

COMPARATIVA ENTRE LOS ORIGENES DE LA EDIFICACION EN ALTURA EN ACERO  
Y PRIMEROS PROYECTOS EN MADERA CONTRALAMINADA

MARIA DEL CARMEN CUADRADO SANCHEZ





*Comparativa entre los orígenes de la edificación en acero y  
primeros proyectos en madera contralaminada.*

*Trabajo Fin de Grado, Septiembre 2020.  
Grado en Fundamentos de la Arquitectura*

*María del Carmen Cuadrado Sánchez*

*Tutores:*

*Julian Alonso Monje  
Dr. Jose Antonio Balmori*

*Escuela Técnica Superior de Arquitectura  
Universidad de Valladolid*



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE ARQUITECTURA DE VALLADOLID**



## ÍNDICE

	<i>Pág.</i>		<i>Pág.</i>
Resumen.	5	4. Madera.	67
Abstract.	7	4.1. Madera material.	68
1. Introducción.	9	4.1.1. Breve historia.	68
2. Antecedentes.	15	4.1.2. CLT.	70
2.1. Por qué se empezó a diseñar en altura. La ambición de alcanzar el cielo.	17	4.1.3. Proceso de fabricación.	71
2.2. Edificación en altura, ¿Cómo surge?	19	4.1.4. Propiedades de la madera.	76
3. Acero.	25	4.1.5. Principales ventajas e inconvenientes de la madera en estructuras.	77
3.1. Acero material.	26	4.2. Madera uniones.	78
3.1.1. Breve historia.	26	4.2.1. Uniones de estructura de CLT.	78
3.1.2. Acero estructural.	28	4.2.2. Edificación con CLT.	83
3.1.3. Proceso de fabricación.	29	4.2.3. Ejemplo unión CLT. Stadthaus, 24 Murray Grove.	88
3.1.4. Propiedades del acero.	33	5. Discusión.	101
3.1.5. Principales ventajas e inconvenientes del acero en estructuras.	35	6. Conclusión.	111
3.2. Acero uniones.	36	7. Bibliografía.	115
3.2.1. Uniones de estructura de acero del siglo XIX.	36		
3.2.2. Edificación en acero.	42		
3.2.3. Ejemplo unión acero. Almacenes Carson, Pirie, Scott – Sullivan Center.	49		



## RESUMEN

En la actualidad, la madera estructural se encuentra en pleno desarrollo gracias a los productos industrializados y las investigaciones que se están realizando sobre este material. Debido a estos avances, se están construyendo edificaciones en altura con estructuras de madera, lo que le hace un material digno de competir, pese a sus singularidades y limitaciones, con el acero y el hormigón. Este trabajo desarrolla una comparativa a nivel histórica de los orígenes de las primeras edificaciones en altura de estructuras construidas en acero (EE.UU. – ff. S.XIX), y las primeras edificaciones en altura que se están realizando con madera contralaminada (CLT) (Europa – ff. S.XX). Materiales, épocas y soluciones, aparentemente, muy diferentes para dar respuesta al origen de un mismo problema; construir estructuras seguras y eficientes en altura. El trabajo se ciñe al estudio de los medios de unión, sabiendo de ante mano que existen multitud de aspectos que podrían servir de estudio y comparación entre estas tipologías de estructuras y que serían inabarcables en este tipo de trabajo (TFG).

Para realizar la comparativa, se analizan las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales, y posteriormente su transformación en elementos estructurales (perfiles/paneles). Posteriormente se analizan las uniones típicas a utilizar en cada material. Como metodología de trabajo se realiza un estudio de ejemplos de interés de edificios construidos, tanto en acero como en madera, en cada una de las épocas. De todos ellos se analiza en detalle (medios de unión) uno de los edificios. En el caso del acero, se ha escogido el edificio de Almacenes Carson, Pirie, Scott que pertenece al estilo de la escuela de Chicago realizado con uniones roblonadas. Para la madera, se ha considerado oportuno analizar el edificio Stadthaus construido enteramente con paneles estructurales de CLT con uniones a base de herrajes metálicos y clavos. Finalmente se reflexionará sobre los temas abordados mediante una breve conclusión.

**Palabras clave:** *Edificio en altura, Estructura, Acero estructural, Madera, CLT, Uniones, Roblón.*



## ABSTRACT

At present, structural timber is in full development thanks to the industrial products and research that is being carried out on this material. Due to these advances, high-rise buildings have been built with timber structures, which makes it a enough competitive material, despite its uniqueness and limitations, with steel and concrete. This work develops an historical comparation about first tall buildings origin's they have been built in structural steel (USA - ff. XIX century), and first tall buildings have been made with cross-laminated timber (CLT) (Europe - ss. S.XX). Materials, times and solutions, apparently, very different to respond at the origin of the same problem; build safe and efficient structures in height. The work is limited to the study of the means of union, knowing in advance that there are many aspects that could serve as a study and comparison between these types of structures and that they are not encompassed in this type of work (TFG).

To make the comparison, the mechanical properties of each of the materials are analyzed, and subsequently their transformation into structural elements (profiles / panels). Later, the typical joints to be used in each material are analyzed. As a work methodology, a study of interesting examples of buildings built, both in steel and timber, is carried out in each of the periods. Of all of them, one of the buildings is analyzed in detail (means of connection). In the case of steel, the Carson, Pirie, Scott Warehouse building has been chosen, which belongs to the style of the Chicago school made with bolted joints. For timber, it was considered oportune to analyze the Stadthaus building built entirely with CLT structural panels with joints based on metal fittings and nails. Finally, the topics addressed were reflected on through a brief conclusion.

Keywords: Tall building, Structure, Structural steel, Timber, CLT, Joints, Bolt.





## 1. INTRODUCCIÓN.

### PRESENTACIÓN DEL TEMA.

Es fácil darse cuenta de que el origen de la edificación en altura va de la mano con el comienzo de las estructuras de acero. A medida que se estudiaba y evolucionaban las estructuras con este material los edificios podían ser cada vez más altos con menos sección. Pequeñas variaciones, como por ejemplo el tipo de unión, hacen capaz un gran cambio en la resistencia de la estructuras de los rascacielos. Simplemente el paso de uniones semirrígidas a rígidas mediante soldadura en combinación con tornillería ha posibilitado tener un mecanismo más eficiente de cara a la resistencia ante acciones horizontales. En el siglo XIX, disponían de arriostramientos o núcleos de fábrica muy rígidos, dado que las uniones eran casi articuladas, la utilización de roblones no permite más que una forma de resistencia a cizalla limitando, por tanto, el diseño de la unión.

Por la necesidad que se ha creado a cuidar el medio ambiente, las estructuras realizadas plenamente de acero y/o hormigón se están dejando de lado para utilizar un material mucho más sostenible y respetuosos con el medio ambiente. Este material es la madera.

En las últimas décadas, se han desarrollado nuevas técnicas para usar este material de manera industrializada (Madera laminada, CLT,...) y solucionar los inconvenientes que afectaban a la madera aserrada. Elementos estructurales como los muros de carga y forjados realizados a base de madera contralaminada CLT, pueden llegar a formar edificaciones en altura como en los orígenes de las estructuras de acero.

## **OBJETIVOS.**

El siguiente estudio se realiza con el objetivo de crear una comparativa entre los orígenes de la edificación en altura con estructuras de acero, mediante un ejemplo analizado de la escuela de Chicago a finales del siglo XIX, y las primeras construcciones en altura a base de madera contralaminada (CLT) que se están realizando en nuestros días, con el propósito de obtener los beneficios y desventajas del empleo de cada material. Comparar en cierto modo el diseño y solución de los nuevos problemas en los orígenes de la edificación en altura con dos materiales muy distintos; el acero (S.XIX) y la madera industrializada (S.XX).

Además, se realiza esta comparativa con el fin de hacer ver que las técnicas de construcción con madera están evolucionando al igual que sucedió con el origen del acero, pudiéndose llegar a construir estructuras que sean realmente rascacielos a medida que las técnicas constructivas y elementos que las componen desarrollen mejoras prácticas para su uso estructural.

Por último el estudio, aprendizaje y reflexión sobre el tema abordado también trata sobre una evolución personal y académica que se intentará reflejar a lo largo de este trabajo.

## **METODOLOGÍA.**

La investigación se llevará a cabo principalmente mediante un análisis constructivo y estructural de cada material, y las soluciones adoptadas en un estudio de casos ejemplares. Como el problema de la edificación en altura es muy amplio, y fuera del alcance sensato de un trabajo final de grado, se limitara el análisis a particularizar el problema de la unión.

El estudio se centra en particular en el origen de los edificios en altura de la escuela de Chicago (EE.UU. – ff. S.XIX) y en las primeras construcciones en altura con madera CLT (Europa – ff. S.XX). De la escuela de Chicago se analizará en detalle el ejemplo los Almacenes Carson, Pirie, Scott; y en el caso de las construcciones de madera el edificio Stadthaus.

Respecto a las uniones, pese a tratarse de materiales muy diferentes, las uniones básicas utilizadas en los primeros diseños de los edificios en altura de ambos materiales dan respuesta, en principio, al mismo tipo de sollicitación; esfuerzos de cortante. En su inicio, el acero no se realizaba con uniones completamente rígidas al ejecutarse mediante roblones. Las uniones roblonadas trabajan a cortante y no es aconsejable que tengan esfuerzos traccionados ya que esto agiliza la rotura de la unión. Esto mismo sucede en el caso de las estructuras de CLT con uniones de herraje metálico y clavos; las más extensamente utilizada en este tipo de estructuras.

## **ESTRUCTURA DEL TRABAJO.**

El trabajo se desarrolla manteniendo, en la medida de las posibilidades, la estructura científica IMRaD:

En el primer apartado, con el objetivo de contextualizar el tema, se expone un marco histórico. En él se desarrolla la intención por la que se quería construir en altura, el sueño casi inalcanzable de llegar al cielo, y como finalmente surge con el incendio de Chicago en 1871 y la necesidad de construir en poco terreno. Esto se consigue gracias a la agrupación de arquitectos que formaron la escuela de Chicago e inventos esenciales como el ascensor.

La segunda y tercera parte trata de los materiales estructuras, el acero y la madera respectivamente. En estos apartados se realiza un estudio en el que se trata el inicio de cada material, su fabricación, propiedades mecánicas, ventajas e inconvenientes de usar cada material, tipos de uniones con las que se realiza las estructuras y ejemplos de edificios. Se continua con un análisis de casos ejemplares explicando más en profundidad el edificio, la estructura y como se calcularía las uniones de los mismos.

En la cuarta y última fase del trabajo, habiéndose expuesto los casos prácticos en los apartados anteriores, se realiza una discusión/conclusión sobre los resultados obtenidos en las estructuras de acero y de madera.







Figura 1. Torre BBVA



Figura 2. Torres Petronas

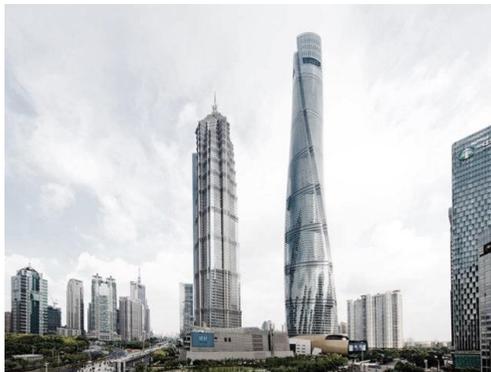


Figura 3. Shanghai Tower

## 2. ANTECEDENTES.

La construcción de edificaciones en altura ha sido recurrentemente utilizada a lo largo de la historia fundamentalmente por razones de valor estratégico (edificaciones defensivas) o por razones de valor simbólico (poder) (por ejemplo las torres palacio de Bolonia). Sin embargo, las limitaciones materiales y constructivas no permitían que estas edificaciones históricas alcancen más allá de las pocas decenas de metros, utilizando además un volumen de recursos estructurales muy alejados de las esbelteces actuales. La edificación en altura, tal y como la podemos definir en la actualidad, persigue valores principalmente económicos (pese a mantenerse en algunos edificios hito además un valor simbólico) con crecimientos urbanísticos en altura que pueden alcanzar desde las muchas decenas de metros (como las “Torre BBVA – 109m” (Figura 1), “Torres KIO-114m”, “Torre Picasso-151m” de Madrid) hasta los centenares de metros (rascacielos como el “Empire State Building – 381m”, “Torres Petronas-452m” (figura 2), o el “Shanghai Tower- 632m” (figura 3)).

