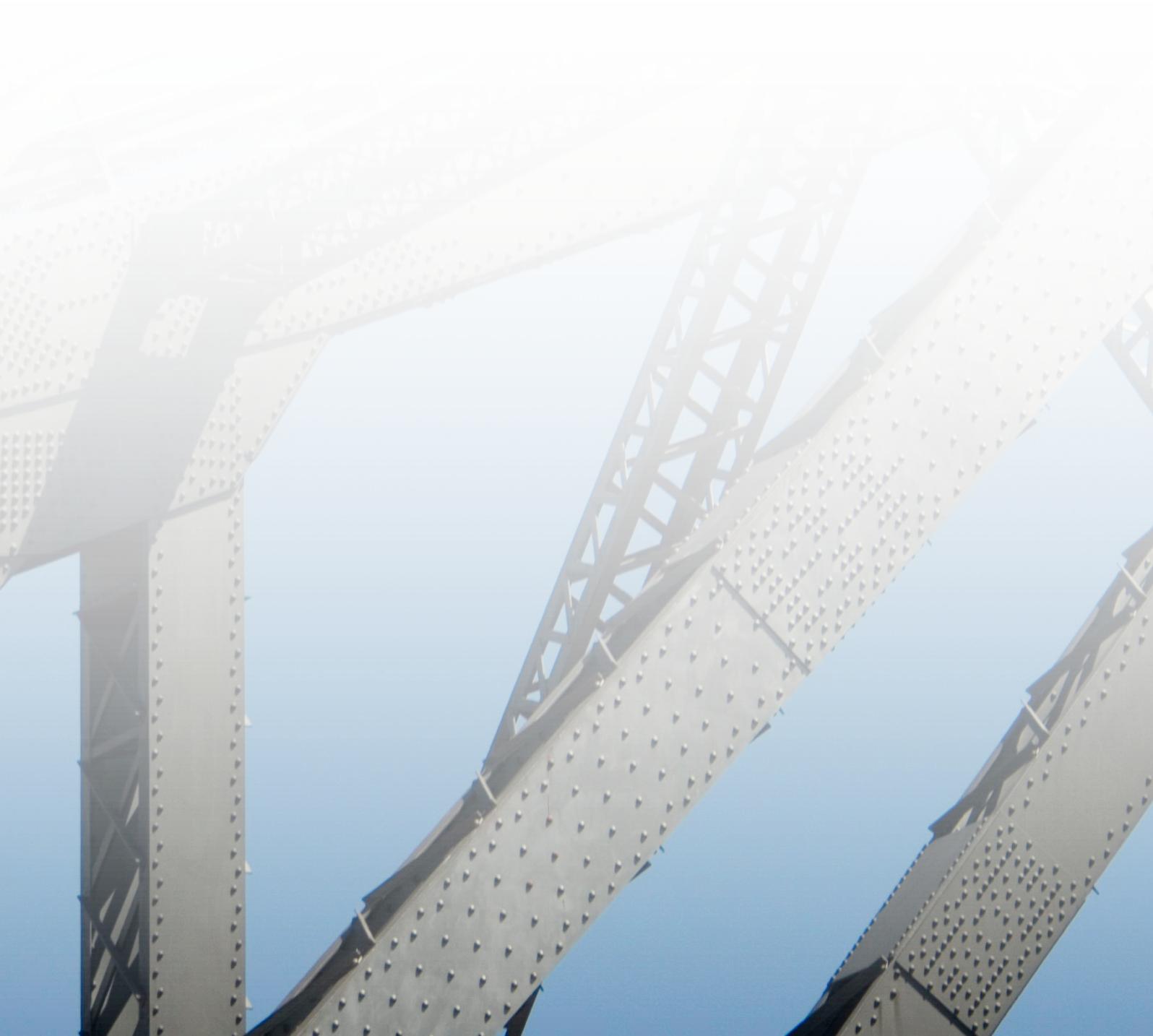


CERCHAS Y CELOSÍAS

RAZÓN DE SER Y DESARROLLO DE SOFTWARE



ALUMNO: DAVID MALAGÓN ZAFRA
TRABAJO FIN DE GRADO 2017-2018
E.T.S. ARQUITECTURA DE GRANADA
TUTOR: JAVIER SUÁREZ MEDINA



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. OBJETIVOS / METODOLOGÍA	
05	1.1. OBJETIVOS
06	1.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO
2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA	
08	2.0. INTRODUCCIÓN
	2.0.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA
21	2.0.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE CERCHAS
22	2.0.3. MÉTODOS DE CÁLCULO
24	2.0.4. JUSTIFICACIÓN MECÁNICA_ELEMENTOS BIAPOYADOS
26	2.0.5. ESQUEMAS DE TRANSMISIÓN DE ESFUERZOS
28	2.0.6. CONCLUSIONES
29	2.1. TIPO INGLESA [MADERA]
30	2.2. TIPO POLONCEAU [METÁLICA]
31	2.3. TIPO PRATT [METÁLICA]
32	2.4. TIPO HOWE [METÁLICA]
33	2.5. TIPO FINK [METÁLICA]
34	2.6. DIAGRAMAS COMPARATIVOS DE CERCHAS
3. VIGAS EN CELOSÍA	
36	3.0. INTRODUCCIÓN
	3.0.1. EL COMIENZO DE LA TRIANGULACIÓN
37	3.0.2. JUSTIFICACIÓN MECÁNICA_VIGAS BIAPOYADAS
40	3.0.3. EJEMPLO PRÁCTICO_COMPARATIVA DE VIGAS
41	3.0.4. EJEMPLOS DE DISEÑO
42	3.1. TIPO WARREN [PLANA]
43	3.2. TIPO HOWE [PLANA]
44	3.3. TIPO PRATT [PLANA]
45	3.4. TIPO LONG O CRUZ DE SAN ANDRÉS
46	3.5. DIAGRAMAS COMPARATIVOS DE VIGAS
4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS / CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA	
48	4.0. METODOLOGÍA DE TRABAJO / PLANTILLA
52	4.1. PLANTILLA CERCHA TIPO INGLESA
53	4.2. PLANTILLA CERCHA TIPO POLONCEAU
54	4.3. PLANTILLA CERCHA TIPO PRATT
55	4.4. PLANTILLA CERCHA TIPO HOWE
56	4.5. PLANTILLA CERCHA TIPO FINK
57	4.6. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO WARREN [PLANA]
58	4.7. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO HOWE [PLANA]
59	4.8. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO PRATT [PLANA]
5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA	
61	5.0. METODOLOGÍA DE TRABAJO / PLANTILLAS
65	5.1. PLANTILLA CERCHA TIPO INGLESA
	5.2. PLANTILLA CERCHA TIPO POLONCEAU
66	5.3. PLANTILLA CERCHA TIPO PRATT
	5.4. PLANTILLA CERCHA TIPO HOWE
67	5.5. PLANTILLA CERCHA TIPO FINK
	5.6. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO WARREN [PLANA]
68	5.7. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO HOWE [PLANA]
	5.8. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO PRATT [PLANA]
6. CONCLUSIONES	
70	6.1. CONCLUSIONES
71	6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN
7. BIBLIOGRAFÍA	
72	7.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
	7.2. REFERENCIAS WEB
8. INDEX DE FIGURAS	
73	8.1. INDEX DE FIGURAS

1. OBJETIVOS / METODOLOGÍA

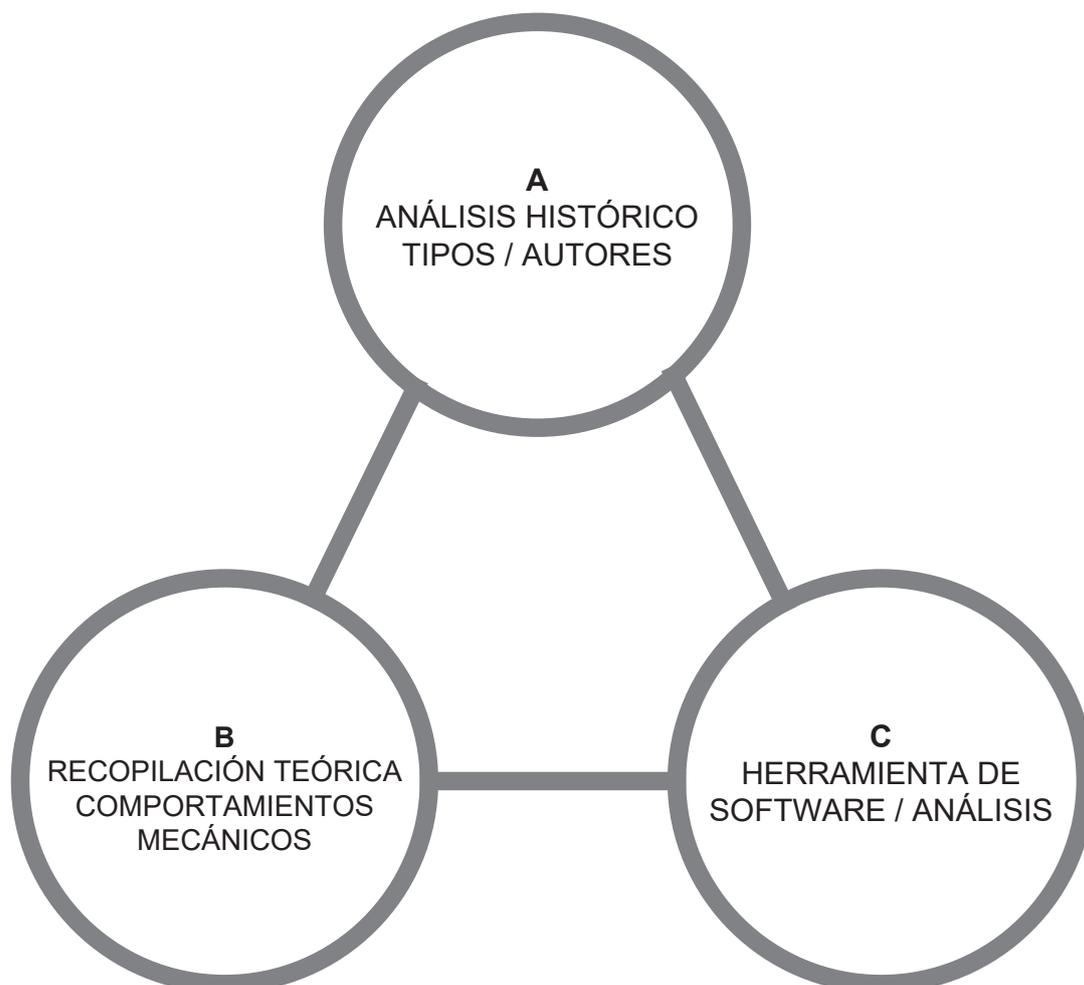
1.1. OBJETIVOS

Los objetivos del trabajo aquí presentado se agrupan en tres líneas fundamentales:

A) Análisis histórico del origen de los distintos sistemas de cerchas y vigas en celosía así como el reconocimiento y localización de los autores que los diseñaron, punto de partida teórico para comprender los contextos y las razones que originaron el diseño de estos.

B) Estudio y recopilación de las distintas teorías y justificaciones mecánicas aportadas por varios autores reconocidos y contrastados sobre el funcionamiento de los tipos estudiados, premisa básica sobre la que se asienta todo el trabajo teórico: localizar sus aportaciones más contrastadas por la comunidad científica y documentarlas para un posterior análisis y verificación con distintos softwares de cálculo.

C) Generar y aportar, como material anexo al trabajo, una herramienta de software en formato excel basada en el Método de Nudos (corregida con software de cálculo de estructuras SAP2000) con la que poder verificar las justificaciones mecánicas antes mencionadas y establecer esquemas comparativos de trabajo ante estados de carga similares de los distintos tipos estudiados.



1. OBJETIVOS / METODOLOGÍA

1.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la realización del presente trabajo se ha dividido la investigación en cuatro bloques principales, dos teóricos y dos prácticos.

El primer bloque teórico se basa en el estudio de sistemas de cerchas, este bloque tiene un primer apartado de introducción en el que se recoge un análisis histórico del origen y evolución de este tipo de sistemas y una clasificación de los mismos en función del equilibrio de las mismas, posteriormente se enumeran y explican brevemente los distintos métodos de cálculo existentes y una justificación mecánica de elementos biapoyados, esta introducción se completa con unos esquemas comparativos de transmisión de esfuerzos en donde se ilustran principios básicos del funcionamiento de estructuras trianguladas y unas conclusiones generales donde se enuncian aspectos esenciales a tener en cuenta para este tipo de sistemas. Este primer bloque se completa con cinco fichas, una por cada tipo de cercha estudiada, donde se recogen unas breves biografías de los autores de los tipos, conceptos básicos de diseño, esquemas de funcionamiento y una comparativa final de los esquemas de trabajo de todos los sistemas.

El segundo bloque teórico está acotado en los sistemas de vigas en celosía, se inicia con una introducción previa donde se recoge el comienzo de la triangulación, una justificación mecánica de vigas biapoyadas donde se enuncian principios básicos del funcionamiento de este tipo de sistemas y una conclusiones extraídas de un estudio práctico que recoge una comparativa de cinco tipos de vigas en celosía. En este segundo bloque se añaden, al igual que en el primer bloque, las cuatro fichas de los tipos estudiados así como una comparativa final de los esquemas de trabajo de todos los sistemas.

El Tercer y Cuarto bloque son de tipo práctico y recogen los resultados obtenidos con la plantilla de software excel generada para el bloque tercero y el análisis de los tipos estudiados con el software SAP2000 del bloque cuarto para corregir los resultados de la plantilla excel. Como ya se ha indicado en los objetivos del trabajo aquí presentado, con estos dos bloques prácticos se ha buscado inicialmente corroborar las teorías de funcionamiento de los distintos tipos de los bloques teóricos y por otro lado se ha buscado aportar material en formato autocad, excel y sap2000 que suponga una base de trabajo para futuras líneas de investigación del departamento en torno a este tipo de sistemas.

CERCHAS Y CELOSÍAS

RAZÓN DE SER Y DESARROLLO DE SOFTWARE

2. CERCHAS ARMADURAS DE CUBIERTA



2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.0. INTRODUCCIÓN

Las cerchas han sido parte sustancial de las cubiertas durante casi dos mil años. Una cercha es una estructura triangulada, de sección variable, autoportante, que aprovecha al máximo el material del que está compuesta, minimizando los esfuerzos de las barras y respondiendo, con su forma, eficientemente a su función.

No se puede afirmar con exactitud el momento de aparición de la cercha como parte de las cubiertas, primero porque las pruebas documentales, los textos antiguos que han llegado a nuestras manos no lo señalan, es posible que falte por descubrir ese documento y un día éste dato se alcance. Segundo porque las pruebas físicas, los edificios de la antigüedad que, también han llegado hasta nuestras manos, han sufrido numerosos daños, modificaciones y reconstrucciones a lo largo del tiempo. Y tercero porque la cercha, como prácticamente todos los sistemas constructivos, antiguos y modernos es fruto de la evolución y de la exploración de las ideas, de forma que sería difícil concretar en que momento se puede decir que una estructura triangulada, es específicamente una cercha.

La cercha originaria era, y durante siglos continuó siendo, de madera. No es hasta la revolución industrial, cuando los avances tecnológicos permiten, que el acero, dé el salto de la mera constitución de herramientas y materiales auxiliares a material de construcción con mayúsculas, material estructural. Salto que permitió que un siglo después apareciera el que hasta ahora es el material más importante por la extensión de su uso y por sus prestaciones, el hormigón armado. A partir de cada uno de estos hitos, el material con que realizar las cerchas no se limitó a la madera, abriendo el abanico a estos otros dos.¹

2.0.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Las cubiertas de madera, presentan un enorme catálogo de soluciones estructurales, todas ellas vinculadas directamente a la evolución técnica de cada momento histórico. Pero la utilización de la madera como material, hasta la revolución industrial, no solo tenía un importante protagonismo en las estructuras, sino también, en los medios auxiliares, las máquinas, mecanismos y herramientas.

Desde la época clásica hasta la edad media, se utilizaban secciones completas de árboles especialmente seleccionados por poseer una madera recta y resistente, fundamentalmente coníferas y algunas frondosas de gran porte. Con la llegada de otro tipo de cubiertas (abovedadas) en la edad media, se comienzan a utilizar también otras maderas de grandes propiedades pero que difícilmente daban grandes luces por su forma de crecimiento, robles y castaños que permitían grandes resultados en piezas curvas (Hammer Beam) y acodadas.

No obstante, el uso de una u otra madera es una cuestión geográfica y botánica. En la Europa del periodo clásico pueden distinguirse dos zonas claramente diferenciadas, la cuenca mediterránea y la meridional, con los Alpes como barrera natural. En la primera existen extensos bosques de coníferas, mientras que en el norte de Francia, Países Bajos e Islas Británicas son predominantes las especies frondosas, siendo especialmente importantes el roble y el castaño, que a efectos estructurales pueden considerarse equivalentes. Fueron famosos y están citados por los autores clásicos, el pino de Alepo y del Báltico, los cedros de Líbano, los cipreses de Creta, etc.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

Las cubiertas griegas más antiguas, entendiéndose con ello todas las del arco mediterráneo oriental prehelenísticas tenían poca pendiente, en torno a los 20°. Se realizaban con una terminación de barro y fibras vegetales como la paja o cañas. A partir del siglo VII a.C. se comenzaron a usar las tejas cerámicas soportadas por correas u ordenes menores. La cubierta era de pares apoyados sobre dinteles, el equivalente a la anteriormente definida como de par y picadero. Desde el periodo arcaico las cubiertas pasan a ser a dos aguas, estableciendo de éste modo la separación entre las cubiertas de la edad de bronce y la Grecia antigua. Las luces máximas alcanzables se podrían establecer en la longitud de un tronco con capacidad portante, unos 12 metros, estimados a partir de las luces habituales de los edificios clásicos, que sin embargo nunca se alcanzaron en esta época.

Alcanzado el periodo clásico, aparece la naos o cella y se deja un espacio interior muy amplio que permite el alojamiento de la deidad correspondiente y su culto. Para ello la pieza longitudinal de cumbrera se soportaba sobre virotillos que a su vez cargaban sobre dinteles transversales apoyados en fábricas longitudinales o en columnatas, como la de la stoa de la imagen anterior, pero situada a ambos lados de la cella. El ejemplo más relevante de templo clásico es el Partenón, construido entre el 447 y el 432 a.C. por los arquitectos Ictinos y Calícrates, en Atenas.

Los dinteles interiores del templo se alojaban en cajas practicadas en el lado interior de la cornisa y todo el entramado de vigas se ocultaba, desde abajo, mediante un entablamento de madera o en el caso del Partenón, que se pretendía que aparentase ser completamente de mármol, de éste material. Los pares también se alojaban en las cornisas coincidiendo sobre las vigas transversales y sobre ellos se colocaban las correas, que se apoyaban entre pares y en los extremos en cajas practicadas en los frontones. Esto ha permitido conocer las secciones de las piezas que eran de gran tamaño. Por ejemplo, las seis cajas de las correas del Partenón median 94x95 cm según Meiggs. Sobre las correas se colocaba un entramado de piezas de ordenes menores, cerrando la retícula, que permitían la colocación de las tejas. Se puede apreciar la misma organización en el templo de Minerva en Egina.

El Partenón marcó un hito en la construcción de los templos dóricos, con una escala muy superior en todos los aspectos y también en la organización de la cubierta, ya que su cella alcanza los 10 metros de luz, una distancia a la que nunca se había llegado hasta entonces en la Grecia ateniense. Existen dos inmediatos antecesores en cuanto a dimensiones e importancia, que son el templo de Zeus en Olimpia, construido hacia el 465 a.C. y el templo de Zeus Olímpico en Agrigento (Sicilia), construido entre el 500 y el 460 a.C. en la Magna Grecia. La cella del primero mide 6 metros, mientras que la del segundo, aunque anterior por pocos años, es de 13 metros.

Está comúnmente admitido que entre los constructores griegos, al menos entre los atenienses, no se utilizaban cerchas, por lo que cubrir una cella de 10 o de 13 metros debió representar un enorme desafío, teniendo en cuenta las dimensiones de las correas dos niveles más arriba. Por esta razón Trevor Hodge en 1960 sugirió la posibilidad de que tanto el Partenón como el templo de Zeus en Agrigento, hubiesen albergado las primeras cerchas. Sin embargo es posible realizar esas cubiertas sin cerchas, por lo que la inercia de la tradición, en el caso de Agrigento los excelentes recursos forestales de las laderas del Etna y la falta de pruebas inclinan la balanza hacia unas cubiertas resueltas genialmente con la tecnología preexistente.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

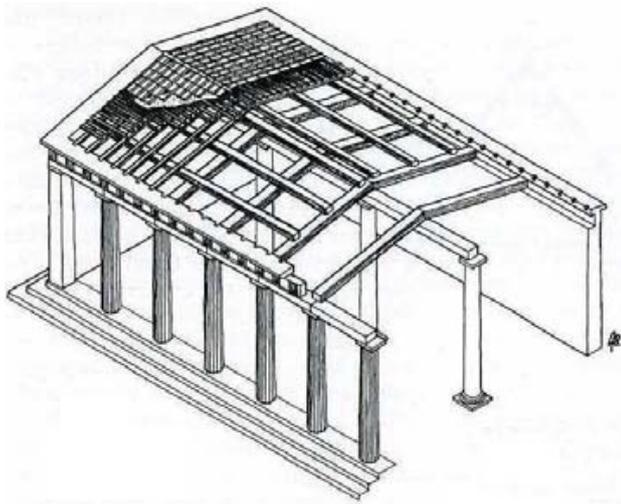


Figura 1: Stoa griega ¹

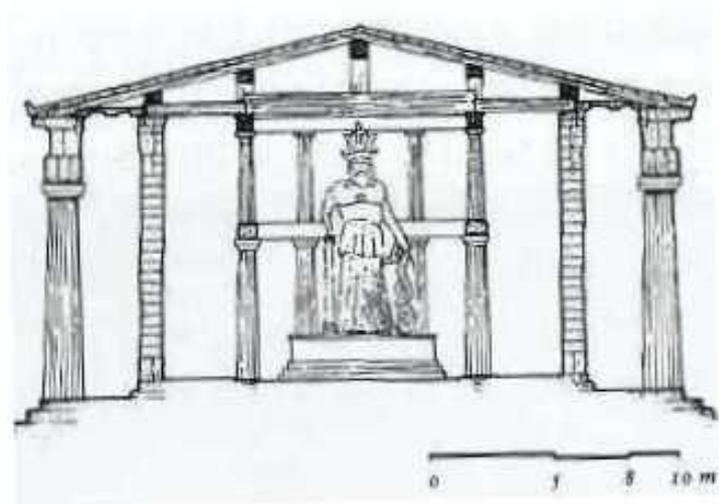


Figura 2: Sección del Partenón según Coulton ¹

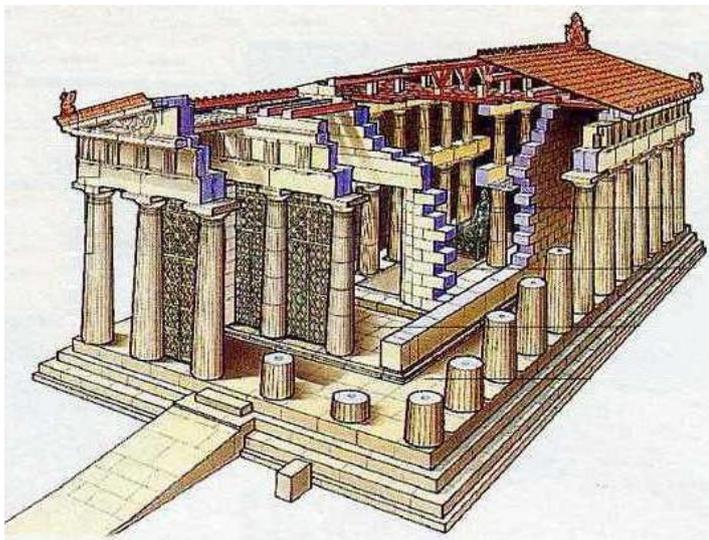


Figura 3: Templo dórico de Minerva en Egina ¹

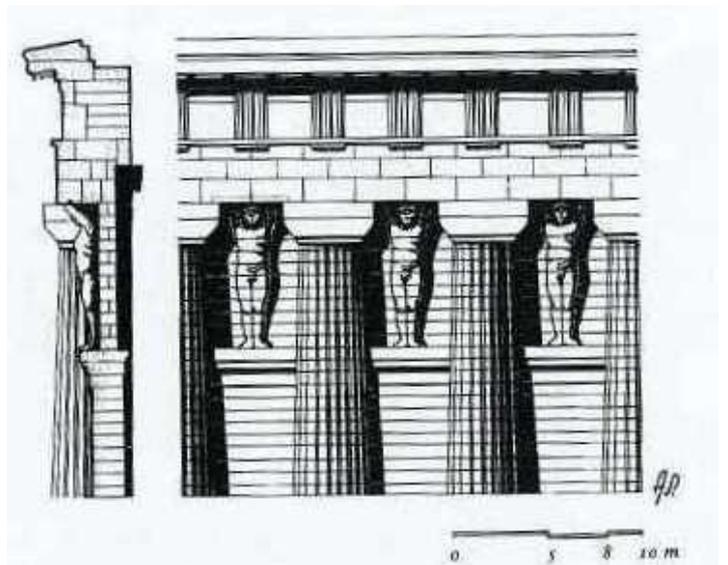


Figura 4: Templo de Zeus en Agrigento según Coulton ¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA / ROMA

El nivel que poseían los romanos, herederos de egipcios, griegos, fenicios, cretenses y resto de los pueblos del mare nostrum y de las fronteras septentrionales sometidos, era como ya se ha adelantado enorme. Más allá de la evolución de los materiales y las herramientas, las técnicas dominadas no difieren grandemente de las actuales. Se podría afirmar sin cometer un gran error que cualquier carpintero romano podría sin muchas dificultades trabajar en la actualidad.

Las cubiertas de los grandes edificios imperiales resultan difíciles de reconstruir dado el estado de los mismos; las termas de Caracalla, la basílica de Magencio, etc. Ninguna cubierta original romana permanece en pie. Pero existen, como ya se ha dicho, descripciones literarias, representaciones numismáticas, artísticas y los propios restos de los edificios. Como ejemplos basten:

1. *La basílica Aemilia* del año 100 a.C., en el lado norte del Foro romano poseía una luz de 17 metros.
2. *El Diribitorium de Agripa*, descrito por Dion Casio como el espacio cubierto más grande jamás construido, con una luz de 30,5 m. que ya no fue superada en el mundo antiguo. Los tirantes se realizaron, muy probablemente, con pino de Alepo o pinabete.
3. *La basílica Ulpia*, del Foro de Trajano, con 26 metros de luz.
4. *La primitiva basílica de San Pedro*, con 23 metros de luz, cuya sección quedó reflejada en la sacristía durante la demolición y ha llegado hasta nosotros.
5. *La basílica de San Pablo Extramuros*, con una luz de 24,33 metros, destruida en el incendio de julio de 1823, pero que afortunadamente había documentado Rondelet, con una cercha doble con tirante, uniones mediante herrajes y pernos, incluso un empalme de diente de perro en el tirante. El intereje era de 3,5 metros.
6. *La basílica de una sola nave de Tréveris*, al norte de los Alpes con 26 metros de luz. La prueba de que una cercha cubría la nave se encuentra, como en las otras basílicas en que el espesor del muro en el nivel de soporte de cubierta no podría contrarrestar los empujes de una cubierta de pares tradicional. Otras basílicas en que el espesor del muro en el nivel de soporte de cubierta no podría contrarrestar los empujes de una cubierta de pares tradicional.
7. Ya se ha citado el *Panteón de Agripa*. En el pórtico de entrada la cubierta se soportaba sobre una estructura de piezas de bronce acopladas. Aunque conscientes de que la estructura actual no es la original, el documento de Palladio permite hacerse una buena idea de lo que había. La pregunta es si ese elemento puede ser considerado o no una cercha. Es evidentemente triangulado pero su apoyo sobre la estructura de fábrica entre las naves desmerece el concepto de autoportante. Dado que tampoco conocemos con exactitud la cubierta original, de nuevo nos encontramos con un frondoso bosque de dudas.
8. *La basílica de Fanum*. Obra de Vitrubio, la describe en el quinto de sus Diez Libros de Arquitectura, de forma que queda claro que los 20 metros de luz de su nave central quedaron cubiertos con una cercha. No está tan claro como era la cercha, ya que las equivalencias entre las palabras de Vitrubio y las nuestras actuales permiten más de una interpretación.

La realidad es que las cubiertas romanas son poco conocidas, sobretudo debido a que una parte sustancial no ha sobrevivido al tiempo, pero además porque faltan por datar realmente algunas de las existentes, que podrían proporcionar más de un dato inesperado, como veremos en que sucedió en el monasterio de Santa Catalina del Monte Sinaí.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

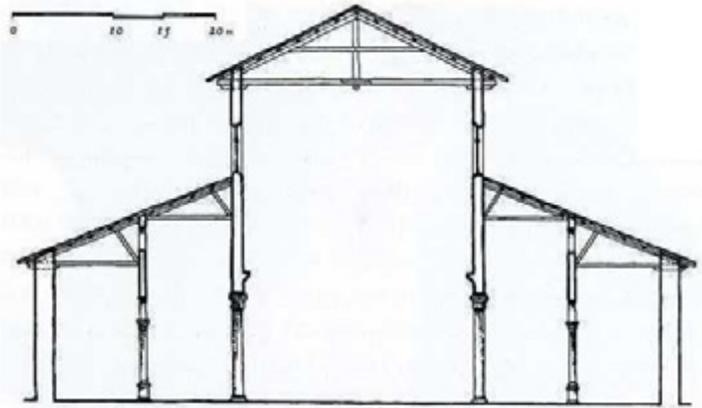


Figura 5: Primitiva basílica de San Pedro (Roma) 333 d.C., según Letarouilly. ¹

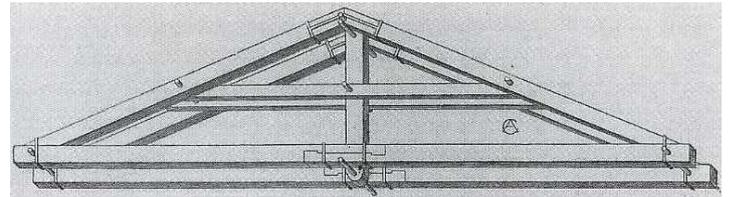


Figura 6: Cercha primitiva de la basílica de San Pablo Extramuros (Roma), según J. Rondelet. ¹

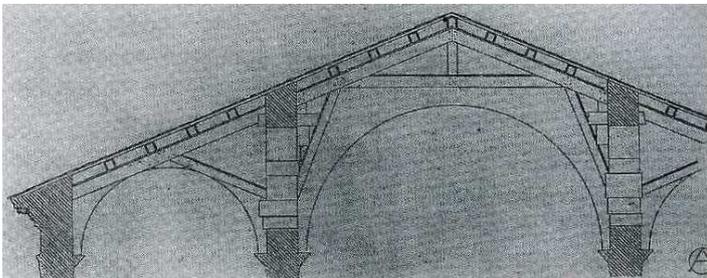


Figura 7: Estructura de cubierta del pórtico de entrada del Panteón (Roma), según Palladio. ¹

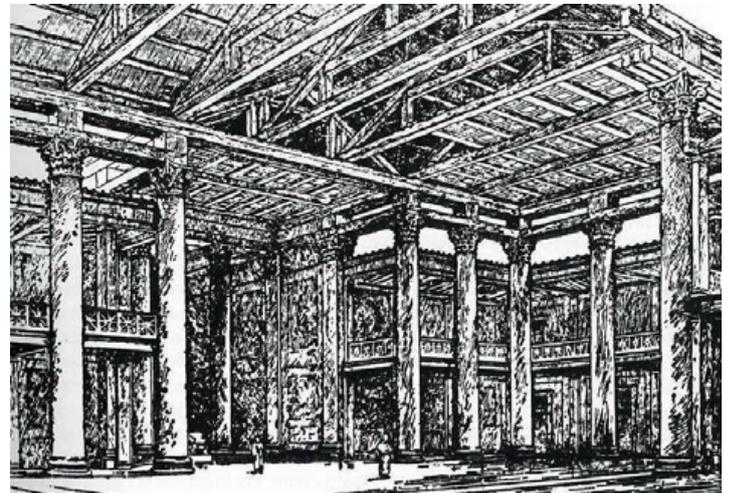


Figura 8: Basílica de Fanum de Vitrubio, según Morgan. ¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA / BIZANCIO

La construcción en el imperio romano de oriente se basó en la piedra, así las cúpulas de la Roma imperial fueron sus protagonistas, pero la edificación de cúpulas requiere el concurso de hábiles carpinteros para las cimbras, lo cual implica que había buenos carpinteros pero que su obra, como medio auxiliar, no perduró. No obstante se construyeron basílicas por lo tanto, hubo cubiertas de madera.

Entre los años 548 y 565 d.C. Justiniano funda y fortifica el monasterio de Santa Catalina del Monte Sinaí, centro de peregrinación ya que marca el lugar en el que se produjo el milagro de la zarza ardiente. En el siglo XVIII se realizó una intervención en la cubierta por la que de estructura vista paso a quedar oculta. Ya en el siglo XIV, se sabe por documentos que la cubierta era de plomo, por lo que anteriormente se sustituyeron las tejas romanas por las planchas de plomo.

La cuestión es que actualmente, estudiada la estructura oculta, se comprueba que se compone de cerchas de pendolón, del modelo que llamamos española, con la particularidad de poseer un sotopar parcial en el punto en que se encuentra con el tornapuntas, con la clara intención de proteger la sección del par.

Además, tratándose de una luz pequeña para una cercha 6,5 metros, el pendolón no llega hasta el tirante, ya que no es necesario corregir su flexión. La datación de ésta cubierta, contrastada por ensayo de radiocarbono, se basa en la firma dejada por el constructor, un tal Stephanos de Aila.¹

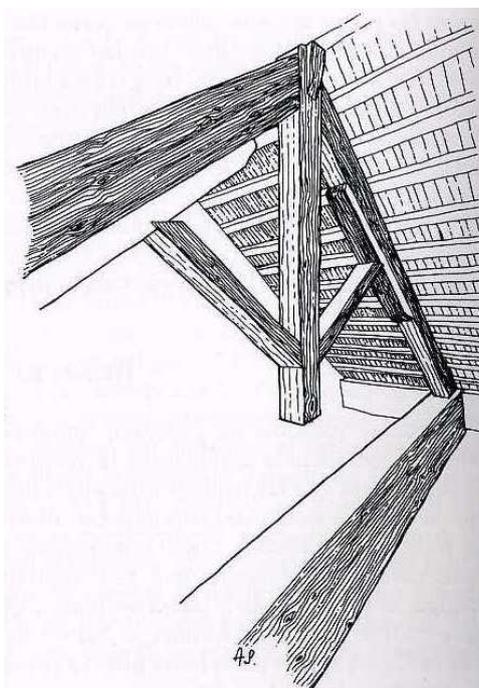


Figura 9: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí. ¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA / PRERROMÁNICO

El periodo que en la Península Ibérica llamamos prerrománico, en la Europa occidental se corresponde, aproximadamente, con el Carolingio y en la Europa oriental, aproximadamente, con el Otoniano. Las reformas eclesiásticas carolingias supusieron un periodo de expansión constructiva con más de 1.200 abadías, muchas de las cuales siguen siendo centros importantes como San Martín de Tours y Saint Riquier en Centula, Francia, o Farfa y San Salvador en Italia. En España nos encontramos en plena reconquista y la reconstrucción es un periodo lento aunque paulatino que no aporta grandes edificaciones, pequeñas ermitas, iglesias reducidas, en muchas ocasiones fortificadas, debido a la incertidumbre de la vida en la frontera, con continuas tomas y pérdidas de posiciones, razzias, que impedían la consolidación de las poblaciones y sin plazo para poder edificar grandes construcciones.

