructurales que permiten verificar la hipótesis propuesta.

Palabras clave: armaduras; madera; estructura de bajocubierta; par e hilera; cercha española; historia de la construcción.

ABSTRACT

The Convent of Nuestra Señora de Gracia, located in Ávila, features a unique roof that covers two structures built 400 years apart: the southern block, from the 16th century, and the western block, from the mid-20th century. The aim of this research is to detail the stages involved in the construction of this roof. To achieve this, a hypothesis is proposed regarding the steps taken during the construction process. The methodology includes, firstly, the review of photographs and existing plans of the convent, as well as the creation of detailed plans of the roof. Secondly, non-destructive testing (NDT) was carried out on site. Finally, laboratory analyses and structural assessments were conducted to validate the proposed hypothesis.

Keywords: truss; wood; roof framing; rafter and purling system; spanish truss; construction history.

Cómo citar este artículo/Citation: María Ángeles Benito Pradillo, Sofía Carabaña Lozano (2025). Hipótesis sobre el proceso constructivo de la armadura de cubierta del convento de Gracia en Ávila S.XVI. Informes de la Construcción, 77 (580): 7112. <https://doi.org/10.3989/ic.7112>

Copyright: © 2025 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Recibido/Received: 10/09/2024

Aceptado/Accepted: 01/07/2025

Publicado on-line/Published on-line: 23/01/2026

1. OBJETO DE ESTUDIO Y MARCO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Presentación del edificio

El conjunto del Convento de Gracia en Ávila data del siglo XVI. Es a partir de entonces cuando comienza a levantarse en un largo periodo de tiempo, junto al cubo sureste de la Muralla de Ávila, este Convento [1]. Las distintas fases de construcción por las que pasó se deben a una cuestión económica y a la necesidad de ampliación del edificio debido al crecimiento de la Comunidad.

De modo general, se puede entender que el conjunto se organiza en torno al patio central de la clausura del convento, El Campito; variando las alturas de los volúmenes desde una planta en la parte de la iglesia hasta tres plantas en la zona Sur para salvar los desniveles existentes entre las diferentes cotas según se muestra en la Figura 1.

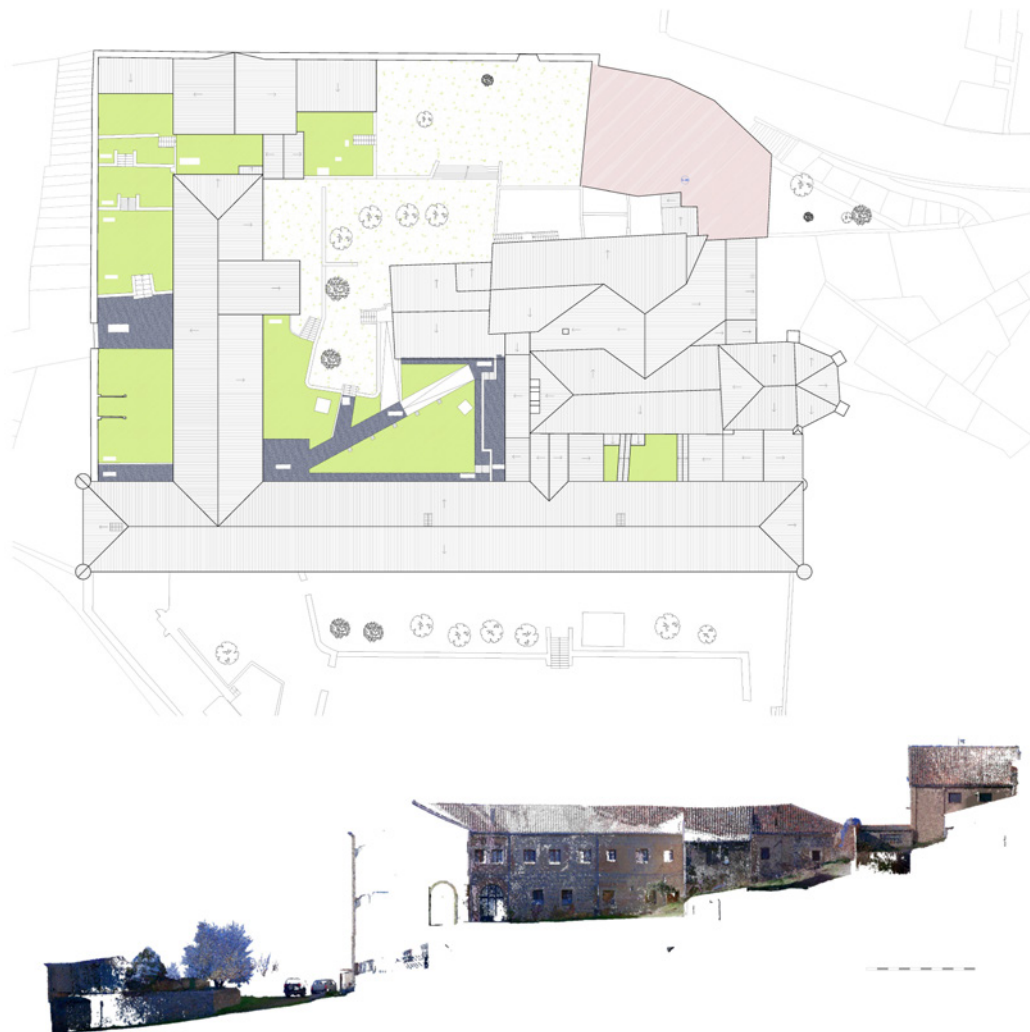


Figura 1. Plano de cubiertas del Convento de Gracia y sección elaborada a partir de nubes de punto mediante escaneado láser.
Fuente: Elaboración propia.

El edificio principal del monasterio se compone de un largo pabellón de sillería de granito, situado al sur de la parcela y dividido en tres plantas que se comunican por dos escaleras, la más amplia, conocida como “La escalera de los Doctores”, en la fachada oeste, y otra escalera de madera situada en el centro de la planta. Este bloque tiene la planta más baja enterrada por el lado norte y abierta al lado sur. En el primer nivel se produce la conexión con el bloque Oeste y con la zona este de la Iglesia. El bloque Oeste se construyó recientemente como veremos en las conclusiones de este artículo.

En relación a la cubierta que nos ocupa en este artículo pertenece tanto al bloque Sur como al bloque Oeste y está conectada por el interior.

El Convento de Gracia se encuentra situado fuera de la muralla frente al bastión sureste de la misma, como se observa en las Figuras 2 y 3. Pertenece al Casco Histórico de Ávila.

El objetivo de este artículo es realizar una hipótesis del proceso constructivo de la cubierta del bloque Sur y Oeste a través de un análisis cronológico, constructivo y estructural. El uso de diferentes tipologías para las armaduras del bajo cubierta empleadas en los cuerpos Sur y Oeste de este complejo arquitectónico permite para plantear una hipótesis del proceso crono-constructivo que se corroborará desde tres puntos de vista: planimetría y fotografía histórica, análisis in situ de vestigios en el propio edificio y comprobación de la viabilidad estructural. Este estudio se apoya también en algunos

análisis de los elementos constructivos de la cubierta mediante métodos no destructivos, realizados en la propia cubierta y otros métodos destructivos llevados a cabo en el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid.



Figura 2. Vista del recinto amurallado (izquierda) y fotografía señalando perímetro del Convento de Gracia. Fuente: Plan Nacional de Orografía Aérea. Instituto Geográfico Nacional. Castilla y León 2006.



Figura 3. Vista del Convento de Gracia desde el norte Fuente: Google Maps.

2. METODOLOGÍA

Para el análisis del espacio del bajocubierta la metodología utilizada contempla el punto de vista histórico junto al análisis experimental in situ en el propio edificio, todo ello con una capacidad de síntesis desde una perspectiva de arquitecto y teniendo en el horizonte los trabajos realizados para la restauración del Convento.

2.1. Consulta de bibliografía

Se han consultado fuentes bibliográficas históricas [2] y [3], el Proyecto de Intervención Arqueológica [4] y los Proyectos Básico [5] y de Ejecución [6] de la Restauración del Convento.

2.2. Pruebas no destructivas y destructivas

Todos los elementos que se han analizado tanto para caracterización END como destructiva se han seleccionado de piezas pertenecientes a los dos bloques repartidas uniformemente en su longitud.

El propósito de estos ensayos tanto destructivos como no destructivos tienen la finalidad de realizar una caracterización mecánica de la madera más aproximada a la existente realmente. Estos datos se utilizarán posteriormente en el análisis estructural.

Ensayo no destructivo para comprobar la humedad:

Se han realizado como trabajo de campo tomas de datos y mediciones in situ, con xilohigrómetro, para ver el contenido de humedad de la madera, además de ensayos no destructivos con penetrómetro WOOD Pecker DCR (Figura 4).