## 2.1. POR QUÉ SE EMPEZÓ A DISEÑAR EN ALTURA. LA AMBICIÓN DE ALCANZAR EL CIELO.

Desde siempre el hombre ha querido alcanzar el cielo, elevarse por encima de lo demás. La humanidad ha sido un ser incapaz de volar, con el único contacto con el cielo a través de ambiciosos pensamientos y sueños. Con construcciones de todo tipo como templos, palacios, campanarios hasta llegar a los bloques residenciales hemos conseguido hacer del cielo nuestro hogar.

Desde la antigüedad hasta hoy en día, desde la torre de Babel 1750 a.C. (figura 4), las pirámides de Egipto 2570 a.C. (figura 5) o el faro de Alejandría 280 a.C. (figura 6) hasta llegar a las construcciones de los rascacielos más altos (s. XIX-actualidad), estas construcciones han servido como hito de posición y símbolo de valores de la sociedad<sup>1</sup>. Son pocas las construcciones de edificios que se hace solamente con la intención de alcanzar la necesidad de cobijar, casi siempre tienen el añadido de demostrar orgullo y superioridad. Por ejemplo, las pirámides de Egipto y Sudamérica, edificaciones en altura para vigilar en Europa y Asia, construcciones culturales y religiosas, se realizaban con el deseo de demostrar a los demás la grandeza, alabar a la divinidad, o simplemente elevarse sobre lo demás para observar.

Todas estas edificaciones han sido posibles por la evolución de la técnica, por las necesidades y aspiraciones del hombre y por la capacidad económica para poder convertirlas en una realidad y no solo en sueños. Si bien las propias limitaciones de resistencia de los materiales estructurales tradicionales, y la dificultad de ejecutar un sistema estructural de forma precisa, económica y segura fueron un problema. Con la evolución industrial, algunos inventos como el ascensor y el diseño de “esqueletos metálicos”, el rascacielos se convirtió en el símbolo del capitalismo americano, del dinamismo, del ingenio, el progreso y la prosperidad.



Figura 4. Torre de Babel, año 1750 a.C.



Figura 5. Pirámide de Keops, año 2570 a.C.



Figura 6. Faro de Alejandría, año 280 a.C.

<sup>1</sup> <http://www.demaravilla.com/vivir-nubes-evolucion-rascacielos-lujo/>

Tabla 1. Rascacielos de mayor altura construidos

	AÑO	EDIFICIO	UBICACIÓN	ALT
1	2009	Burj Dubái	Dubái, United Arab Emirates	828m
2	2015	Shanghái Tower	Shanghái, China	632m
3	2012	Makkah Royal Clock Tower	Mecca, Saudi Arabia	601m
4	2017	Ping An Finance Center	Shenzhen, China	599m
5	2017	Lotte World Tower	Seoul, South Korea	555m
6	2014	One World Trade Center	New York City, EEUU	541m
7	2016	Guangzhou CTF Finance Centre	Guangzhou, China	530m
8	2019	Tianjin CTF Finance Centre	Tianjin, China	530m
9	2018	CITIC Tower	Beijing, China	527m
10	2004	Taipéi 101	Taipéi, Taiwán	505m
11	2008	Shanghái World Financial Center	Shanghai, China	492m
12	2010	International Commerce Centre	Hong Kong, China	484m
13	2019	Lakhta Center	St. Petersburg, Russia	462m
14	2018	Vincom Landmark 81	Ho Chi Minh City, Vietnam	461m
15	2018	Changsha IFS Tower T1	Changsha, China	452m
16	1998	Petronas Towers	Kuala Lumpur, Malaysia	452m
17	2019	Suzhou IFS	Suzhou, China	450m
18	2010	Zifeng Tower	Nanjing, China	450m
19	2019	The Exchange 106	Kuala Lumpur, Malaysia	445m

La construcción del primer “rascacielos” se suele situar en 1885 con el edificio “Home Insurance Building” de William Le Baron Jenney. Esto fue un gran avance, y la vez que se construía este edificio se empezaron a diseñar decenas de prototipos para toda la ciudad de Chicago. El edificio “Home Insurance Building” con tan solo diez pisos de altura, sin embargo generó los orígenes de la “Escuela de Chicago”.

Con el desarrollo de los rascacielos en EEUU, poco a poco empezó a triunfar por todo el mundo convirtiéndose así en un símbolo de poder y orgullo. Al tratarse del edificio más común de las últimas décadas, solo los primeros rascacielos americanos pudieron mantener el record de edificio más alto del mundo durante varias décadas seguidas, ya que actualmente existe una “carrera” por diseñar y construir el edificio más alto (tabla 1). Esto supone un cambio de título nuevo cada pocos años.

Los rascacielos que se construyen en la actualidad son muchos más fuertes, flexibles y seguros que en sus comienzos. Estas edificaciones continúan alimentando la fascinación moderna al evolucionar la tecnología dando sensación de poder, glamour y sofisticación urbana.

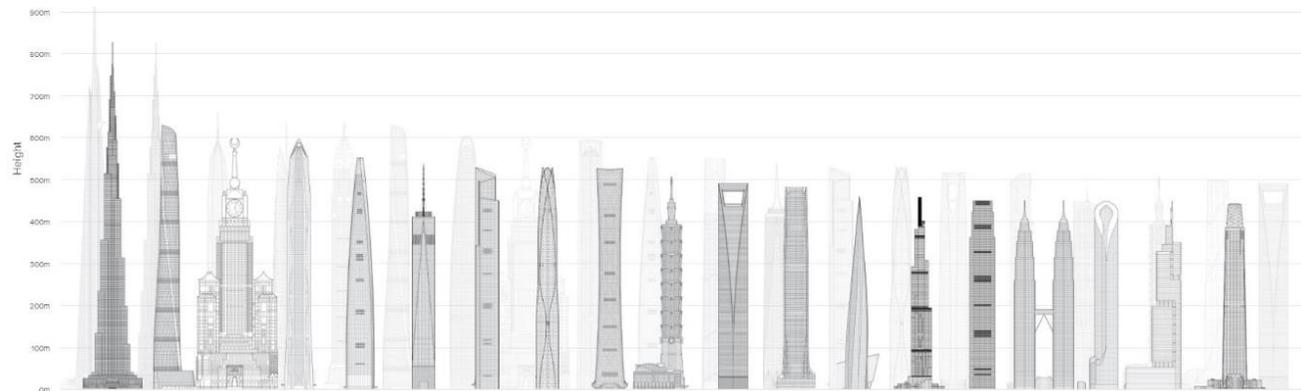


Figura 7. Skyline de los rascacielos de mayor altura

## 2.2. EDIFICACIÓN EN ALTURA ¿CÓMO SURGE?

La edificación en altura tiene su origen en Estados Unidos como resultado del crecimiento económico y el uso intensivo del suelo para construir nuevas ciudades. Chicago fue la pionera de este diseño de arquitectura moderna debido a su auge como gran capital financiera a mediados del siglo XIX creciendo de un pueblo pequeño en 1830, teniendo en 1850 una ocupación de 30.000 habitantes y llegando a alcanzar los 300.000 en 1870. Esto produjo la necesidad de una construcción rápida. La ciudad era totalmente de madera, los muros, el suelo, las puertas y ventanas, los muebles e incluso algunas calles se habían pavimentado para facilitar el tránsito de una ciudad que crecía rápidamente. Se podían encontrar edificios de hasta 4 alturas construidos en madera. Más de 40.000 edificios eran de construcciones en madera.

En octubre de 1871, Chicago se había convertido en el centro de negocios pero un gran incendio destruyó el centro de la ciudad construido en madera (figura 9). Más de 100.000 personas se quedaron sin hogar, el fuego devastó 17.000 estructuras. Este desastre no paró la evolución de la ciudad sino que dio un nuevo impulso. Antes de que el fuego fuese apagado, se habían formado comités para realizar los planes de la reconstrucción de Chicago. El incendio había dejado vacío los solares de la mejor zona de la ciudad y la demanda de ocupación era tan grande que el precio del suelo se disparó. Los arquitectos e ingenieros tenían la necesidad de rentabilizar al máximo el alto precio con nuevos edificios de bajo coste y aprovechando todo el espacio posible. La ciudad fue reconstruida (figura 10) manteniendo el trazado ortogonal creando una parte comercial que configuraba todo el centro mientras que los edificios residenciales se situaban a las afueras. Se aprobaron leyes que prohibían el uso de construcciones en madera y exigían edificios que fueran construidos con materiales resistentes al fuego. Todos estos factores alentaron la construcción de edificios en altura con el uso de materiales innovadores como el hierro fundido y el acero para sus estructuras, utilizados en aquella época



Figura 8. Chicago antes del incendio



Figura 9. Chicago durante el incendio



Figura 10. Chicago después del incendio



Figura 11. Edificio en construcción en Chicago



Figura 12. Exposición del New York Crystal Palace en 1854. Invención del ascensor

únicamente para la realización de puentes ferroviarios. A estas edificaciones se las denominó en 1888 como “rascacielos”.

La aparición de los rascacielos fue posible gracias a la revolución industrial que proporcionó nuevos materiales, tipologías, inventos y técnicas como las estructuras de acero. En las construcciones convencionales los muros ocupaban mucho espacio en planta, a medida que se hacían más altos sus muros debían ser más anchos para soportar bien las cargas. Es por esto por lo que surgió la idea de hacer “esqueletos metálicos” y que concentrara la tensión estructural, de esta manera los muros se separan de la estructura pasando a ser solo parte de la envolvente, aprovechando mejor la ocupación del suelo edificable y mayor luminosidad.

La invención del ascensor también fue esencial para el desarrollo de los rascacielos. El requisito para el diseño de estos edificios capaz de llevarlo hasta elevaciones insospechadas fue el ascensor. Los primeros ascensores aparecieron en Inglaterra en la década de 1830 para el uso de transporte de mercancías. Se realizaban con un sistema a base de cables por lo que solo podían funcionar en edificios de poca elevación. En 1852, Elisha Graves Otis<sup>2</sup> inventó un dispositivo de seguridad que posibilitaba ascensores “seguros”, al evitar la caída en caso de rotura de cable (figura 12), proporcionando la solución que permitían transportar personas de forma segura haciendo realidad la construcción de los primeros rascacielos. Otras nuevas tecnologías como la calefacción, iluminación, ventilación e instalaciones sanitarias fueron también importantes para la creación de los edificios en altura.

La destrucción de la ciudad debido al gran incendio de 1871 dio la oportunidad a decenas de arquitectos e ingenieros de diseñar un nuevo estilo arquitectónico moderno. Este estilo denominado “Escuela de Chicago” se caracteriza por crear nuevas ideas como los esqueletos metálicos, los edificios en altura y los Bow-windows.

<sup>2</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Elisha\\_Graves\\_Otis](https://es.wikipedia.org/wiki/Elisha_Graves_Otis)

No era un grupo oficial sino un momento determinado en la historia en el que unos profesionales trabajaron en una ciudad creando una nueva arquitectura. Esta escuela incluía profesionales como Louis Sullivan, William Le Baron Jenney, Dankmar Adler, Henry Hobson Richardson, entre muchos otros.

El primer rascacielos que se construyó en la época de la Escuela de Chicago fue el “Home Insurance Building” (figura 13), considerados por muchos el primer rascacielos del mundo. Es un edificio de 10 pisos de altura de 42 metros y diseñado por William Le Baron Jenney en 1884. El diseño era inusual ya que incorporaba acero y hierro fundido en la estructura. Esta estructura ayudaba a absorber el peso de las plantas del edificio con un sistema tridimensional basado en pilares y vigas.