La cercha evoluciona en éste periodo desde las basílicas romanas a las grandes iglesias románicas, a través de dos vías, por un lado las cerchas reducen la sección de sus piezas y necesitan así reducir también su intereje, como la nave central de San Vicente de Soignies en Hinault, Bélgica y Santa Gertrudis de Nivelles, en el ducado de brabante, aunque la cubierta original ya no existe, solo las huellas en el faldón de la cabecera oriental. En cualquier caso ambas poseían aún puente. Por otro las cubiertas noruegas de pares pesados y jabalcones de tijera, que eran poco menos que otro juego de pares con una leve inclinación que permite arriostrar lateralmente la cercha.¹

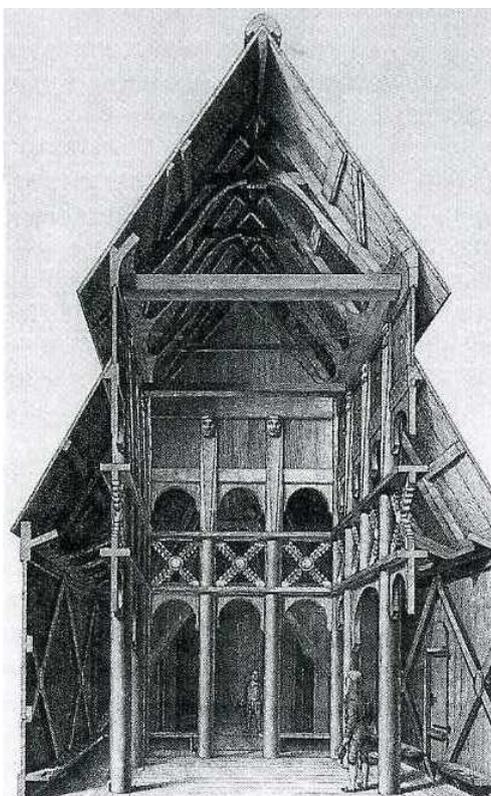


Figura 10: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA / ROMÁNICO

Las cubiertas románicas más antiguas en la Europa septentrional eran estructuras abiertas o destinadas a soportar un entablamento inferior, clavado a los tirantes que se decoraba. Como en tantos casos, las cubiertas que han llegado hasta nuestros días están plenas de reparaciones, alteraciones y reconstrucciones. Es posible deducir esto por las huellas de antiguos cajeados en piezas, la detección de piezas de madera diferente a la original y también por las huellas presentes en la cantería. En el lado occidental superior de la torre del crucero de la Iglesia de la abadía de Jumièges se puede apreciar la huella de tres cubiertas con inclinaciones diferentes de 20, 40 y 55 grados. De las tres, la menor inclinación data del siglo XVII. La más inclinada es evidente que tampoco es la original puesto que atraviesa los huecos de las ventanas. Por tanto la cubierta románica es la de 40 grados. La nave tiene una luz de diez metros y las cajas de los tirantes miden 26x31 cm, con un intereje de un metro.

Se dieron dos factores críticos que provocaron la evolución de las cubiertas de cerchas durante el siglo XII. Primero el incremento de edificios de gran tamaño, provocado por un periodo de estabilidad económica y política y fervor religioso. En segundo lugar el aumento del uso de las bóvedas de piedra, lo que obligó a reducir el número de tirantes, esto suponía que de alguna manera debía mejorarse el arriostramiento de las cerchas. Se logró mediante el apoyo triangulado de los pares y un arriostramiento longitudinal de las cerchas llamada correa colgante. En la cubierta actual de San Vicente de Soignies, fechada en 1170, se alternan cerchas con tirantes con cerchas de puente arriostradas.

En la antigua cubierta de la nave central de la catedral de Lisieux, la actual es posterior a 1226 en que se incendió, se encontraba uno de los primeros ejemplos de jabalcones colocados en tijera y duplicación de pares como estrategia para no colocar el tirante y permitir la ejecución de una bóveda debajo. Había una cercha de tirantes cada siete de las de puente.

Ambas cubiertas estaban realizadas con madera de duramen, escuadrías reducidas e iguales en todas las cerchas y con juntas sencillas.¹

Los avances propios del románico fueron:

- Eliminación parcial de los tirantes.
- Arriostramiento longitudinal para rigidizar la cubierta.
- Utilización del arranque triangular de los pares.
- Duplicación de los pares.

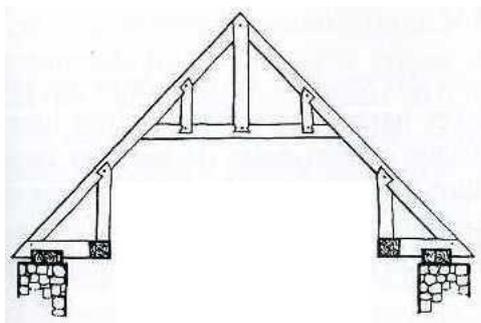


Figura 11: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí.¹

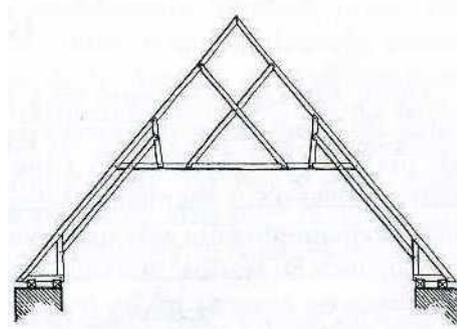


Figura 12: Catedral del Lisieux: armadura de la nave central con jabalcones de tijera y duplicado de pares.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA / GÓTICO

El desarrollo de las cubiertas desde mediados del siglo XIII y el XIV amplía enormemente el catálogo de soluciones para poder hacer frente a luces de naves mayores, grandes chapiteles, muros portantes más estrechos y mayores inclinaciones de los faldones de cubierta, de hasta 60 grados. Violet le Duc, en su libro *La construcción medieval* afirma "... los arquitectos de la edad media pensaban que la cubierta debía tener una pendiente de más de 45 grados...". Todo ello acompañado de la adopción de la bóveda de crucería gótica, sexpartita primero y cuatripartita más adelante. Durante el gótico llega incluso a experimentarse con cubiertas en las que ninguna cercha tiene tirante, basando el funcionamiento en los avances ya citados propios del románico.

La catedral de Notre Dame de París, construida entre 1163 y 1345, posee como la mayoría de las catedrales de la época cerchas con tirantes o mayores intercaladas con otras de juego de pares sin tirante. La cubierta se diseñó en 1180, siendo la actual de la reforma realizada en 1235, aunque no existen indicios de que no se respetara el diseño básico original.

En el caso de Notre Dame las cerchas tuvieron un uso auxiliar además del de estructura de cubierta. Como fueron levantadas antes que las bóvedas de piedra, sirvieron de punto de anclaje para los dispositivos de izado de los materiales. Para ello se utilizaron los extremos inferiores de las péndolas, que estaban constituidas por piezas dobles, que fueron dotados de juntas de tracción consistentes en un pasador acuñado de madera. El arriostamiento longitudinal de las cerchas se desplazó en esta ocasión a la parte superior de las péndolas extremas, inmediatamente debajo de la cubierta.

Sin duda, las cubiertas más originales del gótico, en éste caso tardío, son las constituidas por cerchas de piezas curvas, las Hammer beam ya explicadas. Y entre todas ellas, la más espectacular la del Westminster Hall en Londres.

Diseñado y construido por el maestro carpintero de Ricardo II, Hugo Herland, a finales del siglo XIV (en Italia había comenzado el renacimiento), en solo tres años desde que se empezó a talar la madera hasta la finalización de la estructura portante. Esta estructura cubre el salón normando del siglo XI, con una luz de 21 metros. Consta de trece cerchas mayores de madera de roble que dividen la estancia en doce tramos, con un intereje de 5,5 metros, logrado merced a un potente arriostamiento longitudinal sobre el que apoyan los cabios de cubierta.

Según una reciente investigación realizada con un modelo a escala, la mayor parte del peso (600 toneladas de roble) descansa sobre una ménsula situada aproximadamente a la mitad de la altura de los muros laterales, mediante un gran arco compuesto de piezas enclavijadas. Por otro las piezas curvas del tirante trilobulado funcionan a tracción de manera que compensan, aunque no completamente los empujes horizontales del gran arco. Por ésta razón el apoyo del arco es más bajo, ya que el muro es más capaz de absorber los empujes horizontales en su parte media. Además, expresamente el apoyo del arco se realizó en la parte más interior del muro, de forma de la pendiente de la resultante de compresión no saliera de la base, es decir que el muro pudiera absorber en su masa el posible vuelco.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

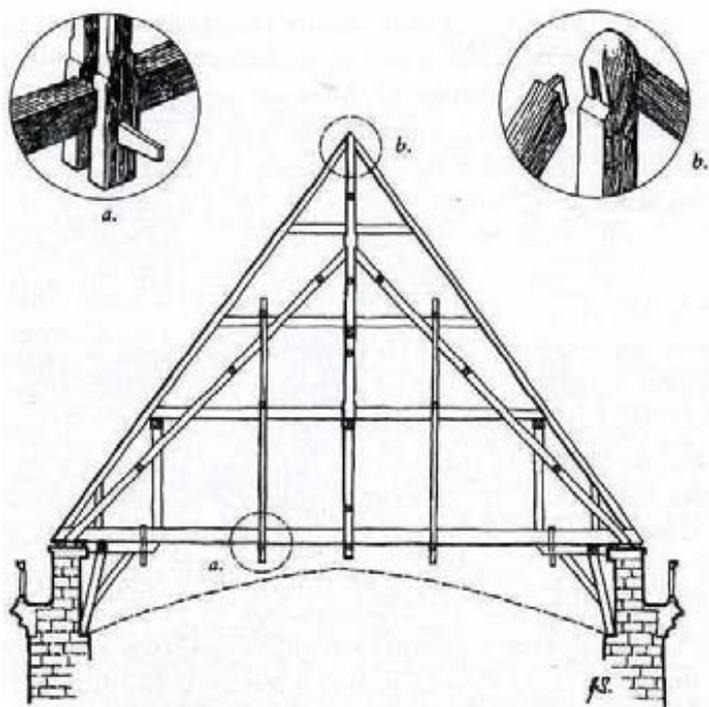


Figura 13: Catedral de Notre Dame de París.
 Cercha mayor de la cubierta de la nave central según Deneux.¹

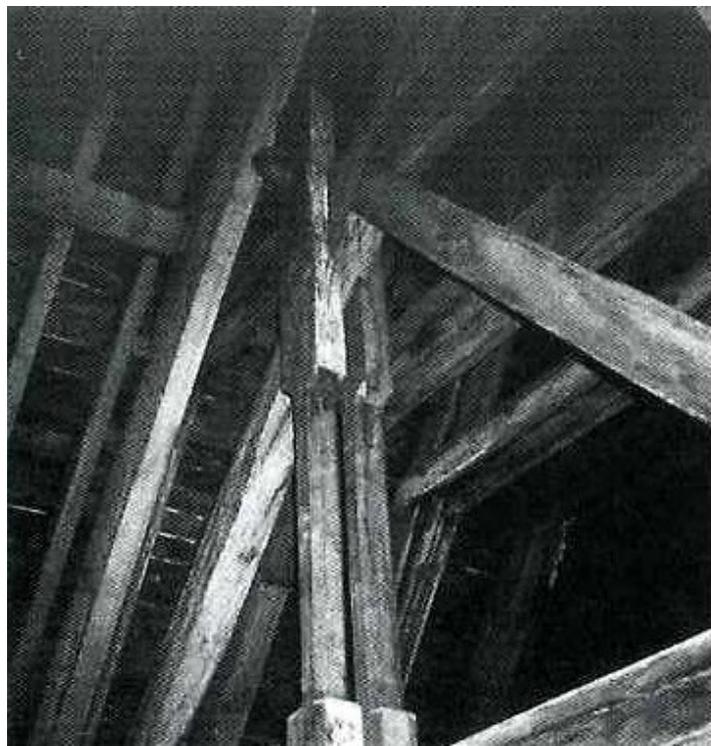


Figura 14: Catedral de Notre Dame de París.
 Detalle de péndola de cercha mayor.¹

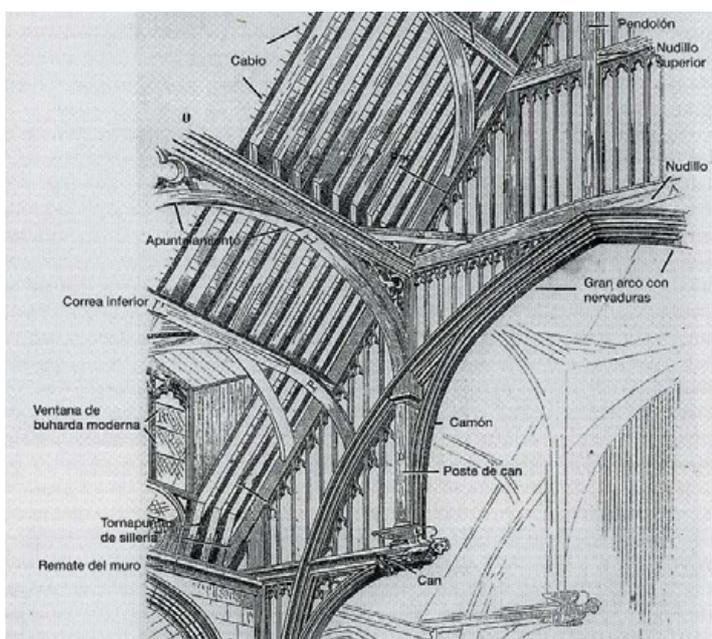


Figura 15: Westminster Hall. Detalle de cercha mayor.¹

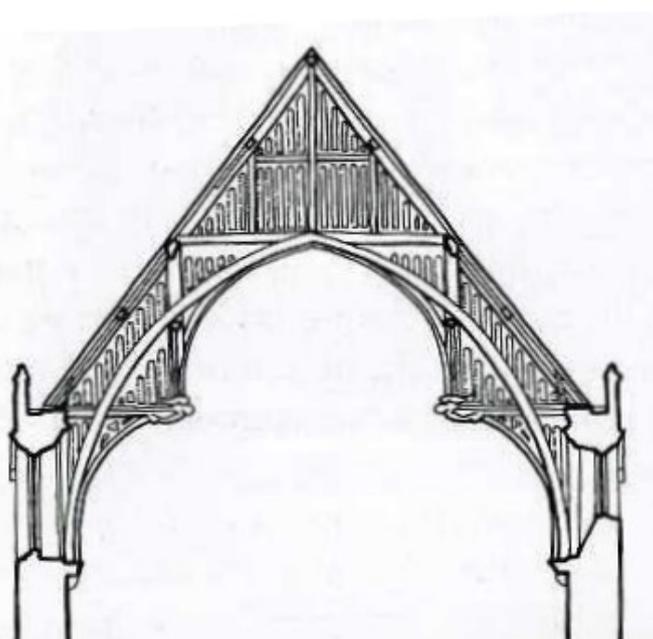


Figura 16: Westminster Hall. Sección por cercha mayor.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA / RENACIMIENTO

Durante el periodo renacentista, es conocida la recuperación que se hace de los conceptos, ideas y filosofías clásicas. También pasa esto con la cercha. Andrea Palladio recoge en su obra Los cuatro libros de la arquitectura, publicada en 1570, numerosos ejemplos de cerchas imperiales y de pendolón utilizados en las primeras basílicas cristianas. Especialmente las cerchas de pendolón perduran hasta nuestros días, se expandieron durante el Renacimiento por las ideas ya citadas, pero la realidad es que suponen una tecnología de alta eficacia.

A lo largo de los tiempos desde la edad media, se pueden encontrar escritos en los que el redactor se lamenta de la falta de árboles grandes, las razones pueden ser varias, la primera, más obvia es que el uso de los materiales a lo largo de la historia es un proceso in crescendo, de modo que los árboles se utilizan cada vez más jóvenes y eso impide encontrar grandes portes. La segunda sería un efecto subjetivo, la técnica se perfecciona y cada vez es posible superar los límites anteriores, la materia prima, en cambio no evoluciona y se queda atrás. En cualquier caso la técnica se ha visto obligada a perfeccionar los modos de empalme de piezas. Quizá el ejemplo más relevante sea la cúpula de la catedral de Florencia. Brunelleschi tuvo que ralentizar las obras porque no se le suministraba con suficiente fluidez las vigas de madera de castaño que necesitaba para los andamios.

El renacimiento va a traer, con el desarrollo de la tecnología de empalmes y acoplamientos nuevas técnicas que se desgajan de las cerchas. En 1561, tres años antes de la muerte de Miguel Ángel, Philibert de l'Orme (1510-1570), arquitecto real de Enrique II de Francia, edita la obra Nouvelles inventions pour bien bastir, un tratado de dos volúmenes dedicado a la carpintería. En ella propone la sustitución de las cerchas por arcos escarzanos, que se constituyen de pequeñas piezas de madera.

La razón de la propuesta es económica y tiene la intención de preservar las grandes piezas y utilizar las pequeñas, más baratas. Además de ser un sistema de rehabilitación de estructuras dañadas. De l'Orme llegó a concebir luces de hasta 60 metros con su sistema, pero de nuevo se encontró con la principal aportación de la cercha, que su arco no podía superar, los empujes horizontales.¹

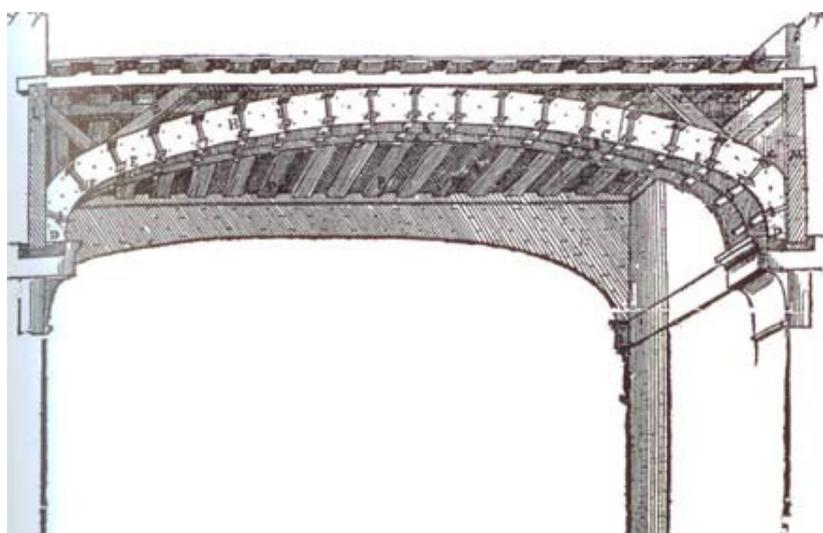


Figura 17: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

EVOLUCIÓN HISTÓRICA / DE LA ERA MODERNA A LA ACTUALIDAD

Hasta finales del siglo XVII no comienzan a utilizarse ensambles basados en tornillos pasantes roscados, una de las cubiertas de mayor luz de esta época es la diseñada por Christopher Wren en Oxford en 1662, el teatro Sheldonian. El diseño del Sheldonian, estaba basado en el teatro romano de Marcelo, pero éste no podía ser tapado por un toldo como el del romano y se vio obligado a diseñar una cubierta que cubriese la luz completa de la sala. Se trata de una cercha quebrada, en la que la mayor peculiaridad consiste en la realización de un tirante mediante el ensamble de dos piezas por superposición usando redientes en cola de milano quebrada y pernos.

Con la revolución industrial comienza el uso del acero como material estructural. Las nuevas tecnologías, basadas como se sabe en las posibilidades que aportaban las máquinas y su potencia de trabajo, permiten por un lado la fabricación de perfiles y obliga a la investigación para evolucionar y mejorar el material y poder aportar las prestaciones necesarias. A lo largo del siglo XIX el uso del acero en edificación dio con la denominación de “siglo del acero”, con ejemplos de todo tipo. La estructura metálica más antigua, que además se conserva es el puente sobre el río Severn en Reino Unido, diseñado por John Wilkinson y Abraham Darby en 1777. En los años siguientes y hasta la actualidad, las uniones de las estructuras trianguladas de madera han ido evolucionando de forma muy variada mediante distintos herrajes y tecnologías, entramos de lleno en las uniones modernas y en el uso de las colas para elementos estructurales.

Un ejemplo que necesariamente debe figurar entre los que se citen de la historia de la cercha es la empleada en la cubierta de la sala de ejercicios de Moscú, construida por Agustín de Betancourt en 1818. La cubierta tiene una pendiente del 33% y una luz de 45,72 m. Las cerchas tienen un intereje de 5 y la longitud de la nave es de 150 m. Aunque sin duda, el edificio de estructura metálica por excelencia es la Torre Eiffel de París, diseñada y construida por el ingeniero del mismo nombre, en 1889, con vocación temporal para la Exposición Universal, que el amor de los parisinos torno en eterna.

La realización de cerchas y estructuras trianguladas como los puentes de ferrocarril en Estados Unidos, tuvieron una expansión absoluta, todo lo realizado en madera anteriormente se hace con perfilaría metálica, e incluso se innovan soluciones. El gran obstáculo que encuentra la expansión del acero fue, la unión de las barras. Durante años el dominio lo tubo el roblonado, que era una herencia lógica de las uniones de madera y una tecnología dominada en la cerrajería de fabricación de otros elementos como herramientas, maquinas, etc. Después se desarrollaron los tornillos y finalmente se perfeccionó la soldadura. En la actualidad los roblones se usan únicamente para restaurar estructuras roblonadas. El campo de las uniones estructurales de acero se encuentra ocupado por la tornillería y la soldadura. El hecho de que compartan espacio se debe a que ambas tienen ventajas y desventajas.

El uso de tornillos facilita el montaje en obra y permite el tratamiento antioxidante superficial de las piezas, sin que quede resquicio alguno, por ejemplo con galvanizado en caliente. Sin embargo una unión atornillada no puede lograr el grado de empotramiento de la soldadura. La soldadura tiene la ventaja de que no requiere tanta planificación, dos piezas son soldables siempre y si está correctamente hecha, el monolitismo es completo. La desventaja pasa por el hecho de que el personal debe ser especializado, cosa que no pasa a la hora de apretar un tornillo.¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

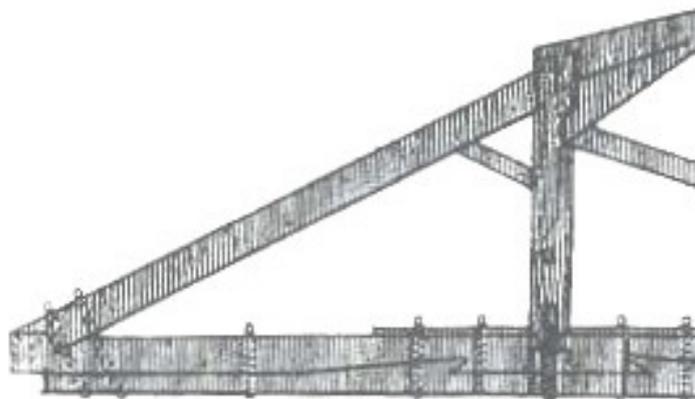
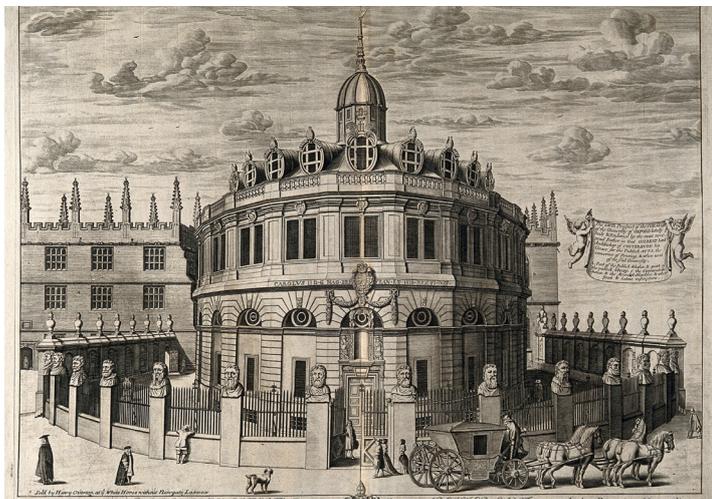


Figura 18: Teatro Sheldonian, Christopher Wren, Reino Unido (1662) ¹



Figura 19: Puente de Coalbrookdale sobre el río Severn, John Wilkinson y Abraham Darby, Reino Unido (1777) ¹

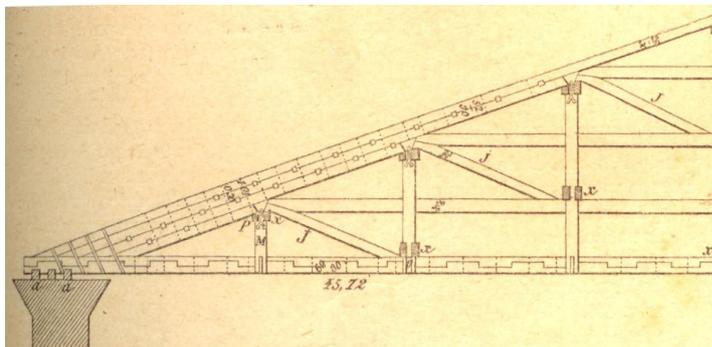
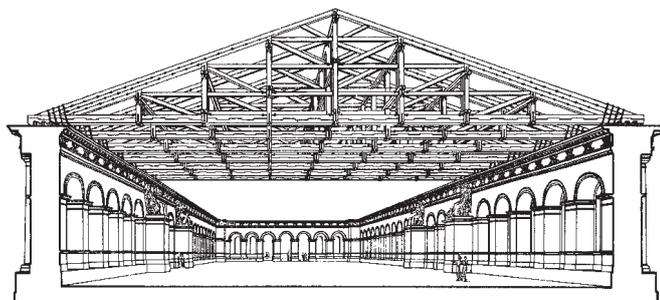


Figura 20: Picadero para caballos, Angel Betancourt, Moscú (1817) ¹

¹ García López de la Osa, Gregorio. 2009

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.0.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE CERCHAS

El nacimiento de la cercha, es la respuesta a un problema de eficiencia, como realizar las cubiertas con la menor cantidad de material. Si la evolución de las cubiertas, anteriormente vista, está relacionada con la utilidad del edificio que cubren, en base a lograr mayores superficies utilizables con los sistemas constructivos más simples, se llega al punto en que eliminando el apoyo en la cabeza superior del par aparecen esfuerzos horizontales.

Frente a estos esfuerzos, la respuesta inmediata más simple es incrementar la masa del muro para contrarrestarlos por rozamiento interno. Pero, al aumentar las luces estos esfuerzos lo hacen también y llega el punto en el que la masa de muro y la mano de obra subsiguiente, es tal, que merece la pena buscar una solución para los esfuerzos horizontales, de forma que nace el tirante. Pero este tirante se encuentra en un principio asociado a los empujes que sufre el muro, colocado por lo tanto secuencialmente sin estar sincronizado con los otros elementos que conforman la cubierta.

La cercha, definida como una viga triangulada, de sección variable, autoportante, se descubre en el momento en que se asocia cada tirante a un juego de pares. En ese momento, con esfuerzos coplanarios y que confluyen en un punto, ejes concurrentes, triangulando desde el modelo más sencillo tenemos un elemento estructural autoportante.

Es cierto que además cumple otro requisito de forma poco accidental, afortunada y a la vez coherente. La figura en dos aguas hacia fuera del edificio, provoca que posea el mayor canto en el punto que precisa la mayor inercia. Un aspecto relacionado con las cargas de las barras es la pendiente que se le da a la cercha. A mayor pendiente menores esfuerzos para las barras, pero mayor exposición a viento, que habrá de absorber en cualquier caso el muro portante, pero de forma más uniformemente repartida, como un esfuerzo continuo en la coronación, a través del pertinente estribo.²

Según su función de equilibrio una cercha puede ser totalmente isostática o determinada estáticamente en relación al equilibrio mecánico aplicado a la forma externa de la estructura. Lo mismo sucede con los elementos internos, que son evaluados en sus reacciones y esfuerzos para conocer su estabilidad. Las categorías resultantes de esta evaluación, han sido establecidas de la siguiente forma.

a) Isostáticas: Este concepto se refiere a una clase de estructura que puede ser analizada mediante los principios y las fórmulas que dan a conocer los valores estáticos. Como se ha referido, su naturaleza está determinada estáticamente, por lo que la eliminación de algunos de los componentes que unen la armazón como tal, causaría una falla catastrófica en todo el sistema.

b) Hiperestáticas: La esencia de este tipo de configuración es su estado de equilibrio, lo que significa que el momento flector tiene un valor igual a cero en cada una de las barras que componen el sistema. A pesar de esta condición, la cercha puede presentar condiciones propias de inestabilidad por el tipo de diseño con nudos fijos que puede asemejar a una estructura isostática.¹

¹ www.ocwus.us.es_Universidad de Sevilla

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.0.3. MÉTODOS DE CÁLCULO

Para resolver los esfuerzos que soportan las barras de una cercha, se utilizan múltiples métodos, pero habitualmente tres métodos analíticos y gráficos; Ritter, Cremona y Nudos.

a) Método de Ritter:

La principal ventaja de este método es que permite obtener la tensión de una barra sin necesidad de calcular la estructura entera. Para calcular una estructura articulada plana, deben calcularse las reacciones de los apoyos primero.

Posteriormente se cortará la estructura por una sección que corte a la barra de la que deseamos conocer la tensión y como máximo dos más. Se elige una de las dos mitades, siendo recomendable elegir aquella con menos fuerzas actuando y se obtienen las formulas de equilibrio tomando momentos en un punto. Ese punto debe ser tal que pasen por el las directrices de las barras distintas a la elegida, de forma que su brazo de palanca sea nulo y desaparezcan, quedando únicamente como incógnita la tensión de la barra elegida.

b) Método de Cremona:

Se basa en la construcción de polígonos de fuerzas para cada nudo o espacio encerrado por nudos de la estructura. Como deben cerrarse los polígonos, solo pueden quedar dos direcciones posibles, de manera que deben elegirse siempre nudos en los que solo se desconoce el funcionamiento de dos barras. Para ello se representan los vectores correspondientes a las cargas de la estructura y al funcionamiento de las barras conocidas, colocándolos consecutivamente según un criterio previo que se seguirá siempre igual. Habitualmente se colocan los vectores siguiendo el sentido del reloj y eligiendo la primera barra o fuerza conocida. Finalmente se cierra el polígono dibujando por el principio y por el final sendas rectas con la dirección de las barras cuyo esfuerzo se desconoce. Este proceso se repite hasta que se termina de conocer toda la estructura.

c) Método de Nudos:

Similar al método de Cremona, pero simplificando los gráficos. Es el equivalente al desmontado de nudos y la búsqueda del equilibrio en cada nudo mediante el cierre de polígonos vectoriales. Para ello deben conocerse las reacciones en los apoyos y se tendrán en cuenta tanto los esfuerzos de las barras conocidas como las acciones exteriores. Al igual que en los anteriores la estructura debe ser articulada plana.¹

¹ www.ingenieriarural.com Universidad de Castilla la Mancha

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.0.4. JUSTIFICACIÓN MECÁNICA ELEMENTOS BIAPROYADOS

Un elemento longitudinal que trabaja a flexión, consiste básicamente en dos cabezas, que absorban las tracciones y compresiones que genera el momento flector en caras opuestas y un elemento que mantenga ésta distancia, el brazo de palanca, que estará sometido a cortadura.

En el caso de un elemento biapoyado, articulado, como cualquier estructura triangulada, los esfuerzos son del mismo tipo constantemente para cada una de las caras, tal y como demuestra el diagrama de flectores de la anterior imagen.

Un diagrama de flectores solo representa las tracciones, por tanto donde hay diagrama existen tracciones, cara inferior y donde no lo hay existen compresiones, cara superior. Se denominan a las barras longitudinales, las cabezas que absorben el flector, cordones superior e inferior respectivamente y al resto barras intermedias. En una cercha, el cordón superior está quebrado y lo conforman los pares y el cordón inferior es el tirante. Por otro lado, el diagrama de cortantes y momentos flectores adjunto permite exponer un hecho de suma relevancia para el cálculo de las cerchas:

Para los elementos longitudinales el trabajo es mínimo en el apoyo (teóricamente cero) y máximo en el centro del vano (ver diagrama de flectores, rojo). Pero para las barras intermedias, las encargadas de mantener la distancia entre las cabezas de compresión y tracción, absorbiendo el cortante, el esfuerzo es máximo en los apoyos y mínimo en el centro (ver diagrama de cortantes, azul).

Obtenidos, por el método que se desee los esfuerzos, la siguiente acción pasa por calcular las secciones de trabajo, lo que permitirá dimensionar las secciones brutas de las barras.

Del esquema de estabilidad en armaduras adjunto se extraen algunas consideraciones a tener en cuenta a la hora de elegir un diseño u otro de cercha.

- a) Armadura inestable: el área central de la armadura no triangular se distorsionará enormemente bajo carga, conduciendo al colapso de toda la armadura.
- b) y c) Armaduras estables: el patrón de los elementos es completamente triangular.
- d) Armadura estable: patrón de elementos no triangular, cada una de las armaduras simples se comporta como los puntales de una cuerda superior de un triángulo simple más grande.¹

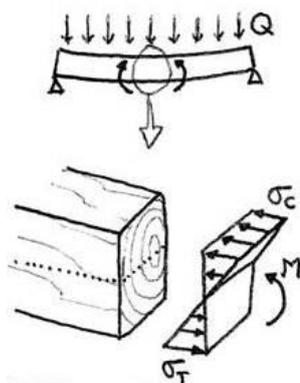


Figura 24: Esfuerzo de flexión ¹

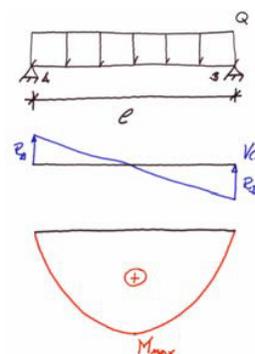


Figura 25: Diagramas de cortante y flexión viga biapoyada ¹

¹ Moore F. 2001

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

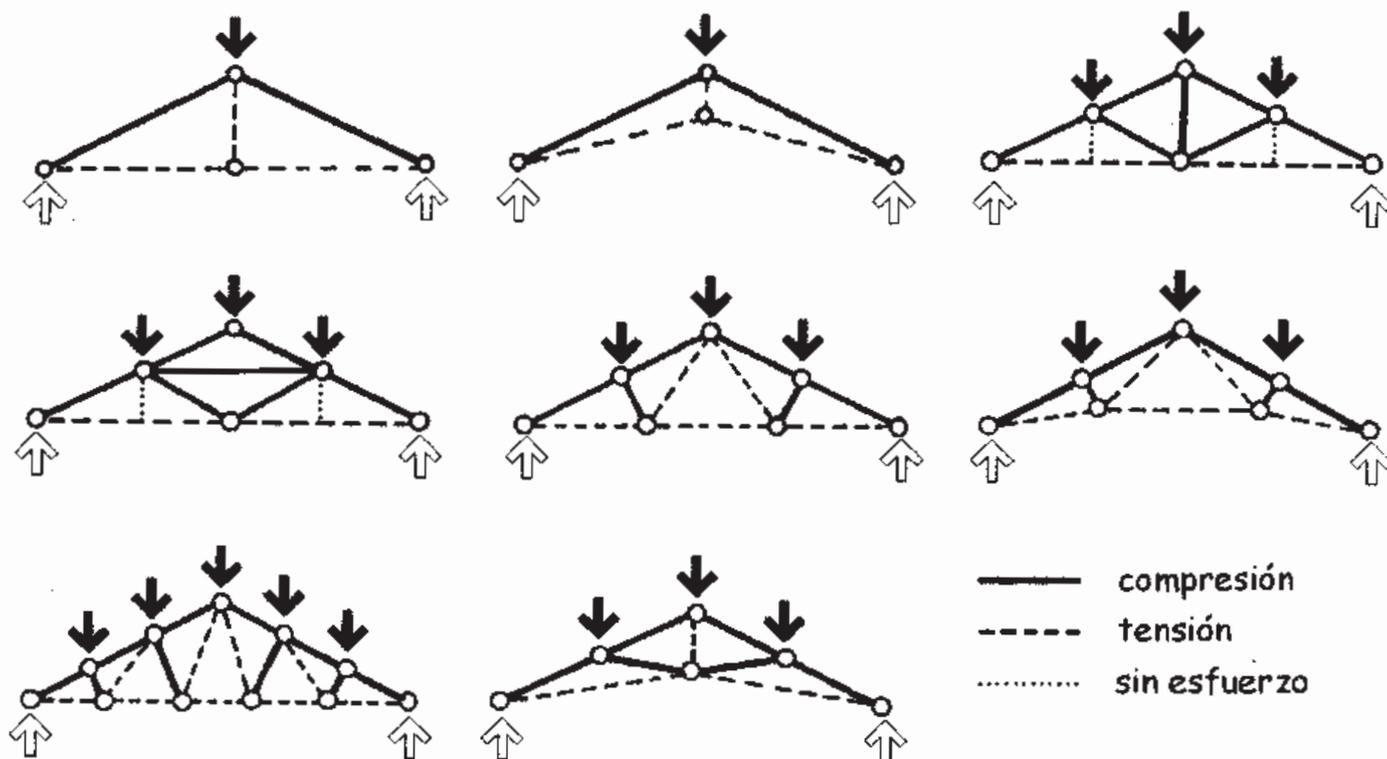


Figura 26: Tensión y Compresión en algunas armaduras triangulares ¹

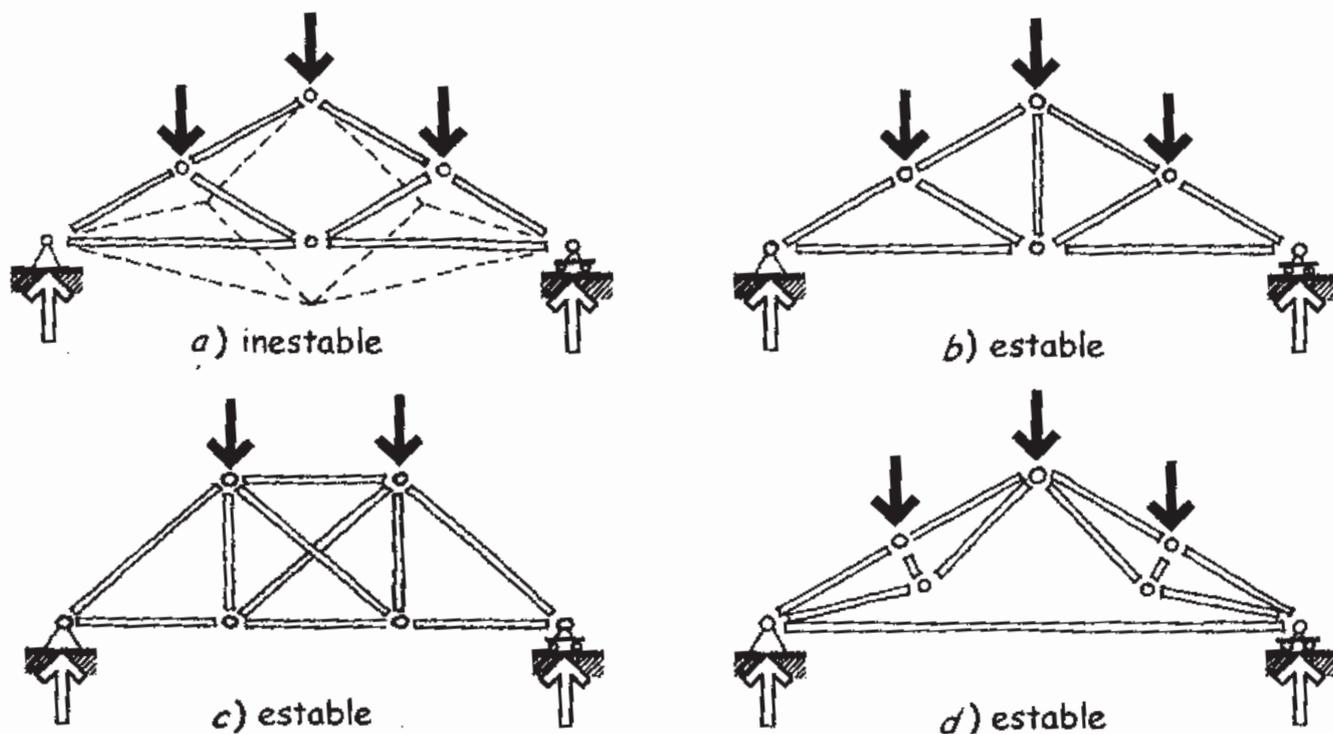


Figura 27: Estabilidad en armaduras ¹

¹ Moore F. 2001

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.0.5. ESQUEMAS DE TRANSMISIÓN DE ESFUERZOS

COMPARACIÓN CON OTROS MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE FUERZAS ¹

A. MECANISMO DE VIGA

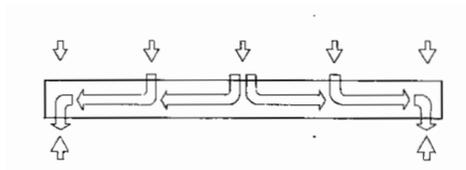


Figura 28: Transmisión de las fuerzas exteriores mediante una sección material rígida.