Ensayos no destructivos de densidad:

Otro de los ensayos no destructivos que se ha realizado es el de la densidad, tomando cinco probetas y aplicando el principio de Arquímedes, conociendo la masa previamente de cada una de las probetas y sumergiendo estas en agua destilada para obtener su volumen.



Figura 4. Mediciones con el xilohigrómetro, izquierda. Ensayo con el penetrómetro, derecha. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo destructivo de compresión:

También se han realizado ensayos destructivos de muestras de algunos elementos de cubierta. Se analizaron 5 probetas de 2x2x6 a compresión paralela a la fibra (Figura 5), obteniendo la gráfica de tensión-deformación y deduciendo, como resultado del ensayo, la tensión máxima de rotura. Se ha obtenido la resistencia característica multiplicando el valor medio de los ensayos por 0,75 según Aira (2013) [7].



Figura 5. Probetas para ensayos a compresión (izquierda). Calibración de la probeta (centro). Ensayo de compresión paralela a la fibra (derecha). Fuente: Elaboración propia.

2.3. Levantamiento planimétrico y geometría de la cubierta

Por último, detallar como parte de la metodología utilizada en este estudio el levantamiento realizado de la geometría de los elementos estructurales. Este bajocubierta cubre dos zonas diferenciadas del Convento. Una de ellas la zona de aulario (zona Sur), y la otra zona de dependencias (zona Oeste). El acceso a este bajocubierta se produce por una escalera situada en la planta tercera de la zona Sur. Ambas zonas son de planta rectangular, teniendo una cubierta a cuatro aguas en las esquinas. La cubierta se apoya sobre unos muros de sillería.

Se realiza un levantamiento de este bajocubierta, para poderlo comprender en su totalidad e identificar los elementos que la componen para poder posteriormente analizarlos (Figura 6).

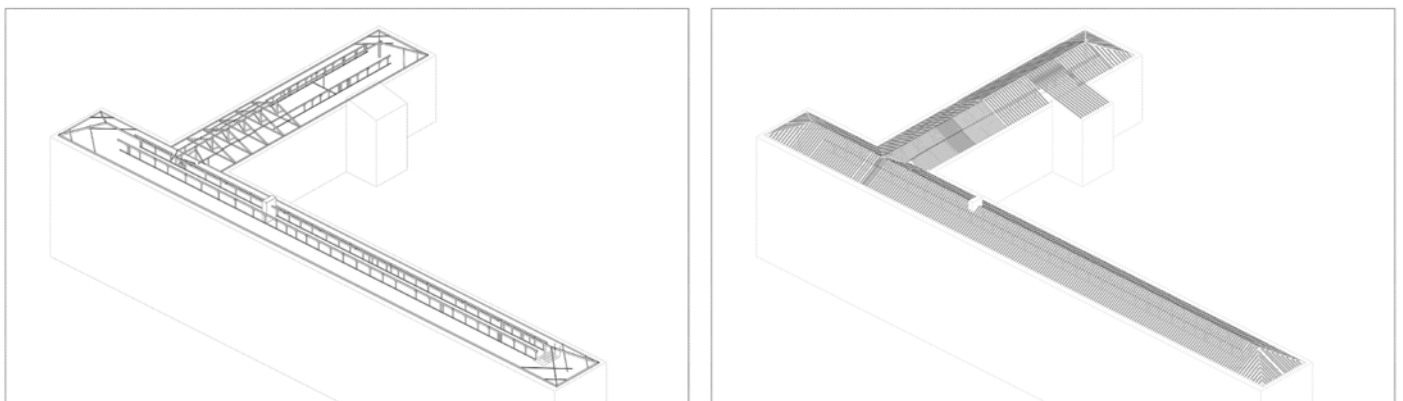


Figura 6. Levantamiento de los elementos de estructura de cubierta, armaduras (izquierda) y colocación de los pares (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Se realiza una medición de cada una de las escuadrías de la estructura de cubierta que se exponen en la Figura 7.

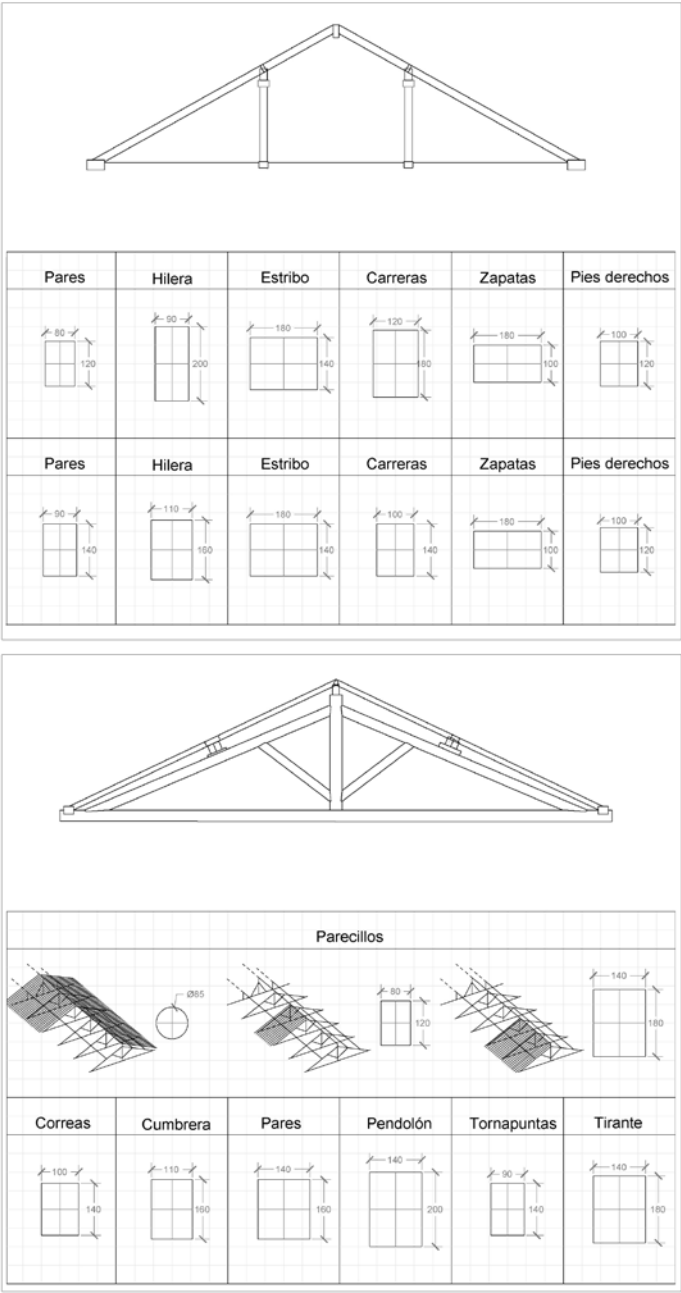


Figura 7. Medición de las escuadrías de las dos tipologías estructurales: par e hilera y cercha española.
Fuente: Elaboración propia.

2.4. Utilización del software para el cálculo estructural

Se utilizará para el cálculo estructural y el análisis de esfuerzos de las dos tipologías estructurales el software Cype 3d. Se detallan en el artículo las bases de cálculo, la definición del modelo y las condiciones de contorno.

3. TIPOLOGÍAS E HIPÓTESIS DE PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA

3.1. Identificación de tipologías

Se trata de dos cuerpos de tipología formal a cuatro aguas y planta rectangular erguidos sobre unos muros de sillería y entramados horizontales de viguetas de madera. El encuentro entre estos cuerpos se da en un único punto, en la zona de unión del bloque Sur y el bloque Oeste.

Alrededor del siglo XVI la técnica constructiva más empleada en España para las armaduras de cubierta era de armadura de pares, llamada así según el criterio establecido por Fernández Cabo [8]. Esta técnica constaba de una serie de vigas de madera paralelas enfrentadas entre ellas, siguiendo la pendiente de la cubierta en forma de ‘v’ invertida. Los extremos descansan en un durmiente o estribo, repartiendo las cargas al apoyo horizontal sobre el que se levanta la cubierta, conformado por el entramado horizontal y el muro de sillería.

En el caso del Convento de Gracia nos encontramos con esta tipología constructiva de armadura de pares e hilera en el cuerpo Sur, en la zona por la que se accede a la cubierta. Los pares acortan su luz introduciendo un elemento de apoyo intermedio debido a la flexión producida sobre los pares por su longitud. Una carrera paralela a la hilera, apoyada sobre zapatas que distribuyen las cargas a unos pies derechos. En el encuentro la unión es de entalladura descansando el par con un corte en barbilla sobre la carrera. Contra el estribo el ensamble es de barbilla a tope [9].

En la Figura 8 se observa la definición de los elementos que componen la estructura de par e hilera.