En las construcciones de la Escuela de Chicago se denotan dos tendencias: una corriente estructuralista y una corriente estilística. La primera desarrolla un sistema para la construcción de la estructura de los edificios a prueba de fuego. Los edificios eran esqueletos que confiaban todo el programa arquitectónico a la solución estructural. Edificios como Home Insurance Building citado anteriormente, Fair Store Building (W.L.B. Jenney) o Marshall Field’s Wholesale (H.H. Richardson) son ejemplos de esta tendencia. La segunda corriente da más importancia a las implicaciones estilísticas con estilo románico. El principal representante de esta tendencia es Louis Sullivan junto con Dankmar Adler que diseñan el Auditorium (1889) (figura 14) y el Wainwright Building (1891).<sup>3</sup>

A partir de 1888, una vez superados los desafíos técnicos, en Chicago se vivió un periodo de auge en la construcción de rascacielos. En 1893, Chicago ya había construido doce rascacielos de entre 16 y 20 pisos de



Figura 13. Fachada Home Insurance Building



Figura 14. Edificio Auditorium

<sup>3</sup> <https://www.emagister.com/blog/escuela-chicago-inicios-del-mundo-contemporaneo/>



Figura 15. Edificio Flatiron



Figura 16. Edificio Rockerfeller Center

altura, mientras que en Nueva York solo tenía cuatro de más de 16 pisos. Esta lentitud se debía a las autoridades de la ciudad a aprobar las nuevas técnicas de construcción con estructura metálica. Finalmente, en 1895, se terminó la construcción del American Surety Building de 20 pisos de altura y 92 m, con estructura de acero, que rompía el record de altura que mantenía Chicago. En Chicago se estaban viendo afectados por los límites del diseño de estructuras de acero y por los subsuelos embarrados de la ciudad limitando así las construcciones con una altura de 16 o 17 plantas. Desde entonces, Nueva York se convirtió en la ciudad con edificios más altos.

En la primera década del siglo XX, surgió una nueva ola en la construcción de rascacielos en Nueva York, debido a una mayor demanda de espacio de oficinas. Los avances en las técnicas estructurales hicieron más fácil construir y habilitar edificios cada vez más altos. Edificios emblemáticos como el Flatiron (figura 15), Singer Tower de 187 m, la Metropolitan Life Insurance Company Tower de 213 m y el edificio Woolworth de 241 m tuvieron críticas ya que alteraban el skyline de la ciudad y sumieron las calles y edificios colindantes a una sombra perpetua. Como resultado, se aplican las ordenanzas parcelario de 1916 que obligaban al retranqueo en altura para permitir la entrada de luz y aire en las calles. Todas estas críticas callaron fascinadas admirando las alturas que alcanzaban las agujas de los edificios Chrysler (W.V. Allen 1928), Rockerfeller Center (R. Hood 1931) (figura 16) o Empire State Building (Shreve, Lamb and Harmon 1931).

Actualmente, ha surgido un gran interés por las estructuras de madera en la construcción de edificios de gran altura. La aparición de nuevas técnicas, el desarrollo de las maderas industriales y la preocupación por el medio ambiente están haciendo real la construcción con madera como alternativa con igual o mejor relación que el acero o el hormigón. Esto conlleva una competición de los diferentes países por conseguir la construcción del rascacielos más alto realizado en madera. Cada poco tiempo se publican proyectos de edificación en madera que se supera en altura y que están suponiendo auténticos desafíos para la arquitectura. En la ciudad de Brumunddal (Noruega) se ha construido el edificio Mjøstårnet<sup>4</sup> (figura 17), por el momento es el rascacielos más alto realizado con estructura de madera con un total de 85,4m de altura y 18 pisos. Este edificio ha dejado atrás a su anterior líder, la residencia de estudiantes de la Universidad de Columbia Británica Brock Commons (figura 18) situada en Vancouver (Canadá) con una altura de 53m y 18 pisos. Mjøstårnet no será el rascacielos más alto en madera por mucho tiempo. En Tokio (Japón) están proyectando el edificio W350 que tendrá 70 pisos y 350m. En España, concretamente Hondarribia, se está realizando la construcción de un edificio con 65 viviendas de 4 plantas (figura 19).

Existen diversas tipologías constructivas y estrategias estructurales para solventar las limitaciones propias del material y permitir la construcción en altura con madera. Sin embargo, en la actualidad una de las soluciones que mayor éxito y expansión está alcanzando en la construcción de edificaciones en altura es el empleo de paneles de madera contralaminadas –“Cross Laminated Timber”- (CLT).

El resultado de esta estructura es interesante no solo arquitectónicamente sino por su actitud sostenible ayudando a la lucha contra el cambio climático. Este proceso supone un fomento del uso de la madera por su carácter económico-social y ventajas en la construcción.



Figura 17. Edificio Mjøstårnet



Figura 18. Edificio Brock Commons



Figura 19. Edificio 65 viviendas en Hondarribia

<sup>4</sup> [https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553167229\\_981390.html](https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553167229_981390.html)





Tabla 2. Edificios con estructura de acero que tuvieron el record por edificación con más altura

AÑO	EDIFICIO	UBICACIÓN	ALT
1885	Home Insurance Building	Chicago, Illinois	55m
1890	World Building	New York City	94m
1894	Manhattan Life Insurance Building	New York City	106m
1899	Park Row Building	New York City	119m
1908	Singer Building	New York City	187m
1909	Metropolitan Life Tower	New York City	213m
1913	Woolworth Building	New York City	241m
1930	Manhattan Company	New York City	283m
1930	Chrysler Building	New York City	319m
1931	Empire State Building	New York City	381m
1973	World Trade Center	New York City	417m
1974	Sears Tower	Chicago, Illinois	443m
1998	Petronas Towers	Kuala Lumpur, Malaysia	452m
2004	Taipéi 101	Taipei, Taiwán	505m
2009	Burj Dubái	Dubái, United Arab Emirates	828m

### 3. ACERO.

#### 3.1. ACERO MATERIAL

##### 3.1.1. BREVE HISTORIA.

Uno de los materiales más utilizado en la construcción de estructuras es el acero. Antes del descubrimiento de este material, el hierro fundido es el que se utilizaba con frecuencia en la construcción. No es conocida con exactitud la fecha en la que se comenzó a usar la técnica de fundir el mineral de hierro. Los primeros artesanos que trabajaban con hierro fundido calentaban una masa de mineral de hierro junto con carbón vegetal en un gran horno. Con esta técnica reducían el mineral a una masa esponjosa de hierro con impurezas metálicas. A continuación, retiraban esa masa estando aún incandescente y con un martillo expulsaban las impurezas dándole golpes fuertes.

En el 1855, los hornos de fundición aumentaron de tamaño donde el mineral de la partes superior se reducía a hierro fundido y absorbía el carbono de los gases que lo atravesaban. El resultado de este proceso se llama arrabio. Posteriormente, se refinaba este material para conseguir finalmente la fabricación del acero.

Desde la década de 1960, se inventaron varios hornos que funcionan con electricidad que producen acero a través de chatarra. Este método es importante ya que mejora su impacto medioambiental al usar chatarra reciclada. Sin embargo, el uso de altos hornos para la fabricación de acero a partir de mineral de hierro sigue siendo esencial.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-44191/historia-del-acero>

El acero se trata de uno de los materiales de uso más común con una alta resistencia a carga usando la menor sección. Su característica más importante en las estructuras de acero que permiten alcanzar edificaciones de gran esbeltez de una forma relativamente sencilla. Se podría decir que una de las construcciones más representativas en acero ha sido la Torre Eiffel basándose en una estructura triangulada con una altura de 300m, prolongada con una antena alcanzando los 324m. Se realizó para la Exposición Universal de 1889 en París y fue la estructura más elevada del mundo durante 41 años siendo actualmente el monumento con entrada más visitado. A partir de esta construcción, se empezaron a edificar edificios de varios pisos con estructuras totalmente realizadas a base de acero, los famosos “esqueletos metálicos” de Estados Unidos como el rascacielos Chrysler (figura 20) o el Empire State Building (figura 21). En la actualidad, muchos arquitectos realizan sus diseños con el uso exclusivo del acero creando nuevas formas de edificio explotando al máximo las propiedades de este material.

Además de la monumentalidad que se puede conseguir con el uso del acero, este material es cotidiano y versátil, desarrollando el producto con propiedades mejoradas, acabados, formas y aleaciones nuevas.

En la tabla 2 de la página anterior se puede observar una comparativa de la evolución una evolución en altura a lo largo de los años.

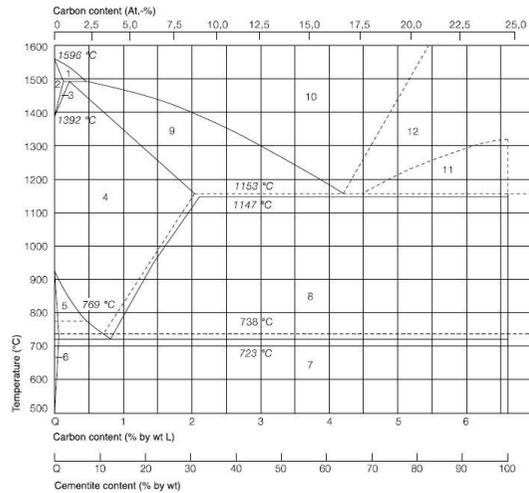


Figura 20. Edificio Chrysler



Figura 21. Edificio Empire State Building

### 3.1.2. ACERO ESTRUCTURAL.



The figures in the above diagram designate fields

1 melt + δ mixed crystals	5 γ + α mixed crystals	9 melt + γ mixed crystals
2 δ mixed crystals	6 α mixed crystals (ferrite)	10 melt
3 δ + γ mixed crystals	7 α mixed crystals + Fe <sub>3</sub> C	11 melt + Fe <sub>3</sub> C
4 γ mixed crystals (austenite)	8 γ mixed crystals + Fe <sub>3</sub> C	12 Fe <sub>3</sub> C (cementite)

Figura 22. Diagrama constitución para hierro-carbono

Acero es el nombre que se le da a las aleaciones de hierro (Fe), carbono (C) y otros elementos de aleación fundidos a partir del mineral. En función del porcentaje de carbono y la temperatura de fabricación se puede obtener distintos tipos de acero (figura 22). El porcentaje de carbono en acero para la edificación se encuentra es de 2-5%, considerado el acero dulce. Otros elementos para la aleación pueden ser fósforo (P), azufre (S), nitrógeno (N), manganeso (Mn), silicio (Si), cromo (Cr), níquel (Ni), molibdeno (Mo) y otros.

Todo tipo de acero contiene pequeñas cantidades de aditivos que, según su composición, influyen en su calidad. Por ejemplo, se podría agregar silicio, cromo o manganeso a la masa fundida para aumentar la resistencia. El contenido de carbono tiene un efecto fundamental sobre las propiedades de los distintos aceros. A medida que aumenta el contenido de carbono, aumentan la dureza y la resistencia a la tracción, pero al mismo tiempo disminuyen la tenacidad a la fractura y la ductilidad. La idoneidad para la soldadura mejora a medida que desciende el contenido de carbono.<sup>6</sup>

La medición correspondiente de la composición química y el tratamiento térmico específico permiten que las propiedades del material del acero se ajusten con precisión para adaptarse al propósito previsto. Por ejemplo, se hace una distinción entre acero estructural, acero de refuerzo, acero de pretensado, acero inoxidable (resistente a la corrosión), acero resistente a la fluencia, variando el porcentaje de carbono, tratamiento térmico y metales añadidos en la aleación. Se eligen requiriendo unas propiedades físicas, químicas y mecánicas adecuadas para el propósito.

<sup>6</sup> SCHULITZ SOBEK HABERMANN "Steel Construction Manual". 2000. Pag 80.