B. MECANISMO DE ARCO

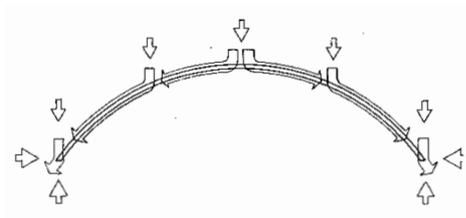


Figura 29: Transmisión de las fuerzas exteriores mediante forma material conveniente.

C. MECANISMO DE ESTRUCTURA TRIANGULADA

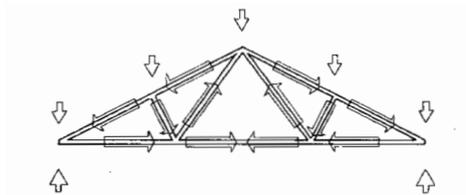


Figura 30: Transmisión de las fuerzas exteriores mediante una disposición conveniente de las barras.

RIGIDEZ Y TRIANGULACIÓN ESTRUCTURAL ¹

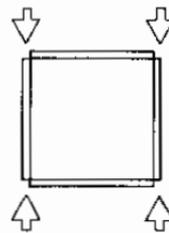


Figura 31:
 1. Pórtico de cuatro nudos articulados se halla en equilibrio sólo teóricamente

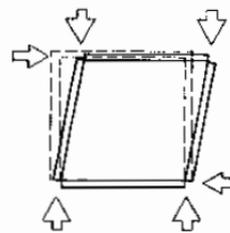


Figura 32:
 2. Bajo cargas asimétricas, el equilibrio del sistema se rompe en tanto los nudos permanezcan articulados

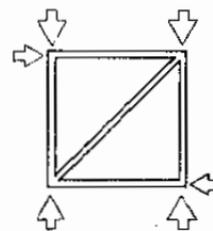


Figura 33:
 3. El elemento diagonal impide la deformación. El pórtico se convierte en una estructura triangulada.

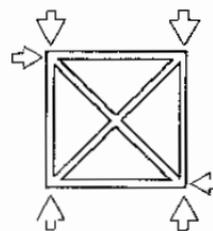
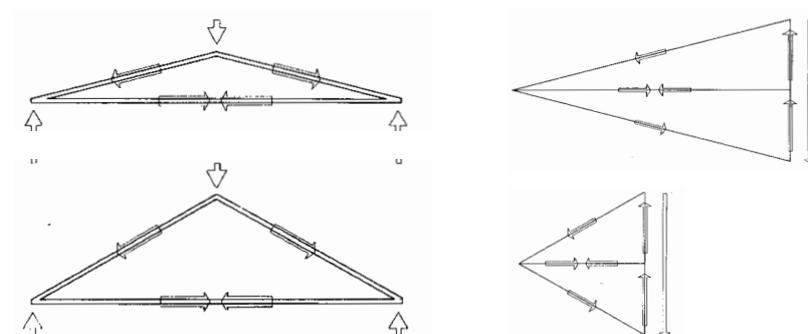


Figura 34:
 4. Una segunda diagonal incrementa la rigidez pero no es necesaria para el efecto resistente

SISTEMA DE TRANSMISIÓN VECTORIAL ¹

Figura 35: Cada carga exterior es mantenida en equilibrio por dos o más vectores-fuerza



- Altura reducida: los esfuerzos de las barras se incrementan porque su componente en la dirección de la fuerza exterior es pequeña y resulta poco eficaz.
- Altura aumentada: los esfuerzos de las barras decrecen porque su componente en la dirección de la fuerza exterior es grande y resulta más eficaz.

¹ Engel, H. (1970)

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

INFLUENCIA DE DIVISIÓN DEL RETICULADO Y DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS ¹

A. DIVISIÓN EN 4 RETÍCULAS

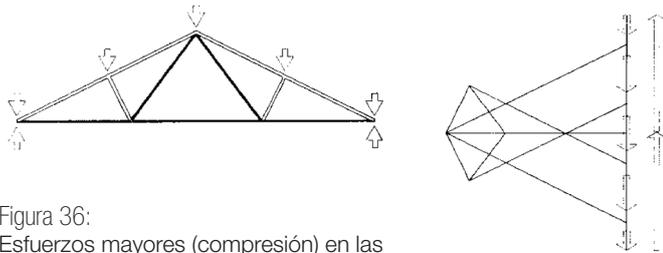


Figura 36:
 Esfuerzos mayores (compresión) en las barras superiores con longitudes de pandeo críticas.

B. DIVISIÓN EN 6 RETÍCULAS

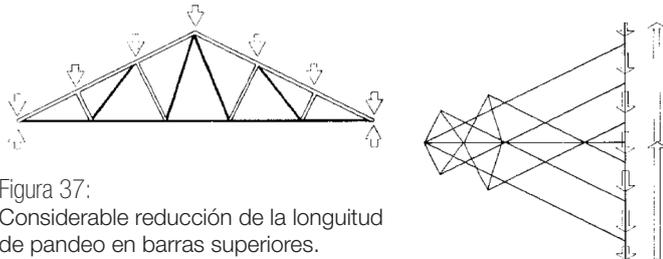


Figura 37:
 Considerable reducción de la longitud de pandeo en barras superiores.
 Apreciable reducción de esfuerzos en elementos diagonales.

C. DIVISIÓN EN 8 RETÍCULAS

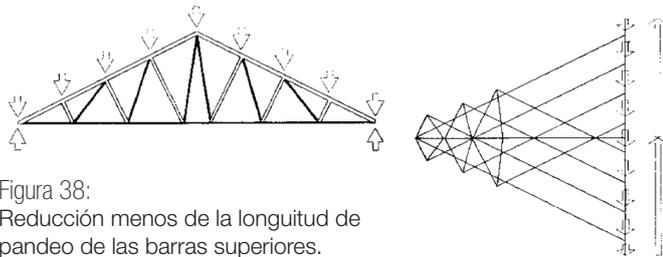


Figura 38:
 Reducción menos de la longitud de pandeo de las barras superiores.
 Escasa reducción de esfuerzos en elementos diagonales.

INFLUENCIA ALTURA CERCHA Y DE ESFUERZOS EN BARRAS ¹

PEQUEÑA MEDIA GRANDE

NUDOS DE ANÁLISIS VECTORES FUERZA

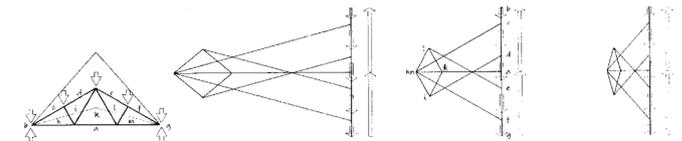


Figura 39: TODOS LOS NUDOS

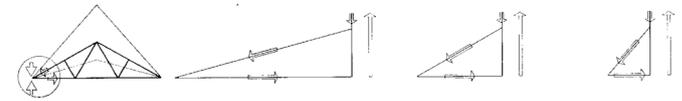


Figura 40: NUDO DE APOYO

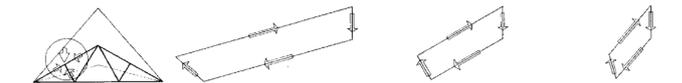


Figura 41: NUDO EN EL PAR



Figura 42: NUDO EN CUMBREIRA



Figura 43: NUDO EN TIRANTE

INFLUENCIA DE CONFIGURACIÓN DE ENTRAMADO Y DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN NUDOS ¹

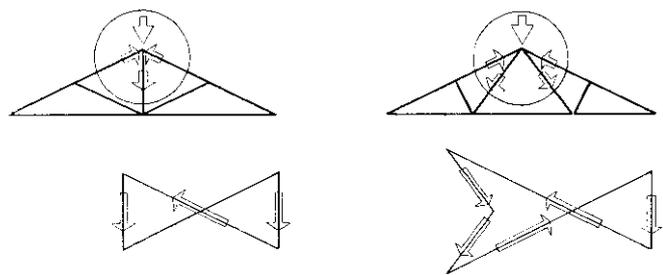


Figura 44:
 A pesar del aumento de retícula, los esfuerzos en las barras que concurren en el par decrecerán poco por el diferente ángulo que forman las barras.

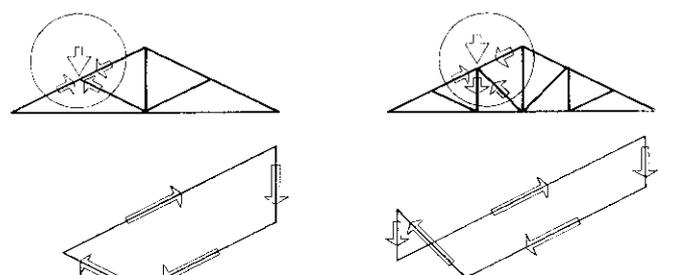


Figura 45:
 A pesar de la barra adicional, los esfuerzos en el par aumentarán a causa del ángulo menos eficaz que forman las barras.

¹ Engel, H. (1970)

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.0.6. CONCLUSIONES

A) Las cerchas han sido parte sustancial de las cubiertas durante casi dos mil años, aunque no es posible establecer el momento de su aparición con exactitud. Algunos autores, especialmente el profesor Trevor-Hodge¹, afirman que la primera cercha podría haberse utilizado en el Partenón de Atenas o en el templo de Zeus Olímpico en Agrigento, coetáneos del siglo V a.C. Se basa para ello en las grandes luces a cubrir y en las dimensiones de las piezas, según los mechinales aún existentes en el Partenón. Sin embargo está comúnmente aceptado que las primeras cerchas pertenecieron a las basílicas romanas del siglo II a.C., si bien se atribuye éste desarrollo a la influencia de la construcción griega.

B) El desarrollo de las cerchas responde a la aspiración por parte de la arquitectura de dar solución a la cubierta con eficiencia. En ésta solución se tuvieron en cuenta varios aspectos técnicos de diferente origen:

- La limitación de la luz. Las cubiertas basadas en el uso del dintel, tradicionalmente la llamada a la molinera, utilizadas en las civilizaciones de la edad de bronce, el antiguo Egipto y Grecia, limitan la luz de los espacios a la longitud útil que pueda dar la madera del árbol más alto existente en cada zona.
- Los empujes horizontales. Con la aparición de la tecnología de pares y después de una cierta evolución a partir de los pares apoyados en ambas cabezas, es decir superada la tradicionalmente llamada cubierta de par y picadero (desaparición de las correas y aparición de pares, los muros de carga no son paralelos a la línea de máxima pendiente sino que la generan por diferencia de cota y la cubren los propios pares) se duplican las luces posibles aunque se siga utilizando la misma madera, el mismo árbol. Éste logro lleva anejo un ineludible peaje, la aparición de empujes horizontales en la cimera de los muros donde apoyan las cubiertas.

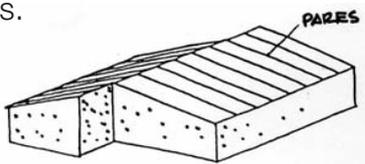


Figura 46: Cubierta de par y picadero

- La deformabilidad de las estructuras. La generación de una viga de gran canto, que es otra definición posible de cercha, implica la necesidad de algún tipo de arriostramiento que garantice la estabilidad de la estructura y el mantenimiento de la distancia necesaria, el brazo de palanca, entre la cabeza comprimida y la traccionada que responden al momento flector total de la estructura.

La aparición de la cercha dio respuesta a los tres requisitos a la vez. Al ser un sistema compuesto de barras, la longitud de las mismas es independiente de la luz del vano a cubrir. Al ser triangulado es indeformable. Al ser de nudos articulados, con las barras trabajando con solicitaciones exclusivamente axiales, las secciones necesarias son mucho menores que para un dintel equivalente y además a los apoyos transmiten únicamente cargas gravitatorias a los muros portantes.

C) El futuro de la cercha no está en absoluto comprometido. A pesar de la aparición de tecnologías capaces de superar las limitaciones de la luz ligada a la altura de un árbol, como la madera laminada. Las prestaciones de la cercha siguen vigentes y por lo tanto cabe esperar una evolución de las formas, novedades en el modo de realizar los encuentros, nuevos materiales con los que realizar las barras, pero no de la desaparición de ésta cultura.²

¹ Trevor-Hodge, A. 1960.

² García López de la Osa, G. 2009.

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.1. CERCHAS_TIPO INGLESA [MADERA]

AUTOR

Sin autor reconocido

CONCEPTO DE DISEÑO

Cercha Inglesa: Conceptualmente similar a la española pero con mayor número de barras. Los bosques ingleses, ricos en especies frondosas, especialmente robles, castaños y tejos, aportan madera muy robusta pero corta, de forma que los carpinteros tuvieron que incrementar el número de barras para poder lograr que fueran más cortas, sin renunciar a la luz. Utilizaron una segunda estrategia más brillante, las barras curvas de la Hammer Beam.

Cercha Española: Solventado el problema de la excesiva flexión del tirante, la siguiente barra más larga, según se va ganando luz es el par. Para reforzarlo en la flexión, se colocan sendos tornapuntas que cortan la luz. Se llama española a ésta cercha por que es de uso común en nuestra geografía, especialmente en el medio rural.

Cercha Hammer Beam: Un tanto alejada de nuestras formas propias de construir y entender la madera, una de las más originales, específicas y representativas es la llamada Hammer Beam, tecnología desarrollada en las islas británicas, privadas de árboles de gran longitud y resistencia adecuada y muy ricas en robles, utiliza los troncos curvos de los robles que les permiten obtener secciones curvas de gran resistencia, que sustituyen al tirante.²



TIPO: INGLESA
AUTOR: NO RECONOCIDO
FECHA: NO RECONOCIDA

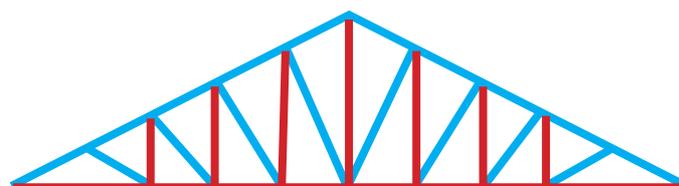


Figura 47: tipo inglesa ¹

TRACCIÓN ———
COMPRESIÓN ———

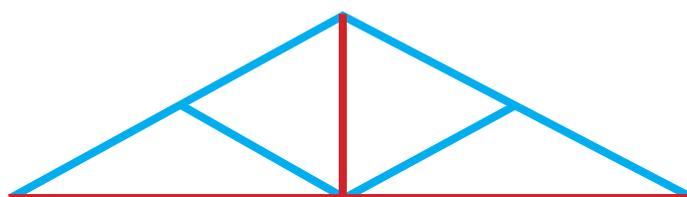


Figura 48: tipo española ¹

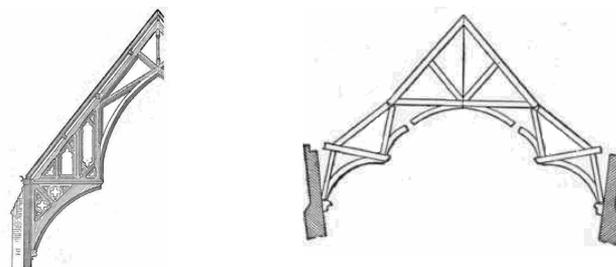


Figura 49: tipo Hammer Beam ²



Figura 50: Ejemplo de aplicación del sistema

¹ Moore F. 2001.

² García López de la Osa, G. 2009.

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.2. CERCHAS_TIPO POLONCEAU [METÁLICA]

AUTOR

JEAN-BARTHÉLÉMY CAMILLE POLONCEAU (1813-1859)

Fue un ingeniero de ferrocarriles francés, recordado por ser el inventor de la «cercha Polonceau» y el creador del tren imperial de Napoleón III. Era hijo de Antoine-Rémy Polonceau (1778-1847), un ingeniero de Puentes y Caminos (Ponts et Chaussées) y constructor de puentes, y primo hermano de Gustave Ernest Polonceau (1832-1900) ingeniero ferroviario que hizo innovaciones en las máquinas de vapor.

Jean-Camille Barthélémy Polonceau fue diplomado «Hors Ligne» de la École Centrale des Arts et Manufactures. A su salida de la escuela, Auguste Perdonnet, ingeniero jefe de la Compañía de ferrocarril de París a Versailles-Rive Gauche le llevó con él para la construcción de la línea de París a Versailles-Rive-Gauche. En este puesto diseñó en 1837 un sistema de carpintería de hierro y madera para un pequeño edificio de la vía férrea, que se convertirá en la «cercha Polonceau» (cercha dispuesta en V invertida, definida por la Real Academia de Ingeniería como una «cercha triangulada con dos pendolones oblicuos, de cuyo nudo con el tirante arrancan dos codales que apuntalan los pares por su mitad).

Fue director de la Compañía de ferrocarril de Estrasburgo a Basilea de 1842 a 1847. Fabricó el tren imperial de Napoleón III de la Compañía del Ferrocarril de París a Orleans.¹

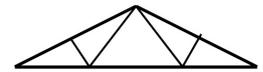
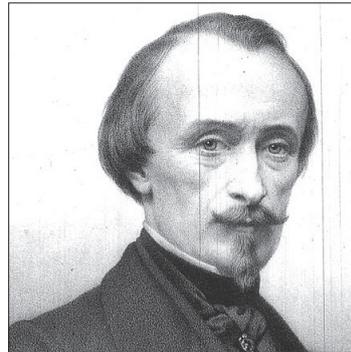
CONCEPTO DE DISEÑO

- **Cercha Polonceau sencilla:** Es una adaptación del cuchillo belga en el que las tornapuntas centrales mueren en las péndolas. Es una cercha formada por otras dos invertidas, unidas por el tirante.
- **Cercha Polonceau compuesta:** La misma cercha que antes pero más resistente, por lo tanto capaz de cubrir luces mayores, siempre a igualdad de secciones en las barras. Otra posibilidad es cubrir la misma luz con barras de menor tamaño.
- **Cercha Polonceau Peraltada:** La configuración de ésta cercha permite quebrar el tirante liberando espacio bajo el mismo, dando mayor pendiente a la cubierta.³

¹ Barjot, D./ Dureuil, J. 2008.

² Moore F. 2001.

³ García López de la Osa, G. 2009.



TIPO: POLONCEAU
AUTOR: CAMILLE PONLONCEAU
FECHA: 1837

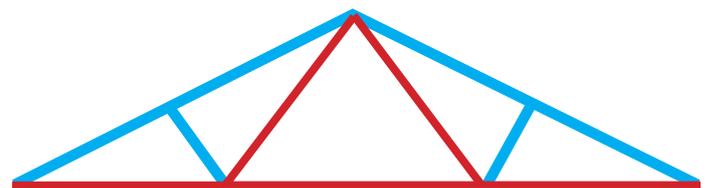


Figura 51: tipo Polonceau sencilla ²

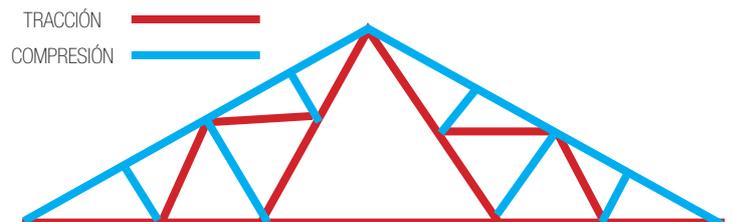


Figura 52: tipo Polonceau compuesta ²

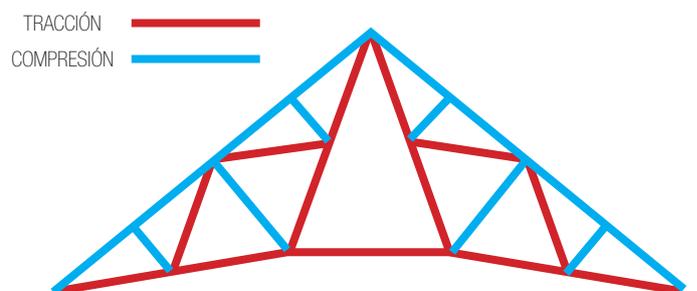


Figura 53: tipo Polonceau peraltada ²



Figura 54: Ejemplo de aplicación del sistema (Metálica)

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.3. CERCHAS_TIPO PRATT [METÁLICA]

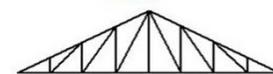
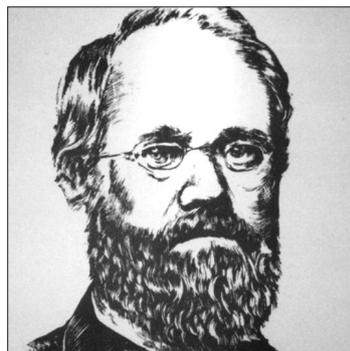
AUTOR

THOMAS WILLIS PRATT (1812-1875)

Thomas Willis Pratt nació en 1812 en Boston, Massachusetts. Fue educado en la universidad en Troy, NY en el Instituto Rensselaer y el Instituto Politécnico Rensselaer, pero nunca se graduó. En cambio, regresó a casa y trabajó en Boston, Worcester RR y las empresas de ingeniería de Providence & Worcester RR cuando la mayoría de los puentes se construyeron con madera y con diseños de cerchas fabricadas por SH Long, Elias Towne y William Howe. Desde su introducción en 1844, este diseño de puente se convirtió en parte de cientos de puentes creados hasta la Segunda Guerra Mundial. Fue diseñado por Thomas Willis Pratt (1812 - 1875) y su padre Caleb Pratt, un par de ingenieros estadounidenses, justo varios años después de que William Howe patentó su famoso diseño de cercha Howe. Este diseño de puente se hizo extensamente de uso inmediato durante el período en que muchos puentes se movieron desde componentes de madera hacia diseños de construcción completamente de acero. Su característica más convincente era la capacidad de abarcar grandes distancias utilizando métodos de construcción simples. Se usaba regularmente para abarcar puntos de anclaje que están a una distancia de hasta 250 pies (76 metros). Se usaba con mayor frecuencia en la construcción de puentes ferroviarios, aunque también era una opción preferida para crear otros tipos de puentes. en todo el mundo hasta principios del siglo XX.¹

CONCEPTO DE DISEÑO

Representa la adaptación de las celosías al uso más generalizado de un nuevo material de construcción de la época: el acero. A diferencia de una celosía Howe, aquí las barras están inclinadas en sentido contrario (forman V) de manera que las diagonales están sometidas a tracción mientras que las barras verticales están comprimidas. La forma básica de la armadura de Pratt incluye un diseño de armadura triangular cuyos miembros diagonales se inclinan hacia el centro del puente. Cuando está bajo carga, este diseño hace que las diagonales estén en tracción mientras que los montantes verticales están a compresión. Si los miembros diagonales están hechos de material sólido (como barras de metal) la carga pesada de la armadura puede provocar la necesidad de implementar refuerzos en el área central de esta, ya que esa parte se experimentará la mayor resistencia a cargas de fuerza. Esas áreas centrales se pueden reforzar con materiales más fuertes, o se pueden subdividir en patrones en forma de K o Y.³



TIPO: PRATT
 AUTOR: THOMAS Y CALEB PRATT
 FECHA: 1844

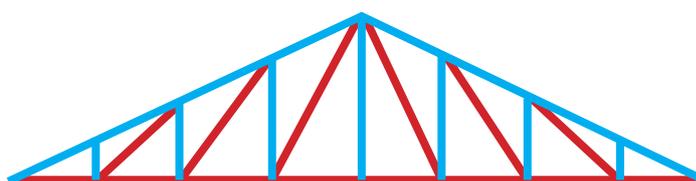


Figura 55: tipo Pratt ²

TRACCIÓN ——— (red line)
 COMPRESIÓN ——— (blue line)

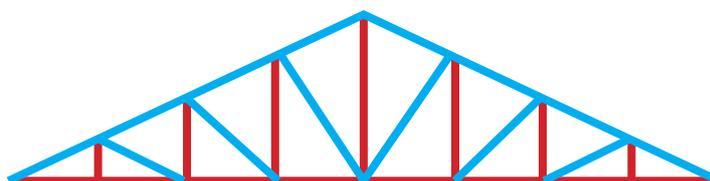


Figura 56: tipo Howe ²



Figura 57: Ejemplo de Aplicación del sistema (Madera)

¹ www.asce.org

² Moore F. 2001

³ García López de la Osa, G. 2009.

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.4. CERCHAS_TIPO HOWE [METÁLICA]

AUTOR

WILLIAM HOWE (1803-1852)

William Howe nació el 12 de mayo de 1803, en Spencer, Massachusetts, su padre era dueño de un aserradero y aprendió carpintería y construcción a una edad temprana. Después de completar con éxito su aprendizaje en carpintería se inscribió y se graduó en la Leicester Academy en Leicester, Massachusetts.

Howe se casó con Azubah Stone, hija de un granjero de Charlton, Massachusetts (hermana de Amasa Stone) en 1828. En la familia Howe había muchos inventores, su hermano Elias Howe patentó la primera máquina de coser; su otro hermano, Tyler Howe, inventó la cama con somier. William Howe estableció una carrera como contratista de construcción, construyendo casas e iglesias. Era particularmente conocido por sus iglesias pero los puentes fueron su principal interés, fundó el Howe Bridge Works en 1840.

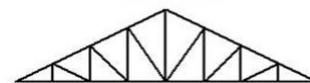
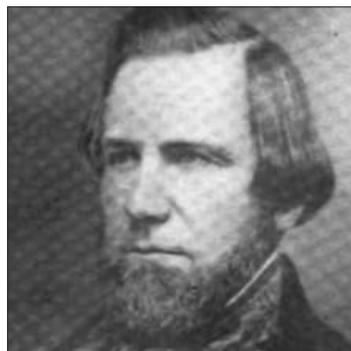
En ese año se comprometió a construir un puente ferroviario sobre el río Connecticut en Springfield, Massachusetts. Este puente tenía un diseño nuevo e influyente: el puente de celosía Howe, patentado por él en ese año. Posteriormente, uno de sus trabajadores de Howe, Amasa Stone, compró en 1842 los derechos de la patente de este diseño y se extendieron a puentes y estructuras erigidas por toda Nueva Inglaterra.

Howe realizó mejoras adicionales y patentó un segundo diseño de cercha Howe en 1846.¹

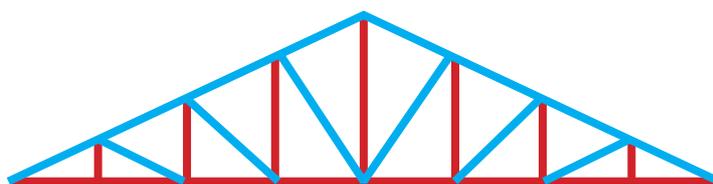
CONCEPTO DE DISEÑO:

El interés de este tipo de estructuras es que las barras trabajan predominantemente a compresión y tracción presentando comparativamente flexiones pequeñas.

Las armaduras Howe pueden ser construidas por materiales diversos: acero, aluminio, madera etc. las uniones pueden ser articuladas o rígidas.³



TIPO: HOWE
AUTOR: WILLIAM HOWE
FECHA: 1840



TRACCIÓN ———
COMPRESIÓN ———
Figura 58: tipo Howe²



Figura 59: Ejemplo de Aplicación del sistema (Madera)



Figura 60: Harbert Cottage_ Searl Lamaster Howe Architects (Metálica)

¹ www.asce.org

² Moore F. 2001

³ García López de la Osa, G. 2009.

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.5. CERCHAS_TIPO FINK [METÁLICA]

AUTOR

ALBERT FINK (1827-1897)

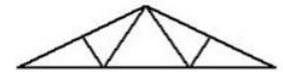
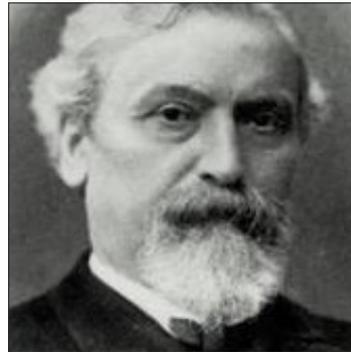
Albert Fink nació en Lauterbach, Alemania, el 27 de octubre de 1827, hijo de un arquitecto. Su padre murió joven, y Albert decidió ir al Politécnico en Darmstadt para estudiar arquitectura e ingeniería civil. Se graduó en 1848 durante tiempos tumultuosos con revoluciones en toda Europa y Alemania.

No fue hasta el 21 de diciembre de 1849 que Benjamin Latrobe, Ingeniero Jefe del B & O le ofreció un puesto como dibujante. Uno de sus primeros esfuerzos fue completar su diseño para un puente de hierro para el B & O. Hungerford. Basado en este trabajo, Latrobe le dio a Fink el proyecto de construir un puente de tres vanos a través del Monongahela en Fairmount, Virginia en 1852.

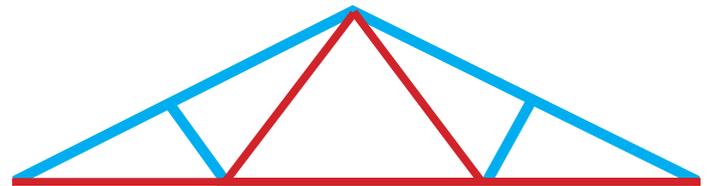
Durante los siguientes cinco años, Fink ocupó varios puestos en B & O y construyó los Fox Run y Trey Viaducts, las dos principales estructuras de hierro fundido. El 9 de mayo de 1854 recibió la patente número 10.887 para un puente. Dejó el B & O en 1857 para trabajar en el ferrocarril de Louisville y Nashville (L & N). Uno de sus primeros esfuerzos fue la construcción del Green River Bridge cerca de Mammoth Kentucky. Recibió una segunda patente el 9 de abril de 1867, el número 63.714 para una armadura combinada con miembros de compresión de madera y miembros a tracción de hierro forjado. Lo usó en muchos puentes para el L & N, incluido el puente Blue River con un tramo de 126 pies 10.5 pulgadas. Su primer puente importante después de la Guerra Civil fue el puente Louisville sobre el río Ohio que se inauguró en 1870. Fue el más largo puente en el mundo en ese momento. Consistió en 25 cerchas de cubierta Fink convencionales con luces que van desde 50 pies a 245 pies 5 pulgadas y dos cerchas principales de tramo largo de 370 pies y 400 pies. En el diseño de estas cerchas, Fink, una vez más, exhibió su poder de diseño innovador. Las cerchas de luz larga fueron las primeras de paneles subdivididos en los Estados Unidos.¹

CONCEPTO DE DISEÑO

Estructura muy utilizada para techos con fuertes pendientes, resulta más económica porque la mayoría de sus barras están sometidas a tracción mientras que las que están sometidas a compresión son más cortas. Estas estructuras pueden ser divididas en un gran número de triangulaciones lo que le aporta una gran flexibilidad de adaptación a los espacios.³



TIPO: FINK, W
AUTOR: ALBERT FINK
FECHA: 1848



TRACCIÓN
COMPRESIÓN

Figura 61: tipo Fink ²



Figura 62: Ejemplo de Aplicación del sistema (Madera)



Figura 63: Fábrica en Milltown, Missoula (Metálica)

¹ www.structuremag.org

² Moore F. 2001

³ García López de la Osa, G. 2009.

2. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

2.6. DIAGRAMAS COMPARATIVOS DE CERCHAS ¹

TIPO INGLESA

Sin Autor Reconocido (-)

TRACCIÓN
 COMPRESIÓN

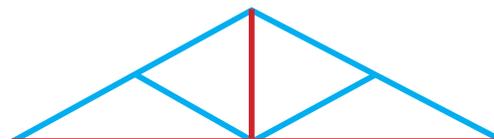


TIPO INGLESA

TIPO ESPAÑOLA

Sin Autor Reconocido (-)

TRACCIÓN
 COMPRESIÓN

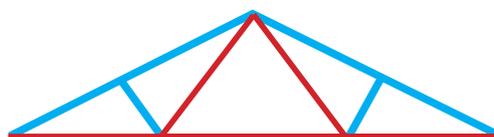


TIPO ESPAÑOLA

TIPO POLONCEAU

Camille Polonceau (1837)

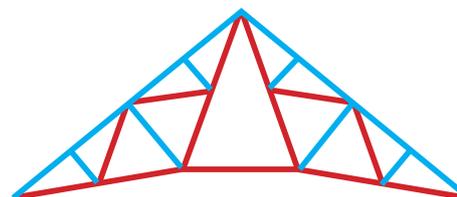
TRACCIÓN
 COMPRESIÓN



TIPO POLONCEAU SENCILLA



TIPO POLONCEAU COMPUESTA



TIPO POLONCEAU PERALTADA

TIPO PRATT

Thomas y Caleb Pratt (1844)

TRACCIÓN
 COMPRESIÓN



TIPO PRATT

TIPO HOWE

William Howe (1840)

TRACCIÓN
 COMPRESIÓN

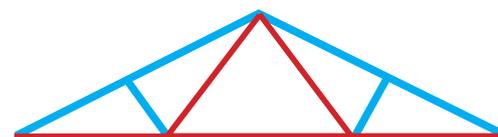


TIPO HOWE

TIPO FINK

Albert Fink (1848)

TRACCIÓN
 COMPRESIÓN



TIPO FINK

¹ Moore F. 2001

CERCHAS Y CELOSÍAS

RAZÓN DE SER Y DESARROLLO DE SOFTWARE

3.VIGAS EN CELOSÍA



3. VIGAS EN CELOSÍA

3.0. INTRODUCCIÓN

Desde que la mecánica racional, a partir del siglo XVIII, encontró con sus aplicaciones vectoriales, campo abonado para desarrollarse en la técnica de la construcción, las estructuras trianguladas fueron dejando entrever mayores posibilidades, aun con la misma madera que siempre acusaba el defecto de sus ensambles en tracción. La cubierta del Picadero de San Petersburgo con sus 48m de luz fue una buena prueba de ello en 1817.