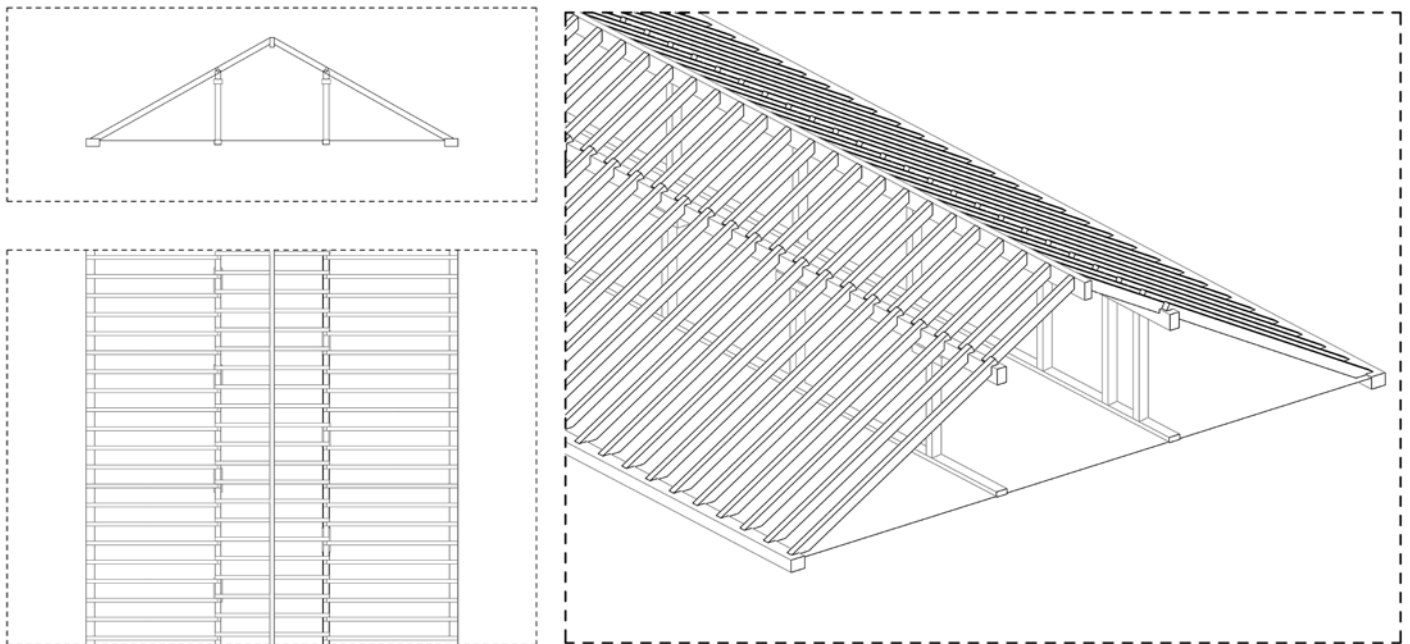


Figura 8. Definición de la tipología de par e hilera en el bloque Sur. Elaboración propia

En las fotografías de la Figura 9 podemos observar desde el interior de la cubierta esta estructura de par e hilera, así como el ensamble en barbilla de los pares con la hilera.



Figura 9. Fotografía de la tipología de par e hilera en el bloque Sur donde se aprecia el apoyo intermedio de viga sobre pilarcillos con zapata y detalle de la unión en barbilla. Elaboración propia.

Sin embargo, en el cuerpo Oeste, a partir del encuentro de ambos arranca una tipología diferente, la cubierta de cerchas a la española. Las cerchas a la española se componen de pendolón y tornapuntas y un tirante (Figura 10). El ensamble se realiza en barbilla.

Cabe destacar que las cerchas a la española no continúan a lo largo de todo el cuerpo Oeste, sino que se vuelve a desarrollar de nuevo la tipología de par e hilera. En las fotografías de la Figura 11 se observa el detalle de la cercha a la española y sus uniones.

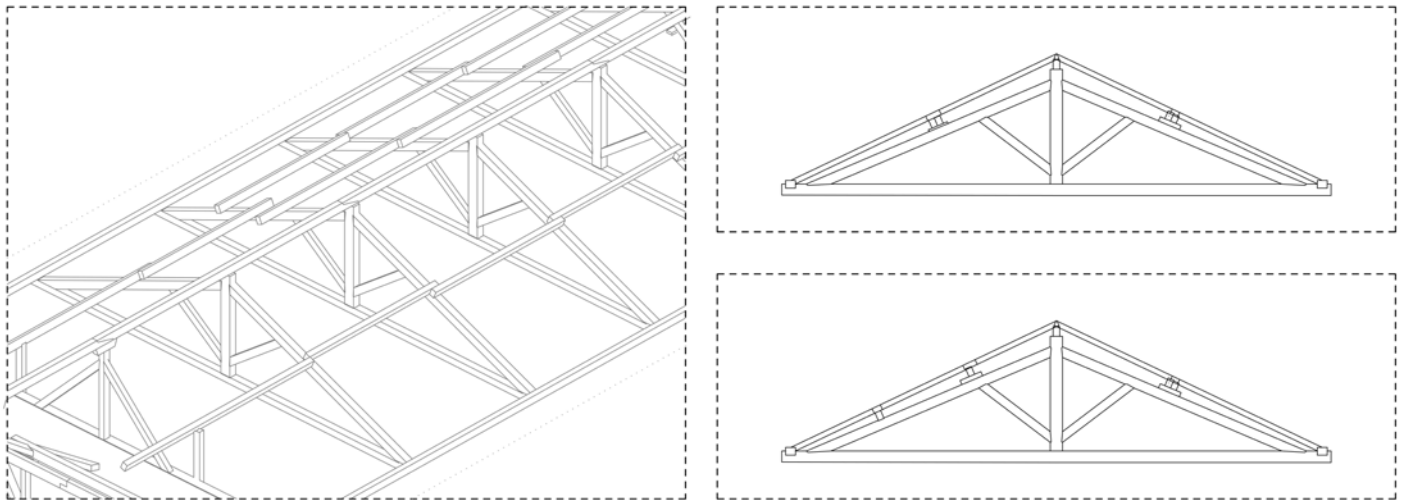


Figura 10. Definición de la tipología de cercha a la española en el bloque Oeste. Elaboración propia.



Figura 11. Izda. Vista de la bajocubierta en el brazo Oeste donde se observa el cambio de tipología de cercha española (izquierda) a tipología de par e hilera (derecha). Fuente: Elaboración propia.

3.2 Hipótesis de proceso constructivo

Se desarrolla a continuación la hipótesis para el proceso constructivo de la unión de la cubierta del bloque Sur con el bloque Oeste. La cubierta del bloque Sur existe con toda seguridad desde el siglo XVII, por una inscripción que encontramos de 1745 (Figura 14). La construcción muy posterior del bloque Oeste obligó al derribo de parte de la cubierta del bloque Sur para realizar la unión de ambas y permite un recorrido continuo por su interior. Se plantea la hipótesis de que el cambio de tipología entre ambas zonas venga dado por una posterior intervención y construcción de la zona oeste.

A continuación, en la Figura 12 se expone una hipótesis sobre los pasos del proceso constructivo.

Paso 1: En un primer momento existiría solamente el bloque Sur, como se observa en la Figura 12a. Cuando se comienza a construir la cubierta del brazo Oeste se eliminan los pares situados en el punto de unión de ambos cuerpos.

Paso 2: Se corta la carrera intermedia de apoyo para los pares y en este espacio de unión se coloca un pie derecho con dos diagonales, tanto en la carrera cortada como en el final del muro perimetral (Figura 12b).

Paso 3: Sobre zapatas en los pies derechos se dispone la nueva cumbrera del cuerpo Oeste, enfrentándose a la hilera del cuerpo Sur, en perpendicular. Esta cumbrera a su vez se apoya en los pendolones de las cerchas. Para reforzar, en el faldón contrario a la unión del cuerpo Sur se añade un nuevo par (Figura 12c).

Paso 4: Las limahoyas que se generan entre los dos cuerpos no son continuas, y se apoyan sobre la nueva cumbrera y los pares existentes. Ambas se resuelven de distinta manera, probablemente por la falta de recursos económicos de la época. Una de ellas acorta la flexión apoyando sobre la carrera intermedia de los pares del cuerpo Sur, y la otra es continua hasta estos pares (Figura 12d).

Paso 5: Se termina colocando los pares retirados en un inicio y se apoyan sobre las nuevas limahoyas como se observa en la Figura 12e. Los nuevos parecillos del cuerpo Oeste apoyan sobre las correas sustentadas por las cerchas. Las secciones empleadas para todos estos nuevos elementos no son iguales en ningún caso. Los parecillos que encontramos sobre las cerchas a la española cambian

la sección de rectangular (como en el cuerpo Sur) a circular. Y en el caso de los pares del cuerpo Sur en el punto de unión se continúa con la sección rectangular puesto que se reutiliza el material previamente retirado. Las propias cerchas a la española tienen secciones mayores con respecto a las empleadas en el cuerpo Sur [10].