### 3.1.3. PROCESO DE FABRICACIÓN.

El acero se produce a través de dos tipos de procesos:

- Los altos hornos. La fabricación se obtiene a partir del mineral de hierro y carbono.
- Los hornos eléctricos. Este proceso recicla el acero ya producido.

#### Los altos hornos

El proceso de fabricación del acero de los altos hornos consiste en dos grandes pasos. El primero se basa en convertir el mineral de hierro directo de las minas en arrabio, y el segundo en quitar las impurezas del arrabio y transformarlo en acero.

El hierro no se encuentra en forma estable naturalmente sino en forma de óxidos. Los minerales extraídos de minas contienen 70% de hierro y el resto se divide en componentes de oxígeno, arena, arcilla, piedras y sílice. Para eliminar la sílice en esta producción hay que agregar piedra caliza en el proceso. A altas temperaturas, la caliza tiene gran afinidad por la sílice y otras impurezas del hierro formando así compuestos que flotan en el arrabio líquido facilitando la eliminación de la escoria.<sup>7</sup>

El mineral de hierro, la piedra caliza y el coque (derivado del carbón) se introducen en el alto horno por la parte superior. Primero se muele el mineral de hierro y la piedra caliza. Por la parte inferior del alto horno se introduce un sople de aire caliente que se incorpora por los huecos que quedan entre las partículas de la carga. Esto sirve para producir la combustión del coque y elevar la temperatura, alcanzando los 1800°C. El óxido de

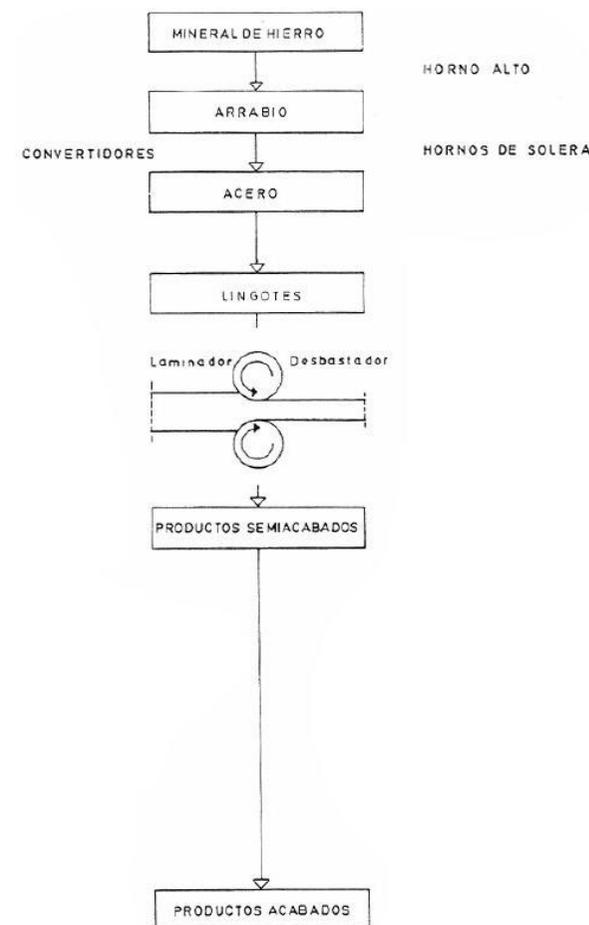


Figura 23. Proceso de fabricación del acero. Los altos hornos

<sup>7</sup> [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5193/02\\_Memorial.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5193/02_Memorial.pdf)

hierro y la caliza empiezan a gotear arrabio y escoria que se depositan en el crisol de la parte inferior del alto horno.

Para convertir el arrabio en acero se utiliza un proceso de combustión/gasificación para eliminar la escoria. Estas impurezas se queman mediante la introducción de oxígeno. El oxígeno reacciona con el carbono del arrabio y lo elimina en forma de dióxido de carbono. El chorro de oxígeno junto con el polvo de piedra caliza hace que el arrabio sea convertido en acero.

### Los hornos eléctricos

Tras el proceso de reconversión industrial de la siderurgia en España se abandonó la vía del alto horno y se apostó de forma decidida por la obtención de acero a través de horno eléctrico. En este proceso, la materia prima es la chatarra, a la que se le presta una especial atención, con el fin de obtener un elevado grado de calidad de la misma. Para ello, la chatarra es sometida a unos severos controles e inspecciones por parte del fabricante de acero, tanto en su lugar de origen como en el momento de la recepción del material en fábrica.

La calidad de la chatarra depende de tres factores:

- La chatarra reciclada que está formada por rechazos y despuntes en la propia fábrica.
- La chatarra de transformación producida durante el proceso de fabricación. Son los recortes de prensa y guillotina.
- La chatarra de recuperación. Es la chatarra que se consigue de los desguaces de edificios con estructuras de acero, plantas industriales, barcos, etc.<sup>8</sup>

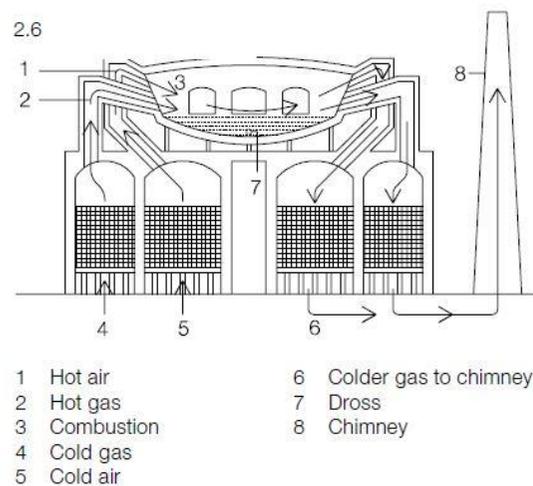


Figura 24. Ejemplo de horno eléctrico

<sup>8</sup> <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-7.pdf>

El horno que se usa en este tipo de proceso está formado por chapa gruesa y paneles refrigerados por agua. La carga de chatarra en el horno se realiza a través de una bóveda desplazable con una serie de orificios, generalmente 3, en los que se introduce unas barras gruesas de grafito para añadir electrodos al proceso. Estas barras se van consumiendo pudiéndose regular la distancia a la que se encuentran los electrodos. Estos electrodos están conectados a un transformador que les proporciona unas condiciones de voltaje e intensidad.

Este proceso de fabricación sigue los siguientes pasos:

### 1. Fase de fusión.

Una vez que el horno ya contiene la chatarra, se bajan los electrodos hasta conseguir fundir completamente los materiales. Este proceso se repite hasta completar la fusión.

### 2. Fase de afino.

Esta fase se compone de dos etapas. En el primer afino, se analiza la composición y se elimina las impurezas y elementos no deseados como son el silicio, manganeso, etc. De esta manera, se realiza un primer ajuste de los componentes químicos.

En la segunda etapa, con el acero que se ha obtenido, se vacía en una cuchara de colada en la que termina de ajustarse su composición y temperatura para proceder al siguiente paso.

### 3. La colada continua.

Una vez finalizada la fase de afino, pasa de la cuchara de colada a la colada continua. Este es un proceso siderúrgico en el cual el acero ya líquido se vierte en lingoteras o moldes. Durante el tiempo que este en la lingotera se mueve alternativamente para despegar la costra sólida que se va formando durante el enfriamiento. Posteriormente se va cortando el producto en las longitudes deseadas mediante sopletes que

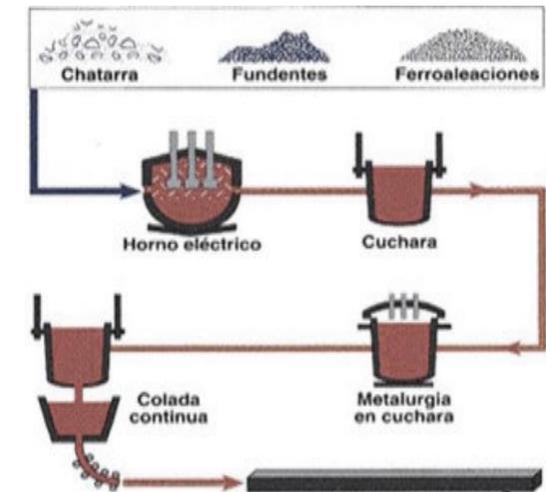


Figura 25. Fases de fabricación del acero por hornos eléctricos

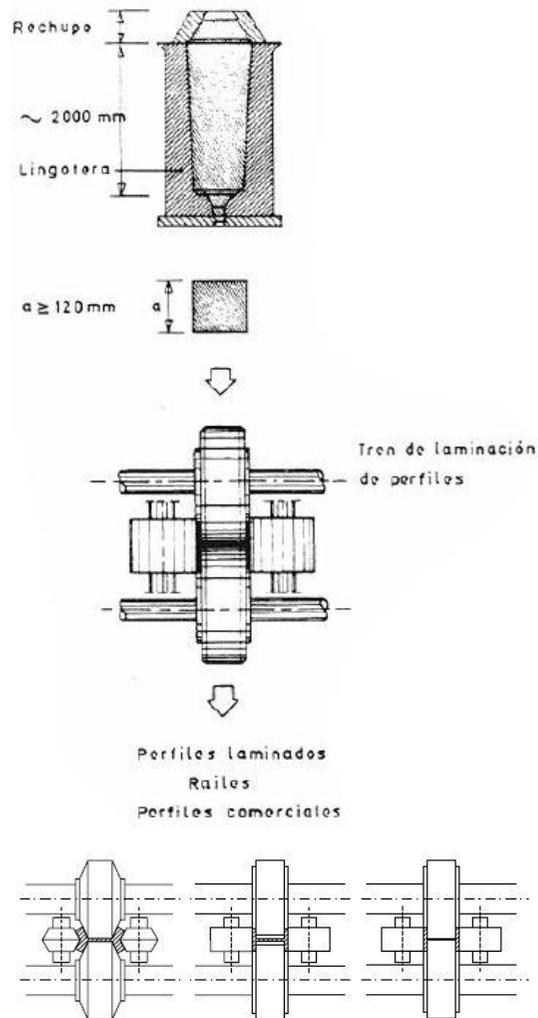


Figura 26. Proceso de laminación del acero

se desplazan durante el corte. Por último, se clasifican con el número de referencia de la colada a la que pertenece, de esta manera se vigila la sección, sanidad interna y ausencia de defectos externos.

La formación del acero habría finalizado con cualquiera de estos dos procesos de fabricación, pero se clasifica como producto semielaborado. Para que el producto este totalmente terminado se le debe aplicar una fase de acabado y conformación. Se pueden agrupar en dos según sea el proceso realizado en caliente o en frío.

En el proceso en caliente el más importante es el laminado. Para el laminado, el producto semielaborado se calienta a aprox. 1250 ° C antes de ser moldeado mediante presión aplicada directamente sobre la pieza fundida, normalmente mediante rodillos, en el rango de temperatura 800-1200 ° C. Como resultado de este trabajo en caliente, se mejoran las propiedades del material, se compacta la microestructura<sup>9</sup>.

Cuanto mayor sea la deformación prevista del producto en bruto, mayor será el número de cajas de laminación (figura 26) necesarias. Si se requieren más de cinco cajas de laminación sucesivas, hablamos de un tren de laminación.

Con este proceso se distinguen los productos de acero laminado en función de la forma, las dimensiones, el método de producción y la calidad de la superficie como por ejemplo los redondos para el refuerzo del hormigón, rieles, perfiles estructurales, etc.

<sup>9</sup> SCHULITZ SOBEK HABERMANN "Steel Construction Manual". 2000. Pag 85.

### 3.1.4. PROPIEDADES DEL ACERO.

Gracias al desarrollo técnico de la elaboración del acero desde sus inicios hasta nuestros días, las propiedades mecánicas difieren dependiendo de la técnica empleada en su fabricación, consiguiendo un mejor acero cuanto más alto sea su valor en carbono. A su vez, los avances tecnológicos han permitido la realización de estudios más rigurosos con los cuales se ha podido conocer más detalladamente las características propias de dicho material.