Cuando el acero laminado acaparó el dominio de las estructuras, el desarrollo de la triangulación fue tan rápido, exuberante y atrevido como demuestran, entre otros, la torre Eiffel y el puente Firth of Forth (John Fowler, Benjamin Baker y Allan Stewart).¹

3.0.1. EL COMIENZO DE LA TRIANGULACIÓN

La *triangulación* es una disposición especialmente apta para elementos que han de trabajar a flexión. Aun los que lo hacen fundamental o exclusivamente en compresión, como soportes, lo que buscan en la triangulación es el arriostramiento que evite la flexión parcial o total de sus elementos longitudinales y del conjunto de la pieza.

La *viga triangulada* no permite esbelteces tan grandes como las de alma llena pero sí permite disminuciones de peso y, por tanto, aumentos de luz enormes; existiendo hoy vigas de puente metálicas de este tipo de 457 metros de luz mientras que la mayor de alma llena sigue por debajo de los 300 metros con las desventajas económicas que ello conlleva. Las *vigas en celosía* conservan las cabezas de la viga maciza; pero el alma se descompone en dos familias de elementos, unos a compresión y otros a tracción, que absorben los fenómenos de esfuerzo cortante del alma.

Los primeros intentos y éxitos de *triangulación* se hicieron, naturalmente, con la madera y no para vigas propiamente dichas, sino para cerchas de cubiertas a dos aguas, donde la diferencia de nivel entre cumbrera y arranques facilitaba su desarrollo. Los dos pares requieren acodarse sobre un tirante para no abrirse tumbando los muros o deslizarse sobre ellos; así se formó el primer "triángulo" (Fig. 65a). El tirante resultó demasiado flexible para su propio peso y necesitó de un pendolón para ser colgado por el centro (Fig. 65b), por fin los dos pares se apuntalaron con éxito sobre el pendolón, partiendo en dos la luz libre a salvar (Fig. 65c). De aquí a la viga Polonceau va sólo un paso: el de abrir el pendolón en dos (Fig. 65d).¹

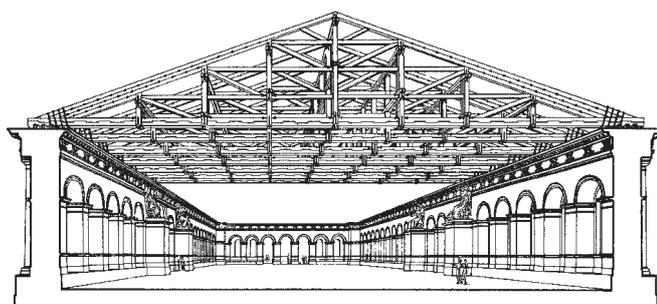


Figura 64: Proyecto Cubierta Picadero en Moscú_Angel Betancourt (1817) ¹

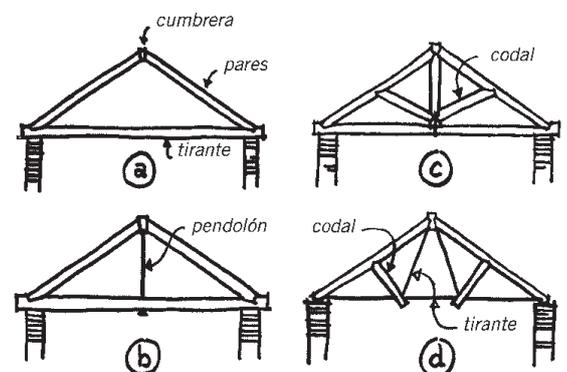


Figura 65: Comienzos de la triangulación ¹

¹ Torroja Miret, E. 2007

3. VIGAS EN CELOSÍA

3.0.2. JUSTIFICACIÓN MECÁNICA_VIGAS BIAPOYADAS

Pero en las vigas, el primer paso que dió el acero, para aligerar su alma, no fue un simple camino de complicación sucesiva; sino que, con criterios más intuitivos y menos mecánicos, empezó a sustituirse la continuidad del alma por una celosía múltiple muy cerrada (Fig. 66a), llegando a la conclusión de que es preferible agrupar los esfuerzos en el mínimo número de piezas para poder darles mayor rigidez sin aumentar el peso total.

Algunos tipos de vigas pretendían arrancar con varias diagonales desde los apoyos; pero esto, llevado al extremo (Fig. 66b) presentaba tres inconvenientes principales.

El primero era que cada par de diagonales sólo trabaja para la carga que actúa sobre el montante que apoya en el extremo común de estas. Por ello se pretendía repartir las cargas entre las diferentes diagonales para que “cada cual soportara la suya”; pero de este modo se desaprovechaba la resistencia de cada una de ellas cuando las sobrecargas ocupaban otras posiciones.

Por otra parte existía el inconveniente de, al pasar la sobrecarga concentrada sobre un montante solamente hacía trabajar un par de diagonales, estas se deformaban y producían un descenso de la carga sin que el resto de la estructura les acompañe en el movimiento.

Por último, los ángulos resultantes de cada triángulo de trabajo eran muy agudos u obtusos, lo que daba lugar a la desigualdad de deformaciones entre las barras de un triángulo, lo que se traducía en esfuerzos secundarios perjudiciales. Por todo ello, las triangulaciones tendieron a formarse por una sucesión de triángulos, de lados no muy diferentes en longitud, con ángulos comprendidos entre los 45° y los 60° y con pocas barras relativamente robustas. La *Viga Warren* (Fig. 66c) es la más representativa de esta tendencia. En ella se observaba como la armadura obligaba a deformar y esquematizar la red de isotáticas que aparecían en la viga maciza; pero en realidad no demasiado porque la estática gráfica acusaba muy claramente el esquema de esfuerzos que en ella resultaban.

En general interesaba mantener, dentro de los límites aceptables, la esbeltez de todas las piezas; pero más especialmente las que habían de sufrir esfuerzos axiales de compresión que estaban expuestas al pandeo. Es por ello por lo que podía ser preferible utilizar la *Viga Pratt* (Fig. 66d) que, a plena carga, trabajaba con los montantes verticales, más cortos, a compresión mientras que las diagonales, más largas a tracción. El caso contrario sucedía con la *Viga Howe* (Fig. 66e) donde los montantes verticales trabajaban a tracción y las diagonales a compresión.

En esta evolución tipológica de las Vigas Warren y Pratt se comprobó que, para sobrecargas parciales que ocupaban solo un trozo de la luz, los esfuerzos podían invertirse y perderse buena parte de las ventajas que ofrecían estos tipos, para evitarlo se pensó en duplicar las diagonales originando la llamada *Viga Long* o *Cruces de San Andrés* (Fig. 66f) con objeto de que siempre hubiese una diagonal, en cada recuadro, dispuesta a trabajar en tracción y, por consiguiente, ninguna de ellas necesitase ser resistente a compresión. No obstante esta ventaja se vería equilibrada por el exceso de número de barras y además, el hiperestatismo de la estructura hacía que las barras, que habrían de trabajar en compresión aunque innecesarias para el equilibrio isotático, sufrieran realmente este tipo de esfuerzo por la deformación que se les imponía con la consiguiente tendencia al pandeo, perjudicando con ello los enlaces y el trabajo de las otras piezas.¹

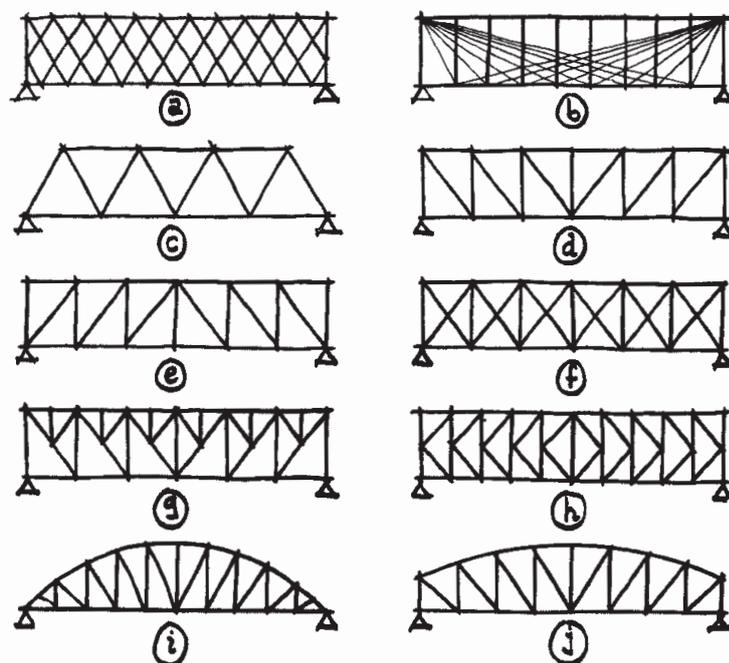


Figura 66: Tipos de Vigas biapoyadas¹

¹ Torroja Miret, E. 2007

3. VIGAS EN CELOSÍA

En todo caso, el peligro de pandeo de los montantes, o de la cabeza comprimida, y las mismas flexiones de la estructura por su propio peso, dieron lugar a triangulaciones grandes y a secciones demasiado fuertes, hecho que hizo necesario buscar arriostramientos intermedios para sus barras, es decir, triangulaciones secundarias dentro de la principal (*Fig. 66g*).

Todas estas estructuras trianguladas, que primero se construyeron articuladas, pasaron pronto a hacerse con nudos rígidos, mediante técnicas de roblonado (uniones fijas mediante remaches o roblones) más sencillas y económicas que las articulaciones y que acabaron de rigidizarse aún más con la llegada de las soldaduras. Esto permitió convertir estructuras isostáticas articuladas en estructuras hiperestáticas al suprimir sus articulaciones y a su vez que las deformaciones longitudinales de las barras, diferentes de unas a otras dentro de cada triángulo, no fueran ya posibles sin unas flexiones que interesase reducir al mínimo. Para que este hecho fuese posible (fijar las uniones) era necesario que los triángulos no fuesen demasiado escalenos, en este sentido, la triangulación de la Viga Warren responde mejor que la Pratt aunque si el objetivo es reducir las longitudes de pandeo en las diagonales la Pratt tiene un mejor rendimiento.

En vigas de gran luz, como las de los puentes, *la triangulación en K (Fig. 66h)* puede ser muy ventajosa porque sigue siendo una triangulación simple (isostática si los nudos fuesen articulados) en la que, sin variar la inclinación de las diagonales o la separación entre montantes o entre nudos sobre las cabezas, se reducen a la mitad los elementos de arriostramientos necesarios para la Viga Warren o Pratt. Al mismo tiempo, se disminuye mucho la longitud libre de los montantes y las diagonales, consecuencia de ello y de dar a esas piezas la sección apropiada para igualar sus peligros de pandeo en ambas direcciones (en el plano de la viga y en el plano perpendicular a él) se pueden lograr buenas economías con el empleo de la triangulación en K cuando se trata de grandes luces y alturas de viga.

Estas vigas trianguladas se prestan muy bien a diseñarse de altura variable siguiendo las exigencias de las flexiones. De esta manera, con carga uniformemente repartida, que da lugar a una ley parabólica de momentos flectores, se puede hacer variar el canto según esa misma ley (*Fig. 66i*) pero, a poco esbelta que sea la viga, la parábola da ángulos demasiado agudos en los triángulos extremos, con esfuerzos secundarios demasiado grandes, es por esa razón por la que se emplea la mal llamada Viga Semiparabólica (*Fig. 66j*).

En los elementos triangulados, el enlace tiene una importancia fundamental. Las barras, coincidentes en un nudo, le transmiten sus esfuerzos axiales, equilibrándose o contrarrestándose unos con otros. Ello provoca cambios bruscos de en las tensiones principales, con concentraciones importantes y unos desaprovechamientos de secciones resistentes. Este desaprovechamiento es muy notable en las costuras por roblonado; pero también con las soldaduras, pues las tensiones han de transmitirse por los estrechos cordones de soldadura establecidos sobre los bordes de los perfiles laminados cuya sección se mantiene constante, normalmente no pueden ir en el mismo plano, ni coincidir en toda su sección.¹

¹ Torroja Miret, E. 2007

3. VIGAS EN CELOSÍA

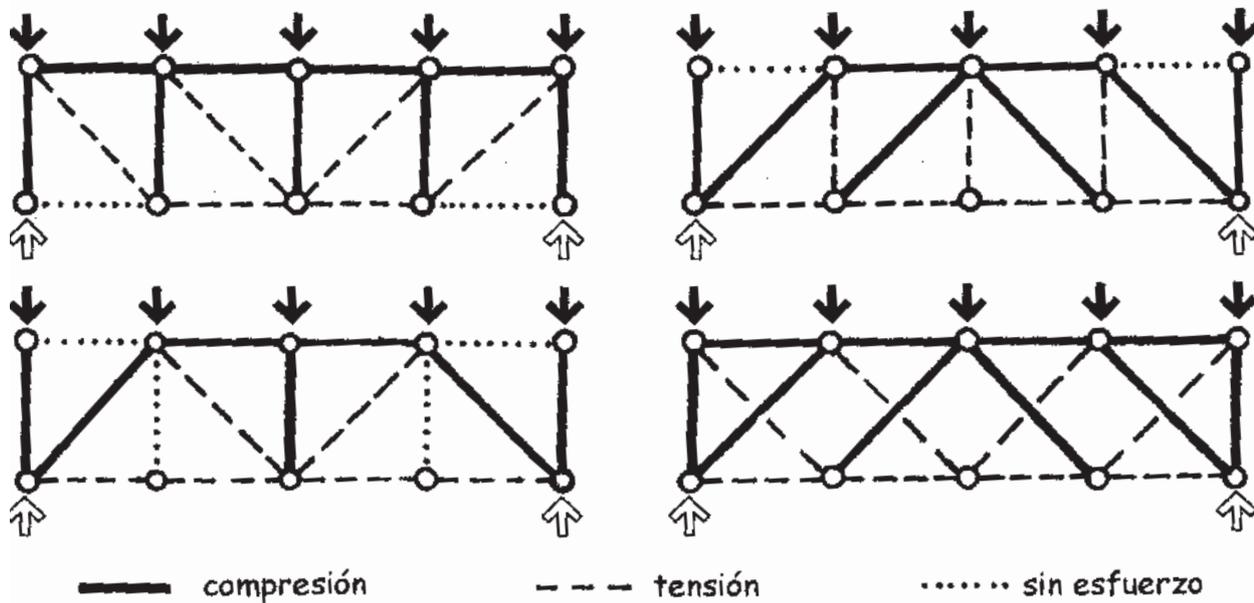


Figura 67: Esquemas de Tracción y compresión de armaduras rectangulares ¹

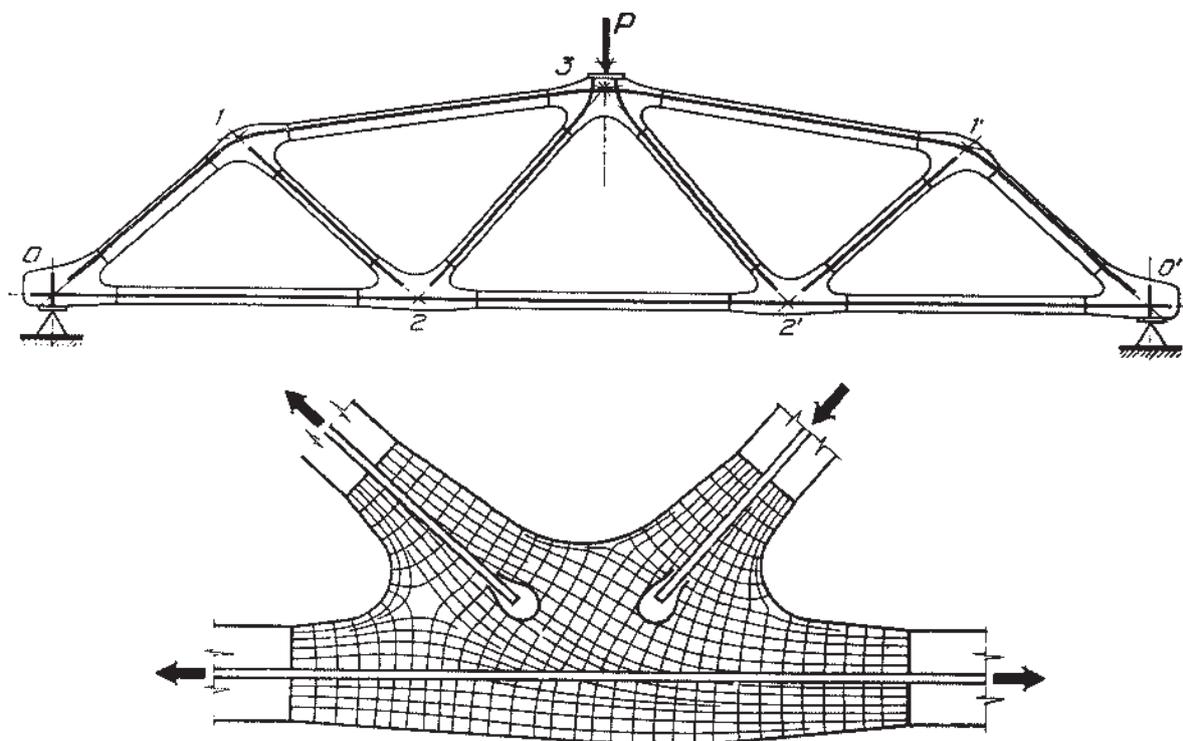


Figura 68: Viga experimental estudiada en laboratorio ²

¹ Moore F. 2001

² Torroja Miret, E. 2007

3. VIGAS EN CELOSÍA

3.0.3. EJEMPLO PRÁCTICO_COMPARATIVA DE VIGAS

Proyectar una pasarela de 60 metros, las cargas planteadas no son acordes a la normativa, simplemente se pretende mostrar los diferentes comportamientos de cada uno de los tipos. La sección tipo de las barras será la misma para todas:

- Profundidad = 0.2 m
- Ancho= 0.2 m
- Espesor = 0.02 m
- Módulo elástico $E = 2.1 \times 10^8$ KN/m²
- Coeficiente de Poisson = 0.3
- Densidad del acero 77 KN/m³
- Límite elástico del acero = 355 Mpa
- Área de la sección = 0.0144 m²
- 20 KN de carga cada 6 metros

Las estructuras con nudos rígidos se deformarían como se explica en el esquema adjunto (Esquema deformada) Se ve perfectamente que la viga Vierendeel es la que peor se comporta. Esto sucede porque no está triangulada, y la deformación de los rectángulos es mucho mayor que la de los triángulos en las otras. La flecha es 10 veces mayor que en el resto. Aproximadamente del orden de $Luz/100$, que en principio no está del todo mal. Las otras son menores que $Luz/1000$.

Si dibujamos los esfuerzos axiales vemos que en la tipo Long y en la celosía con arriostramiento en K son mayores, aunque no tienen una flecha tanto menor para justificarlos. El peso propio de esas barras juega en su contra.

Las celosías Pratt y Howe tienen la misma cantidad de acero, el mismo peso y el mismo trabajo de montaje. El comportamiento estructural se ve que es similar. La única diferencia es que las barras diagonales en la Pratt están a compresión y en la Howe a tracción, lo cual es más adecuado frente al pandeo en las barras más largas de la estructura. La viga Long, con cruces de San Andrés no funciona mejor que la Pratt y la Howe, y sin embargo necesita más material, más horas de montaje y tiene más peso propio. No parece la alternativa más adecuada.

La viga con arriostramientos en K tiene también un comportamiento similar a la Howe, pero sigue necesitando más barras, más trabajo (mayor coste) y más peso. La viga más apropiada en este caso es la Howe, sin duda. Como se ve en el cuadro anterior, todas las vigas están lejos del límite elástico del material, así que podría reducirse en principio el espesor de la chapa o el canto de la viga cuadrada, siempre que cumplan los requerimientos de la normativa frente a abolladuras y demás. Además, lo lógico sería que los montantes y los cordones tuviesen porque no sufren las mismas sollicitaciones.

El resultado es prácticamente idéntico (variaciones < 5%) usando nudos rígidos o articulados porque las cargas puntuales se encuentran en los nudos, y la única flexión que aparece en las barras es la debida al peso propio. Así hay momentos de 5, 6 ó 7 mKN en las rígidas (concretamente en los montantes extremos) y nulos en las articuladas, pero las tensiones no varían gran cosa, que es lo importante. ¹

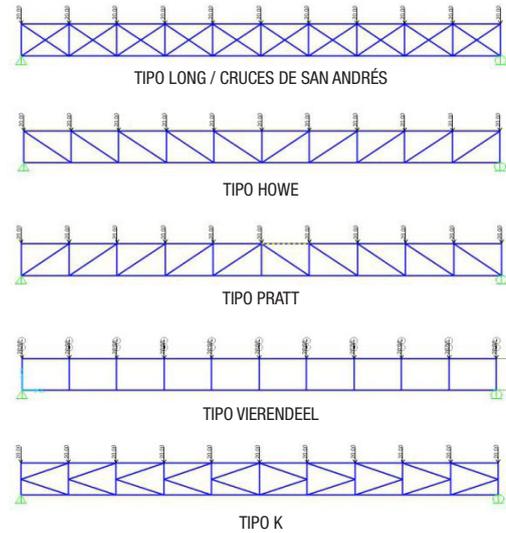


Figura 69: Ejemplo práctico-Vigas estudiadas ¹

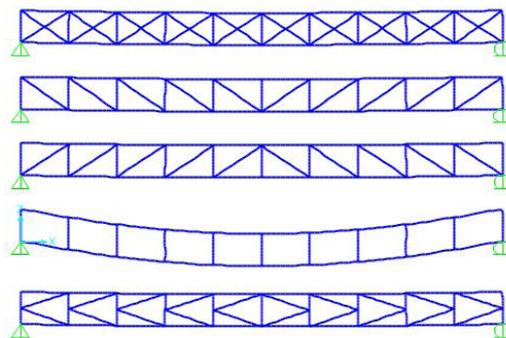


Figura 70: Ejemplo práctico-Esquema deformada ¹

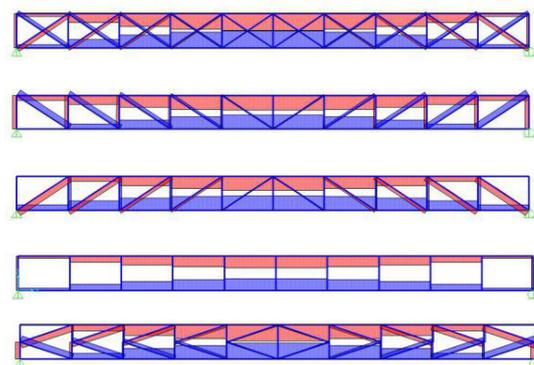


Figura 71: Ejemplo práctico-Esfuerzos axiales ¹

TIPO	MOMENTO MÁX (KN*m)	AXIL MÁX. (KN)	TENSIÓN MÁX. (MPa)	FLECHA CENTRO VANO (Cm)
LONG	5.61	989.6	74.32	6.43
HOWE	7.43	824.15	64.9	5.91
PRATT	7.29	858.2	64.9	5.85
VIERENDEEL	425	687.7	539	60.72
K	7.02	927.6	72.04	5.32

Figura 72: Ejemplo práctico-Resultados ¹

¹ Mateo Blanco. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos [www.unblogdeingenieria.wordpress.com]

3. VIGAS EN CELOSÍA

2.0.4. EJEMPLOS DE DISEÑO

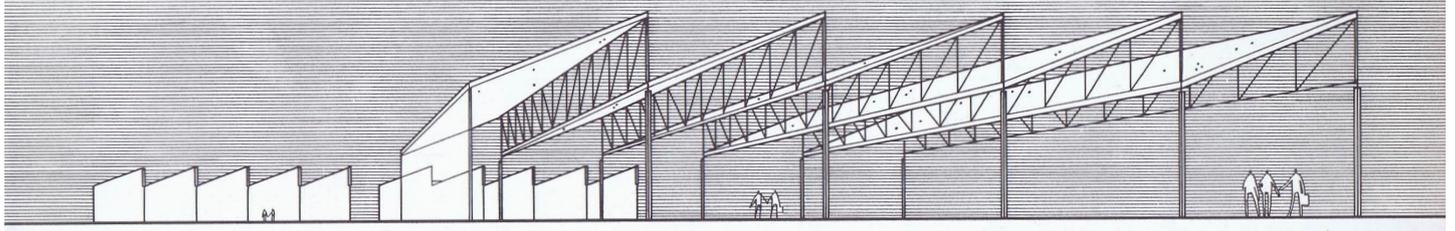


Figura 73: superficies de cubierta inclinadas apoyadas en ambos extremos. ¹

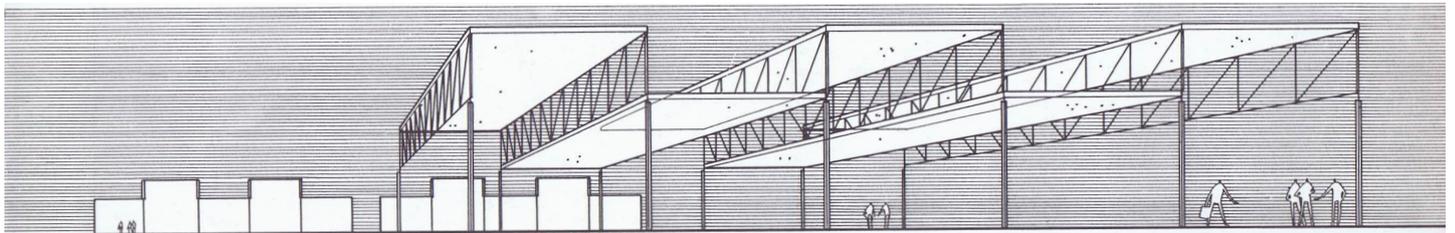


Figura 74: superficies de cubierta horizontales alternadas apoyadas en ambos extremos. ¹

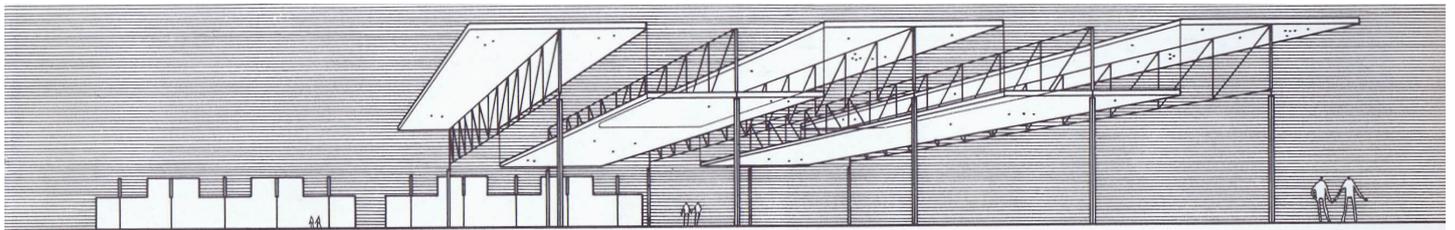


Figura 75: superficies de cubierta horizontales apoyadas en el centro. ¹

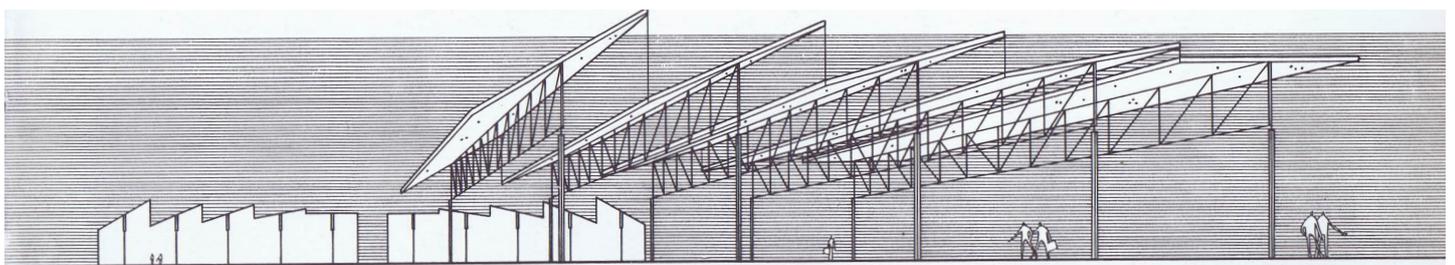


Figura 76: superficies de cubierta con diferente inclinación, apoyadas en el centro. ¹

¹ Engel, H. 1970

3. VIGAS EN CELOSÍA

3.1. VIGA CELOSÍA_TIPO WARREN [METÁLICA]

AUTOR

JAMES WARREN (1806-1908)

Ingeniero británico que, alrededor de 1848 a 1907 (junto con Willoughby Monzoni) patentó el diseño de vigas y puentes de estilo Warren. Este diseño de puente se construye principalmente mediante triángulos equiláteros que pueden soportar tracción y compresión. El primer puente colgante que incluyó una viga Warren en su diseño fue el puente de Manhattan en la ciudad de Nueva York.

El diseño de la viga Warren también se usó en el campo de la aviación cuando los biplanos eran dominantes, la cercha diagonal alterna que se usa para los puntales las alas de los aviones como el avión de línea Handley Page HP42 y el caza Fiat CR.42. La viga Warren es uno de los estilos de puentes más utilizados y conocidos en todo el mundo.

Ninguno de estos estilos de viga es lo que James Warren y Willoughby Monzani patentó en 1848 en Inglaterra. Basaron su patente en cerchas similares que fueron construidas en Francia por Alfred H. Neville y una patente que fue otorgada en Inglaterra a William Nash en 1839 con un diseño similar. A pesar de que Squire Whipple en los Estados Unidos había publicado el método para determinar las cargas en miembros de vigas bajo cargas uniformes y variables, este método no había llegado a Inglaterra. No fue sino hasta 1850 que WB Blood desarrolló un método para analizar vigas triangulares, como lo hizo Whipple.

Parece que su único reclamo de originalidad fue en el uso de triángulos con los mejores acordes de compresión y acordes de menor tracción. El primer gran puente, construido por Joseph Cubitt en 1852 aproximadamente para la patente, fue el Newark Dyke Railroad Bridge del Great Northern Railroad. En él, utilizó diagonales de compresión y tracción alternadas de hierro fundido con cordones superiores de hierro fundido y eslabones de hierro forjado para el cordón inferior. En el panel del medio tenía montantes de hierro fundido.¹

CONCEPTO DE DISEÑO

Viga con diagonales de tensión y compresión alternas; sin embargo, a veces se denomina viga equilátera ya que todas las longitudes de los paneles y las diagonales son iguales y crean una serie de triángulos equiláteros. Cuando las longitudes de los paneles son más cortas que las diagonales de igual longitud, algunas veces se denomina isósceles o viga isométrica. Cuando la longitud y la altura del tramo aumentó los miembros de compresión largos en el tramo superior necesitan arriostramiento para minimizar el pandeo en la dirección vertical.³



TIPO: WARREN
 AUTOR: JAMES WARREN
 FECHA: 1848



Figura 76: tipo Warren_variante común²

TRACCIÓN — (línea roja)
 COMPRESIÓN — (línea azul)



Figura 77: tipo Warren_variante con montantes verticales²
 (soporte del cordón superior y estructura plataforma)



Figura 78: Modelo de avión Handley Page HP42, 1930



Figura 79: Puente de Newark Dyke, Cass Hayward, Reino Unido, 1890

¹ www.structuremag.org

² Moore F. 2001

³ García López de la Osa, G. 2009

3. VIGAS EN CELOSÍA

3.2. VIGA CELOSÍA_TIPO HOWE [METÁLICA]

AUTOR

WILLIAM HOWE (1803-1852)

William Howe nació el 12 de mayo de 1803, en Spencer, Massachusetts, su padre era dueño de un aserradero y aprendió carpintería y construcción a una edad temprana. Después de completar con éxito su aprendizaje en carpintería se inscribió y se graduó en la Leicester Academy en Leicester, Massachusetts.

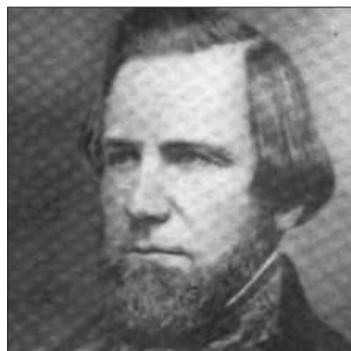
Patentó su diseño de viga con “diagonales dobles” en 1840. Su estructura era similar a la armadura de Stephen Long, excepto que reemplazó las vigas verticales con barras de metal. Las barras de metal se pueden ajustar apretando las tuercas o los tensores, conservando así la resistencia de la armadura tanto durante como después de la construcción del puente. Él fue el primero en usar componentes metálicos como miembros principales. Su método hizo posible que los puentes soportaran cargas pesadas usadas por los ferrocarriles.

Aunque era más costoso de construir, su viga fue muy popular y prácticamente eliminó la necesidad de la armadura Long. El coronel Long reclamó la infracción de patente por parte de Howe, pero su caso carecía de fundamento. Muchos consideraron este tipo de viga el comienzo de la era del puente de hierro. Se construyeron más puentes de hierro que de madera a finales del siglo XIX.¹

CONCEPTO DE DISEÑO

El interés de este tipo de estructuras es que las barras trabajan predominantemente a compresión y tracción presentando comparativamente flexiones pequeñas. Las armaduras Howe pueden ser construidas con materiales diversos: acero, aluminio, madera etc. las uniones pueden ser articuladas o rígidas.

la *Viga Howe* a plena carga trabajaba con los montantes verticales, más cortos, a tracción mientras que las diagonales, más largas a compresión. Es de señalar que para sobrecargas parciales que no ocupen solo un trozo de la luz, los esfuerzos pueden invertirse y cambiar el comportamiento de la viga, para evitarlo se pensó en duplicar las diagonales con objeto de que siempre hubiese una, en cada recuadro, dispuesta a trabajar a tracción y por tanto, ninguna de ellas necesitase ser resistente a compresión. Esta ventaja inicial quedaba contrarrestada con un exceso en el número de barras y además provocaba que el hiperestatismo de la estructura sometiera a las barras sometidas a compresión a un exceso de este esfuerzo, lo que producía una mayor tendencia al pandeo, perjudicando con ello los enlaces y el trabajo de las demás piezas.³



TIPO: HOWE
 AUTOR: WILLIAM HOWE
 FECHA: 1840



Figura 80: tipo Howe_variante común²

TRACCIÓN ——— (línea roja)
 COMPRESIÓN ——— (línea azul)

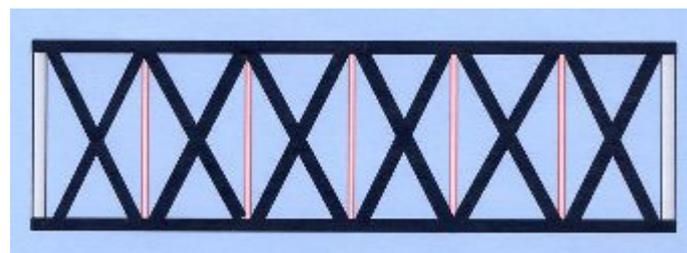


Figura 81: tipo Howe_variante con diagonales dobles

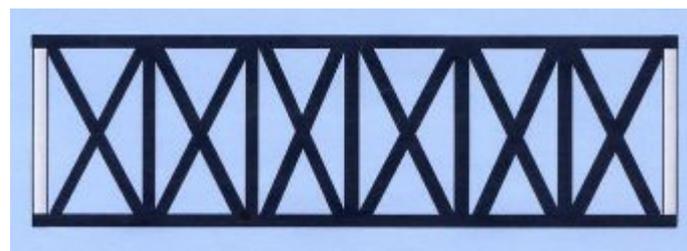


Figura 82: tipo Long o Cruces de San Andrés



Figura 83: Puente sobre el río Alamo, Holtville, California, 1910

¹ www.asce.org

² Moore F. 2001

³ García López de la Osa, G. 2009

3. VIGAS EN CELOSÍA

3.3. VIGA CELOSÍA_TIPO PRATT [METÁLICA]

AUTOR

THOMAS WILLIS PRATT (1812-1875)

Thomas Willis Pratt nació en 1812 en Boston, Massachusetts. Fue educado en la universidad en Troy, NY en el Instituto Rensselaer y el Instituto Politécnico Rensselaer, pero nunca se graduó. En cambio, regresó a casa y trabajó en Boston, Worcester RR y las empresas de ingeniería de Providence & Worcester RR cuando la mayoría de los puentes se construyeron con madera y con diseños de cerchas fabricadas por SH Long, Elias Towne y William Howe.¹

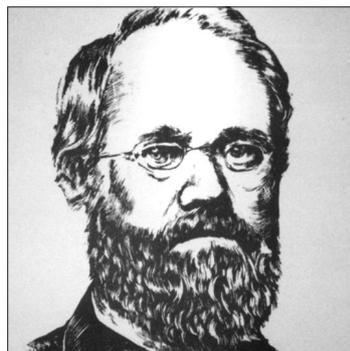
CONCEPTO DE DISEÑO

A diferencia de una celosía Howe, aquí las barras están inclinadas en sentido contrario (forman V) de manera que las diagonales están sometidas a tracción mientras que las barras verticales están comprimidas salvo en los cuadros cercanos a los apoyos donde se produce una inversión de esfuerzos.