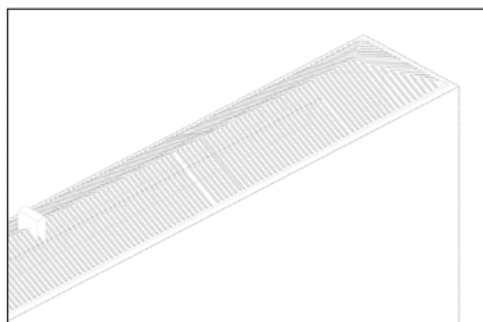


Figura 12a

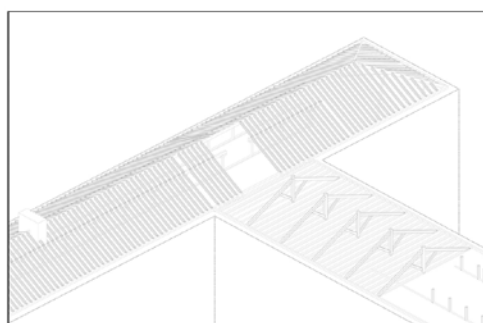
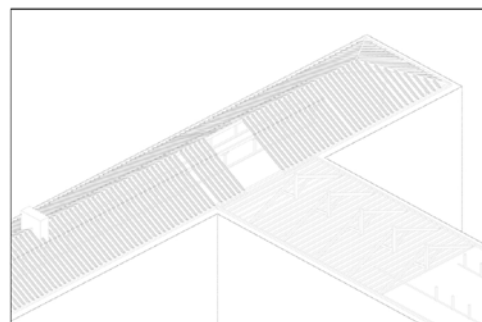


Figura 12b

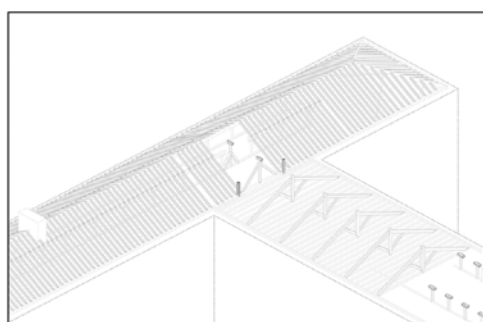
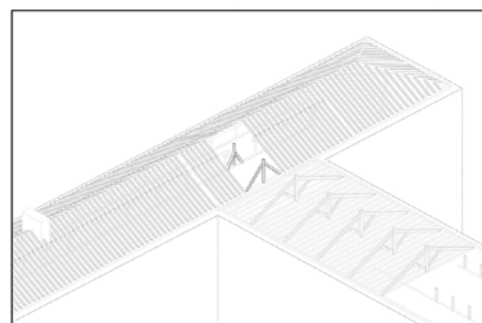


Figura 12c

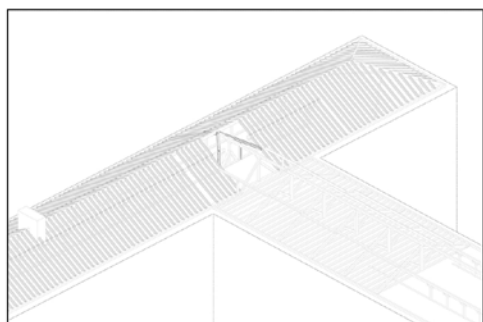
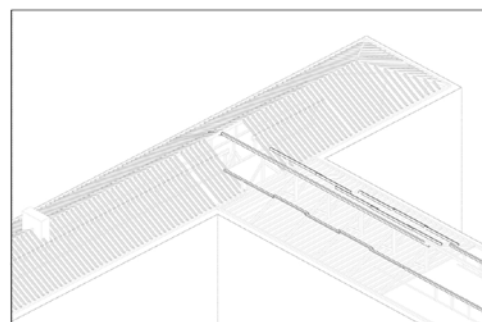


Figura 12d

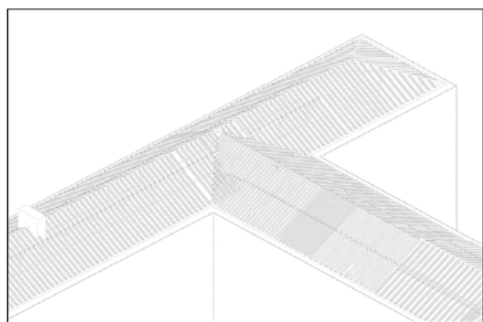
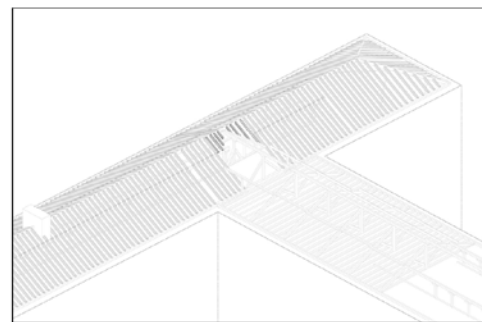


Figura 12e

Figura 12. Proceso de unión de la cubierta del bloque Sur con el bloque Oeste. Elaboración propia.

4. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La identificación de los elementos que componen esta cubierta, y la propia hipótesis de proceso constructivo llevan a realizar un análisis cronológico y constructivo para que se corrobore.

4.1. Planimetría existente

Gracias a la planimetría histórica se puede corroborar que el cuerpo Oeste comienza a aparecer a partir de mediados del siglo XIX. Así mismo, la única comunicación existente del cuerpo Oeste con el cuerpo Sur, además del espacio bajo cubierta, se encuentra a cota de patio. Por lo tanto se deduce que la construcción de ambos cuerpos fue en un lapso de tiempo distinto. Esto podemos verlo en la siguiente Figura 13.



4.2. Vestigios in situ

El análisis de los distintos vestigios que se encuentran in situ corrobora la hipótesis que se plantea. Entre ellos se encuentran, los visibles en el espacio de unión de ambos cuerpos como pueden ser los pares o la carrera intermedia cortada; y las uniones que se producen entre los distintos elementos que conforman las armaduras.

El cuerpo Oeste se construyó a cota diferente dejando a la vista el apoyo de los pares en sus extremos sobre el estribo inferior, y los entramados horizontales que conforman el forjado del espacio bajo cubierta del cuerpo Sur, que apoyan sobre el muro de sillería (Figura 14). También existe una inscripción sobre la carrera horizontal de apoyo intermedio de los pares del cuerpo Sur mostrando las fechas de construcción [11].



Figura 14. Encuentro de los cuerpos Sur y Oeste en el espacio bajocubierta. Fuente: Elaboración propia. Grafito con la fecha 1745. Fuente: Pueblos y culturas de la prehistoria a la actualidad. Sandra Olivero Guidobono. Carmen Laura Paz Reverol.

La ejecución de las uniones varía de un cuerpo a otro. En el cuerpo Sur la unión que se presenta es la de empalme a media madera, permitiendo la continuidad de las carreras y de la viga cumbreira. Diferenciándose del empalme en pico de flauta u oblicuo en el cuerpo Oeste. Estas uniones las encontramos en la hilera o viga cumbreira y permiten darle continuidad a estos elementos. Así mismo el apoyo de cada una de ellas es distinto, en el caso de la tipología par e hilera es gracias a los pares enfrentados, y en el caso de las cerchas es gracias a los pendolones de estas sobre los que descansan los distintos pares (Figura 15).



Figura 15. Uniones en el cuerpo Sur y en el cuerpo Oeste. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis estructural

4.3.1. Clasificación de la madera

Para realizar la comprobación estructural mediante cálculos, se toma como base madera de pino silvestre con una clase resistente C22 para considerar los valores característicos [12], en base a las comprobaciones pertinentes realizadas mediante ensayos no destructivos y destructivos, explicados anteriormente.

Respecto al contenido de humedad de la madera registrado con el Xilohigrómetro, tomando datos en diferentes orientaciones y elementos de la cubierta se consigue conocer el contenido de humedad por cada 100 gr de madera seca. Se puede concluir que nos encontramos en una clase de servicio 2, inferior al 20% y superior al 12% (CTE DB SE M 2.2.2.2. Clases de Servicio). Se pueden leer los datos en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de mediciones de humedad y su interpretación.

Ensayo	Zona (cuerpo) / Orientación	Elemento	Estado sección	Humedad %
1	Sur / sur	Carrera	Hongos y carcoma gruesa	13,3
2	Sur / sur	Carrera	Bueno	13
3	Oeste / oeste	Pie derecho	Bueno: abeto de refuerzo	13,5
4	Oeste / oeste	Pie derecho	Termita	12,2
5	Oeste / oeste	Pie derecho	Abeto con carcoma	12,6
6	Oeste / este	Pie derecho	Termita	12,3
7	Oeste / este	Pie derecho	Bueno: abeto	13,3
8	Oeste / norte	Pie derecho	Abrazadera por termitas	12,8
9	Oeste / norte	Par	Xilofagos	14,8
10	Sur / norte	Carrera	Mancha de humedad antigua	13
11	Sur / norte	Par	Zona de humedad	15
12	Sur / norte	Par	Zona de humedad	16,6
13	Sur / norte	Par	Zona de humedad	14,3
14	Sur / norte	Par	Bolsa de humedad	25,1
15	Sur / sur	Par	Quemado	13,8

Fuente: Elaboración propia.