Características tales como su resistencia, tenacidad, plasticidad, resistencia a la corrosión y su capacidad para unión mediante soldadura, de las cuales se han obtenido valores mensurables gracias a los desarrollos anteriormente citados, hacen que este material haya sido empleado en construcciones de grandes estructuras.

Como se observa en las tablas posteriormente añadidas, su alta densidad, que otorga una gran resistencia, y su capacidad elástica, hacen que este material sea estructuralmente estable frente a grandes esfuerzos antes de alcanzar el punto de fatiga.

Es debido a estas propiedades que el acero tiene una gran resistencia frente a esfuerzos de tracción, flexión, cizalladura y torsión, facilitando el empleo de dicho material en edificaciones en altura.

E Modulus of elasticity  $E = \frac{\delta}{\epsilon}$   
 I:  $\sigma_p$  Limit of proportionality  $\delta$  Stress at failure  
 II:  $\sigma_e$  Elastic limit  $F_0$  Original cross-sectional area of test specimen  
 III:  $\sigma_{Fu}$  Upper yield point  $l_0$  Original length of test specimen  
 IIIa:  $\sigma_{Fu}$  Ultimate yield strength  
 IV:  $\sigma_{Fv}$  Lower yield point  $\Delta l$  Elongation  
 V: Failure

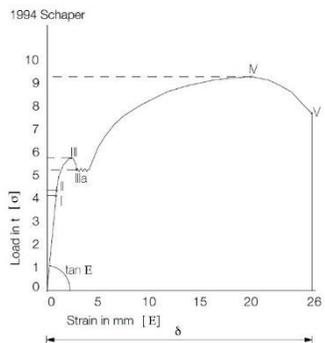
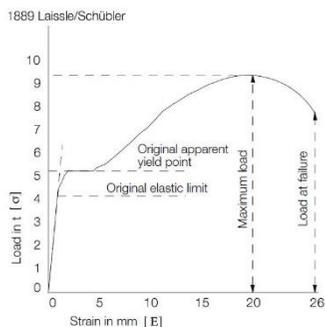
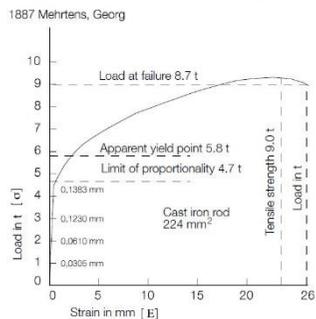


Tabla 3. Propiedades del acero

CLASE	DENSIDAD	MÓDULO DE ELASTICIDAD E	ALARGAMIENTO	CLASE DE LAS PIEZAS	CLASE DE REFUERZOS	FATIGA		
						MÍNIMO	MÁXIMO	
ACERO DULCE DE CONSTRUCCIÓN	7.85	2100000	22	PERFILES LAMINADO EN ELEMENTOS SIMPLES Y COMPUESTOS	TRACCIÓN FLEXIÓN	1100	1300	
					COMPRESIÓN	1100	1300	
					CORTANTE	800	1000	
				TORNILLOS Y ROBLONES	APLASTAMIENTO	1600	2000	
					CORTANTE	800	1000	
TIRANTES ROSCADOS	TRACCIÓN	800	1000					
FUNDICIÓN	7.25	1000000	-	EN GENERAL	COMPRESIÓN	-	900	
				COLUMNAS	FLEXIÓN	COMPRESIÓN	-	900
					TRACCIÓN	.	900	
				EN GENERAL	FLEXIÓN	COMPRESIÓN	.	600
					TRACCIÓN	-	300	

CLASIFICACIÓN	LÍMITE ELÁSTICO MÍNIMO N/mm <sup>2</sup>		RESISTENCIA A TRACCIÓN N/mm <sup>2</sup>	MÓDULO DE ELASTICIDAD N/mm <sup>2</sup>		DENSIDAD kg/m <sup>3</sup>
	ESPESOR NOMINAL t (mm)			E	G	
	t ≤ 40	40 < t ≤ 80				
S235	235	215	450	210 000	76 800	7825
S275	275	255	650	210 000	76 900	7850
S355	355	335	800	210 000	78 900	7850
S460	460	430	600	210 000	76 900	7850

Figura 27. Evolución de los diagramas tensión-deformación de hierro y acero

### 3.1.5. PRINCIPALES VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL ACERO EN ESTRUCTURAS.

VENTAJAS	
<i>ALTA RESISTENCIA</i>	La relación de resistencia del acero por unidad de peso es alta. $275\text{MPa}/7850\text{kg} = 0,035 \text{ MPa/kg}$
<i>UNIFORMIDAD</i>	Las propiedades del acero no varían con el paso del tiempo
<i>DURABILIDAD</i>	Sufren un proceso natural de oxidación, pero con un mantenimiento las estructuras de acero pueden durar casi indefinida
<i>DUCTILIDAD</i>	Soporta grandes deformaciones, presentando una gran fluencia antes de la rotura
<i>RAPIDEZ DE MONTAJE</i>	Gran facilidad de construir las estructuras por medio de conectores
<i>DIVERSIDAD DE FORMA</i>	Capacidad de laminación con variedad de tamaños y formas
INCONVENIENTES	
<i>CORROSIÓN</i>	Alto coste de mantenimiento al ponerse en contacto del agua y aire
<i>PANDEO</i>	La esbeltez de las piezas y la alta concentración de tensiones limitan su óptimo aprovechamiento por problemas de pandeo
<i>VULNERABILIDAD AL FUEGO</i>	Sus propiedades de resistencia, y su módulo de elasticidad, reducen en caso de incendio

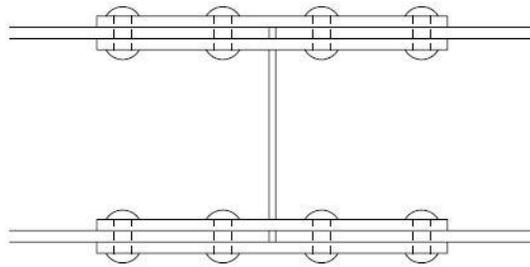


Figura 28. Unión roblonada

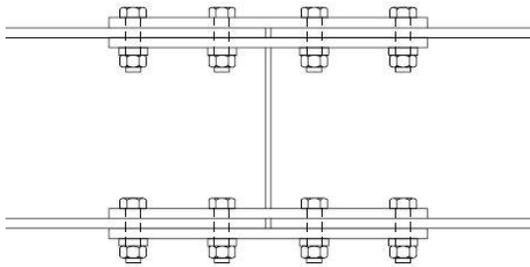


Figura 29. Unión atornillada

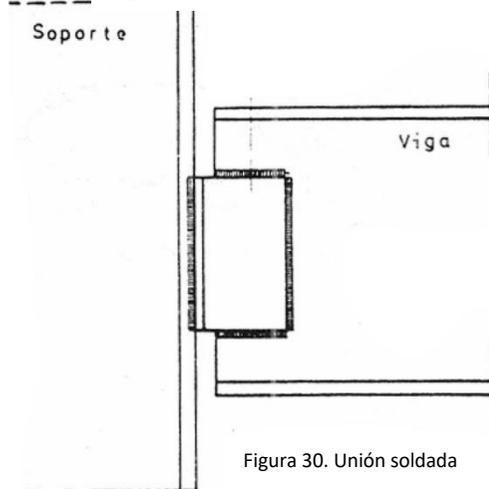


Figura 30. Unión soldada

## 3.2. ACERO UNIONES.

### 3.2.1. UNIONES DE ESTRUCTURAS DE ACERO DEL SIGLO XIX.

En las estructuras metálicas es necesario enlazar entre sí perfiles simples para formar barras compuestas y fijar barras. Las uniones tienen como labor transmitir las cargas de un perfil a otro. Cualquier unión es siempre un encuentro delicado en una estructura y por ello es necesario calcularlas todas mientras se diseña el proyecto y ejecutarlas en obra con unas mínimas condiciones de control.

Debido a que las uniones son puntos críticos de la estructura, el número debe ser el menor posible y realizado con la mayor garantía. La garantía de calidad es mayor al realizarlas en taller que frente a las uniones en obra. El peligro de defecto es mayor para las uniones de obra, por lo que es recomendable fabricar todas las partes de la unión en taller, realizando en obra el montaje más básico de la unión.

Para calcular los elementos de unión se determinarán las solicitaciones que sobre ellos actúan y se acomodarán a las mismas hipótesis consideradas en el cálculo del conjunto de la estructura o de sus elementos, aplicando adicionalmente un coeficiente de seguridad. En uniones de montaje, que deban realizarse en condiciones difíciles, deberá aumentarse prudencialmente el coeficiente de seguridad, para así prever posibles defectos en su ejecución.

El método de unión de las estructuras de acero ha experimentado muchos avances desde que se empezó a usar el acero laminado en 1856 hasta la actualidad. El primer método de unión fue a través de roblones, elemento que trabaja únicamente a cortante. En la actualidad esta técnica está en desuso en construcciones de estructuras. Tras los roblones se desarrollaron las uniones mediante tornillos, con la finalidad de obtener uniones desmontables. En 1910 se descubre la nueva técnica de enlace, la soldadura. Esta técnica de unión va sustituyendo poco a poco al remachado hasta hacerlo desaparecer por completo.

**TIPOS DE UNIONES.**

- **ROBLONADO.**

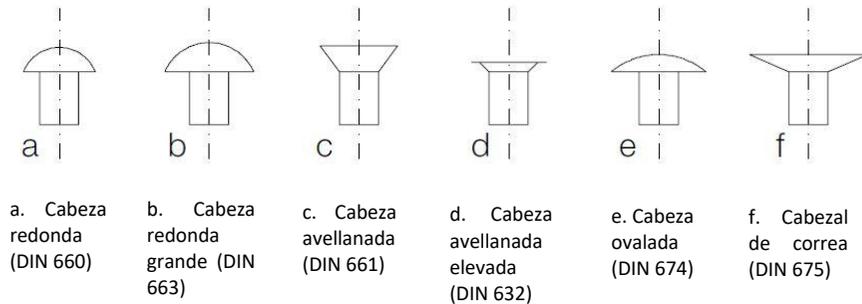


Figura 31. Tipos de roblones según la forma de la cabeza



El roblonado consiste en una clavija metálica que debe pasarse a través de las piezas a enlazar, previamente perforadas. Una vez introducido se remacha por el extremo opuesto para formar la segunda cabeza que efectúe el cierre de la unión. Cuando se realiza este cierre, la clavija se transforma en roblón.

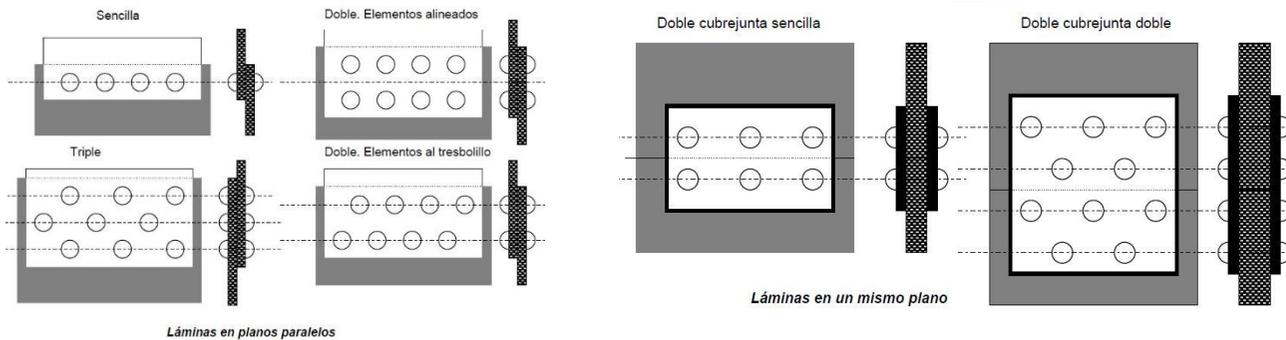


Figura 32. Diferentes posiciones de los roblones en las uniones

Tabla 5. Relación espesor chapa con el diámetro del agujero

ESPEJOR DE LA CHAPA mm	4-5	6-7	8-10	11-13	14-18	Mayor de 18
DIAMETRO DEL AGUJERO mm	14	17	20	23	26	29

Los roblones que se utilizan normalmente en construcción son de cabeza semiesférica, aunque también hay de cabeza plana y cabeza bombeada (figura 31).