La forma básica de la armadura de Pratt incluye un diseño de armadura triangular cuyos miembros diagonales se inclinan hacia el centro del puente. Cuando está bajo carga, este diseño hace que las diagonales estén en tracción mientras que los montantes verticales están a compresión. Si los miembros diagonales están hechos de material sólido (como barras de metal) la carga pesada de la armadura puede provocar la necesidad de implementar refuerzos en el área central de esta, ya que esa parte se experimentará la mayor resistencia a cargas de fuerza. Esas áreas centrales se pueden reforzar con materiales más fuertes, o se pueden subdividir en patrones en forma de K o Y.

Pratt sin duda había visto el puente Springfield de Howe, patentado en 1840, al otro lado del río Connecticut y era consciente de que fue adoptado por muchos ferrocarriles en reemplazo de las vigas Long y Towne. La utilización de la armadura de Howe fue limitada, ya que las diagonales a compresión eran susceptibles a pandeo. Con el tiempo, las cuñas se aflojaron requiriendo un ajuste frecuente de los verticales a tracción.

Básicamente Pratt tomó la viga Long y reemplazó las diagonales de madera con dos varillas de hierro con roscas y tuercas, mientras mantenía las verticales de madera a compresión, en ambos extremos para hacer los ajustes necesarios para obtener la inclinación necesaria y el pretensado. Como los tramos más largos eran posibles con los miembros largos a tracción, el puente parecía corregir algunos de los problemas que se habían comprobado con las vigas Howe.³



TIPO: PRATT
 AUTOR: THOMAS Y CALEB PRATT
 FECHA: 1844



Figura 84: tipo Pratt_variante común²

TRACCIÓN ——— (línea roja)
 COMPRESIÓN ——— (línea azul)



Figura 85: tipo Pratt_variante con barras de cierre²

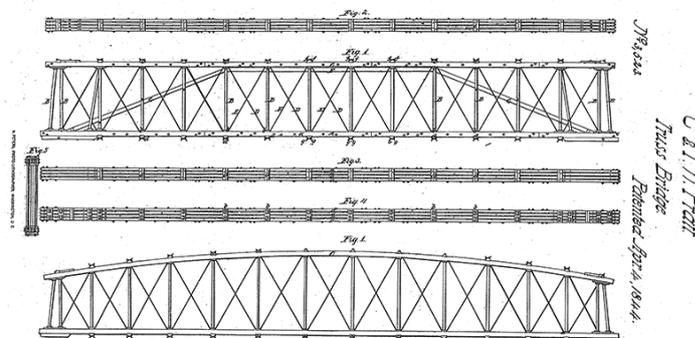


Figura 86: Dibujo de patente de Pratt



Figura 87: Puente Río Dearborn, Montana, 1897

¹ www.asce.org

² Moore F. 2001

³ García López de la Osa, G. 2009

3. VIGAS EN CELOSÍA

3.4. VIGA CELOSÍA_TIPO LONG [METÁLICA]

AUTOR *

STEPHEN H. LONG (1784-1864)

Nació en Hopkinton, New Hampshire, durante la Guerra de 1812, Long trabajó como ingeniero civil en las defensas del puerto de la ciudad de Nueva York.

1827 a 1830 Los servicios de Long como ingeniero son utilizados por el Ferrocarril de Baltimore y Ohio, fue en esta época cuando se construyeron varios puentes que él había patentado. Estos diseños se usarían no solo en la construcción de puentes ferroviarios, sino también en carreteras regulares.

En 1829 Long publicó su Manual del ferrocarril donde propuso un sistema para construir un ferrocarril usando preceptos geométricos y oposición a la locomoción.

El estado de Georgia contrató a Long como su ingeniero jefe y fue en ese momento que estudió las rutas de los ferrocarriles occidentales y atlánticos. El procedimiento de Long de localizar curvas y una nueva forma de puente avanzaría la ciencia del tendido ferroviario que fue adoptado más fácilmente por otros en el campo.

Durante la mayor parte del período de 1840 a 1846, la carrera de Long se centró en la limpieza y el dragado de los ríos Mississippi, Missouri, Ohio y Arkansas. Al final de la Guerra México-Estados Unidos, Long volvió al diseño y la fabricación de barcos de vapor. En el otoño de 1847, lanzó seis vapores para el Quartermasters Corps y ofreció construir otros ocho. Desde fines de 1847 hasta principios de 1847, fue miembro del panel militar del Tribunal Marcial de John Charles Fremont. ¹

CONCEPTO DE DISEÑO

Los cordones superior e inferior horizontales se unen mediante montantes verticales todos ellos arriostrados por diagonales dobles. No confundir con una variante del tipo Howe donde las montantes verticales son varillas metálicas. ²



TIPO: LONG
AUTOR: S. LONG
FECHA: 1830



Figura 88: tipo Long o Cruces de San Andrés

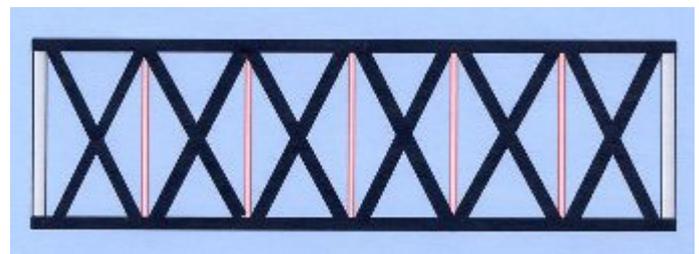


Figura 89: tipo Howe_variante con diagonales dobles

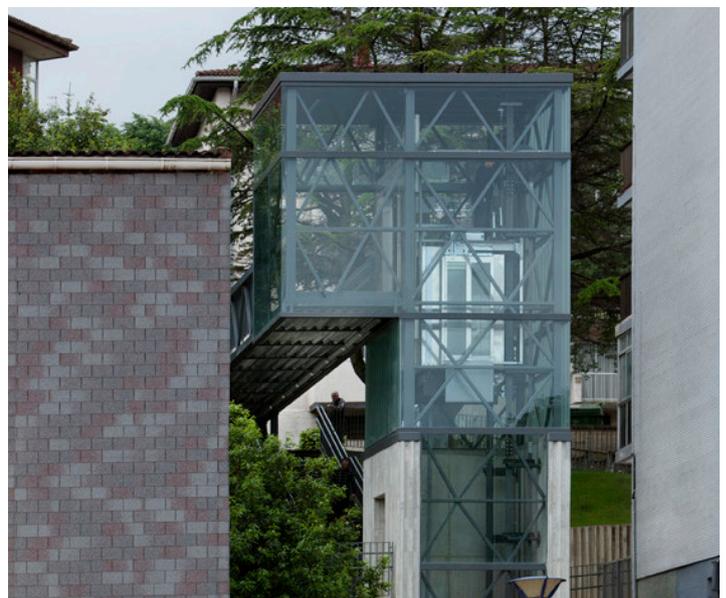


Figura 90: Ascensor Urbano_Vaumn Architects, 2011

¹ www.asce.org

² García López de la Osa, G. 2009

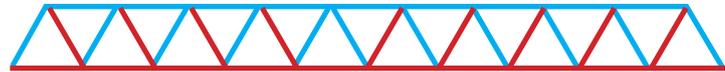
3. VIGAS EN CELOSÍA

3.5. DIAGRAMAS COMPARATIVOS DE VIGAS EN CELOSÍA ¹

TIPO WARREN [PLANA]

James Warren y Willboughby Monzoni (1848)

TRACCIÓN ——— (línea roja)
 COMPRESIÓN ——— (línea azul)



TIPO WARREN COMÚN



TIPO WARREN_VARIANTE CON MONTANTES VERTICALES
 (soporte del cordón superior y estructura plataforma)

TIPO HOWE [PLANA]

William Howe (1840)

TRACCIÓN ——— (línea roja)
 COMPRESIÓN ——— (línea azul)



TIPO HOWE COMÚN

TIPO PRATT [PLANA]

Thomas y Caleb Pratt (1844)

TRACCIÓN ——— (línea roja)
 COMPRESIÓN ——— (línea azul)



TIPO PRATT COMÚN



TIPO PRATT_VARIANTE CON BARRAS DE CIERRE DE PANELES

TIPO LONG / CRUZ DE SAN ANDRÉS

Stephen H. Long (1835)

TRACCIÓN ——— (línea roja)
 COMPRESIÓN ——— (línea azul)



TIPO LONG / CRUCES DE SAN ANDRÉS

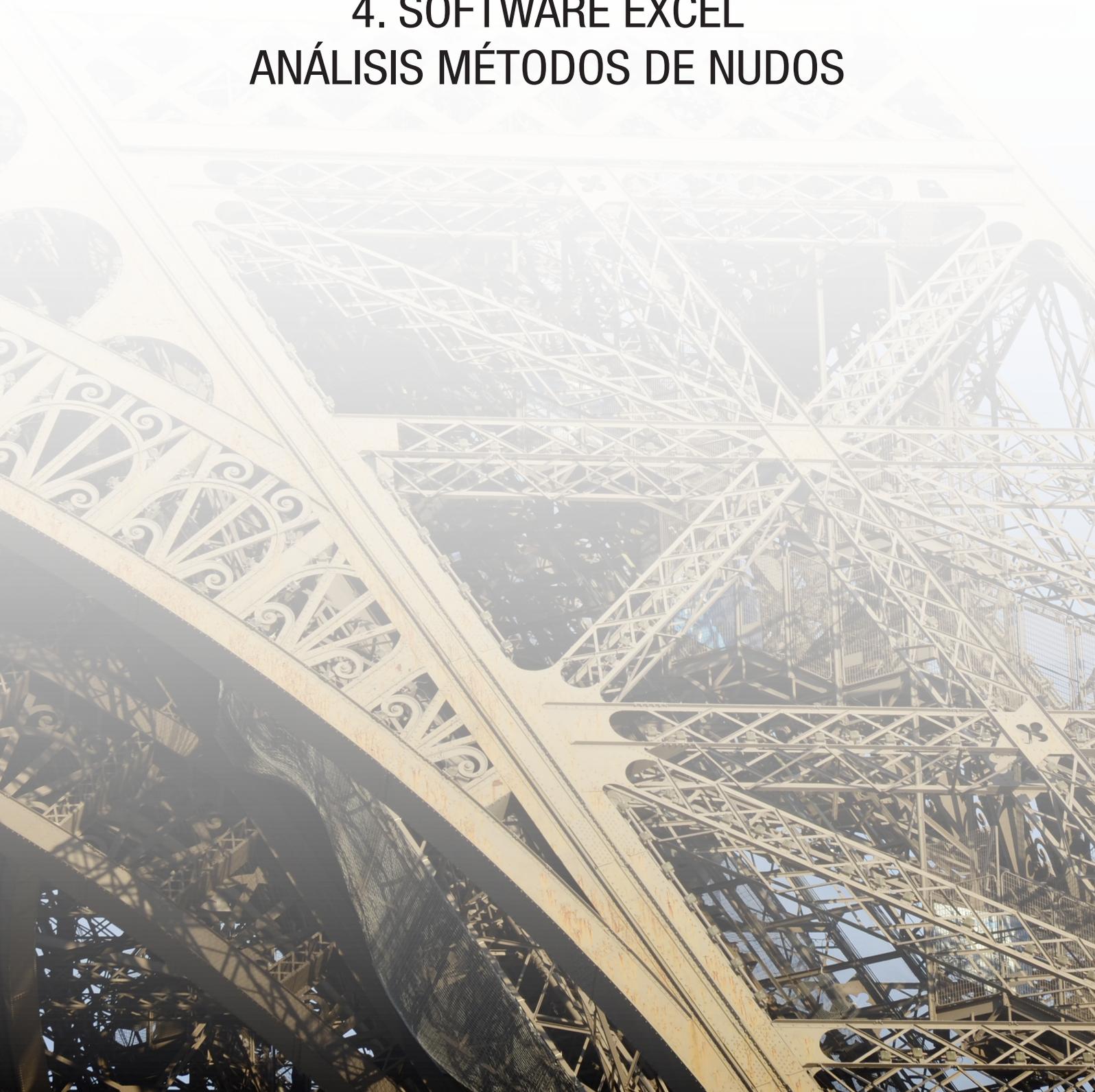
¹ Moore F. 2001

CERCHAS Y CELOSÍAS

RAZÓN DE SER Y DESARROLLO DE SOFTWARE

4. SOFTWARE EXCEL

ANÁLISIS MÉTODOS DE NUDOS



4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

4.0. METODOLOGÍA DE TRABAJO / PLANTILLA

El trabajo realizado en este bloque práctico tenía como principal objetivo aportar una herramienta de análisis sencilla con la que poder obtener los esfuerzos resultantes de los tipos de sistemas estudiados. El método utilizado para la creación de esta plantilla expuestos anteriormente en la página 22 ha sido el método de Nudos. Hay que añadir un segundo objetivo y es el de la creación de un material base para futuras líneas de investigación sobre este tipo sistemas de estructurales.

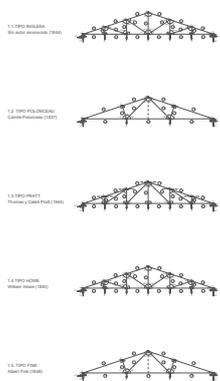
A continuación se define la metodología de trabajo seguida para la creación de la plantilla de software excel, dicha metodología se engloba en siete apartados principales:

1) Creación de gráficos de apoyo:

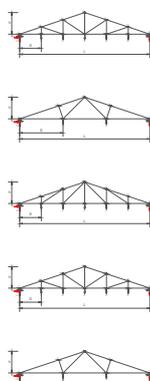
Dimensiones físicas, Estados de cargas, Reacciones exteriores, Esquemas de nudos aislados, Secciones de comprobación y Diagramas de esfuerzos de todos los tipos estudiados en formato .dwg y .jpg para establecer un criterio de nomenclatura de parámetros y dimensiones a definir para su posterior inclusión en software excel.

01. CERCHAS / ARMADURAS DE CUBIERTA

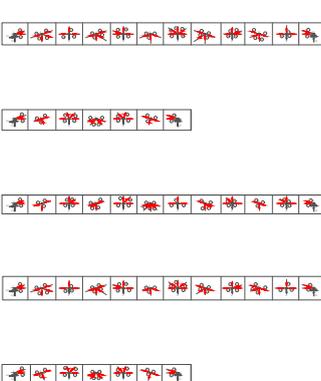
CARGAS / REACCIONES / NUDOS Y BARRAS



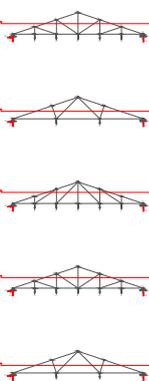
PARÁMETROS PRINCIPALES



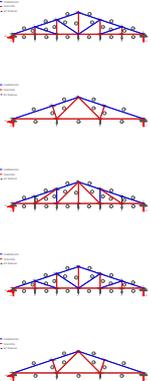
NUDOS INDIVIDUALES



COMPROBACIONES DE RESULTADOS_SECCIONES

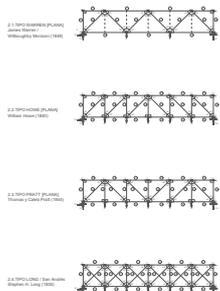


DIAGRAMAS DE ESFUERZOS

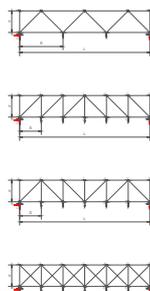


02. VIGAS EN CELOSÍA

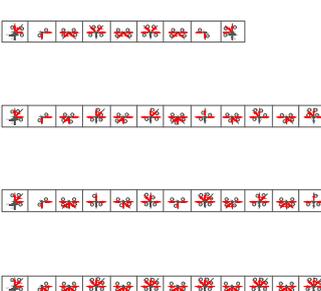
CARGAS / REACCIONES / NUDOS Y BARRAS



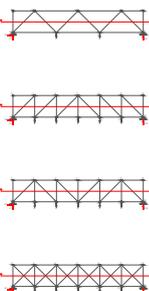
PARÁMETROS PRINCIPALES



NUDOS INDIVIDUALES



COMPROBACIONES DE RESULTADOS_SECCIONES



DIAGRAMAS DE ESFUERZOS

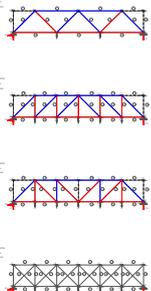


Figura 91: Gráficos de apoyo para software excel

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

2) Introducción de parámetros principales:

Los parámetros que el usuario podrá definir serán la altura (h) y la luz a salvar (L) ambos en metros y marcados en color amarillo, esta plantilla se ha preparado para tener en cuenta (a la hora de realizar los cálculos y sin que el usuario pueda modificarlos) parámetros como el número de vanos (n), la separación entre montantes (S), el valor de las cargas aplicadas en los nudos de los cordones inferiores (P), el número de cargas total que se aplican a los sistemas y los ángulos que forman las diagonales con las horizontales y que serán necesarios para las descomposiciones de esfuerzos posteriores en las ecuaciones de equilibrios horizontales y verticales.

1.1. TIPO INGLESA DE 6 VANOS	
PARÁMETROS	
Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO	
ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	6
SEPARACIÓN [S] (m)	8
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTUALES	5
ÁNGULOS	α (18,45) °
	β (33,67) °
	Ω (71,45) °

Figura 92: Software excel, parámetros a definir por usuario.

3) Cálculo de Grados de Hiperestatismo Interno, Externo y Total:

Aunque desde el comienzo del presente trabajo se acordara trabajar con estructuras isostáticas (igual número de incógnitas que de ecuaciones) se han introducido las ecuaciones para realizar los cálculos automáticos de los tres grados de libertad de una estructura en previsión de futuras líneas de investigación con estructuras hiperestáticas o hipostáticas.

GRADOS DE HIPERESTATISMO			
Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDL_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDL_{int}$	60	60	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDL_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDL_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{int}	GH_{ext}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

Figura 93: Software excel, cálculo grados de hiperestatismo.

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

4) Cálculo de Reacciones Externas:

Aunque desde el comienzo del presente trabajo se acordara trabajar los cálculos con cargas puntuales unitarias en los nudos para la obtención de las ecuaciones en función de estas cargas "P", la plantilla viene preparada para realizar, en el caso de desproteger cada hoja de la misma introduciendo la contraseña "estructuras", el cálculo de los valores de las reacciones externas en los apoyos de los sistemas en función del valor de cada carga puntual (P) y el número total de estas en previsión de futuras líneas de investigación.

24 REACCIONES EXTERNAS (N)			
25	ECUACIONES	RESULTADOS	
26	$H1 = 0$	H1	0,00
27	$V1 = (n-1) \cdot V12$	V1	2,50
28	$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	V12	2,50

Figura 94: Software excel, cálculo de reacciones externas.

5) Cálculo de Esfuerzos en Barras - Método de Nudos:

Posteriormente se preparó la plantilla para que realizara los cálculos automáticamente de los esfuerzos que actúan en cada barra y el sentido de los mismos (tracción o compresión) resolviendo las ecuaciones de equilibrio de fuerzas verticales y horizontales en cada nudo, dejando a su vez indicado las ecuaciones que rigen los equilibrios verticales y horizontales, la nomenclatura de cada barra, los valores de los esfuerzos en cada una de ellas y el sentido de los mismos (tracción o compresión).

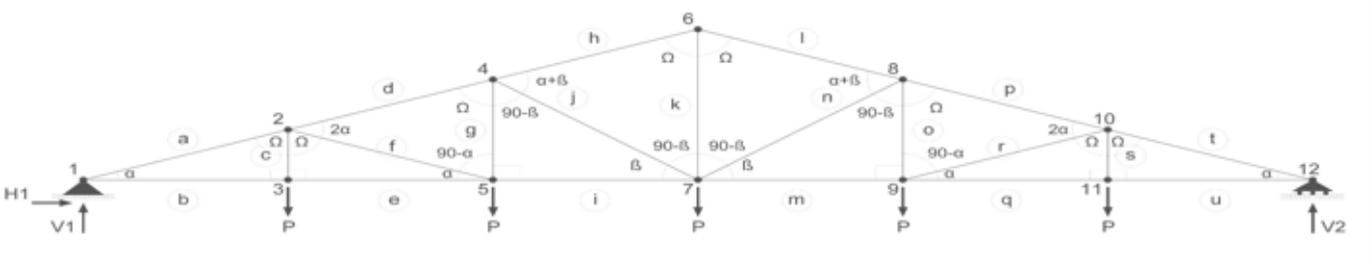
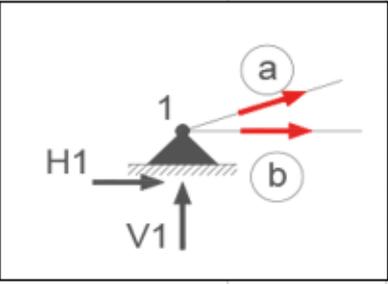
30 ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)						
31 Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN						
32						
33						
34 						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43 						
44						
45						
46						
47						
48						
49						
50						
51						
52						
53 $N_b = -N_a \cdot \cos(\alpha)$						
54 $N_a = -V1 / \sin(\alpha)$						
55						
		Nb	7,49	TRACCIÓN	Nu	7,49
		Na	-7,90	COMPRESIÓN	Nt	-7,90
						TRACCIÓN
						COMPRESIÓN

Figura 95: Software excel, cálculo de esfuerzos en barras.

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

6) Gráfico y Tabla Resumen de resultados:

Con el objetivo de facilitar una mejor lectura final de resultados se ha introducido un gráfico resumen donde se definen los sentidos de los esfuerzos en las barras (rojo = tracción, azul = compresión y línea punteada barras que no trabajasen). Además se añadió una tabla resumen con todas las barras nombradas según criterio seguido, el valor del esfuerzo en cada una de ellas y el sentido de los mismos.

138 TABLA RESUMEN_ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)								
139 Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN								
140								
141		BARRA	VALOR	TIPO		BARRA	VALOR	TIPO
142		Na	-7,90	COMPRESIÓN		Nt	-7,90	COMPRESIÓN
143		Nb	7,49	TRACCIÓN		Nu	7,49	TRACCIÓN
144		Nc	1,00	TRACCIÓN		Ns	1,00	TRACCIÓN
145		Nd	-7,74	COMPRESIÓN		Np	-7,74	COMPRESIÓN
146		Ne	7,49	TRACCIÓN		Nq	7,49	TRACCIÓN
147		Nf	-0,16	COMPRESIÓN		Nr	-0,16	COMPRESIÓN
148		Ng	1,05	TRACCIÓN		No	1,05	TRACCIÓN
149		Nh	-1,60	COMPRESIÓN		Nl	-1,60	COMPRESIÓN
150		Ni	7,34	TRACCIÓN		Nm	7,34	TRACCIÓN
151		Nj	-6,54	COMPRESIÓN		Nn	-6,54	COMPRESIÓN
152		Nk	1,02	TRACCIÓN				

Figura 96: Software excel, tabla resumen de resultados

7) Secciones de comprobación:

Con el objetivo de corroborar que los resultados obtenidos eran correctos se añadieron las ecuaciones de equilibrios horizontales y verticales correspondientes a secciones de comprobación dadas por puntos concretos en los sistemas estudiados. Si la sumatoria de ambas ecuaciones en cada sistema resultaban cero significaría que los resultados obtenidos eran correctos como así fue.

154 SECCIÓN DE COMPROBACIÓN	
155	
156	COMPRESIÓN
157	TRACCIÓN
158	NO TRABAJA
159	
160	
161	
162	
163	
164	
165	
166	
167	$\sum F_H=0 \rightarrow Nd*\cos(\alpha)-Nj*\cos(90-\beta)+Nn*\cos(90-\beta)-Np*\cos(\alpha)=0$
168	
169	
170	$\sum F_V=0 \rightarrow Nd*\sen(\alpha)-Ng+Nj*\sen(90-\beta)-Nk+Nn*\sen(90-\beta)-No+Np*\sen(\alpha)=0$

Figura 97: Software excel, sección y ecuaciones de comprobación

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

4.1. PLANTILLA CERCHA TIPO INGLESA / 6 VANOS

1.1. TIPO INGLESA DE 6 VANOS

PARÁMETROS
 Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	6
SEPARACIÓN [S] (m)	8
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTUALES	5
ÁNGULOS	α (18,45)° β (33,67)° Ω (71,45)°

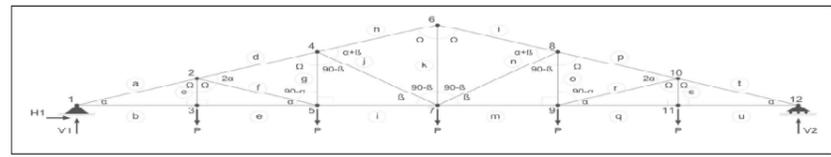
GRADOS DE HIPERESTATISMO

Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDI_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDI_{int}$	60	60	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDI_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDI_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{int}	GH_{ext}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	H1 0,00
$V1 = (n-1) \cdot V12$	V1 2,50
$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	V12 2,50

ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
 Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN



$Nb = -Na \cdot \cos(\alpha)$ **Nb** 7,49 TRACCIÓN

$Na = -V1 / \sin(\alpha)$ **Na** -7,90 COMPRESIÓN

Nu 7,49 TRACCIÓN

Nt -7,90 COMPRESIÓN

Nd -7,74 COMPRESIÓN

Nf -0,16 COMPRESIÓN

Np -7,74 COMPRESIÓN

Nr -0,16 COMPRESIÓN

Ne 7,49 TRACCIÓN

Nc 1,00 TRACCIÓN

Nq 7,49 TRACCIÓN

Ns 1,00 TRACCIÓN

$Nh = (Nd \cdot \cos(90-\Omega) - Nj \cdot \cos(\beta)) / \cos(\alpha)$ **Nh** -1,60 COMPRESIÓN

$Nj = (-Nd \cdot \sin(90-\Omega) - Ng + Nd \cdot \cos(90-\Omega) \cdot \tan(\alpha)) /$ **Nj** -6,54 COMPRESIÓN

Ni -1,60 COMPRESIÓN

Nn -6,54 COMPRESIÓN

$Ni = Ne + Nf \cdot \cos(\alpha)$ **Ni** 7,34 TRACCIÓN

$Ng = P - Nf \cdot \sin(\alpha)$ **Ng** 1,05 TRACCIÓN

Nm 7,34 TRACCIÓN

No 1,05 TRACCIÓN

Nl -1,60 COMPRESIÓN

Nk 1,02 TRACCIÓN

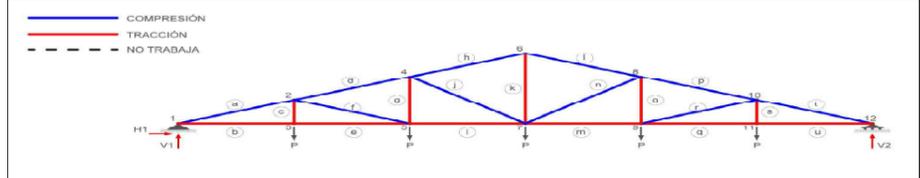


TABLA RESUMEN ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
 Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

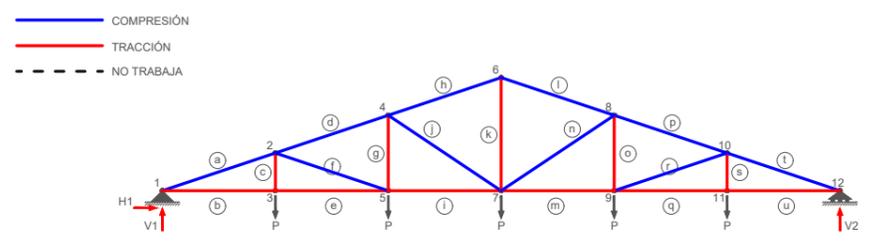
BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	-7,90	COMPRESIÓN	Nt	-7,90	COMPRESIÓN
Nb	7,49	TRACCIÓN	Nu	7,49	TRACCIÓN
Nc	1,00	TRACCIÓN	Nv	1,00	TRACCIÓN
Nd	-7,74	COMPRESIÓN	Np	-7,74	COMPRESIÓN
Ne	7,49	TRACCIÓN	Nq	7,49	TRACCIÓN
Nf	-0,16	COMPRESIÓN	Nr	-0,16	COMPRESIÓN
Ng	1,05	TRACCIÓN	No	1,05	TRACCIÓN
Nh	-1,60	COMPRESIÓN	Ni	-1,60	COMPRESIÓN
Ni	7,34	TRACCIÓN	Nm	7,34	TRACCIÓN
Nj	-6,54	COMPRESIÓN	Nn	-6,54	COMPRESIÓN
Nk	1,02	TRACCIÓN			

SECCIÓN DE COMPROBACIÓN

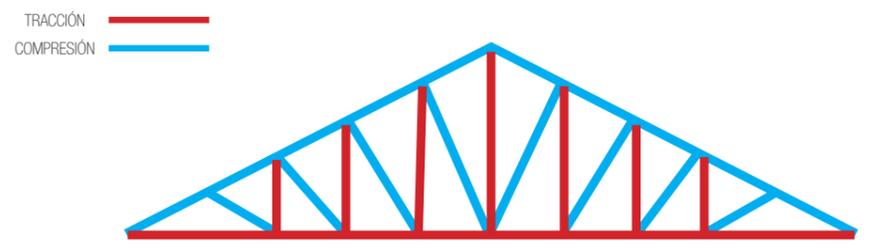
$\sum Fx=0 \rightarrow Nd \cdot \cos(\alpha) - Nj \cdot \cos(90-\beta) + Nn \cdot \cos(90-\beta) - Np \cdot \cos(\alpha) = 0$

$\sum Fy=0 \rightarrow Nd \cdot \sin(\alpha) - Ng + Nj \cdot \sin(90-\beta) - Nk + Nn \cdot \sin(90-\beta) - No + Np \cdot \sin(\alpha) = 0$

Resultados Plantilla Excel



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

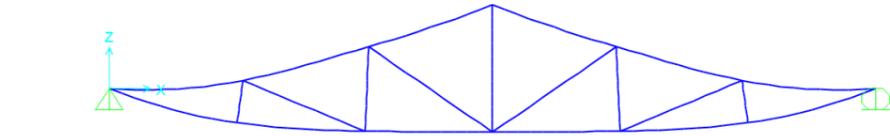


Diagrama Deformada

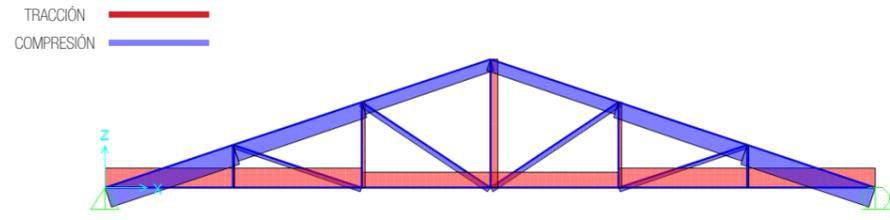


Diagrama de Axiles

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

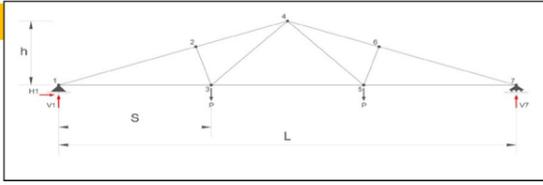
4.2. PLANTILLA CERCHA TIPO POLONCEAU / 3 VANOS

1.2. TIPO POLONCEAU DE 3 VANOS

PARÁMETROS

Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	3
SEPARACIÓN [S] (m)	16
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTALES	2
ÁNGULOS	α (18,45)° β (33,67)° Ω (71,45)°



GRADOS DE HIPERESTATISMO

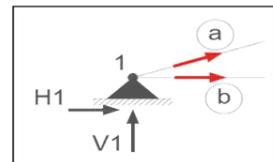
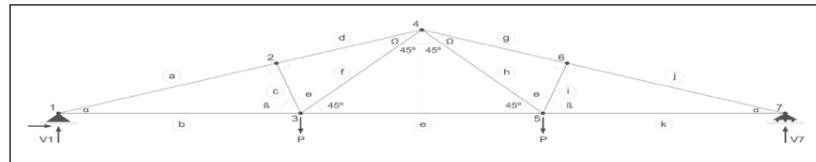
Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDL_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDL_{int}$	24	24	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDL_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDL_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{total}	GH_{ext}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

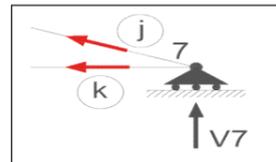
ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	$H1$ 0,00
$V1 = (n-1) \cdot V12$	$V1$ 1,00
$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	$V7$ 1,00

ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)

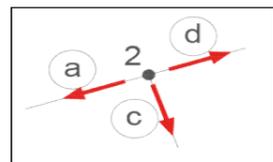
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN



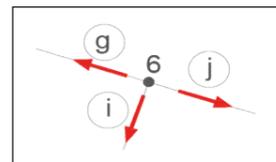
$N_b = -N_a \cdot \cos(\alpha)$ N_b 3,00 TRACCIÓN
 $N_a = -V1 / \sin(\alpha)$ N_a -3,16 COMPRESIÓN



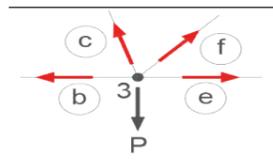
N_k 3,00 TRACCIÓN
 N_j -3,16 COMPRESIÓN



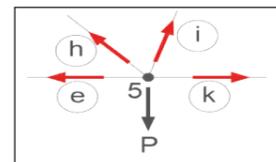
$N_c = N_a \cdot \cotg(\alpha) - N_d \cdot \cotg(\alpha)$ N_c 1,05 TRACCIÓN
 $N_d = [N_a + N_a \cdot \cotg^2(\alpha)] / \cotg^2(\alpha)$ N_d -3,51 COMPRESIÓN



N_i 1,05 TRACCIÓN
 N_g -3,51 COMPRESIÓN



$N_e = N_b + N_c \cdot \cos(\beta) - N_f \cdot \cos(45)$ N_e 3,46 TRACCIÓN
 $N_f = (P - N_c \cdot \sin(\beta)) / \sin(45)$ N_f 0,59 TRACCIÓN



N_h 3,46 TRACCIÓN
 N_g 0,59 TRACCIÓN

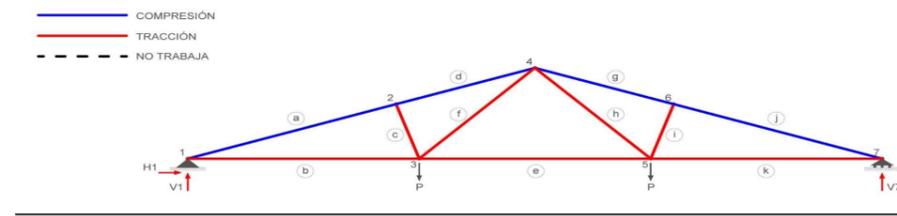
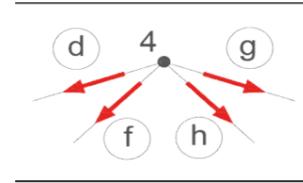
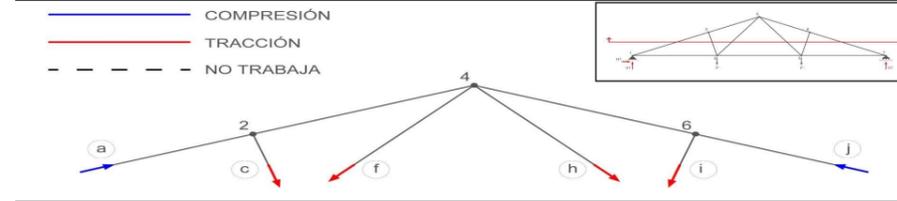


TABLA RESUMEN_ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)

Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	-3,16	COMPRESIÓN	Nj	-3,16	COMPRESIÓN
Nb	3,00	TRACCIÓN	Nk	3,00	TRACCIÓN
Nc	1,05	TRACCIÓN	Ni	1,05	TRACCIÓN
Nd	-3,51	COMPRESIÓN	Ng	-3,51	COMPRESIÓN
Ne	3,46	TRACCIÓN	Nh	0,59	TRACCIÓN
Nf	0,59	TRACCIÓN			

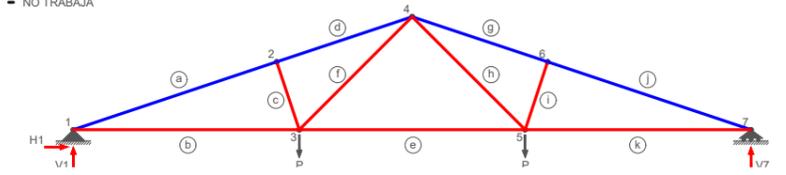
SECCIÓN DE COMPROBACIÓN



$\sum F_H = 0 \rightarrow$ $N_a \cdot \cos(\alpha) + N_c \cdot \cos(45) - N_f \cdot \cos(45) + N_h \cdot \cos(45) - N_i \cdot \cos(45) - N_j \cdot \cos(45) = 0$
 $\sum F_V = 0 \rightarrow$ $N_a \cdot \sin(\alpha) - N_c \cdot \sin(45) - N_f \cdot \sin(45) - N_h \cdot \sin(45) - N_i \cdot \sin(45) + N_j \cdot \sin(\alpha) = 0$