La metodología basada en la clasificación visual, nos permite identificar el tipo de madera con la que contamos. Así mismo se pueden ver los defectos que afectan a la madera, como pueden ser la presencia de xilófagos, fendas, etc, que determinarán la calidad de esa madera, siendo menor cuantos más defectos encontremos. Sin embargo esta clasificación no es del todo precisa puesto que es necesario comprobar todas las caras de las piezas de madera. La UNE 56544 “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: Madera de coníferas” clasifica la madera de pino silvestre como ME1 o ME2 considerando piezas de pequeña escuadría (b < 70 cm) o rechazo no considerándose madera estructural; pero también clasifica como MEG a las piezas de gran escuadría (b >70 cm). La asignación de clase resistente de esta clasificación según el CTE DB SE M, tabla C.1 del Anejo C, nos indica que el pino silvestre de procedencia española se corresponde de tal manera que ME1 es C27, ME2 es C18, y MEG es C22.

Para conocer la clase resistente de la madera se relaciona el módulo de elasticidad a compresión con el módulo de elasticidad a flexión según proponen V. Baño, F. Arriaga, A. Soilán, y M. Guaita [13]. Una vez obtenidos todos los resultados de los ensayos, determinaremos una clase resistente de C22, con la que podremos considerar los valores característicos de la madera para realizar los cálculos según se muestra en Tabla 2.

Tabla 2. Tabla del módulo de Elasticidad a flexión según los resultados obtenidos.

Módulo de elasticidad a flexión			
Probeta	Ec (N/mm ²)	EM (N/mm ²)	Clase resistente
1	8,99	9,83	C18
2	10,78	11,78	C24
3	8,72	9,53	C20
4	12,99	14,20	C40
5	11,05	12,08	C30

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos todos los resultados de los ensayos, determinaremos una clase resistente de C22, con la que podremos considerar los valores característicos de la madera para realizar los cálculos, de acuerdo a la Tabla 3.

Tabla 3. Clases resistentes de la madera. Coníferas y Chopo.

Tabla E.1 Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente

Propiedades		Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistencia (característica) en N/mm²													
- Flexión	f _{m,k}	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
- Tracción paralela	f _{t,0,k}	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
- Tracción perpendicular.	f _{t,90,k}	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- Compresión paralela	f _{c,0,k}	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
- Compresión perpendicular	f _{c,90,k}	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
- Cortante	f _{v,k}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Rigidez, en kN/mm²													
- Módulo de elasticidad paralelo medio	E _{0,medio}	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o -percentil	E _{0,k}	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	E _{90,medio}	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
- Módulo transversal medio	G _{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad, en kg/m³													
- Densidad característica	ρ _k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
- Densidad media	ρ _{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Fuente: CTE DB SE M.

4.3.2. Análisis de esfuerzos y deformaciones

Para realizar los análisis de esfuerzos y deformaciones se establece previamente una hipótesis en relación a las tipologías ya identificadas.

Bases de cálculo:

Hipótesis de carga considerando peso propio, viento y nieve o mantenimiento (no de forma simultánea) y considerado los coeficientes de seguridad según tabla 4.1. del CTE DB SE.

Valores de cálculo del material se considera el valor seguro Fd teniendo en cuenta el factor de modificación en función de la clase de servicio y duración de la carga (Kmod); el Fk como valor característico de la madera afectado por el coeficiente de seguridad del material γm según la tabla 2.3. del CTE DB SE M. (1)

$$(1) \quad Fd = Kmod * \frac{Fk}{\gamma m}$$

Para el cálculo de esfuerzos, recurriremos al CTE DB SE M. Contando con piezas de sección constante, con respecto al estado límite último, se harán las comprobaciones respectivas a flexión, a flexión esviada, compresión y tracción paralelas a las fibras, cortante, y a solicitaciones combinadas.

La comprobación a flexión tendrá que cumplir (2):

$$(2) \quad \sigma m \leq fmd, \text{ es decir } \frac{\sigma m}{fmd} \leq 1$$

σ_m la tensión de cálculo a flexión

f_{md} la resistencia de cálculo a flexión

La comprobación a flexión esviada tendrá en cuenta los dos ejes de la sección de manera que (3):

$$(3) \quad \frac{\sigma_{my}}{v_m f_{myd}} + k * \frac{\sigma_{mz}}{f_{mzd}} \leq 1$$

σ_m la tensión de cálculo a flexión dependiendo del eje a considerar

f_{md} la resistencia de cálculo a flexión

y, z los ejes de la sección

k el factor de redistribución de tensiones con valor 0,7 para secciones rectangulares y 1 para otras secciones

La comprobación paralela a las fibras (4):

$$(4) \quad \sigma_{co} \leq f_{cod}, \text{ es decir } \frac{\sigma_{co}}{f_{cod}} \leq 1$$

σ_{co} la tensión de cálculo a compresión paralela

f_{cod} la resistencia de cálculo a compresión paralela

La comprobación perpendicular a las fibras (5):

$$(5) \quad \sigma_{c90} \leq f_{c90d} * K_{c90}$$

σ_{c90} la tensión de cálculo a compresión perpendicular

f_{c90d} la resistencia de cálculo a compresión perpendicular

La comprobación a tracción paralela a las fibras (6):

$$(6) \quad \sigma_{to} \leq f_{tod}, \text{ es decir } \frac{\sigma_{to}}{f_{tod}} \leq 1$$

σ_{to} la tensión de cálculo a tracción paralela

f_{tod} la resistencia de cálculo a tracción paralela

La comprobación a cortante (7):

$$(7) \quad \tau_o \leq f_{vd}, \text{ es decir } \frac{\tau_o}{f_{vd}} \leq 1$$

τ_o la tensión a cortante

f_{vd} la resistencia de cálculo a cortante (paralela a la rodadura)

Para el cálculo de la comprobación de las deformaciones se recurrirá al estado límite de servicio.
Para la comprobación a deformación (8):

$$(8) \quad \delta_{tot} = \delta_{inicial} + \delta_{diferida},$$

siendo $\delta_{diferida} = \delta_{inicial} * \Psi_2 * K_{def}$

(Ψ_2) coeficiente de simultaneidad obtenido de la tabla 4.2. del CTE DB SE y

K_{def} el factor de fluencia que depende de la clase de servicio reflejado en la tabla 7.1. del CTE DB SE M

Para realizar los cálculos se ha utilizado el software: cype 3d

Tipología de par e hilera

Se ha simplificado toda la cubierta a una sección regular estándar, aunque todos los pares no son iguales. En relación con los apoyos se considera que están impedidos los movimientos en los ejes x e y que definen el plano del eje longitudinal del par, con giro libre según Candela y Ariza [14].

En la cumbre el encuentro se produce enfrentando los pares, por lo que se ha definido como una articulación. El apoyo intermedio se considera empotramiento ya que en la mayoría de los casos es la misma barra y en ningún caso permite giro. Se muestra en la Figura 16 el modelo de barras y nudos utilizado en el análisis.

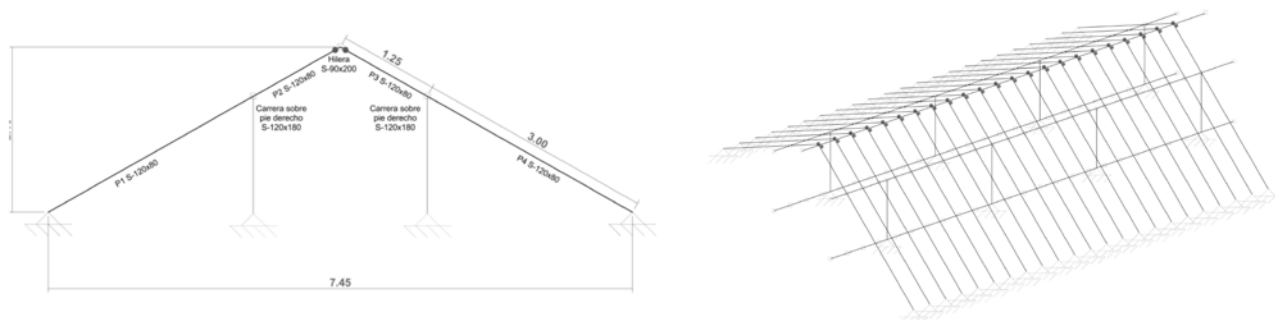


Figura 16. Esquema de barras y nudos de la tipología de par e hilera. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4 se resumen los resultados del análisis realizado para la tipología de par e hilera. Interpretando estos datos se deduce que las secciones de la cubierta de par e hilera se encuentran son adecuadas para resistir los esfuerzos a los que están solicitados los diferentes elementos. La tensión de trabajo de cada uno de los elementos está por debajo de las tensiones de cálculo de una madera C22.