Las perforaciones para los roblones deben ser de 1mm mayor que el diámetro nominal de la clavija, ya que al ser remachados deben llenar perfectamente la holgura anterior.

El taladro, se hace por medio de punzonadora. También se emplean las máquinas taladradoras para dejar los orificios limpios de rebordes, empleándose para esta operación la fresadora.

En el proceso de roblonado, primero se calientan los roblonos para alcanzar la temperatura correspondiente de 1000°C llamado color rojo cereza. Se introduce el remache en el agujero y se mantiene la cabeza de asiento sujeta mientras que con la roblonadora presiona el remache primero rellenando todo el agujero y después forjando la cabeza de cierre. Este proceso debe realizarse de manera muy rápida ya que al finalizar la temperatura debe ser color rojo sombra, e irse enfriando poco a poco hasta adquirir la temperatura ambiente.

Tabla 6. Principales propiedades mecánicas y secciones más comunes de roblón

AGUJERO		FATIGA ADMITIDA		RESISTENCIA DE UN ROBLÓN			SE CALCULARÁ EL ROBLON AL APLASTAMIENTO CUANDO EL ESPESOR SEA	
∅	SECCIÓN cm <sup>2</sup>	CORTANTE	APLASTAMIENTO	SIMPLE CORTANTE	DOBLE CORTANTE	APLASTAMIENTO e=1cm	SIMPLE	DOBLE
11	0.95	800	1600	0.76	1.52	1.76	4.32	8.64
		1000	2000	0.95	1.9	2.2		
14	1.54	800	1600	1.232	2.464	2.24	5.5	11
		1000	2000	1.54	3.08	2.8		
17	2.27	800	1600	1.816	3.632	2.72	6.68	13.4
		1000	2000	2.27	4.54	3.4		
20	3.14	800	1600	2.512	5.024	3.2	7.85	15.7
		1000	2000	3.14	6.28	4		
23	4.15	800	1600	3.72	7.44	3.68	9.03	18.01
		1000	2000	4.15	8.3	4.6		
26	5.31	800	1600	4.248	8.495	4.16	10.2	20.4
		1000	2000	5.31	10.620	5.2		

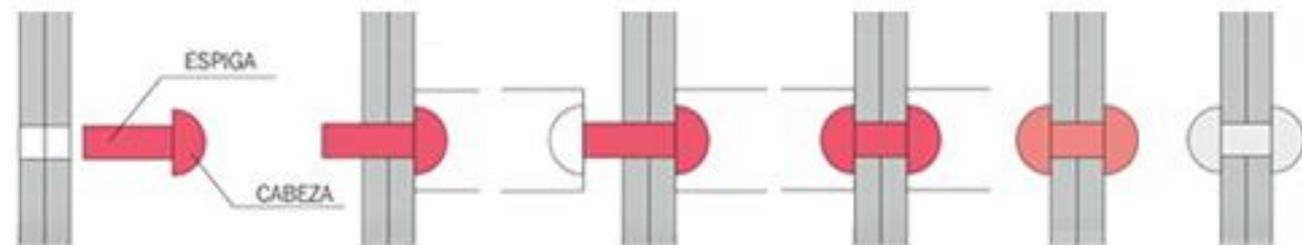


Figura 33. Proceso de roblonado

- **ATORNILLADO.**

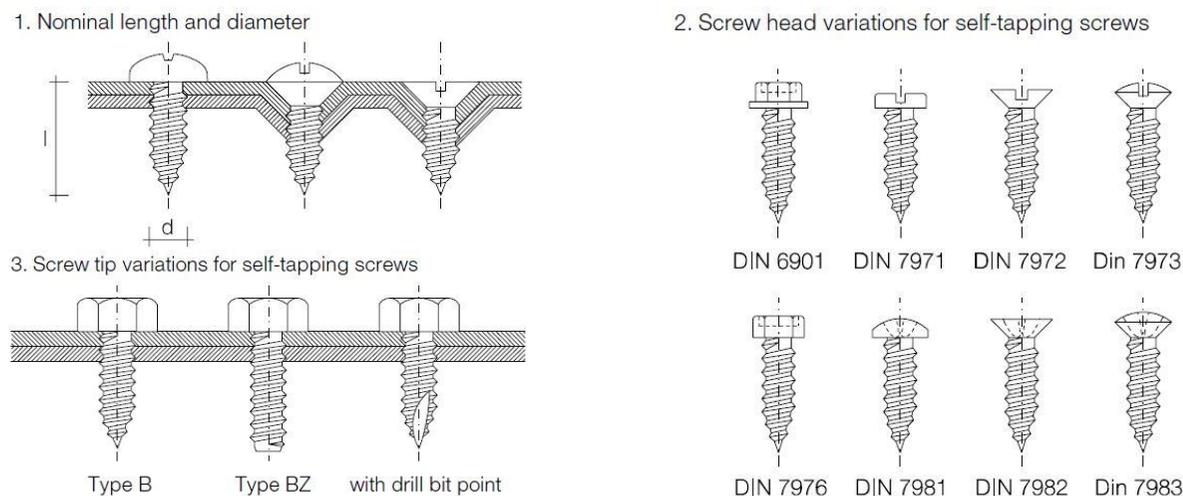


Figura 34. Tipo de tornillos

Tabla 7. Principales propiedades mecánicas y diámetros más comunes de los tornillos

AGUJERO $\phi$		14	17	20	23	26	29
TORNILLOS	$\phi$ ESPIGA mm	12.7	15.9	19.1	22.2	25.4	28.6
	SECCIÓN ESPIGA cm <sup>2</sup>	1.27	1.98	2.85	3.88	5.07	6.41
FATIGA kg/cm <sup>2</sup>	CORTANTE	800	800	800	800	800	800
	APLASTAMIENTO	1600	1600	1600	1600	1600	1600
RESISTENCIA DE UN TORNILLO	SIMPLE CORTANTE	1.016	1.584	2.28	3.104	4.056	5.128
	DOBLE CORTANTE	2.032	3.168	4.560	6.208	8.112	10.256
	APLASTAMIENTO e=1cm	2.03	2.54	3.06	3.55	4.06	4.58
SE CALCULARÁ EL TORNILLO AL APLASTAMIENTO CUANDO EL ESPESOR SEA	SIMPLE	6.27	7.78	9.33	10.9	12.5	14
	DOBLE	12.5	15.6	18.7	21.8	25	28

El método de tornillo se usa para formar uniones desmontables de forma que la velocidad de ejecución de estas uniones es mayor. La forma de trabajar de los tornillos es similar a la de los roblones teniendo un esfuerzo cortante, pero además pudiendo trabajar a tracción. Se realiza esta unión cuando los elementos a unir adquieren grandes dimensiones para su transporte a obra, o por la dificultad de las uniones para ser realizadas mediante el roblonado o la soldadura. También cuando el espesor de la junta a unir es mayor que 4d, siendo d el diámetro del roblón.

Es obligatorio el uso de arandelas en este tipo de unión. De esta manera se evita que la cabeza penetre en el agujero y produzcan tensiones adicionales a las previstas en el cálculo por aplastamiento.

Actualmente, casi todas las estructuras metálicas, unen sus diversos elementos por medio de las soldaduras, que respecto de las uniones roblonadas y atornilladas tienen evidentes ventajas: mayor garantía de seguridad y solidez, economía en mano de obra y material, y menor volumen de las piezas. Además, otorgan a la unión una continuidad material casi idéntica a la de zonas sin unión.

Con este sistema, las antiguas piezas de fundición que antes quedaban inútiles al romperse, ahora aumentan la duración de su empleo al poder unirse mediante la soldadura.

La soldadura consiste en la unión mediante el calor de dos elementos metálicos para que formen una sola pieza, con suficiente resistencia y que no presente solución de continuidad.

- SOLDADURA.

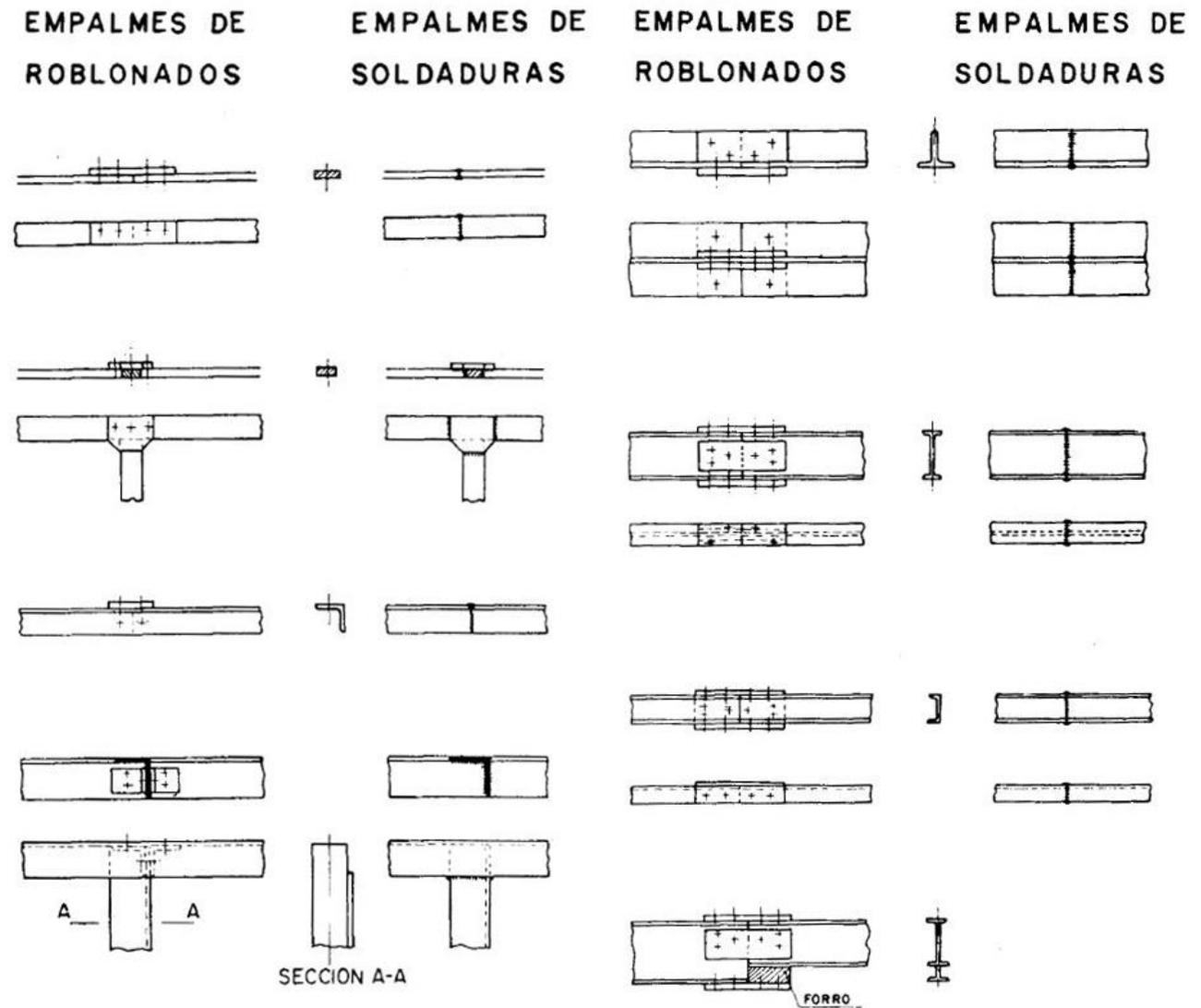


Figura 35. Diferentes uniones de roblones y soldadura

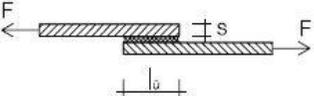
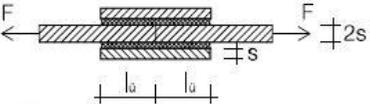
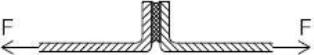
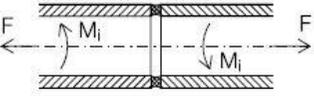
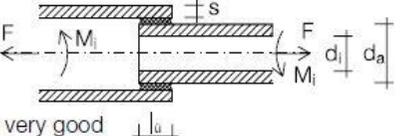
Arrangement	Remarks
	tension (butt joint)
poor	
	combined shear and tension (single overlap)
better	
	combined shear and tension (double overlap)
very good	
	combined peeling and tension
very poor	
	reinforced joint
good	
	butt joint, hollow sections
very poor	
	spigot-type joint
very good	