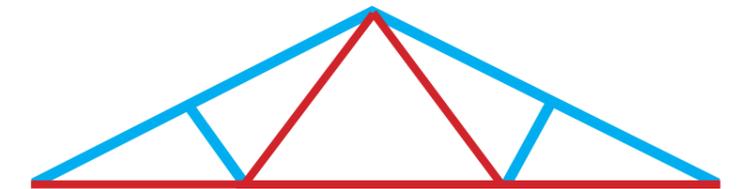
Resultados Plantilla Excel

COMPRESIÓN (Blue line)
TRACCIÓN (Red line)
NO TRABAJA (Dashed line)



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida

TRACCIÓN (Red line)
COMPRESIÓN (Blue line)



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

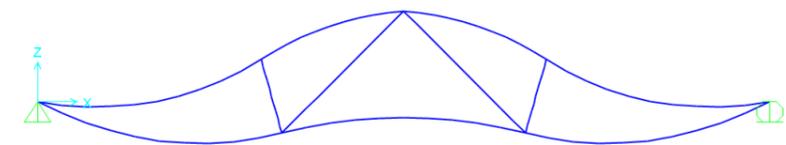


Diagrama Deformada

TRACCIÓN (Red line)
COMPRESIÓN (Blue line)

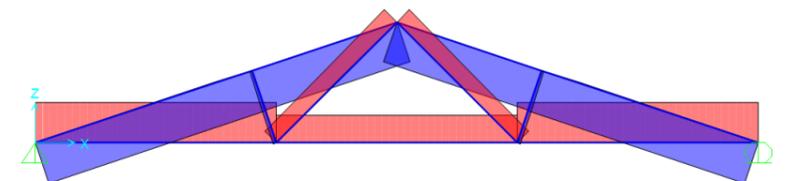


Diagrama de Axiles

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

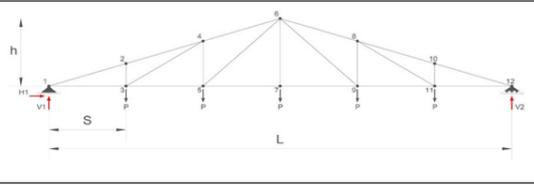
4.3. PLANTILLA CERCHA TIPO PRATT / 6 VANOS

1.3. TIPO PRATT DE 6 VANOS

PARÁMETROS

Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	6
SEPARACIÓN [S] (m)	8
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTUALES	5
ÁNGULOS	
α (18,45)°	
β (33,67)°	
Ω (71,45)°	
Θ (56,32)°	



GRADOS DE HIPERESTATISMO

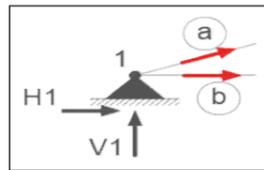
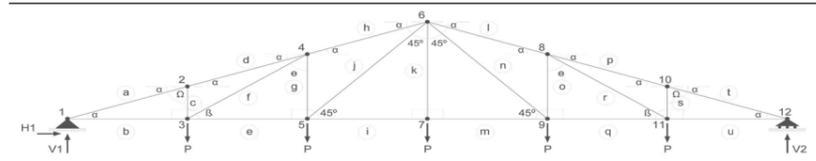
Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDL_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDL_{int}$	60	60	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDL_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDL_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{int}	GH_{ext}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

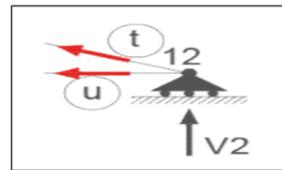
ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	H1 0,00
$V1 = (n-1) \cdot V12$	V1 2,50
$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	V12 2,50

ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)

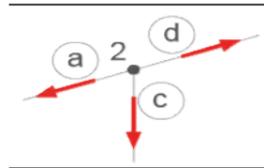
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN



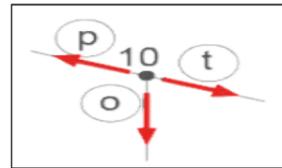
$Nb = -Na \cdot \cos(\alpha)$	Nb	7,49	TRACCIÓN
$Na = -V1 / \sin(\alpha)$	Na	-7,90	COMPRESIÓN



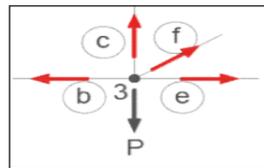
$Nb = -Na \cdot \cos(\alpha)$	Nb	7,49	TRACCIÓN
$Na = -V1 / \sin(\alpha)$	Na	-7,90	COMPRESIÓN



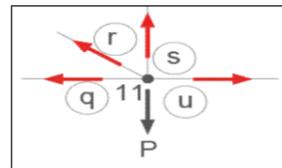
$Nd = Na$	Nd	-7,90	COMPRESIÓN
$Nc = Na \cdot \sin(\alpha) - Na \cdot \sin(\alpha)$	Nc	0,00	NO TRABAJA



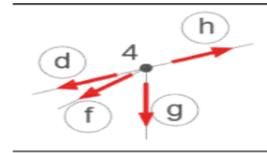
$Nd = Na$	Nd	-7,90	COMPRESIÓN
$Nc = Na \cdot \sin(\alpha) - Na \cdot \sin(\alpha)$	Nc	0,00	NO TRABAJA



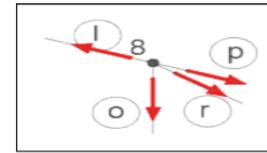
$Ne = Nb - Nf \cdot \cos(\beta)$	Ne	5,99	TRACCIÓN
$Nf = P / \sin(\beta)$	Nf	1,80	TRACCIÓN



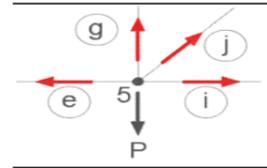
$Ne = Nb - Nf \cdot \cos(\beta)$	Ne	5,99	TRACCIÓN
$Nf = P / \sin(\beta)$	Nf	1,80	TRACCIÓN



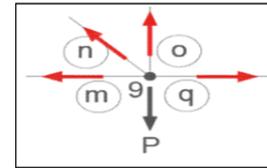
$h = (Nd \cdot \cos(\alpha) + Nf \cdot \sin(\Theta)) / \cos(\Theta)$	Nh	-6,32	COMPRESIÓN
$-Nd \cdot \sin(\alpha) + Nd \cdot \tan(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + h$	Ng	-0,50	COMPRESIÓN



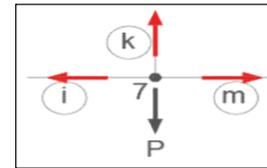
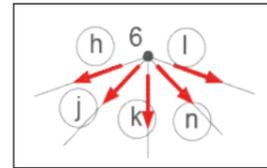
$h = (Nd \cdot \cos(\alpha) + Nf \cdot \sin(\Theta)) / \cos(\Theta)$	Ni	-6,32	COMPRESIÓN
$-Nd \cdot \sin(\alpha) + Nd \cdot \tan(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + h$	No	-0,50	COMPRESIÓN



$Ni = Ne - Nj \cdot \cos(45)$	Ni	4,49	TRACCIÓN
$Nj = (P - Ng) / \sin(45)$	Nj	2,12	TRACCIÓN



$Ni = Ne - Nj \cdot \cos(45)$	Nm	4,49	TRACCIÓN
$Nj = (P - Ng) / \sin(45)$	Nn	2,12	TRACCIÓN



$Ni = Ne - Nj \cdot \cos(45)$	Nk	1,00	TRACCIÓN
$Nj = (P - Ng) / \sin(45)$	Nm	4,49	TRACCIÓN

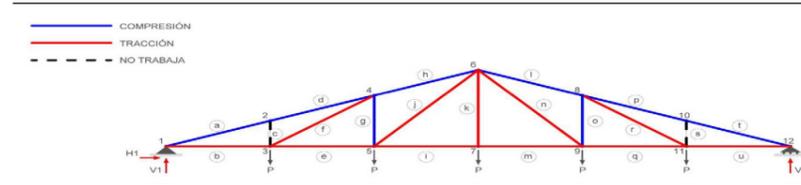
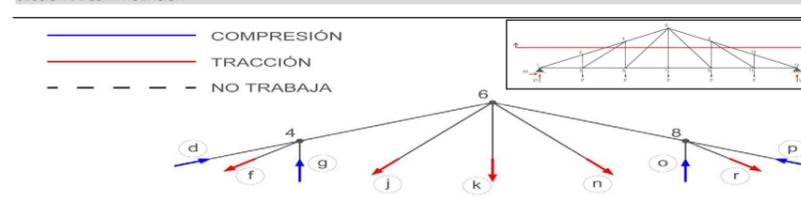


TABLA RESUMEN ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)

Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	-7,90	COMPRESIÓN	Nt	-7,90	COMPRESIÓN
Nb	7,49	TRACCIÓN	Nu	7,49	TRACCIÓN
Nc	0,00	NO TRABAJA	Ns	0,00	NO TRABAJA
Nd	-7,90	COMPRESIÓN	Np	-7,90	COMPRESIÓN
Ne	5,99	TRACCIÓN	Nq	5,99	TRACCIÓN
Nf	1,80	TRACCIÓN	Nr	1,80	TRACCIÓN
Ng	-0,50	COMPRESIÓN	No	-0,50	COMPRESIÓN
Nh	-6,32	COMPRESIÓN	Ni	-6,32	COMPRESIÓN
Ni	4,49	TRACCIÓN	Nm	4,49	TRACCIÓN
Nj	2,12	TRACCIÓN	Nn	2,12	TRACCIÓN
Nk	1,00	TRACCIÓN			

SECCIÓN DE COMPROBACIÓN

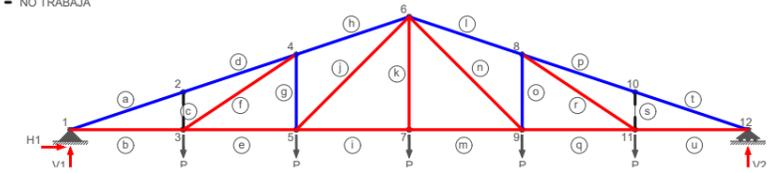


$\sum F_H = 0 \rightarrow Nd \cdot \cos(\alpha) - Nf \cdot \sin(\Theta) - Nj \cdot \sin(45) + Nn \cdot \sin(45) - Nr \cdot \sin(\Theta) - Np \cdot \cos(\alpha) = 0$

$\sum F_V = 0 \rightarrow Nd \cdot \sin(\alpha) - Nf \cdot \cos(\Theta) + Ng - Nj \cdot \cos(45) - Nk - Nn \cdot \cos(45) + No - Nr \cdot \cos(\Theta) + Np \cdot \sin(\alpha) = 0$

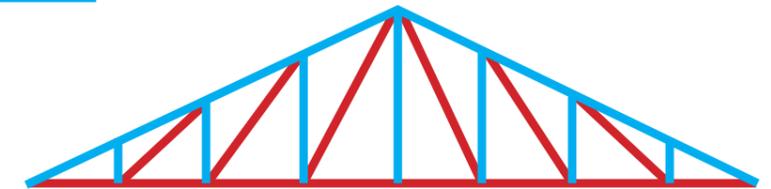
Resultados Plantilla Excel

— COMPRESIÓN
— TRACCIÓN
- - - NO TRABAJA



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida

— TRACCIÓN
— COMPRESIÓN



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

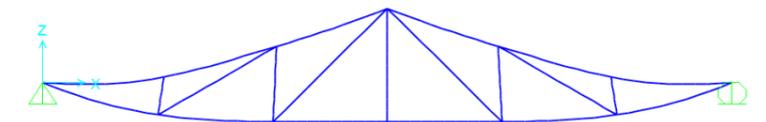


Diagrama Deformada

— TRACCIÓN
— COMPRESIÓN

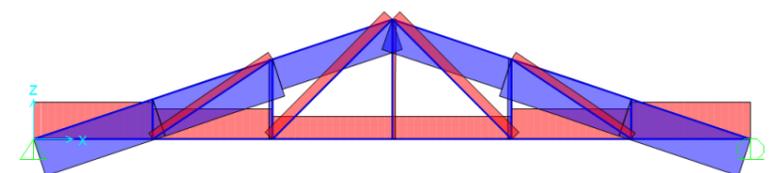


Diagrama de Axiles

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

4.4. PLANTILLA CERCHA TIPO HOWE / 6 VANOS

1.4. TIPO HOWE DE 6 VANOS

PARÁMETROS
Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	6
SEPARACIÓN [S] (m)	8
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTALES	5
ÁNGULOS	
α (18,45) °	
β (33,67) °	
Ω (71,45) °	

GRADOS DE HIPERESTATISMO

Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDI_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDI_{int}$	60	60	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDI_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDI_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{tot}	GH_{ext}	GH_{tot}
$GH_{tot} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	H1 0,00
$V1 = (n-1) \cdot V12$	V1 2,50
$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	V12 2,50

ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

$N_i = N_e + N_f \cdot \cos(\alpha)$ **Ni** 7,34 TRACCIÓN

$N_g = P - N_f \cdot \sin(\alpha)$ **Ng** 1,05 TRACCIÓN

N_m 7,34 TRACCIÓN

N_o 1,05 TRACCIÓN

$N_l = N_h$ **Nl** -1,60 COMPRESIÓN

$N_k = -N_h \cdot \cos(\Omega) - N_l \cdot \cos(\Omega)$ **Nk** 1,02 TRACCIÓN

TABLA RESUMEN_ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	-7,90	COMPRESIÓN	Nt	-7,90	COMPRESIÓN
Nb	7,49	TRACCIÓN	Nu	7,49	TRACCIÓN
Nc	1,00	TRACCIÓN	Nv	1,00	TRACCIÓN
Nd	-7,74	COMPRESIÓN	Np	-7,74	COMPRESIÓN
Ne	7,49	TRACCIÓN	Nq	7,49	TRACCIÓN
Nf	-0,16	COMPRESIÓN	Nr	-0,16	COMPRESIÓN
Ng	1,05	TRACCIÓN	Ns	1,05	TRACCIÓN
Nh	-1,60	COMPRESIÓN	Nt	-1,60	COMPRESIÓN
Ni	7,34	TRACCIÓN	Nu	7,34	TRACCIÓN
Nj	-6,54	COMPRESIÓN	Nv	-6,54	COMPRESIÓN
Nk	1,02	TRACCIÓN	Nw		

SECCIÓN DE COMPROBACIÓN

$\sum F_x = 0 \rightarrow N_d \cdot \cos(\alpha) - N_j \cdot \cos(90-\beta) + N_n \cdot \cos(90-\beta) - N_p \cdot \cos(\alpha) = 0$

$\sum F_v = 0 \rightarrow N_d \cdot \sin(\alpha) - N_g + N_j \cdot \sin(90-\beta) - N_k + N_n \cdot \sin(90-\beta) - N_o + N_p \cdot \sin(\alpha) = 0$

$N_b = -N_a \cdot \cos(\alpha)$ **Nb** 7,49 TRACCIÓN

$N_a = -V1 / \sin(\alpha)$ **Na** -7,90 COMPRESIÓN

Nu 7,49 TRACCIÓN

Nt -7,90 COMPRESIÓN

$N_d = N_a - N_f$ **Nd** -7,74 COMPRESIÓN

$N_f = (-N_c / 2 \cdot \sin(\alpha))$ **Nf** -0,16 COMPRESIÓN

Nv 1,00 TRACCIÓN

Np -7,74 COMPRESIÓN

Nr -0,16 COMPRESIÓN

Ne 7,49 TRACCIÓN

Nc 1,00 TRACCIÓN

$N_h = (N_d \cdot \cos(90-\Omega) - N_j \cdot \cos(\beta)) / \cos(\alpha)$ **Nh** -1,60 COMPRESIÓN

$N_j = (-N_d \cdot \sin(90-\Omega) - N_g + N_d \cdot \cos(90-\Omega) \cdot \tan(\alpha))$ **Nj** -6,54 COMPRESIÓN

Ns 1,05 TRACCIÓN

Nt -1,60 COMPRESIÓN

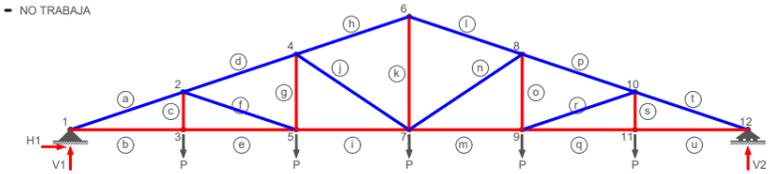
Nu 7,34 TRACCIÓN

Nv -6,54 COMPRESIÓN

Nw 1,02 TRACCIÓN

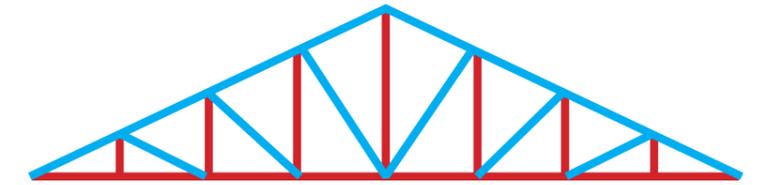
Resultados Plantilla Excel

— COMPRESIÓN
— TRACCIÓN
- - - NO TRABAJA



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida

— TRACCIÓN
— COMPRESIÓN



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

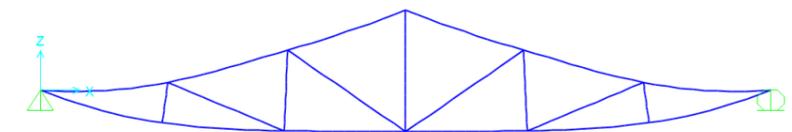


Diagrama Deformada

— TRACCIÓN
— COMPRESIÓN

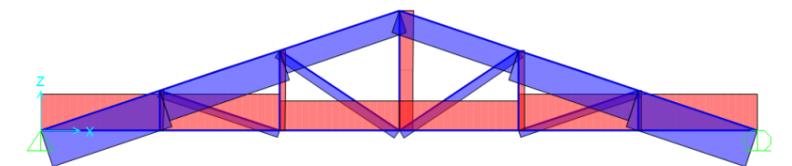


Diagrama de Axiles

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

4.5. PLANTILLA CERCHA TIPO FINK / 3 VANOS

1.2. TIPO FINK DE 3 VANOS

PARÁMETROS
Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

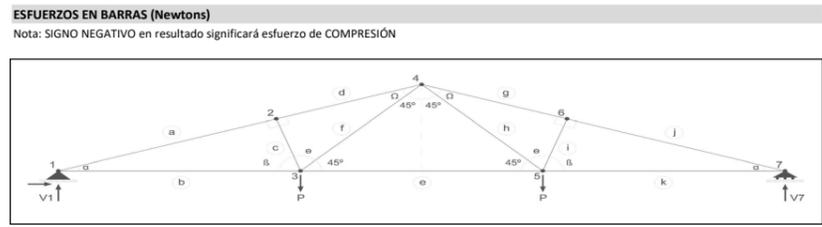
ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	3
SEPARACIÓN [S] (m)	16
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTALES	2
ÁNGULOS	α (18,45)° β (33,67)° Ω (71,45)°

GRADOS DE HIPERESTATISMO

Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDL_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDL_{int}$	24	24	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDL_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDL_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{int}	GH_{ext}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	$H1$ 0,00
$V1 = (n-1) \cdot V12$	$V1$ 1,00
$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	$V7$ 1,00



Node 1:
 $N_b = -N_a \cdot \cos(\alpha)$ N_b 3,00 TRACCIÓN
 $N_a = -V1 / \sin(\alpha)$ N_a -3,16 COMPRESIÓN

Node 7:
 N_k 3,00 TRACCIÓN
 N_j -3,16 COMPRESIÓN

Node 2:
 $N_c = N_a \cdot \cotg(\alpha) - N_d \cdot \cotg(\alpha)$ N_c 1,05 TRACCIÓN
 $N_d = [N_a + N_a \cdot \cotg^2(\alpha)] / \cotg^2(\alpha)$ N_d -3,51 COMPRESIÓN

Node 6:
 N_i 1,05 TRACCIÓN
 N_g -3,51 COMPRESIÓN

Node 3:
 $N_e = N_b + N_c \cdot \cos(\beta) - N_f \cdot \cos(45)$ N_e 3,46 TRACCIÓN
 $N_f = (P - N_c \cdot \sin(\beta)) / \sin(45)$ N_f 0,59 TRACCIÓN

Node 5:
 N_l 3,46 TRACCIÓN
 N_g 0,59 TRACCIÓN

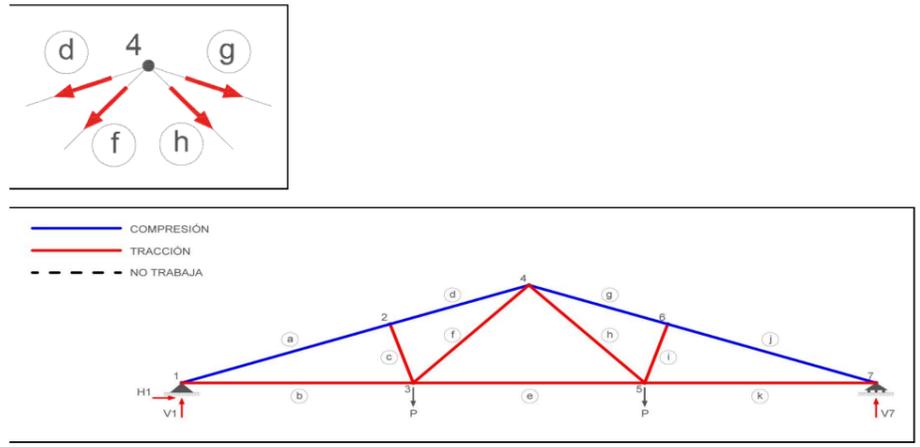
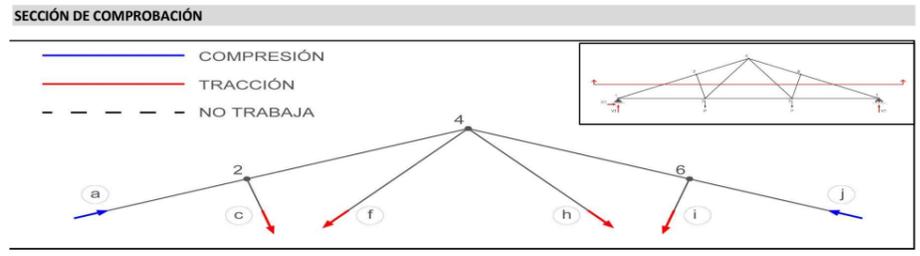


TABLA RESUMEN ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

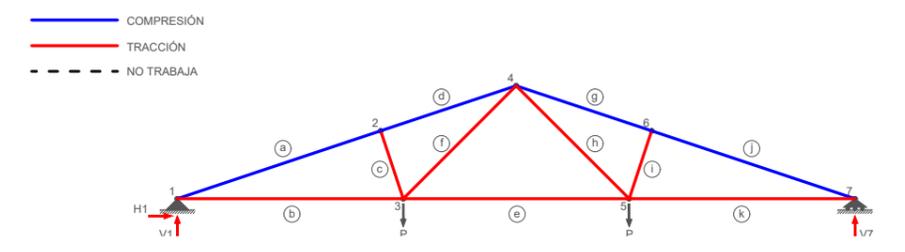
BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	-3,16	COMPRESIÓN	Nj	-3,16	COMPRESIÓN
Nb	3,00	TRACCIÓN	Nk	3,00	TRACCIÓN
Nc	1,05	TRACCIÓN	Ni	1,05	TRACCIÓN
Nd	-3,51	COMPRESIÓN	Ng	-3,51	COMPRESIÓN
Ne	3,46	TRACCIÓN	Nh	0,59	TRACCIÓN
Nf	0,59	TRACCIÓN			



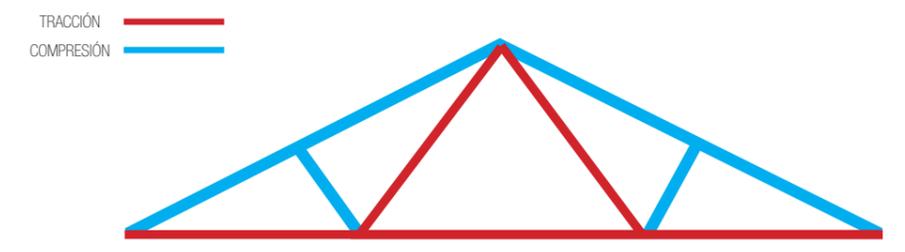
$\sum F_H = 0 \rightarrow N_a \cdot \cos(\alpha) + N_c \cdot \cos(45) - N_f \cdot \cos(45) + N_h \cdot \cos(45) - N_i \cdot \cos(45) - N_j \cdot \cos(45) = 0$

$\sum F_V = 0 \rightarrow N_a \cdot \sin(\alpha) - N_c \cdot \sin(45) - N_f \cdot \sin(45) - N_h \cdot \sin(45) - N_i \cdot \sin(45) + N_j \cdot \sin(\alpha) = 0$

Resultados Plantilla Excel



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

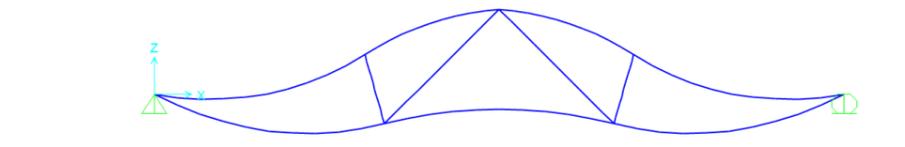


Diagrama Deformada

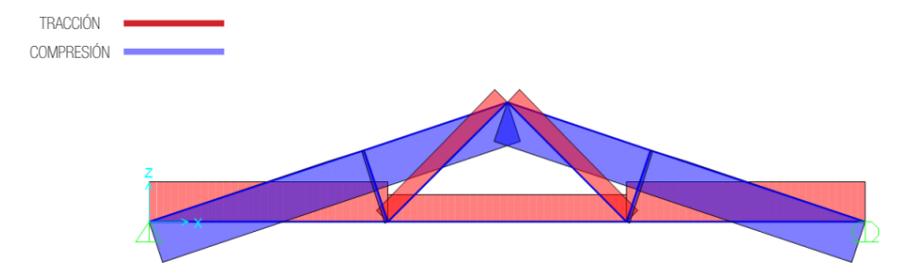


Diagrama de Axiles

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

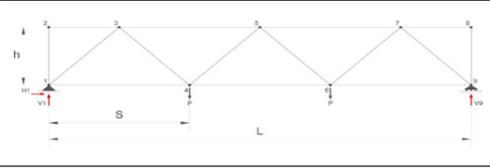
4.6. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO WARREN [PLANA] / 3 VANOS

2.1. TIPO WARREN PLANA DE 3 VANOS

PARÁMETROS

Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	3
SEPARACIÓN [S] (m)	16
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTALES	2
ÁNGULOS	$\alpha(45)^\circ$



GRADOS DE HIPERESTATISMO

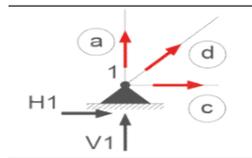
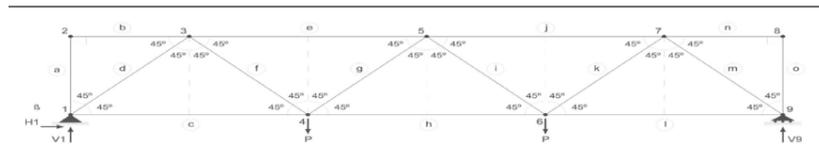
Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDL_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDL_{int}$	42	42	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDL_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDL_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{total}	GH_{total}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	H1 0,00
$V1 = (n-1) \cdot V12$	V1 1,00
$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	V9 1,00

ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)

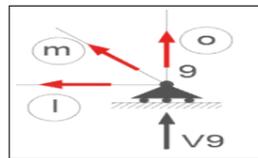
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN



$$N_c = -N_d \cdot \cos(45)$$

$$N_d = -V1 / \sin(45)$$

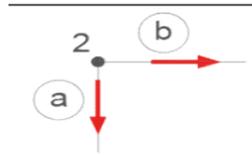
Nc	3,00	TRACCIÓN
Nd	-3,16	COMPRESIÓN



$$N_i = 3,00$$

$$N_m = -3,16$$

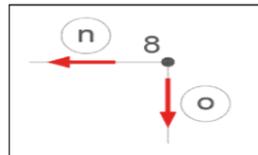
Ni	3,00	TRACCIÓN
Nm	-3,16	COMPRESIÓN



$$N_b = 0$$

$$N_a = 0$$

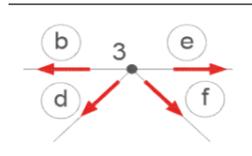
Nb	0,00	NO TRABAJA
Na	0,00	NO TRABAJA



$$N_n = 0,00$$

$$N_o = 0,00$$

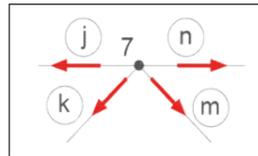
Nn	0,00	NO TRABAJA
No	0,00	NO TRABAJA



$$N_e = N_d \cdot \cos(45) - N_f \cdot \cos(45)$$

$$N_f = -N_d$$

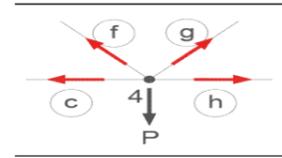
Ne	-5,99	COMPRESIÓN
Nf	3,16	TRACCIÓN



$$N_i = -5,99$$

$$N_m = 3,16$$

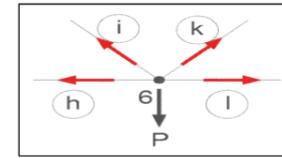
Ni	-5,99	COMPRESIÓN
Nm	3,16	TRACCIÓN



$$N_h = N_c + N_f \cdot \cos(45) - N_g \cdot \cos(45)$$

$$N_g = (P - N_f \cdot \sin(45)) / \sin(45)$$

Nh	6,76	TRACCIÓN
Ng	-2,16	COMPRESIÓN



$$N_k = 6,76$$

$$N_l = -2,16$$

Nk	6,76	TRACCIÓN
Nl	-2,16	COMPRESIÓN

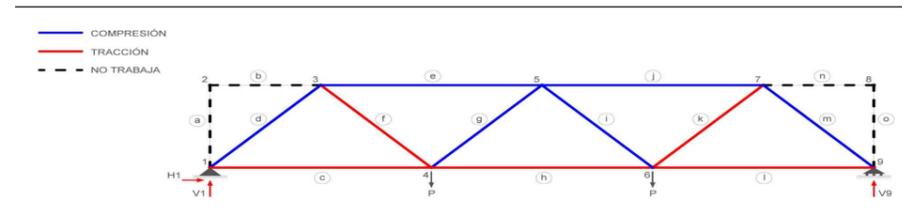
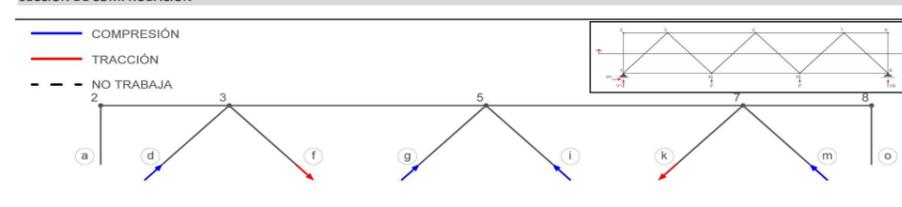


TABLA RESUMEN ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)

Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	0,00	NO TRABAJA	No	0,00	NO TRABAJA
Nb	0,00	NO TRABAJA	Nn	0,00	NO TRABAJA
Nc	3,00	TRACCIÓN	Ni	3,00	TRACCIÓN
Nd	-3,16	COMPRESIÓN	Nm	-3,16	COMPRESIÓN
Ne	-5,99	COMPRESIÓN	Nj	-5,99	COMPRESIÓN
Nf	3,16	TRACCIÓN	Nk	3,16	TRACCIÓN
Ng	-2,16	COMPRESIÓN	Nl	-2,16	COMPRESIÓN
Nh	6,76	TRACCIÓN			

SECCIÓN DE COMPROBACIÓN

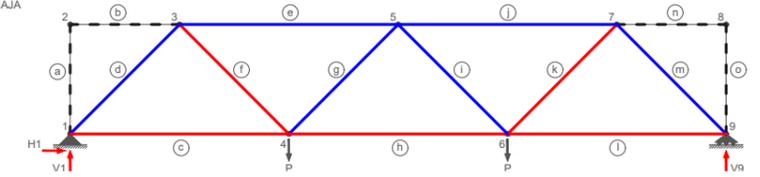


$$\sum F_x = 0 \rightarrow N_d \cdot \cos(45) + N_f \cdot \cos(45) + N_g \cdot \cos(45) - N_i \cdot \cos(45) - N_k \cdot \cos(45) - N_m \cdot \cos(45) = 0$$

$$\sum F_v = 0 \rightarrow N_d \cdot \sin(45) - N_f \cdot \sin(45) + N_g \cdot \sin(45) + N_l \cdot \sin(45) - N_k \cdot \sin(45) + N_m \cdot \sin(45) = 0$$

Resultados Plantilla Excel

COMPRESIÓN
TRACCIÓN
NO TRABAJA



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida

TRACCIÓN
COMPRESIÓN



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

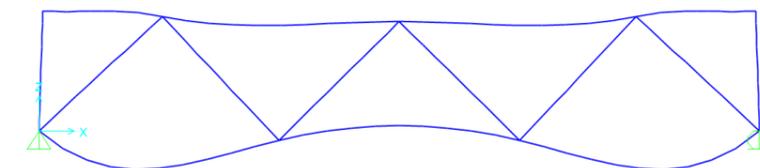


Diagrama Deformada

TRACCIÓN
COMPRESIÓN

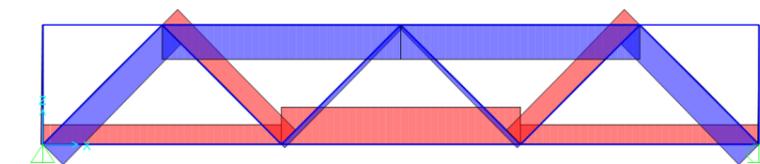


Diagrama de Axiles

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

4.7. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO HOWE [PLANA] / 6 VANOS

2.2.TIPO HOWE PLANA DE 6 VANOS

PARÁMETROS
Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	6
SEPARACIÓN [S] (m)	8
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTALES	5
ÁNGULOS	$\alpha (45)^\circ$

GRADOS DE HIPERESTATISMO

Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDI_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDI_{int}$	78	78	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDI_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDI_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{int}	GH_{ext}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	$H1 = 0,00$
$V1 = (n-1) \cdot V12$	$V1 = 2,50$
$V14 = [P \cdot (n-1)] / 2$	$V14 = 2,50$

ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

$N_c = -Nd \cdot \cos(45)$	N_c	7,49	TRACCIÓN
$N_d = -V1 / \sin(45)$	N_d	-7,90	COMPRESIÓN
$N_b = 0$	N_b	0,00	NO TRABAJA
$N_a = 0$	N_a	0,00	NO TRABAJA
$N_f = Nd \cdot \cos(45)$	N_f	-5,59	COMPRESIÓN
$N_e = -Nd \cdot \sin(45)$	N_e	5,59	TRACCIÓN
$N_g = N_c - Nh \cdot \cos(45)$	N_g	12,08	TRACCIÓN
$N_h = (P - Ne) / \sin(45)$	N_h	-6,49	COMPRESIÓN
$N_w = 7,49$	N_w	7,49	TRACCIÓN
$N_x = -7,90$	N_x	-7,90	COMPRESIÓN
$N_v = 0,00$	N_v	0,00	NO TRABAJA
$N_y = 0,00$	N_y	0,00	NO TRABAJA
$N_r = -5,59$	N_r	-5,59	COMPRESIÓN
$N_u = 5,59$	N_u	5,59	TRACCIÓN
$N_s = 12,08$	N_s	12,08	TRACCIÓN
$N_t = -6,49$	N_t	-6,49	COMPRESIÓN
$N_q = 4,59$	N_q	4,59	TRACCIÓN
$N_n = -10,17$	N_n	-10,17	COMPRESIÓN
$N_o = 15,66$	N_o	15,66	TRACCIÓN
$N_p = -5,07$	N_p	-5,07	COMPRESIÓN
$N_m = 1,00$	N_m	1,00	TRACCIÓN

5
 $N_j = N_f + N_h \cdot \sin(45)$ N_j -10,17 COMPRESIÓN
 $N_i = -N_h \cdot \cos(45)$ N_i 4,59 TRACCIÓN