Tabla 4. Resultado del análisis para la tipología de par e hilera.

Par - hilera								
Barra	Sección	Resistencia	σ_m Mpa	σ_m esviada Mpa	σ_{co} Mpa	σ_{to} Mpa	τ_d Mpa	δ (mm)
P1	120 x 80	45,50%	0,44	6,44	0,26	-	0,01	14,12
				0,42				
P2	120 x 80	18,74%	2,63	2,63	0,19	-	0,01	6,75
				0,17				
P3	120 x 80	18,74%	2,63	2,63	0,19	-	0,01	6,75
				0,17				
P4	120 x 80	45,50%	0,44	6,44	0,26	-	0,01	14,12
				0,42				

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 17 se muestran los diagramas de axiles, momentos flectores y deformaciones que se han analizado con el software Cype 3d.
De igual manera se comprueban las carreras y los pies derechos que suponen el apoyo intermedio de los pares para el acortamiento de su luz y se muestran en la Tabla 5.

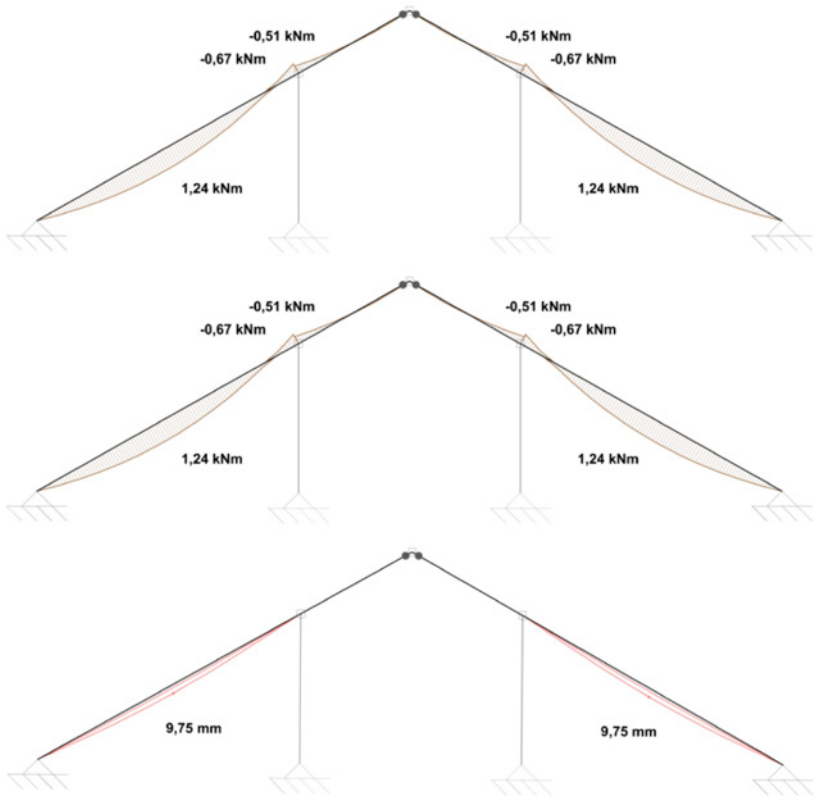


Figura 17. Diagrama de axiles, momentos y deformada para la tipología de par e hilera. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Resultado del análisis para la tipología de par e hilera en las carreras y pies derechos.

Barra	Sección	Resistencia	σ_m Mpa	σ_m esviada Mpa	σ_{co} Mpa	τ_d Mpa	δ mm
Carreras	140 x 100	88,36%	11,35	11,35	0,01	0,05	1,64
				3,75			
Pies derechos	120 x 100	50,73%	3,87	3,87	2,4	0,07	1,49
				1,48			

Fuente: Elaboración propia.

Los esfuerzos axiles que se producen en los pies derechos son de compresión obteniéndose un valor de -29,64 kN. En cambio, en las carreras predomina la flexión, encontrando valores de momento máximo a positivos de 2,22 kN y valores de momento máximo a negativos (en el apoyo con las zapatas y pies derechos) de -4,43 kN. Es por eso que las zapatas ayudan a distribuir la carga al pie derecho y que así no se produzca punzonamiento.

Se presenta en la Figura 18 los resultados obtenidos utilizando el software Cype cad 3d, tanto los diagramas de esfuerzos axiles como los de momentos flectores.

Tipología de cercha de pendolón y tornapuntas.

Esta tipología como ya hemos visto emplea mucho más material para cargas similares. De igual manera, se regularizan las escuadrías para poder llevar a cabo las comprobaciones. Los parecillos o cabios, son de sección circular y rectangular dependiendo del tramo, pero de menor escuadría con respecto a la tipología par hilera. Estos reciben todas las cargas de la cubierta y las transmiten a las correas en forma de cargas puntuales. Así mismo las correas las transmiten también como cargas puntuales a los pares de las cerchas.

Se consideran los apoyos para cada una de las barras como articulaciones. El encuentro entre parecillos y estribo permite el giro, por lo que se considerará un apoyo. En el caso del encuentro entre par y tirante de la cercha sabemos que el conjunto apoya sobre el muro. En la Figura 19 se puede ver el modelo utilizado para el cálculo.

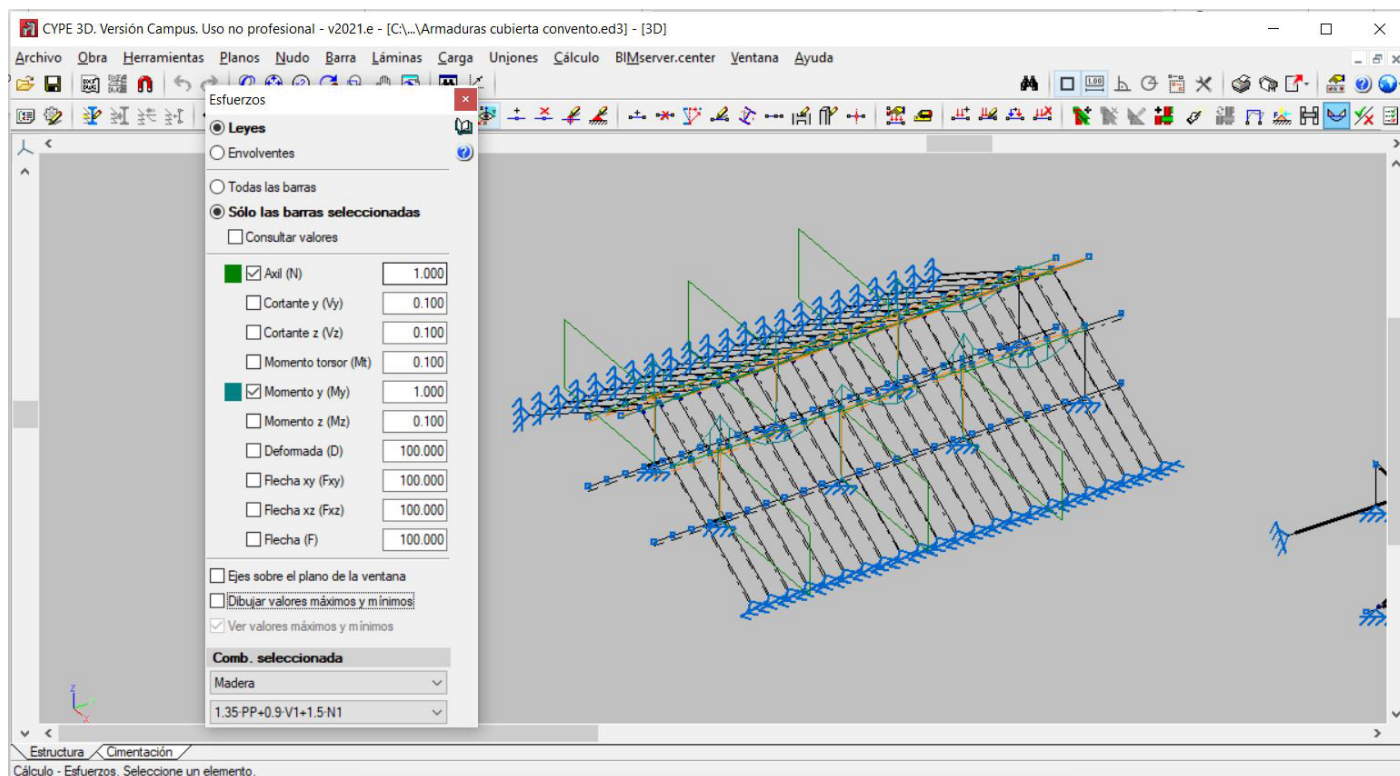


Figura 18. Diagrama de esfuerzos axiales y momentos flectores en las barras de la tipología par e hilera. Fuente: Elaboración propia.