Figura 36. Uniones soldadas eficaces y menos eficaces

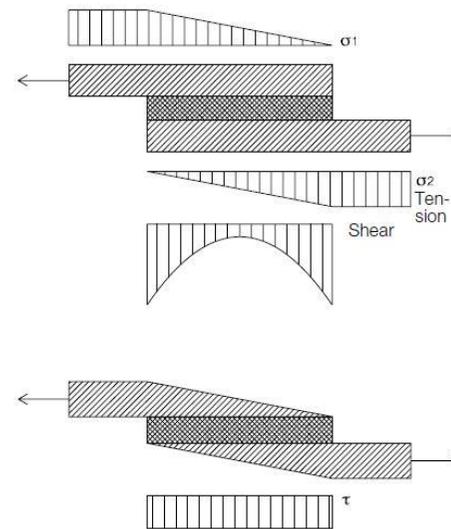


Figura 37. Distribución de esfuerzos en uniones soldadas

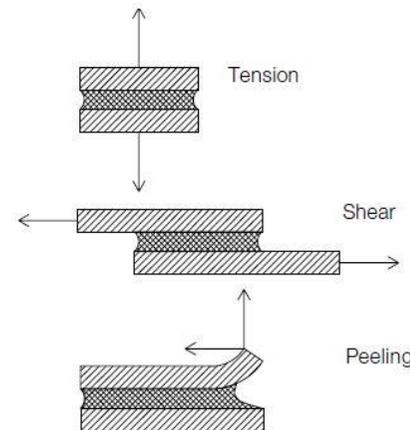


Figura 38. Cargas aplicadas a las uniones soldadas

- F = tensión
- $M_i$  = momento flector
- s = espesor de la placa
- $l_o$  = superposición
- $d_i$  = diámetro interior
- $d_a$  = diámetro exterior

Hoy en día, la soldadura se realiza de diversas maneras; aprovechando el calor generado por la combustión de un gas o por el paso de una corriente eléctrica aprovechando el efecto Joule. Estos son los procedimientos empleados industrialmente, aunque incluyen diversas variantes que en nada afectan su naturaleza esencial. Mediante el empleo de estos dos sistemas básicos se pueden soldar toda clase de metales y aleaciones, con muy pocas excepciones.

La zona del metal de base sufre solo variaciones de temperatura entre las cuales la mayoría de los metales o aleaciones no presentan cambios físico-químicos o estructurales.

La soldadura permite esfuerzos a cortante, tracción y compresión, llegándose a asumir una continuidad material en soldaduras de alta calidad (figura 37 y 38)

### **3.2.2. EDIFICACIÓN EN ACERO. LA ESCUELA DE CHICAGO.**

Se propone una breve presentación de varios ejemplos seleccionados en los que destaca el empleo del acero con el fin de observar las técnicas constructivas y tipo de uso del material en cuestión en cada uno de ellos.

Debido a la necesidad de realizar una comparativa final en estructuras en altura entre el acero y los paneles CLT, los cuales se encuentran relativamente en sus inicios, se eligen como ejemplo varias edificaciones de la escuela de Chicago, ya que la necesidad de construir en altura tras el gran incendio que arrasó gran parte de la urbe, cumplen con los requisitos necesarios y obligatorios que no poseen edificaciones posteriores en las que se ha empleado este mismo material.

Como ejemplo más representativo se realizará un análisis más detallado del edificio de almacenes Carson, Pirie & Scott debido a la gran cantidad de documentación disponible, la cual ha permitido garantizar el empleo de roblones como sistema de unión en dicha edificación para su posterior estudio.

## HOME INSURANCE BUILDING.



Figura 39. Fachada Home Insurance Building

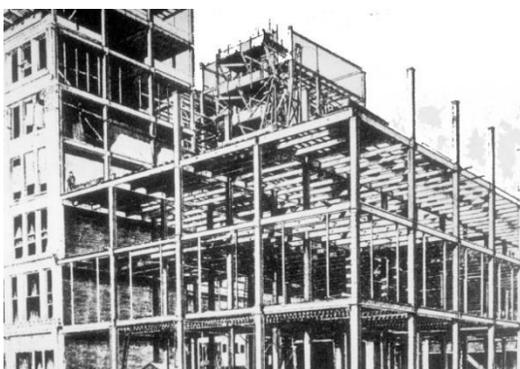


Figura 40. Construcción Home Insurance Building

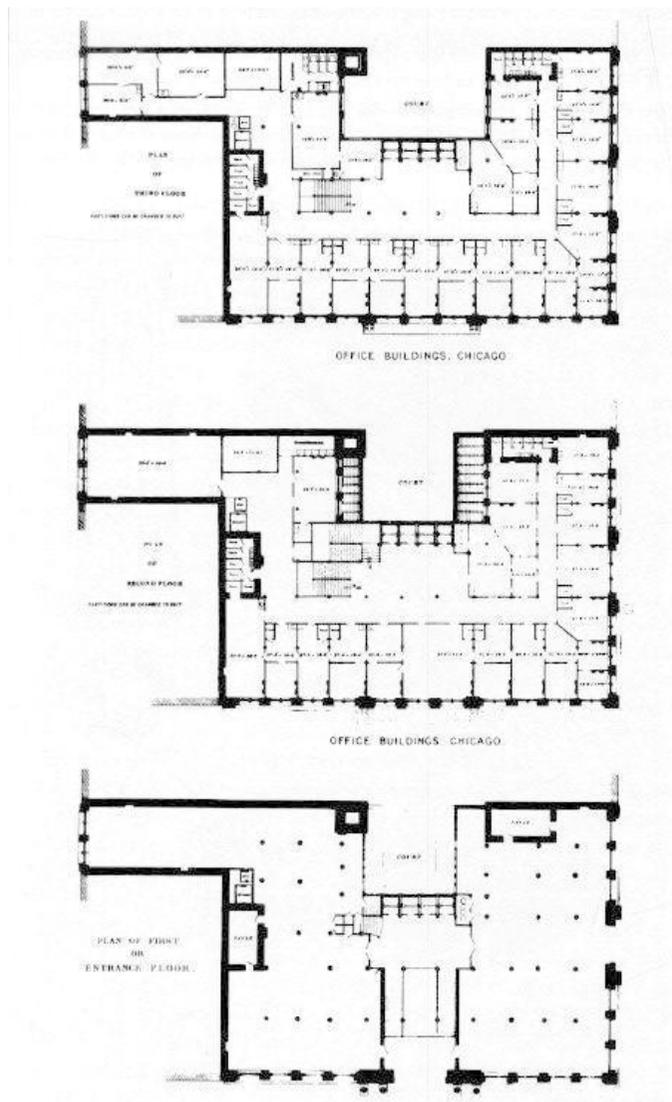


Figura 41. Plantas Home Insurance Building

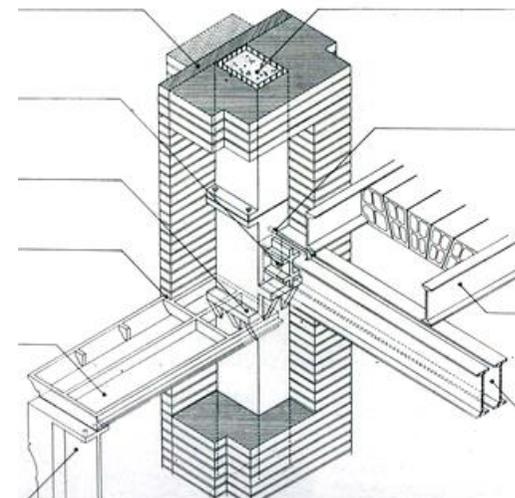


Figura 42. Detalle Home Insurance Building

**Arquitecto:** William Le Baron Jenney.

**Año:** 1885.

**Altura:** 42m.

**Pisos:** 10.

**Ubicación:** Chicago, Illinois, EEUU.

**Estructura:** Acero con cimientos de mampostería.

Demolido: 1931.

Considerado el 1<sup>er</sup> edificio en altura.

Decoración de piedra en planta baja, arquerías decorativas en el cuerpo superior y falsos capiteles.

**THE ROOKERY BUILDING.**

**Arquitecto:** Daniel Hudson Burnham & John Wellborn Root.

**Año:** 1886 – 1888.

**Altura:** 55m.

**Pisos:** 12.

**Ubicación:** Chicago, Illinois, EEUU.

**Estructura:** Acero y muros de carga de albañilería.

Remodelación en 1905 por Frank Lloyd Wright.

Planta inferior para el área comercial y planta superiores oficinas. El patio central organiza todo el edificio.

Contraste exterior-interior: exterior sensación de pesadez e interior ligereza.