6
 $N_k = N_g - N_i \cdot \cos(45)$ N_k 15,66 TRACCIÓN
 $N_l = (P - N_i) / \sin(45)$ N_l -5,07 COMPRESIÓN

7
 $N_n = N_j + N_l \cdot \cos(45) - N_p \cdot \cos(45)$ N_n -16,34 COMPRESIÓN
 $N_p = (-N_m / \sin(45)) - N_l$ N_p 3,66 TRACCIÓN

8
 $N_o = N_k$ N_o 15,66 TRACCIÓN
 $N_m = P$ N_m 1,00 TRACCIÓN

9
 $N_r = N_e$ N_r 5,59 TRACCIÓN
 $N_s = N_g$ N_s 12,08 TRACCIÓN

10
 $N_q = N_e$ N_q 5,59 TRACCIÓN
 $N_t = N_g$ N_t 12,08 TRACCIÓN

11
 $N_u = N_e$ N_u 5,59 TRACCIÓN
 $N_v = N_g$ N_v 12,08 TRACCIÓN

12
 $N_w = N_e$ N_w 5,59 TRACCIÓN
 $N_x = N_g$ N_x 12,08 TRACCIÓN

13
 $N_y = N_e$ N_y 5,59 TRACCIÓN
 $N_z = N_g$ N_z 12,08 TRACCIÓN

14
 $N_{14} = N_e$ N_{14} 5,59 TRACCIÓN
 $N_{13} = N_g$ N_{13} 12,08 TRACCIÓN

TABLA RESUMEN ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

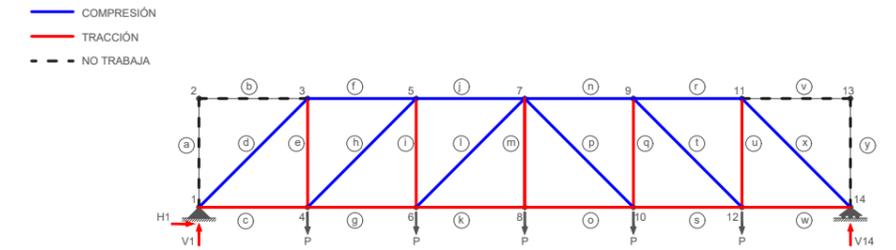
BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	0,00	NO TRABAJA	Ny	0,00	NO TRABAJA
Nb	0,00	NO TRABAJA	Nv	0,00	NO TRABAJA
Nc	7,49	TRACCIÓN	Nw	7,49	TRACCIÓN
Nd	-7,90	COMPRESIÓN	Nx	-7,90	COMPRESIÓN
Ne	5,59	TRACCIÓN	Nu	5,59	TRACCIÓN
Nf	-5,59	COMPRESIÓN	Nr	-5,59	COMPRESIÓN
Ng	12,08	TRACCIÓN	Ns	12,08	TRACCIÓN
Nh	-6,49	COMPRESIÓN	Nt	-6,49	COMPRESIÓN
Ni	4,59	TRACCIÓN	Nq	4,59	TRACCIÓN
Nj	-10,17	COMPRESIÓN	Nn	-10,17	COMPRESIÓN
Nk	15,66	TRACCIÓN	No	15,66	TRACCIÓN
Nl	-5,07	COMPRESIÓN	Np	-5,07	COMPRESIÓN
Nm	1,00	TRACCIÓN	Np	-5,07	COMPRESIÓN

SECCIÓN DE COMPROBACIÓN

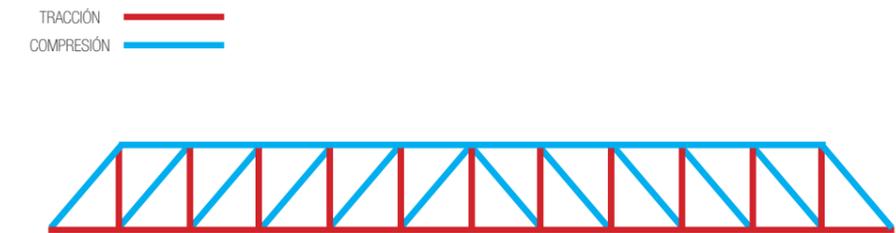
$\sum F_H = 0 \rightarrow Nd \cdot \cos(45) + Nh \cdot \cos(45) + Ni \cdot \cos(45) - Np \cdot \cos(45) - Nt \cdot \cos(45) - Nx \cdot \cos(45) = 0$

$\sum F_V = 0 \rightarrow Nd \cdot \sin(45) - Ne + Nh \cdot \sin(45) - Ni + Nl \cdot \sin(45) - Nm + Np \cdot \sin(45) - Nq + Nt \cdot \sin(45) - Nu + Nx \cdot \sin(45) = 0$

Resultados Plantilla Excel



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

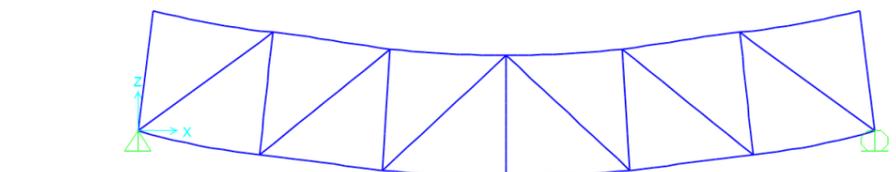


Diagrama Deformada

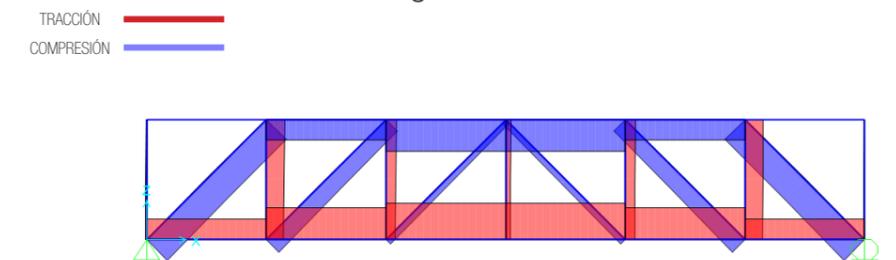


Diagrama de Axiles

4. SOFTWARE EXCEL / ANÁLISIS MÉTODO NUDOS

4.8. PLANTILLA VIGA CELOSÍA TIPO PRATT [PLANA] / 6 VANOS

2.3. TIPO PRATT PLANA DE 6 VANOS

PARÁMETROS
 Nota: Introducir sólo los marcados en AMARILLO

ALTURA [h] (m)	15
LUZ [L] (m)	48
Nº DE VANOS [n]	6
SEPARACIÓN [S] (m)	8
CARGA [P] (N)	1
Nº CARGAS PUNTALES	5
ÁNGULOS α (45)°	

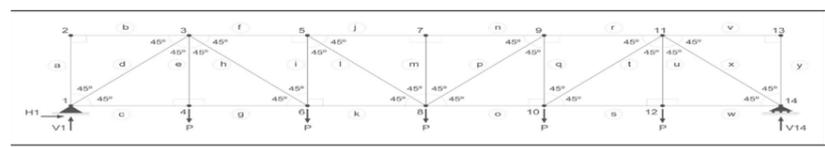
GRADOS DE HIPERESTATISMO

Grado de Hiperestatismo Interno	C_{int}	GDL_{int}	GH_{int}
$GH_{int} = C_{int} - GDL_{int}$	78	78	0
Grado de Hiperestatismo Externo	R_{ext}	GDL_{ext}	GH_{ext}
$GH_{ext} = R_{ext} - GDL_{ext}$	3	3	0
Grado de Hiperestatismo Total	GH_{total}	GH_{total}	GH_{total}
$GH_{total} = GH_{int} + GH_{ext}$	0	0	0

REACCIONES EXTERNAS (N)

ECUACIONES	RESULTADOS
$H1 = 0$	$H1 = 0,00$
$V1 = (n-1) \cdot V12$	$V1 = 2,50$
$V12 = [P \cdot (n-1)] / 2$	$V12 = 2,50$

ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
 Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN



Node 1: $N_c = -N_d \cdot \cos(45)$, $N_c = 7,49$ TRACCIÓN; $N_d = -V1 / \sin(45)$, $N_d = -7,90$ COMPRESIÓN

Node 14: $N_w = 7,49$ TRACCIÓN; $N_x = -7,90$ COMPRESIÓN

Node 2: $N_b = 0$, $N_b = 0,00$ NO TRABAJA; $N_a = 0$, $N_a = 0,00$ NO TRABAJA

Node 13: $N_v = 0,00$ NO TRABAJA; $N_y = 0,00$ NO TRABAJA

Node 3: $N_f = N_d \cdot \cos(45) - N_h \cdot \cos(45)$, $N_f = -10,17$ COMPRESIÓN; $N_h = -N_d \cdot \sin(45)$, $N_h = 6,49$ TRACCIÓN

Node 11: $N_r = -10,17$ COMPRESIÓN; $N_t = 6,49$ TRACCIÓN

Node 4: $N_g = N_c$, $N_g = 7,49$ TRACCIÓN; $N_e = P$, $N_e = 1,00$ TRACCIÓN

Node 12: $N_u = 7,49$ TRACCIÓN; $N_s = 1,00$ TRACCIÓN

Node 5: $N_j = N_f \cdot \cos(45)$, $N_j = -13,76$ COMPRESIÓN; $N_i = -N_f / \sin(45)$, $N_i = 5,07$ TRACCIÓN

Node 9: $N_r = -13,76$ COMPRESIÓN; $N_t = 5,07$ TRACCIÓN

Node 6: $N_k = N_g + N_h \cdot \cos(45)$, $N_k = 12,08$ TRACCIÓN; $N_l = P - N_h \cdot \sin(45)$, $N_l = -3,59$ COMPRESIÓN

Node 10: $N_o = 12,08$ TRACCIÓN; $N_s = -3,59$ COMPRESIÓN

Node 7: $N_n = N_j$, $N_n = -13,76$ COMPRESIÓN; $N_m = 0$, $N_m = 0,00$ NO TRABAJA

Node 8: $N_o = N_k + N_l \cdot \cos(45) - N_p \cdot \cos(45)$, $N_o = 18,25$ TRACCIÓN; $N_p = [P / \sin(45)] - N_l$, $N_p = -3,66$ COMPRESIÓN

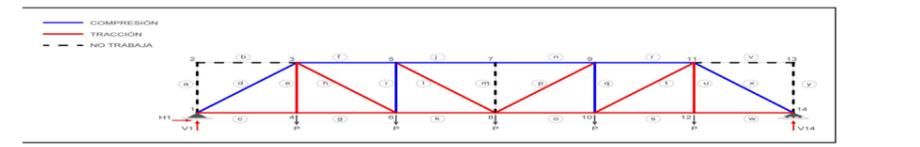


TABLA RESUMEN ESFUERZOS EN BARRAS (Newtons)
 Nota: SIGNO NEGATIVO en resultado significará esfuerzo de COMPRESIÓN

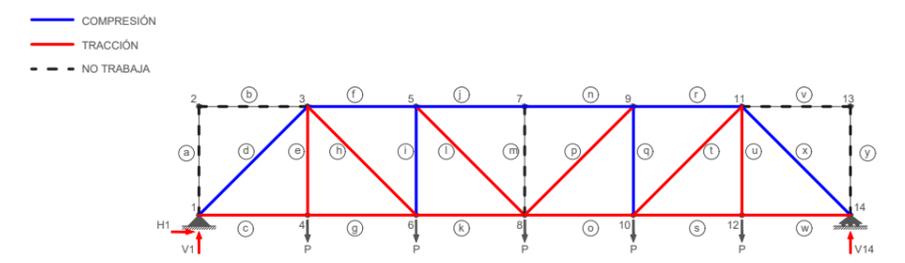
BARRA	VALOR	TIPO	BARRA	VALOR	TIPO
Na	0,00	COMPRESIÓN	Ny	0,00	COMPRESIÓN
Nb	0,00	COMPRESIÓN	Nv	0,00	COMPRESIÓN
Nc	7,49	TRACCIÓN	Nw	7,49	TRACCIÓN
Nd	-7,90	COMPRESIÓN	Nx	-7,90	COMPRESIÓN
Ne	1,00	TRACCIÓN	Nz	1,00	TRACCIÓN
Nf	-10,17	COMPRESIÓN	Nr	-10,17	COMPRESIÓN
Ng	7,49	TRACCIÓN	Ns	7,49	TRACCIÓN
Nh	6,49	TRACCIÓN	Nt	6,49	TRACCIÓN
Ni	-3,59	COMPRESIÓN	Nq	-3,59	COMPRESIÓN
Nj	-13,76	COMPRESIÓN	Nn	-13,76	COMPRESIÓN
Nk	12,08	TRACCIÓN	No	12,08	TRACCIÓN
Nl	5,07	TRACCIÓN	Np	5,07	TRACCIÓN
Nm	0,00	COMPRESIÓN			

SECCIÓN DE COMPROBACIÓN

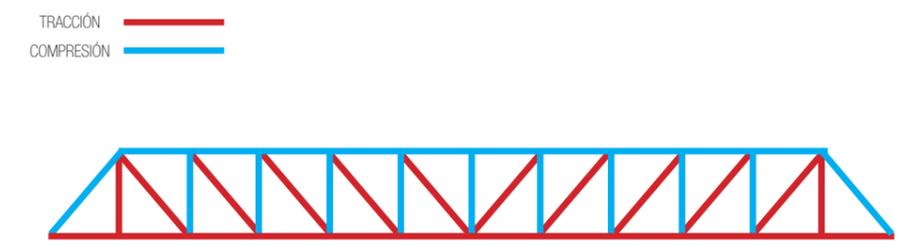
$\sum F_{ix} = 0 \rightarrow N_d \cdot \cos(45) + N_h \cdot \cos(45) + N_i \cdot \cos(45) - N_p \cdot \cos(45) - N_l \cdot \cos(45) - N_x \cdot \cos(45) = 0$

$\sum F_{iy} = 0 \rightarrow N_d \cdot \sin(45) - N_e - N_h \cdot \sin(45) - N_i \cdot \sin(45) - N_p \cdot \sin(45) + N_q - N_t \cdot \sin(45) - N_u + N_x \cdot \sin(45) = 0$

Resultados Plantilla Excel



Resultados Moore F. 2001 / Hipótesis de partida



Resultados SAP2000 (consultar apartado 5 / página 61)

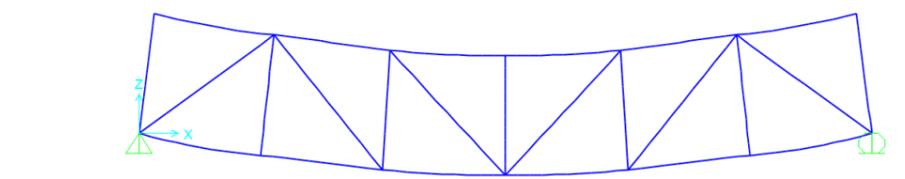


Diagrama Deformada

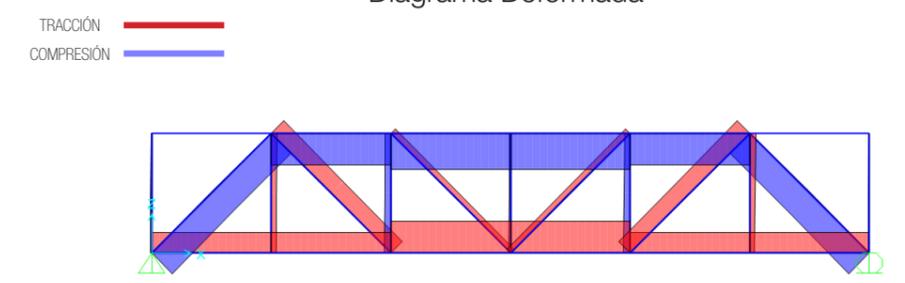


Diagrama de Axiles

CERCHAS Y CELOSÍAS

RAZÓN DE SER Y DESARROLLO DE SOFTWARE

5. SOFTWARE SAP2000

ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS CELOSÍA



5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

5.0. METODOLOGÍA DE TRABAJO / PLANTILLAS

El trabajo realizado en este bloque práctico cumplía con un doble objetivo, por un lado confirmar si los resultados obtenidos en el bloque anterior con la plantilla generada para el software excel eran correctos y por otro lado seguir aportando material para futuras líneas de investigación en cuanto a corrección de resultados se refiera.

La metodología seguida con este software ha sido:

1) Introducción de la geometría base de cada sistema a estudiar.

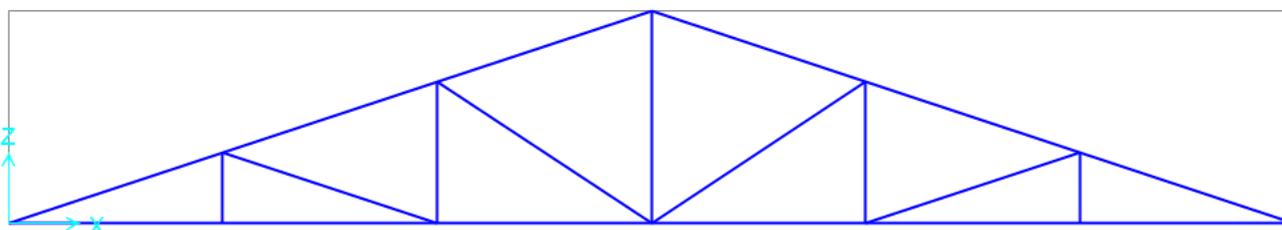


Figura 98: Software SAP200, geometría base.

2) Definición del material base de las secciones de las barras. Se decidió escoger Acero A36 con las siguientes características.

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	ACERO SPAIN
Material Type	Steel
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	7,849
Mass per Unit Volume	0,8004
Units: Tonf, m, C	
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	20389019,
Poisson, U	0,3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,170E-05
Shear Modulus, G	7841930,
Other Properties for Steel Materials	
Minimum Yield Stress, Fy	35153,48
Minimum Tensile Stress, Fu	45699,53
Expected Yield Stress, Fye	38668,83
Expected Tensile Stress, Fue	50269,48
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Figura 99: Software SAP200, definición de material base.

5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

3) Definición de las restricciones en los apoyos. Como se explicó anteriormente se han estudiado sistemas isotáticos, por lo que, para cumplir con esta condición se introducen articulaciones en los apoyos izquierdos y apoyos simples en los apoyos derechos de todos los sistemas a estudiar.

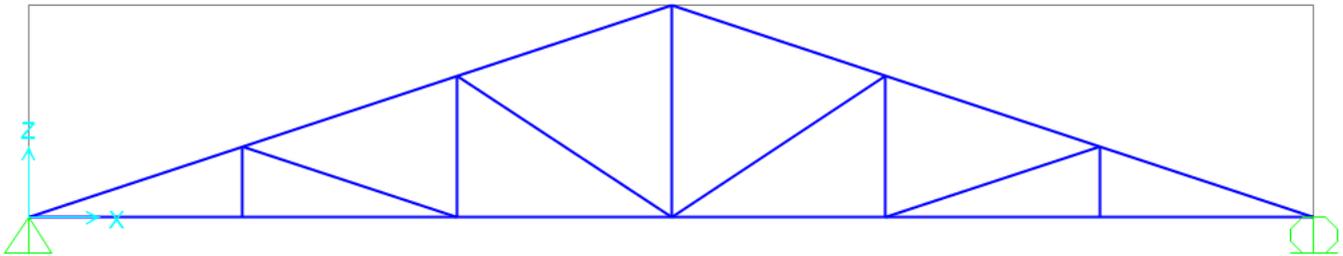


Figura 100: Software SAP2000, restricciones en apoyos.

4) Definición de las secciones de las barras. Se decidió escoger un perfil medio IPN-180.

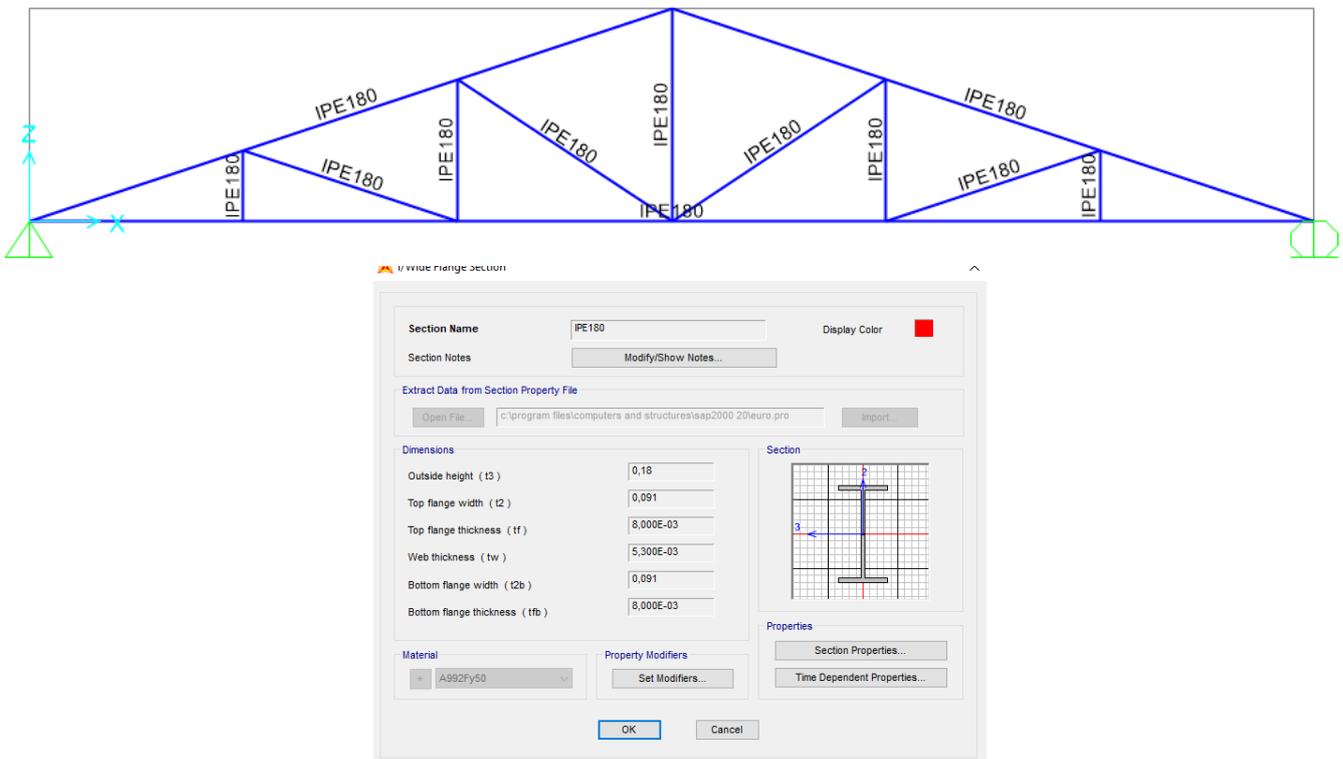


Figura 101: Software SAP2000, definición de perfil.

5) Definición de las rótulas de las uniones. Los sistemas estudiados se caracterizan porque sus barras trabajan soportando solamente esfuerzos axiales, la simbología que define esta característica en SAP2000 es la que se muestra en la siguiente figura.

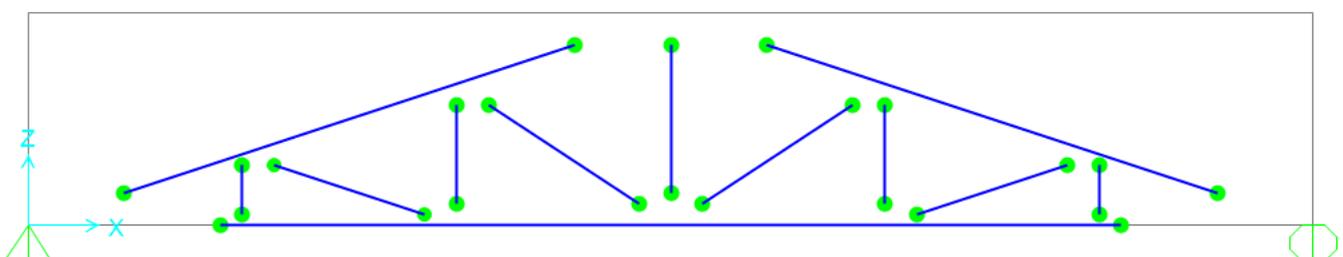


Figura 102: Software SAP2000, definición de rótulas en uniones.

5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

6) Definición de las cargas puntuales en nudos de los cordones inferiores de todos los sistemas.

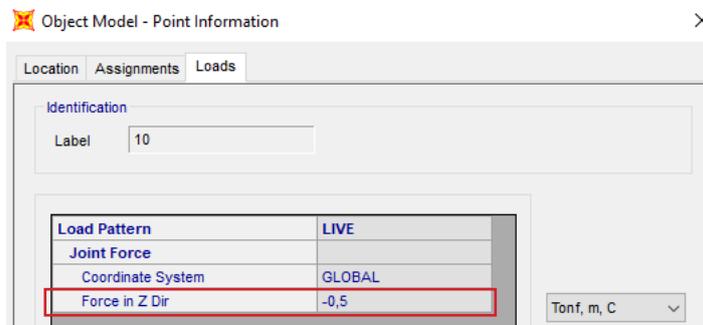


Figura 103: Software SAP200, definición de cargas puntuales en cordón inferior

7) Definición de los tipos de cargas actuantes. Se definieron dos tipos de carga, la primera correspondiente al peso propio de las barras (llamada carga muerta o “dead”) y la segunda correspondiente a las cargas vivas (“live”).

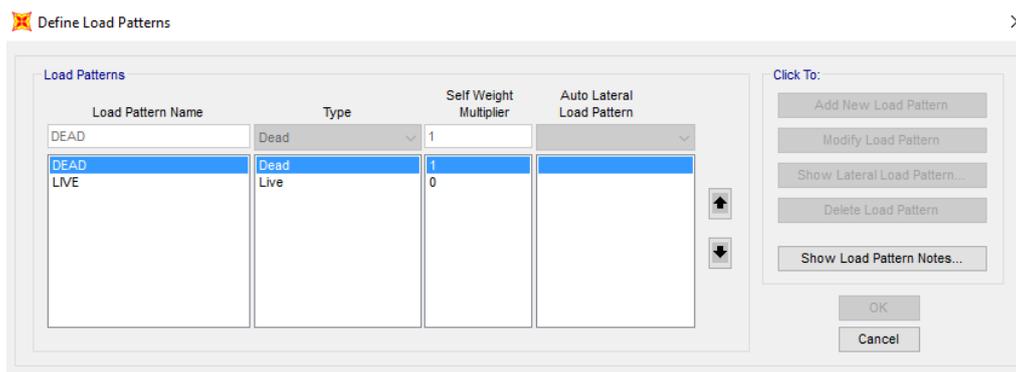


Figura 104: Software SAP200, definición de tipos de cargas actuantes.

8) Introducción de las posibles combinaciones de cargas mayoradas anteriormente definidas que pudieran darse individual o conjuntamente.

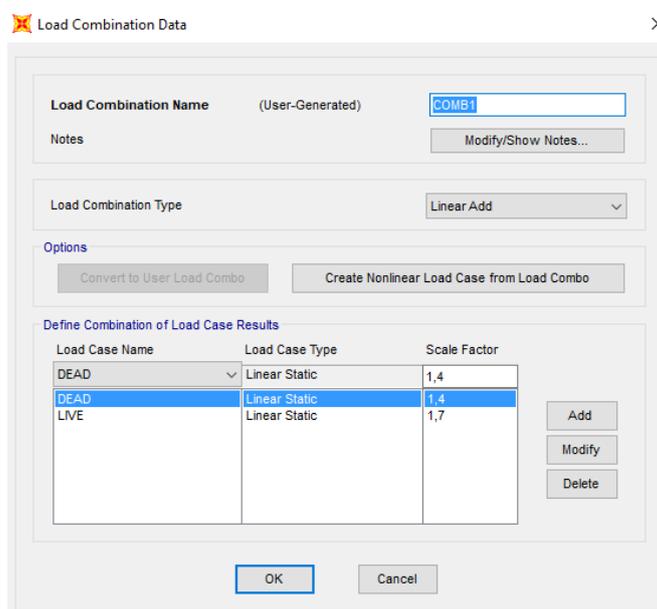


Figura 105: Software SAP200, definición de combinaciones de cargas.

5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

9) Acotar el rango de análisis del software. Para que SAP2000 no realizase más cálculos de los necesarios se restringe el ámbito de cálculo al plano 2D.

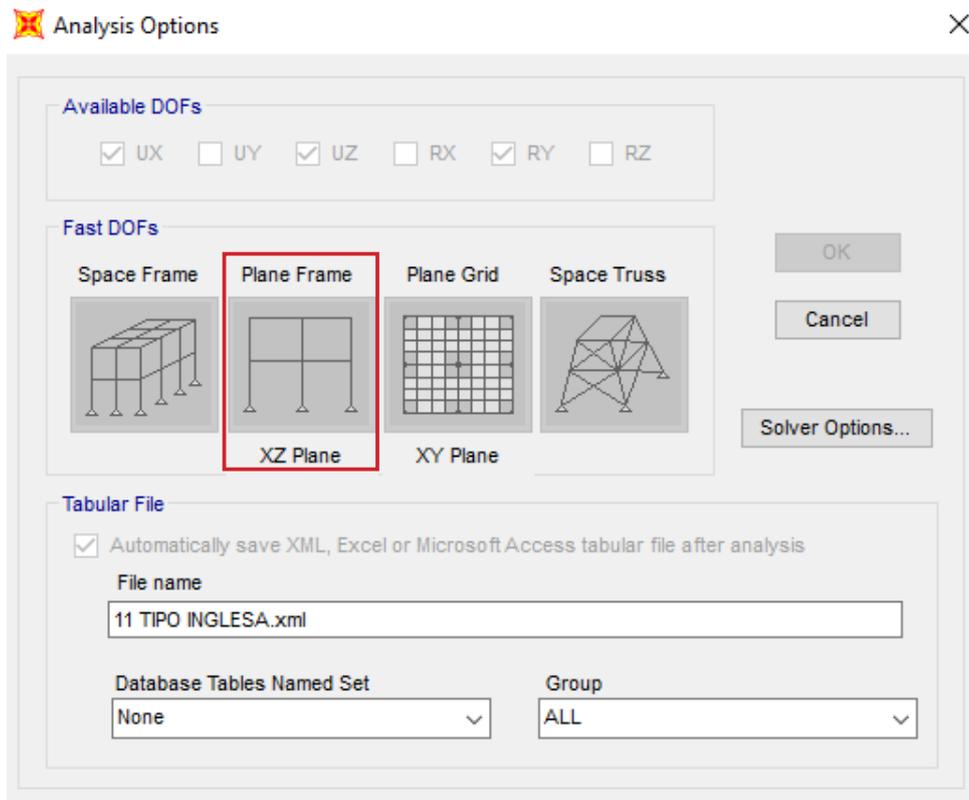


Figura 106: Software SAP200, restricción de cálculos al plano 2D

10) Realizar análisis y obtención de resultados.

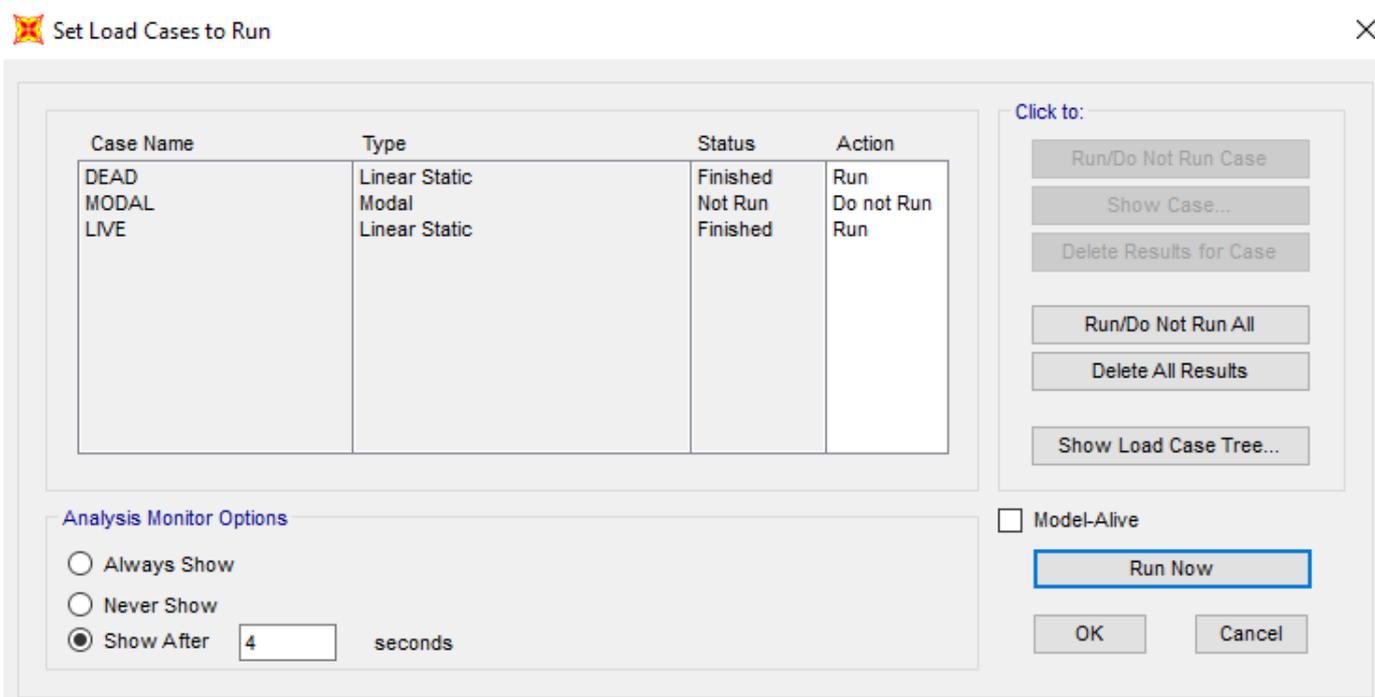


Figura 107: Software SAP200, eliminación de la carga de sismo del cálculo y análisis.

5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

5.1. PLANTILLA CERCHA TIPO INGLESA

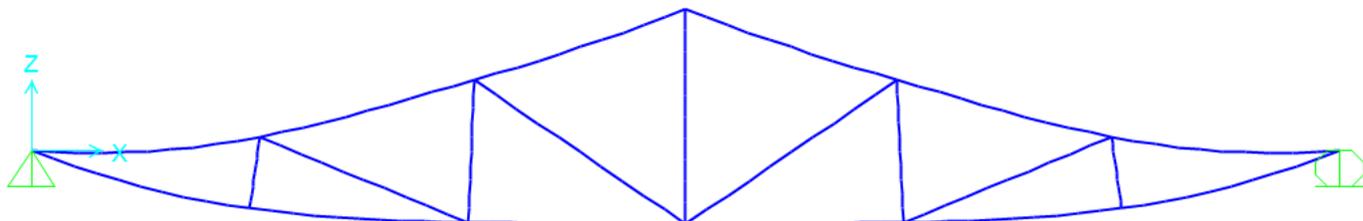


Figura 108: Software SAP2000, cercha tipo inglesa / deformada.

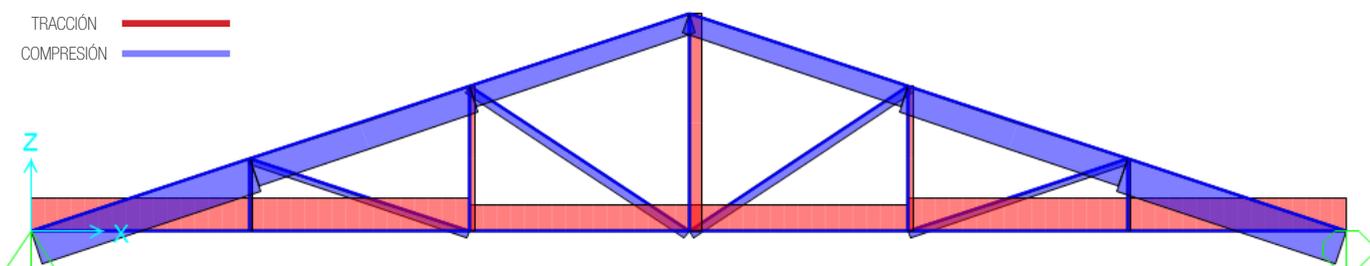


Figura 109: Software SAP2000, cercha tipo inglesa / diagrama de axiles.