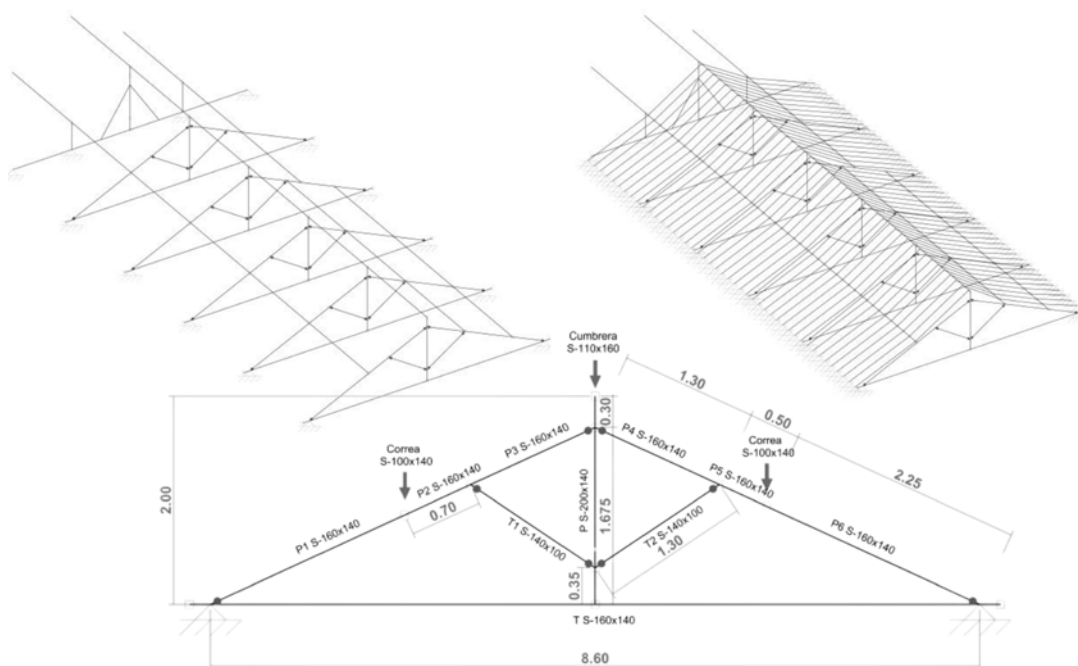


Figura 19. Esquema de barras y nudos de la tipología de cercha de pendolón y tornapuntas. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6 se muestran los valores de las comprobaciones realizadas, se observa que las cerchas nunca llegan a su máxima capacidad de resistencia, y se encuentran todas las tensiones de cálculo por debajo de las que resiste la madera C22.

Tabla 6. Resultado del análisis de todas las barras de la tipología de la cercha de pendolón y tornapuntas.

Cercha pendolón y tornapuntas tipo 1								
Barra	Sección	Resistencia	σm Mpa	σm esviada Mpa	σco Mpa	σto Mpa	τd Mpa	δ mm
P1	160 x 140	61,68%	6,67	6,67	02,05	-	0,01	6,9
				0,06				
P2	160 x 140	93,15%	11,07	11,07	6,67	-	0,01	6,46
				0,26				
P3	160 x 140	65,82%	7,44	7,44	2,13	-	0,01	2,38
				0,17				
P4	160 x 140	56,47%	5,9	5,9	2,1	-	0,02	2,38
				0,4				
P5	160 x 140	69,23%	9,34	9,34	2,68	-	0,05	4,96
				0,55				
P6	160 x 140	51,00%	4,84	4,84	2	-	0,01	5,48
				0,25				
Pendolón	200 x 140	13,16%	0,4	0,4	-	0,97	0,01	2,44
				0,01				
T1	140 x 100	15,20%	-	-	1,62	-	-	2,31
				-				
T2	140 x 100	56,51%	-	-	1,77	-	-	2,3
				-				
Tirante	160 x 140	3,44%	0,25	0,25	-	0,03	0,01	2,33
				0,01				

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 se muestran los diagramas de axiles, momentos flectores y deformaciones que se han analizado con el software Cype 3d para este modelo de cercha con pendolón y tornapuntas.

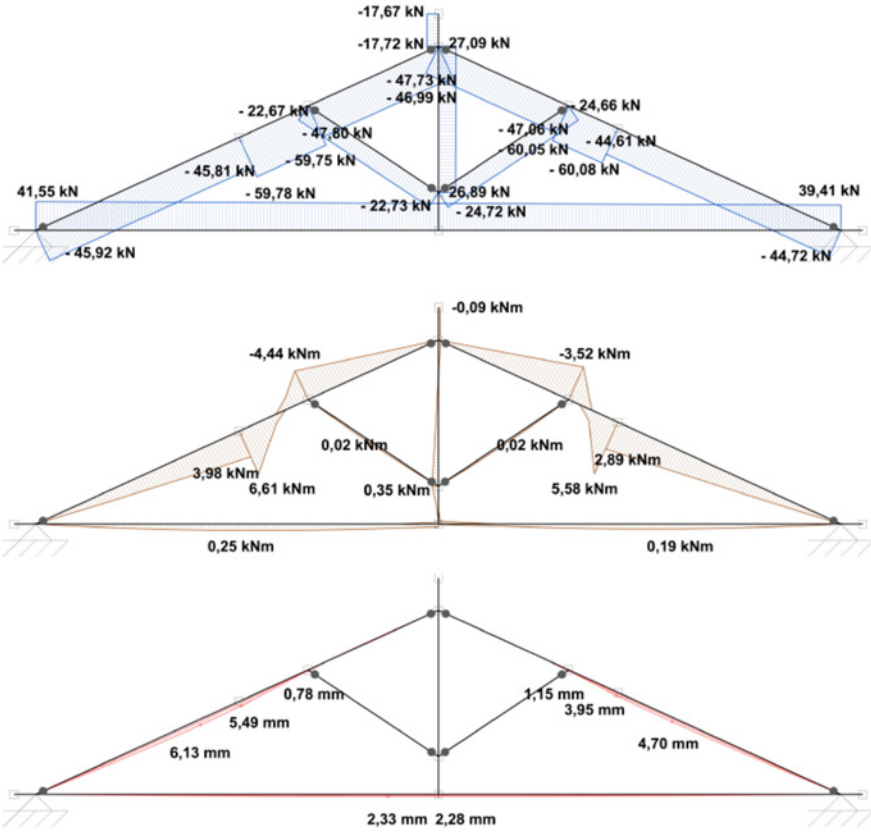


Figura 20. Diagrama de axiles, momentos y deformada para la tipología de cercha con pendolón y tornapuntas.
Fuente: Elaboración propia.

Se comprueban las correas y los parecillos, en la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7. Resultado del análisis de las correas y parecillos.

Cercha pendolón y tornapuntas tipo 1							
Barra	Sección	Resistencia	σm Mpa	σm esviada Mpa	σco Mpa	τd Mpa	δ mm
Correas	140 x 100	65,82%	6,96	6,96	0,18	0,19	12,56
				1,3			
Parecillos/rollizos tipo 1	Φ 85	98,19%	10,45	10,47	0,55	0,04	11,27
				2,2			
Parecillos/rollizos tipo 2	Φ 85	66,21%	9,69	9,69	0,43	0,03	10,24
				0,96			

Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos que se producen en las carreras son principalmente de flexión obteniéndose valores de momento máximo positivos de 2,42 kN y valores de momento máximo negativo (en el apoyo con los pares de las cerchas) de -4,52 kN (Figura 21). En el apoyo de la carrera en la cercha se coloca una pieza de madera que ayude a distribuir las cargas, igual que ocurre con las zapatas en el apoyo de las carreras sobre los pies derechos.