5.2. PLANTILLA CERCHA TIPO POLONCEAU

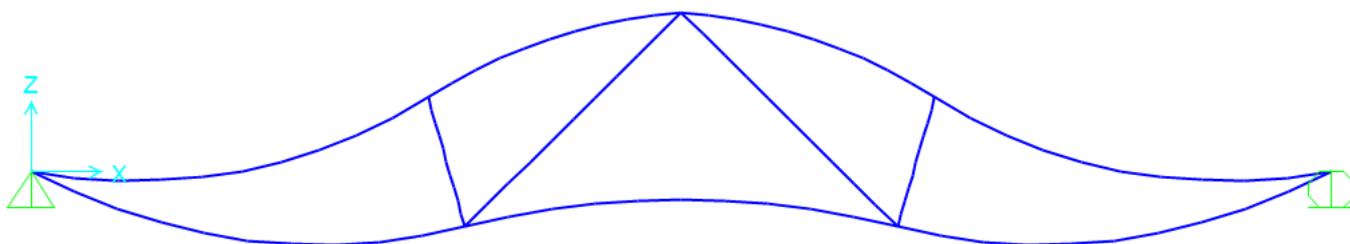


Figura 110: Software SAP2000, cercha tipo Polonceau / deformada.

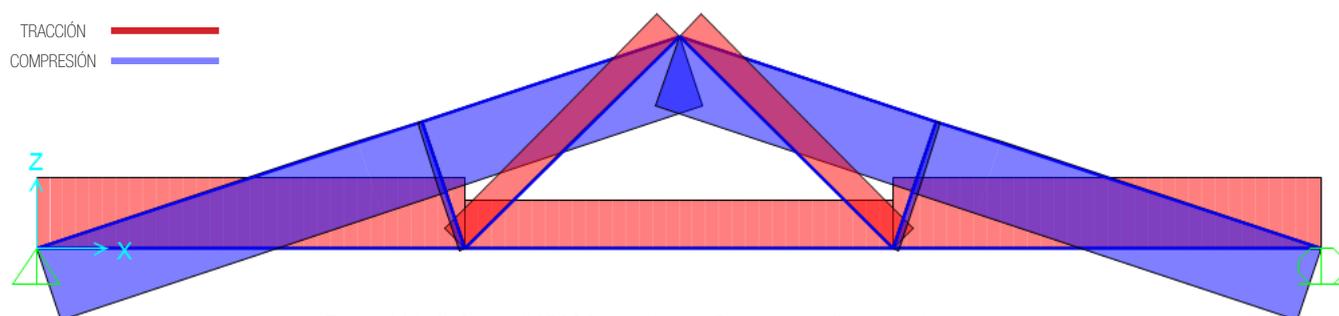


Figura 111: Software SAP2000, cercha tipo Polonceau / diagrama de axiles.

5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

5.3. PLANTILLA CERCHA TIPO PRATT

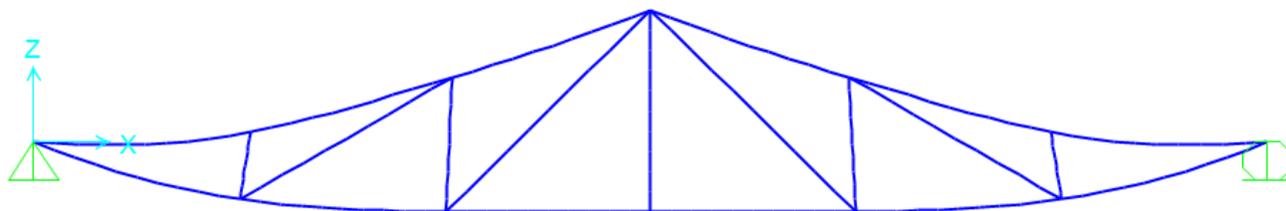


Figura 112: Software SAP2000, cercha tipo Pratt / deformada.

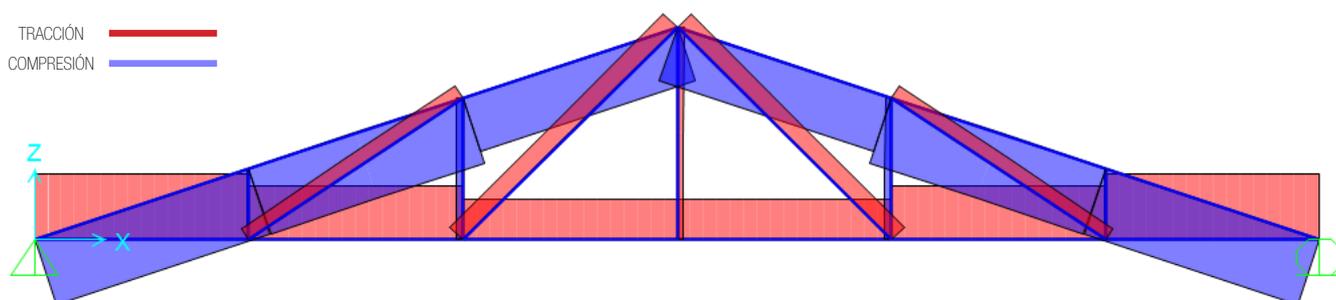


Figura 113: Software SAP2000, cercha tipo Pratt / diagrama de axiles.

5.4. PLANTILLA CERCHA TIPO HOWE

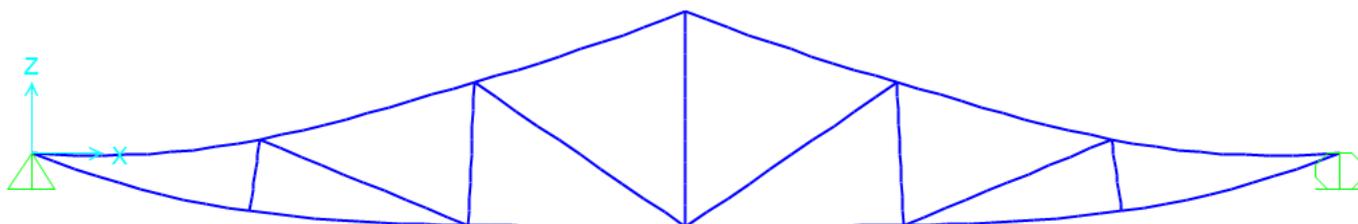


Figura 114: Software SAP2000, cercha tipo Howe / deformada.

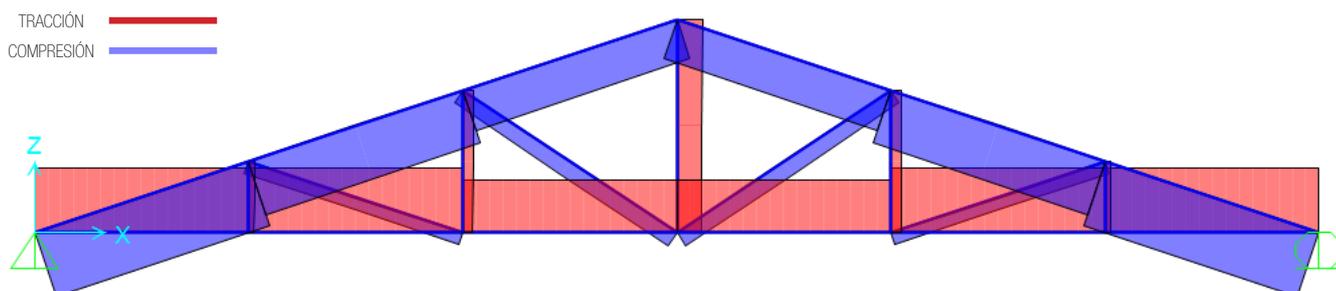


Figura 115: Software SAP2000, cercha tipo Howe / diagrama de axiles.

5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

5.5. PLANTILLA CERCHA TIPO FINK

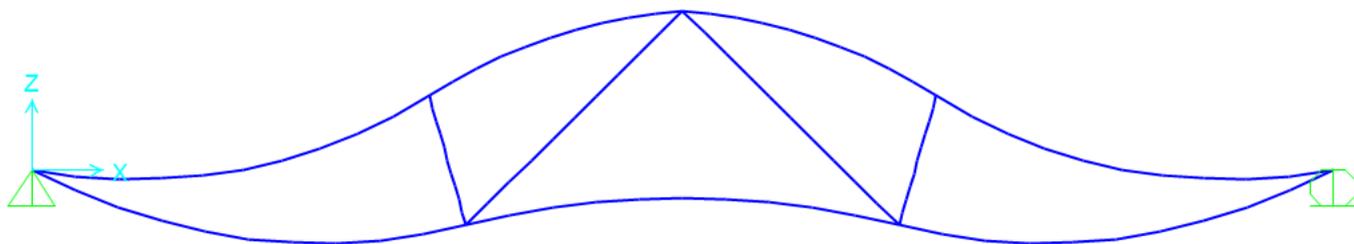


Figura 116: Software SAP2000, cercha tipo Fink / deformada.

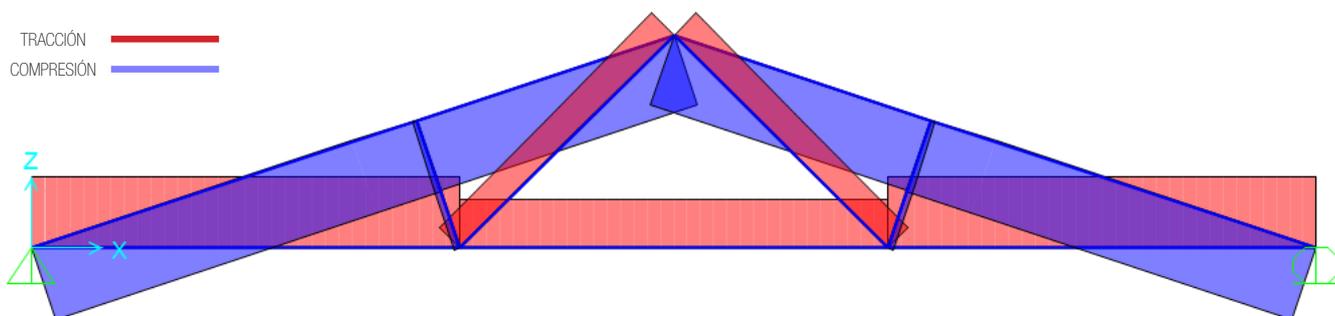


Figura 117: Software SAP2000, cercha tipo Fink / diagrama de axiles.

5.6. PLANTILLA VIGA EN CELOSÍA TIPO WARREN [PLANA]

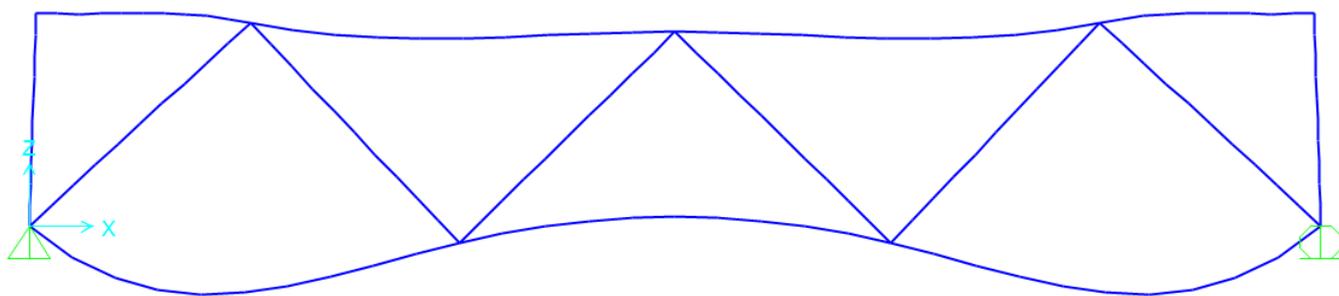


Figura 118: Software SAP2000, viga en celosía tipo Warren / deformada.

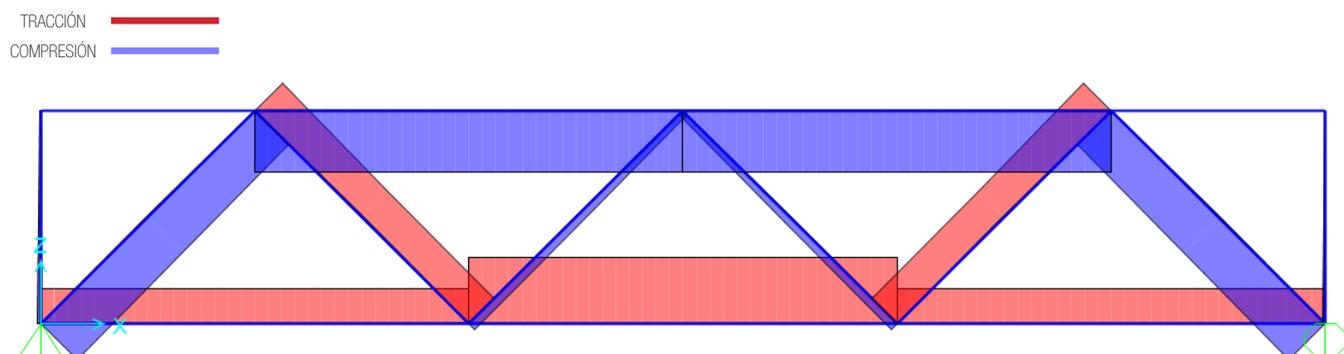


Figura 119: Software SAP2000, viga en celosía tipo Warren / diagrama de axiles.

5. SOFTWARE SAP2000 / ANÁLISIS CERCHAS Y VIGAS EN CELOSÍA

5.7. PLANTILLA VIGA EN CELOSÍA TIPO HOWE [PLANA]

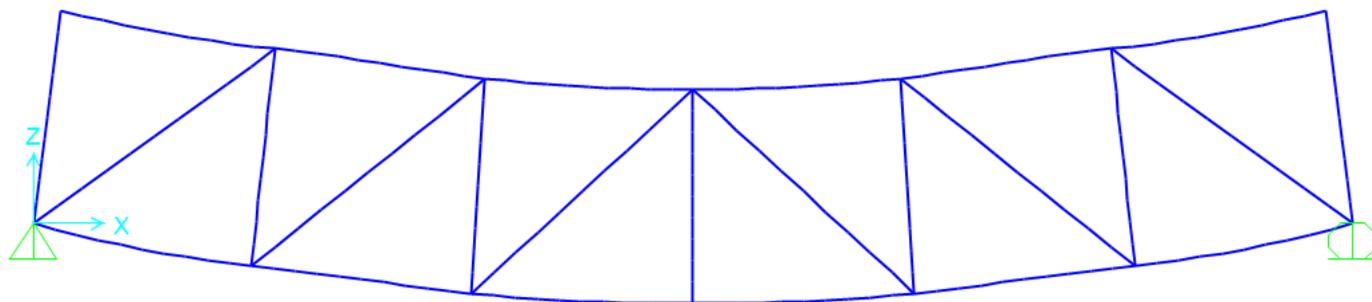


Figura 120: Software SAP2000, viga en celosía tipo Howe / deformada.

TRACCIÓN 
COMPRESIÓN 

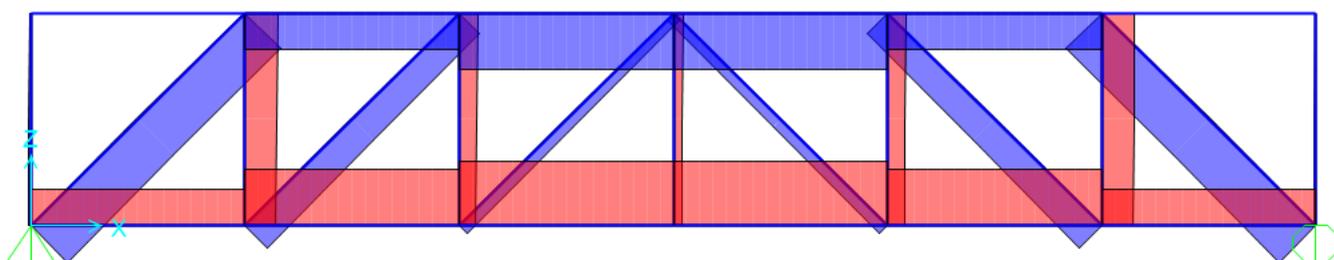


Figura 121: Software SAP2000, viga en celosía tipo Howe / diagrama de axiles.

5.8. PLANTILLA VIGA EN CELOSÍA TIPO PRATT [PLANA]

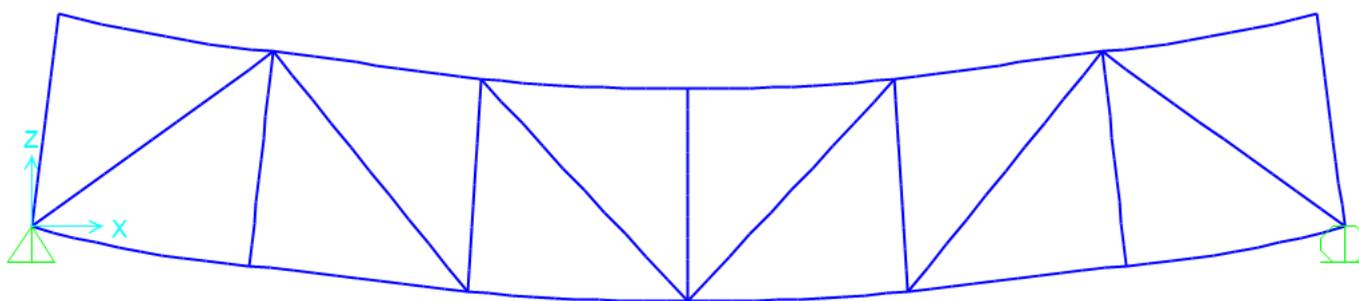


Figura 122: Software SAP2000, viga en celosía tipo Warren / deformada.

TRACCIÓN 
COMPRESIÓN 

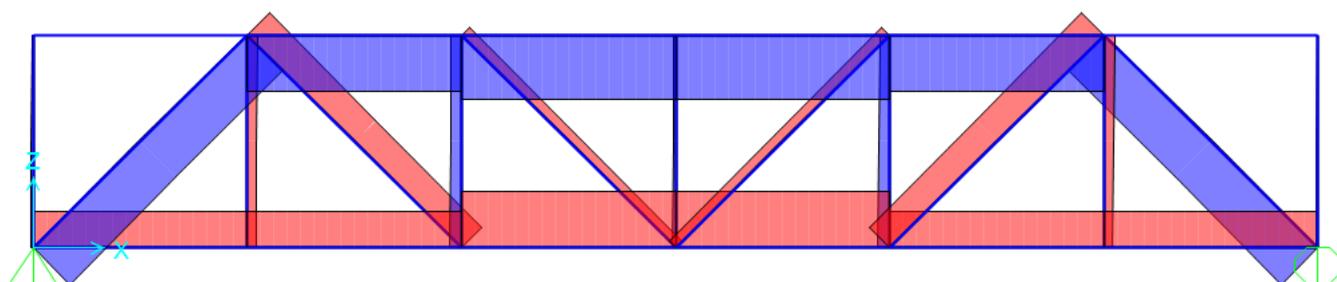


Figura 123: Software SAP2000, viga en celosía tipo Warren / diagrama de axiles.

CERCHAS Y CELOSÍAS

RAZÓN DE SER Y DESARROLLO DE SOFTWARE

6. CONCLUSIONES

7. BIBLIOGRAFÍA

8. REFERENCIAS DE FIGURAS



6. CONCLUSIONES / FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES

A las conclusiones y teorías ya incluidas en este documento (páginas 28, 24-27 y 37-40) sobre este tipo de sistemas y que se resumen a continuación (a, b y c) el desarrollo del presente trabajo de análisis aporta otras dos más (d y e).

a) No ha sido posible establecer con exactitud el origen histórico de los primeros sistemas de cerchas o armaduras de cubierta aunque se estima que se vienen utilizando desde hace más de 2000 años. En el caso de los sistemas de vigas en celosía si existen las suficientes pruebas contrastadas como se ha indicado en cada uno de los casos de los autores que diseñaron y patentaron los distintos tipos que hoy conocemos.

b) Este tipo de sistemas surgen como respuesta a la necesidad de cubrir grandes espacios arquitectónicos, para ello se han tenido en cuenta y superado aspectos técnicos como las limitaciones de luz impuestas inicialmente por la longitud de los árboles con los que se fabricaban estos sistemas, los empujes horizontales resultantes de los apoyos de las cubiertas en los muros laterales de las construcciones o la deformabilidad de las estructuras en si mismas.

c) Las cerchas y vigas en celosía son sistemas compuestos de barras donde la longitud de estas no depende de la luz a cubrir, son sistemas indeformables debido a la triangulación de los elementos que los componen y además estos trabajan solamente frente a solicitaciones axiales debido a la naturaleza de sus uniones. Estas características sumadas a la necesidad de secciones con menor canto en comparación a los dinteles equivalentes han hecho de este tipo de sistemas un avance tecnológico muy importante.

d) La herramienta generada con software excell para el trabajo aquí presentado a cumplido con éxito su objetivo principal de corroborar las teorías aportadas por técnicos y expertos en la materia como F. Moore, H. Engel, E. Torroja por citar algunos de los autores consultados.

Los resultados obtenidos han confirmado las hipótesis de partida iniciales basadas en estudios realizados por estos autores, podemos señalar como características comunes a todos ellos las solicitaciones a compresión a las que están sometidos los pares superiores de las cerchas o armaduras de cubierta o los cordones superiores en el caso de las vigas en celosía y por otro lado las solicitaciones a tracción a las que están sometidos los tirantes inferiores de las cerchas o armaduras de cubierta o los cordones inferiores en el caso de las vigas en celosía.

e) Señalar los tres casos concretos de tres barras en las que, tras haber realizado sendos análisis con los softwares excell y SAP2000, no hay coincidencia de resultados con las hipótesis de partida, estos casos son:

- Cerchas Polonceau y Fink (páginas 53 y 56): Las barras perpendiculares a los pares superiores están sometidas a esfuerzos distintos a las hipótesis de partida, tras estudiar ambos casos se concluye que dichas barras trabajan a compresión.
- Cercha Pratt (página 54): El montante vertical central resulta estar sometido a esfuerzos distintos a la hipótesis de partida, se concluye dicha barra trabaja a compresión.
- Viga celosía Pratt Plana (página 59): El montante vertical central resulta estar sometido a esfuerzos distintos a la hipótesis de partida, se concluye dicha barra trabaja a compresión.

6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Con la documentación y la información base generada en el presente trabajo se ha pretendido aportar una herramienta de análisis con la que poder contrastar los distintos tipos de sistemas estudiados (en el caso de sistemas isostáticos) conociendo el origen de sus diseños, el contexto en el que se generaron, quienes fueron los responsables de su creación y como responden a las distintas sollicitaciones a las que estos sean sometidos.

Las posibles futuras líneas de investigación, especialmente en el bloques prácticos de creación de plantillas de software excel y SAP2000, podrían estar orientadas a resolver los cálculos necesarios para obtener las sollicitaciones resultantes en sistemas hipostáticos o hiperestáticos, valores y diagramas de esfuerzos axiles, flechas, desplazamientos, etc.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Adam, Jean Pierre. 2002. **La Construcción Romana, Materiales y Técnicas**. Editorial de los Oficios. Madrid.
- Argüelles Álvarez, R./ Arriaga Martitegui, F. 1988. **Curso de Diseño y Cálculo de Estructuras de Madera**. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- Argüelles Álvarez, R./ Arriaga Martitegui, F. 1996. **Estructuras de Madera**. Editorial AITIM. España.
- Argüelles Álvarez, R. 1985. **La Estructura Metálica Hoy**. Escuela Técnica Superior de Montes. Madrid.
- Argüelles Álvarez, R. 1987. **Estructuras de Acero, Uniones y Sistemas Estructurales (Tomo 2)**. Editorial Bellisco. Madrid.
- Arnedo Pena, A. 1986. **Naves Industriales con Acero**. Editorial Apta. Madrid.
- Aroca Hernández, R. 2006. **Vigas Trianguladas y Cerchas**. Cuadernos Instituto Juan de Herrera. Madrid.
- Barjot, D./ Dureuil, J. 2008. **150 Ans de Génie Civil: Une Histoire de Centraliens**. Editorial Sorbonne Pups. Francia.
- Batanero, J./ Rodríguez Borlado, R./ Martínez Lasheras, C./ Moras Zancajo, C. 1971. **Estructuras Metálicas de Edificios**. Editorial Altos Hornos de Vizcaya S.A. España.
- Calle Reinoso, L. / Cobeño, E. 1975. **Ábacos para el Cálculo de Cerchas de Hierro y Madera**. Madrid
- Cassinello Pérez, F. 1970. **Construcción: Carpintería**. Editorial Rueda. Madrid.
- Cassinello Plaza, M.J. 2004. **Trazado y Estabilidad de la Arquitectura Gótica**. Cuadernos Intemac nº 53. Ed. Intemac. Madrid.
- D.K.Ching, F. 2009. **Manual de Estructuras Ilustrado**. Editorial Gustavo Gili. Madrid.
- Davidson, B./ Owens, G. W. 2012. **Steel Designers Manual**. Editorial Wiley-Blackwell. Inglaterra.
- Engel, H. 1970. **Sistemas de Estructuras**. Editorial Blume. Madrid.
- Eymar, J.M. **Concepción de Cerchas de Hormigón Armado**. Editorial Rueda. Madrid.
- Heyman, J. 2001. **La Ciencia de las Estructuras**. Instituto Juan de Herrera. Madrid.
- García López de la Osa, G. 2009. **Origen y Evolución de la Cercha**. TFM.Master en Técnicas y Sistemas de Edificación. Arquitectura UPM. Tutor. Dr. Mariano González Cortina. Madrid.
- Moore F. 2001. **Comprensión de las Estructuras**. Editorial Mcgraw-Hill / Interamericana de Mexico.
- Nichols, Roger L. 1980. **Stephen Long & American Frontier Exploration**. The Annals of Iowa 46. Estados Unidos.
- Pérez Gutiérrez, C./ González Lezcano, R./ Molina Iniest, M. 2014. **Abecé de las Estructuras: Análisis de Estructuras**. Editorial Rústica. Madrid.
- Torroja Miret, E. 2007. **Razón de ser de los tipos estructurales**. Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Trevor-Hodge, A. 1960. **The Woodwork of Greek Roofs**. Cambridge. University Press. Inglaterra.
- Vitrubio, M.L. 2000. **Los Diez Libros de Arquitectura**. Editorial Iberia,S.A. Barcelona.

7.2. REFERENCIAS WEB:

- www.pghbridges.com Bridges and Tunnels of allegheny county and pittsburgh, pa
- www.structurae.info Structurae - Base de données internationale du patrimoine du génie civil
- www.tbcbspa.com Theodore burr covered bridge society of pennsylvania
- www.coveredbridgesociety.org National society for the preservation of covered bridges
- www.nycoveredbridges.org New york covered bridge society
- www.historyofbridges.com History of bridges
- www.structuremag.org Structure magazine
- www.asce.org American society of civil engineers
- www.cmich.edu Central Michigan university
- www.iamcivilengineer.com Civil Engineering blog
- www.nps.gov/fosm/learn/historyculture National Park Service
- www.industrialarchaeology.net Society for Industrial archeology
- www.cmich.edu Central Michigan University
- www.joostdevree.nl Nederlandse vereniging van journalisten nvj
- www.magazinedesigning.com Magazine design
- www.cseengineermag.com Magazine - civil + Structural engineer magazine
- www.structuraltimbermagazine.co.uk Structural timber magazine
- www.dailycivil.com/category/structural Structural archives - daily civil
- www.ocwus.us.es Universidad de Sevilla- open course ware
- www.unblogdeingenieria.wordpress.com Mateo Blanco, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

8. REFERENCIAS A FIGURAS

Figura 1: Stoa griega.	10
Figura 2: Sección del Partenón según Coulton.	10
Figura 3: Templo dórico de Minerva en Egina.	10
Figura 4: Templo de Zeus en Agrigento según Coulton.	10
Figura 5: Primitiva basílica de San Pedro (Roma) 333 d.C., según Letarouilly.	12
Figura 6: Cercha primitiva de la basílica de San Pablo Extramuros (Roma), según J. Rondelet.	12
Figura 7: Estructura de cubierta del pórtico de entrada del Panteón (Roma), según Palladio.	12
Figura 8: Basílica de Fanum de Vitrubio, según Morgan.	12
Figura 9: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí.	13
Figura 10: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí.	14
Figura 11: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí.	15
Figura 12: Catedral del Lisieux: armadura de la nave central con jabalcones de tijera y duplicado de pares.	15
Figura 13: Catedral de Notre Dame de Paris. Cercha mayor de la cubierta de la nave central según Deneux.	17
Figura 14: Catedral de Notre Dame de París. Detalle de péndola de cercha mayor.	17
Figura 15: Westminster Hall. Detalle de cercha mayor.	17
Figura 16: Westminster Hall. Sección por cercha mayor.	17
Figura 17: Cubierta de Santa Catalina del Monte Sinaí.	18
Figura 18: Teatro Sheldonian, Christopher Wren, Reino Unido (1662)	20
Figura 19: Puente de Coalbrookdale sobre el río Severn, John Wilkinson y Abraham Darby, Reino Unido (1777)	20
Figura 20: Picadero para caballos, Angel Betancourt, Moscú (1817)	20
Figura 21: Solución de una estructura plana articulada por el método de Ritter.	23
Figura 22: Solución de estructura por el método de nudos.	23
Figura 23: Solución de una cercha por el método de Cremona.	23
Figura 24: Esfuerzo de flexión, elementos bipoyados.	24
Figura 25: Diagramas de cortante y flexión viga biapoyada.	24
Figura 26: Tensión y Compresión en algunas armaduras triangulares.	25
Figura 27: Estabilidad en armaduras.	25
Figura 28: Transmisión de las fuerzas exteriores mediante una sección material rígida.	26
Figura 29: Transmisión de las fuerzas exteriores mediante forma material conveniente.	26
Figura 30: Transmisión de las fuerzas exteriores mediante una disposición conveniente de las barras.	26
Figura 31: Rigidez-Triangulación. Pórtico de cuatro nudos articulados se halla en equilibrio sólo teóricamente.	26
Figura 32: Rigidez-Triangulación. Bajo cargas asimétricas, el equilibrio del sistema se rompe en tanto los nudos permanezcan articulados.	26
Figura 33: Rigidez-Triangulación. El elemento diagonal impide la deformación. El pórtico se convierte en una estructura triangulada.	26
Figura 34: Rigidez-Triangulación. Una segunda diagonal incrementa la rigidez pero no es necesaria para el efecto resistente.	26
Figura 35: Sistema de transmisión vectorial. Cada carga exterior es mantenida en equilibrio por dos o más vectores-fuerza.	26
Figura 36: Influencia división-distribución de esfuerzos. Esfuerzos mayores (compresión) en las barras superiores con longitudes de pandeo críticas.	27
Figura 37: Influencia división-distribución de esfuerzos. Reducción de la longitud de pandeo en barras superiores.	27
Figura 38: Influencia división-distribución de esfuerzos. Reducción menos de la longitud de pandeo de las barras superiores.	27
Figura 39: Influencia altura-esfuerzos en barras. Todos los Nudos.	27
Figura 40: Influencia altura-esfuerzos en barras. Nudo de apoyo.	27
Figura 41: Influencia altura-esfuerzos en barras. Nudo en el Par.	27
Figura 42: Influencia altura-esfuerzos en barras. Nudo en cumbre	27
Figura 43: Influencia altura-esfuerzos en barras. Nudo en cumbre	27
Figura 44: Influencia configuración de entramado- distribución de esfuerzos. (I)	27
Figura 45: Influencia configuración de entramado- distribución de esfuerzos. (II)	27
Figura 46: Cubierta de par y picadero.	28
Figura 47: Tipo inglesa.	29
Figura 48: Tipo española.	29
Figura 49: Tipo Hammer Beam.	29
Figura 50: Ejemplo de aplicación del sistema.	29
Figura 51: Tipo Polonceau sencilla.	30
Figura 52: Tipo Polonceau compuesta.	30
Figura 53: Tipo Polonceau peraltada.	30
Figura 54: Ejemplo de aplicación del sistema (Metálica)	30
Figura 55: Tipo Pratt.	31
Figura 56: Tipo Howe.	31
Figura 57: Ejemplo de Aplicación del sistema (Madera)	31

Figura 58: Tipo Howe.	32
Figura 59: Ejemplo de Aplicación del sistema (Madera)	32
Figura 60: Harbert Cottage_ Searl Lamaster Howe Architects (Metálica)	32
Figura 61: Tipo Fink.	33
Figura 62: Ejemplo de Aplicación del sistema (Madera)	33
Figura 63: Fábrica en Milltown, Missoula (Metálica)	33
Figura 64: Proyecto Cubierta Picadero en Moscú_Angel Betancourt (1817)	36
Figura 65: Comienzos de la triangulación.	36
Figura 66: Tipos de Vigas en celosía biapoyadas.	37
Figura 67: Esquemas de Tracción y compresión de armaduras rectangulares.	39
Figura 68: Viga experimental estudiada en laboratorio.	39
Figura 69: Ejemplo práctico-Vigas estudiadas.	40
Figura 70: Ejemplo práctico-Eschema deformada.	40
Figura 71: Ejemplo práctico-Esfuerzos axiles.	40
Figura 72: Ejemplo práctico-Resultados.	40
Figura 73: Superficies de cubierta inclinadas apoyadas en ambos extremos.	41
Figura 74: Superficies de cubierta horizontales alternadas apoyadas en ambos extremos.	41
Figura 75: Superficies de cubierta horizontales apoyadas en el centro.	41
Figura 76: Superficies de cubierta con diferente inclinación, apoyadas en el centro.	41
Figura 76: Tipo Warren_variante común.	42
Figura 77: Tipo Warren_variante con montantes verticales.	42
Figura 78: Modelo de avión Handley Page HP42, 1930.	42
Figura 79: Puente de Newark Dyke, Cass Hayward, Reino Unido, 1890.	42
Figura 80: Tipo Howe_variante común.	43
Figura 81: Tipo Howe_variante con diagonales dobles.	43
Figura 82: Tipo Long o Cruces de San Andrés.	43
Figura 83: Puente sobre el río Alamo, Holtville, California, 1910	43
Figura 84: Tipo Pratt_variante común.	44
Figura 85: Tipo Pratt_variante con barras de cierre.	44
Figura 86: Dibujo de patente de Pratt.	44
Figura 87: Puente Río Dearborn, Montana, 1897.	44
Figura 88: tipo Long o Cruces de San Andrés.	45
Figura 89: tipo Howe_variante con diagonales dobles.	45
Figura 90: Ascensor Urbano_Vaumn Architects, 2011.	45
Figura 91: Gráficos de apoyo para software excell.	48
Figura 92: Software excel, parámetros a definir por usuario.	49
Figura 93: Software excel, cálculo grados de hiperestatismo.	49
Figura 94: Software excel, cálculo de reacciones externas.	50
Figura 95: Software excel, cálculo de esfuerzos en barras.	50
Figura 96: Software excel, tabla resumen de resultados.	51
Figura 97: Software excel, sección y ecuaciones de comprobación.	51
Figura 98: Software SAP200, geometría base.	61
Figura 99: Software SAP200, definición de material base.	61
Figura 100: Software SAP200, restricciones en apoyos.	62
Figura 101: Software SAP200, definición de perfil.	62
Figura 102: Software SAP200, definición de rótulas en uniones.	62
Figura 103: Software SAP200, definición de cargas puntuales en cordón inferior.	63
Figura 104: Software SAP200, definición de tipos de cargas actuantes.	63
Figura 105: Software SAP200, definición de combinaciones de cargas.	63
Figura 106: Software SAP200, restricción de cálculos al plano 2D.	64
Figura 107: Software SAP200, eliminación de la carga de sismo del cálculo y análisis.	64
Figura 108: Software SAP200, cercha tipo inglesa / deformada.	65
Figura 109: Software SAP200, cercha tipo inglesa / diagrama de axiles.	65
Figura 110: Software SAP200, cercha tipo Polonceau / deformada.	65
Figura 111: Software SAP200, cercha tipo Polonceau / diagrama de axiles.	65
Figura 112: Software SAP200, cercha tipo Pratt / deformada.	66
Figura 113: Software SAP200, cercha tipo Pratt / diagrama de axiles.	66

Figura 114: Software SAP200, cercha tipo Howe / deformada.	66
Figura 115: Software SAP200, cercha tipo Howe / diagrama de axiles.	66
Figura 116: Software SAP200, cercha tipo Fink / deformada.	67
Figura 117: Software SAP200, cercha tipo Fink / diagrama de axiles.	67
Figura 118: Software SAP200, viga en celosía tipo Warren / deformada.	67
Figura 119: Software SAP200, viga en celosía tipo Warren / diagrama de axiles.	67
Figura 120: Software SAP200, viga en celosía tipo Howe / deformada.	68
Figura 121: Software SAP200, viga en celosía tipo Howe / diagrama de axiles.	68
Figura 122: Software SAP200, viga en celosía tipo Warren / deformada.	68
Figura 123: Software SAP200, viga en celosía tipo Warren / diagrama de axiles.	68

CERCHAS Y CELOSÍAS

RAZÓN DE SER Y DESARROLLO DE SOFTWARE



ALUMNO: DAVID MALAGÓN ZAFRA
TRABAJO FIN DE GRADO 2017-2018
E.T.S. ARQUITECTURA DE GRANADA
TUTOR: JAVIER SUÁREZ MEDINA