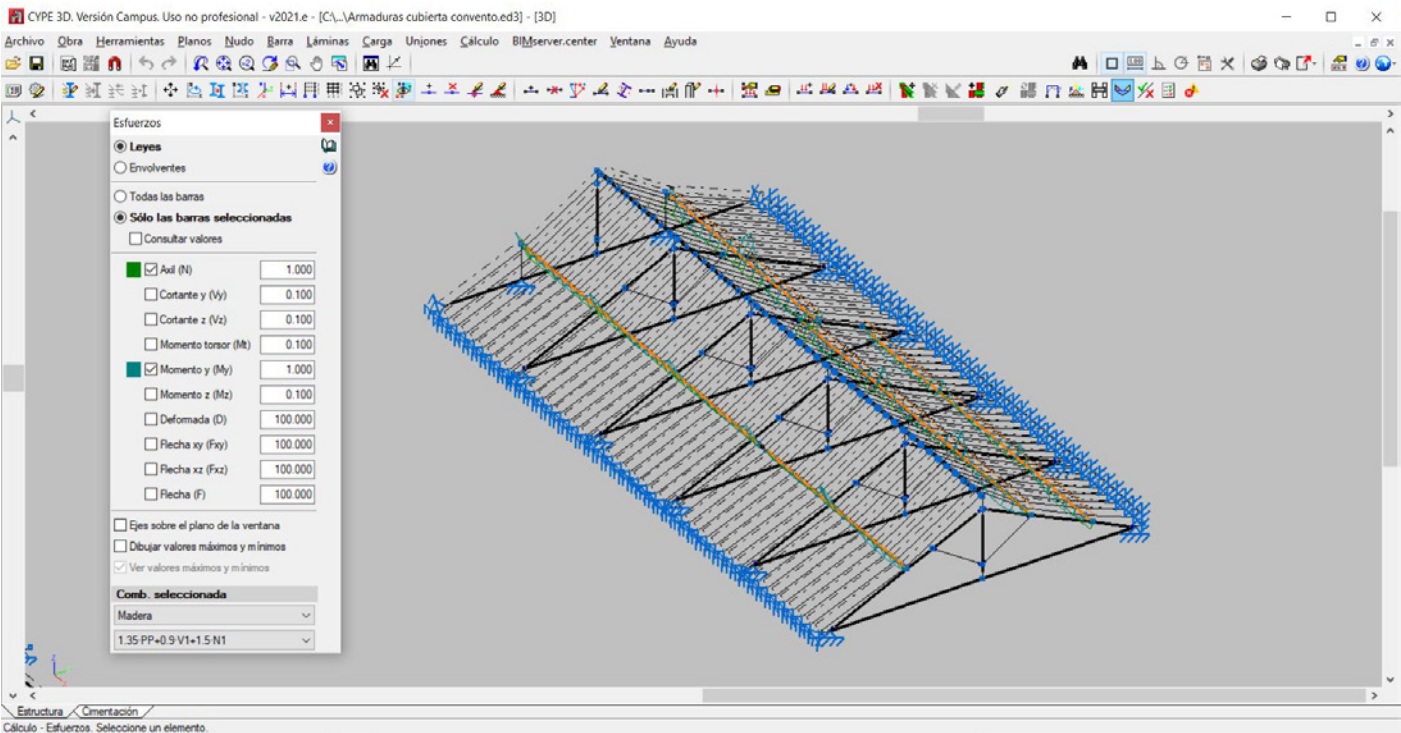


Figura 21. Diagrama de momentos flectores en las barras de la tipología cercha a la española. Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Evaluación

Después de analizar ambas tipologías, se hace patente que la tipología de par hilera es suficiente para resistir las cargas sin deformación mayor que la permitida, se ha considerado hipótesis de carga con peso propio, viento y nieve. En el caso de la tipología de cerchas, se concluye que están sobredimensionadas y se ha comprobado, después del análisis, que las secciones trabajan por debajo de la tensión segura, por lo que podrían ser escuadrías menores.

Se ha podido comprobar que la tipología par e hilera trabaja a flexo compresión y la tipología de cerchas con correas reduce los esfuerzos a flexión y aumenta los axiles. Por ello se deduce que construir con la tipología par e hilera sale más rentable que continuar con las cerchas, esto fue lo que sucedió en la construcción del bloque Oeste iniciado con cerchas y terminado con estructuras de par e hilera

En el análisis que se ha realizado no se han hecho las comprobaciones respectivas de las uniones, pero sería importante considerarlas también, puesto que suponen una reducción de sección.

5. CONCLUSIONES

Se puede concluir que la realidad y la teoría difieren, puesto que los recursos y la ejecución no se dan de igual forma. Las cuestiones económicas o circunstanciales implican el uso de los elementos de material disponible, así como de las técnicas. Esto se evidencia viendo distintas secciones en los pares de la cubierta, así como un elemento de apoyo intermedio de una carrera en vez de un nudillo como solución a la flexión de los pares.

Ayudándonos de la cartografía histórica y de los vestigios en el propio edificio ha sido posible plantear una hipótesis en el proceso cronoconstructivo que se ha corroborado con un análisis

estructural. Para este cálculo se ha partido de la resistencia de la madera conocida por medio de métodos destructivos y no destructivos lo que dota a este estudio de un mayor acercamiento a la realidad.

El desarrollo de las tipologías de par e hilera se corresponde con la técnica constructiva más empleada en el momento en el norte de España y de centro Europa, siendo más tardío el desarrollo o empleo de la cercha a la española.

De la misma manera, se demuestra mediante un análisis estructural, como la tipología par e hilera es más rentable debido a que con menor empleo material consigue resistir las cargas; ya que las cerchas se ha comprobado que están sobredimensionadas. Debido a esto se determina que hubo un cambio de tipología de cercha a la española, que aparece en los primeros tramos, a par e hilera en el tramo final.

Se considera acertada la opción en la construcción de una cubierta única para los dos bloques, aunque para ello fuera necesario el desmontaje de parte de la cubierta ejecutada previamente en el bloque Sur. La principal ventaja es que permite el acceso a toda la cubierta por la misma escalera desde la planta segunda. Este acceso se realiza a través de una escalera muy cómoda que permite la revisión periódica del interior de la bajocubierta. Esto posibilita otra ventaja en el mantenimiento del edificio, especialmente en la detección y solución de goteras y humedades por filtraciones.

De no haberse realizado la cubierta en continuidad por su interior, se hubiera necesitado otro acceso para el mantenimiento de la bajocubierta del bloque Oeste.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

María Ángeles Benito Pradillo: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Sofía Carabaña Lozano: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] M. Serna Martínez, *Ávila. Historia y Leyenda. Arte y Cultura*, 3rd ed. Ávila, España, 2004, pp. 309–316.
- [2] C. M. Ajo González, *Ávila I. Fuentes y Archivos*. Madrid, España, 1962.
- [3] M. Gómez Moreno, *Catálogo Monumental de España: Provincia de Ávila, 1900–1901*. Madrid: Ministerio de Instrucción Pública y Bellas Artes, 1901.
- [4] B. Cabrera González, “Proyecto de intervención arqueológica. Convento Nuestra Señora de Gracia (Ávila). Proyecto de rehabilitación, reforma y obra nueva en Convento Nuestra Señora de Gracia,” informe técnico, Ávila, España, 2021.
- [5] M. A. Benito Pradillo and L. C. García Palomo, “Proyecto básico de rehabilitación, reforma y obra nueva en el Convento de Ntra. Sra. de Gracia para uso religioso, residencia, dependencias culturales y salón de actos en calle Cuesta de Gracia, n.º 4 (Ávila),” informe técnico, Ávila, España, 2020.
- [6] M. A. Benito Pradillo and L. C. García Palomo, “Proyecto de ejecución de rehabilitación, reforma y obra nueva en el Convento de Ntra. Sra. de Gracia para uso religioso, residencia, dependencias culturales y salón de actos en calle Cuesta de Gracia, n.º 4 (Ávila),” informe técnico, Ávila, España, 2023.
- [7] J. R. Aira Zunzunegui, “Análisis experimental y por el método de los elementos finitos del estado de tensiones en uniones carpinteras de empalme de llave,” Ph.D. dissertation, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [8] M. C. Fernández Cabo, “Armaduras de cubierta en la región leonesa: bases documentales y criterios para el análisis, clasificación y evolución de las tipologías estructurales de la cubierta en la región leonesa,” Ph.D. dissertation, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, España, 1991, p. 117.
- [9] E. Nuere, *Dibujo, geometría y carpinteros en la arquitectura*. Madrid, España: Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, 2012.
- [10] S. Carabaña Lozano, “Estructuras históricas de madera: armaduras de cubierta. Caso práctico: Convento Nuestra Señora de Gracia en Ávila,” Bachelor's thesis, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2021.
- [11] R. Moreno Blanco, “El monasterio de Nuestra Señora de Gracia en Ávila: nuevos hallazgos,” in *Pueblos y Culturas de la Prehistoria a la Actualidad, Colección Conocimiento Contemporáneo*, C. L. Rodríguez, Ed. Madrid, España: Dykinson S.L., 2023, pp. 744–776.
- [12] R. Argüelles Álvarez and F. Arriaga Martitegui, *Estructuras de madera: diseño y cálculo*. Madrid, España: AITIM, 1996.
- [13] V. Baño et al., “Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation,” *Biosystems Engineering*, vol. 109, pp. 241–249, 2011, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.05.008.
- [14] A. L. Candela and I. Ariza, “Funcionamiento estructural de las armaduras de par y nudillo. Metodología de análisis,” in *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, S. Huerta, Ed. Cádiz, España, Jan. 27–29, 2005. Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, Arquitectos de Cádiz, COAAT Cádiz, 2005.