Figura 43. Fachada The Rookery Building

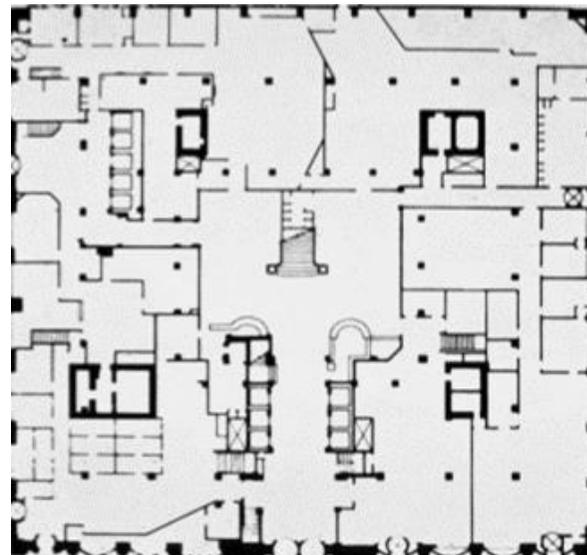


Figura 44. Planta The Rookery Building



Figura 45. Alzado, sección The Rookery Building

## AUDITORIUM BUILDING.

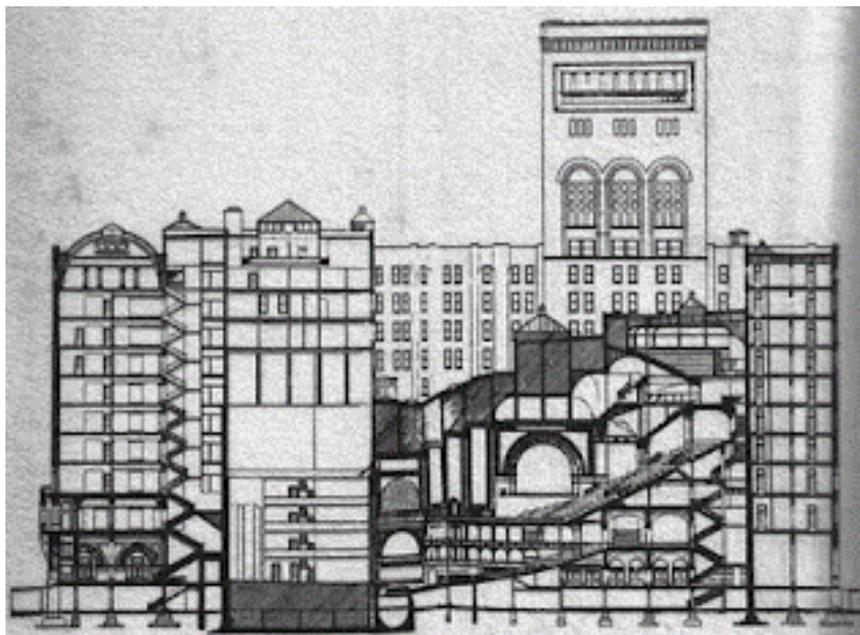


Figura 46. Sección Auditorium Building



Figura 47. Fachada Auditorium Building

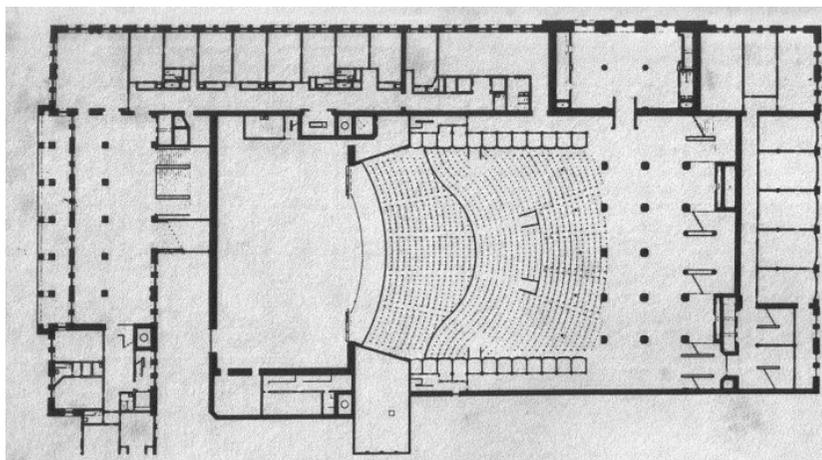


Figura 48. Planta Auditorium Building

**Arquitecto:** Danmark Adler & Louis Sullivan.

**Año:** 1887 – 1889.

**Altura:** 73m.

**Pisos:** 10.

**Ubicación:** Chicago, Illinois, EEUU.

**Estructura:** Acero y muros de carga de piedra.

Actualmente continua con el mismo uso.

**MONADNOCK BUILDING.**

**Arquitecto:** Daniel Hudson Burnham & John Wellborn Root.

**Año:** 1889 - 1891.

**Altura:** 60m.

**Pisos:** 17.

**Ubicación:** Chicago, Illinois, EEUU.

**Estructura:** Columnas de hierro en forma de Z, vigas de acero y muros de carga de mampostería de 1,8m en la parte inferior y de 46cm en la parte superior.

Edificio utilitario, da más importancia a la funcionalidad que a la decoración.

La fachada contiene 5 hileras de Bow-windows alternadas con ventanas planas.

Se organiza con una zona central de comunicaciones y servicios.

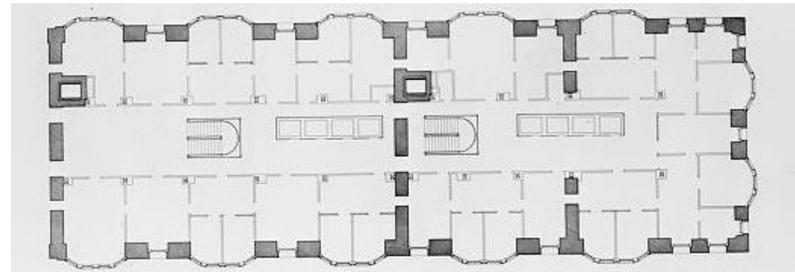


Figura 49. Planta Monadnock Building

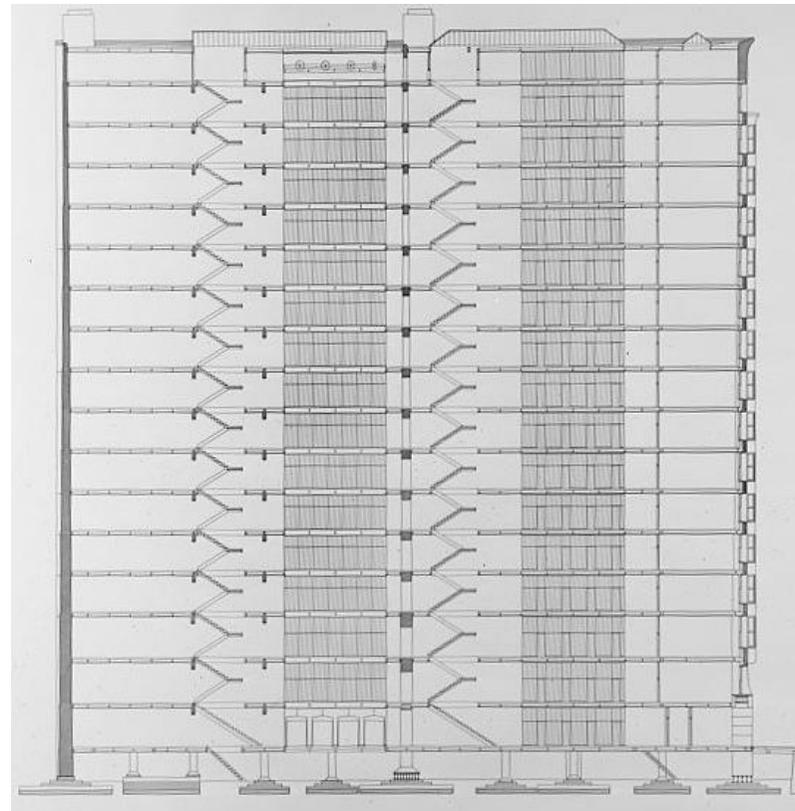


Figura 51. Sección Monadnock Building



Figura 50. Fachada Monadnock Building

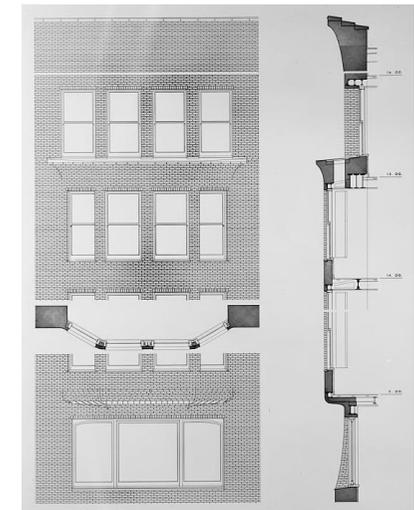


Figura 52. Detalle Monadnock Building

## RELIANCE BUILDING.

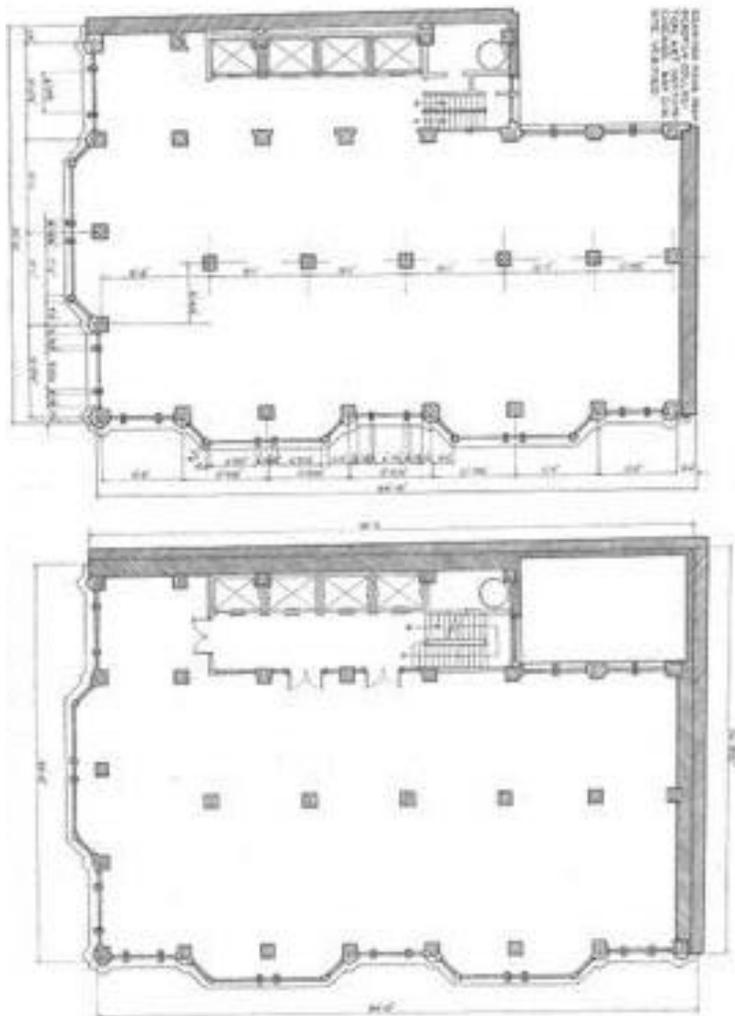


Figura 53. Planta Reliance Building



Figura 54. Fachada Reliance Building

**Arquitecto:** Daniel Hudson Burnham & John Wellborn Root.

**Año:** 1890 - 1895.

**Altura:** 62m.

**Pisos:** 32.

**Ubicación:** Chicago, Illinois, EEUU.

**Estructura:** Acero recubiertos de materiales ignífugos. Cimientos de hormigón hundidos 38m bajo el nivel de calle.

1<sup>er</sup> edificio en incorporar el vidrio como material principal en las fachadas.

Considerada una obra "Proto-Modernista".

En 1976 se declaró Lugar Histórico de los EE.UU.

Actualmente es el Hotel Burnham.

**MANHATTAN BUILDING.**

**Arquitecto:** William Le Baron Jenney.

**Año:** 1889 - 1891.

**Altura:** 52m.

**Pisos:** 16.

**Ubicación:** Chicago, Illinois, EEUU.

**Estructura:** hierro fundido para las columnas y hierro forjado para las vigas. Construido sobre una plataforma de hormigón.

1<sup>er</sup> edificio que uso el retranqueo de planta en altura.

La fachada tiene gran variedad de huecos y ventanas marcando un ritmo fluido y dinámico.

Diferentes anchos de pilastras para cubrir las columnas de hierro fundido, creando el ritmo AABABBABAA, siendo A la pilastra ancha y B la estrecha.



Figura 55. Fachada Manhattan Building



Figura 56. Fachada Manhattan Building

### 3.2.3. EJEMPLO UNIÓN ACERO. ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT – SULLIVAN CENTER.



Figura 57. Fachada ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT

**Arquitecto:** Louis Sullivan.

**Año:** 1899 - 1903.

**Altura:** 63.12m.

**Pisos:** 12.

**Ubicación:** Chicago, Illinois, EEUU.

**Estructura:** marco de acero formando un esqueleto resistente, ligero e ignífugo.

Equilibrio entre sobriedad estructural y ornamentación. La parte inferior está decorada con hierro de gran delicadeza mientras que la parte superior sigue un ritmo de grandes ventanas sin ornamentación.

El edificio de “Almacenes Carson, Pirie, Scott” son una de las estructuras clásicas de la escuela de Chicago. El edificio tiene una planta levemente rectangular y da a dos calles (figura 58). La fachada de cada calle es de diferente altura, siendo una de nueve y a otra de doce alturas. La intersección de estas dos fachadas (figura 57) se realiza a través de una esquina redondeada con columnas que contrasta con el predominio de la línea recta en los laterales.

La solución que empleó Sullivan ya se había utilizado en otros proyectos de la época para grandes rascacielos de oficinas. Se basa en un marco estructural totalmente de acero consiguiendo así plantas diáfanas, amplias sin más distorsiones que los pilares de soporte.

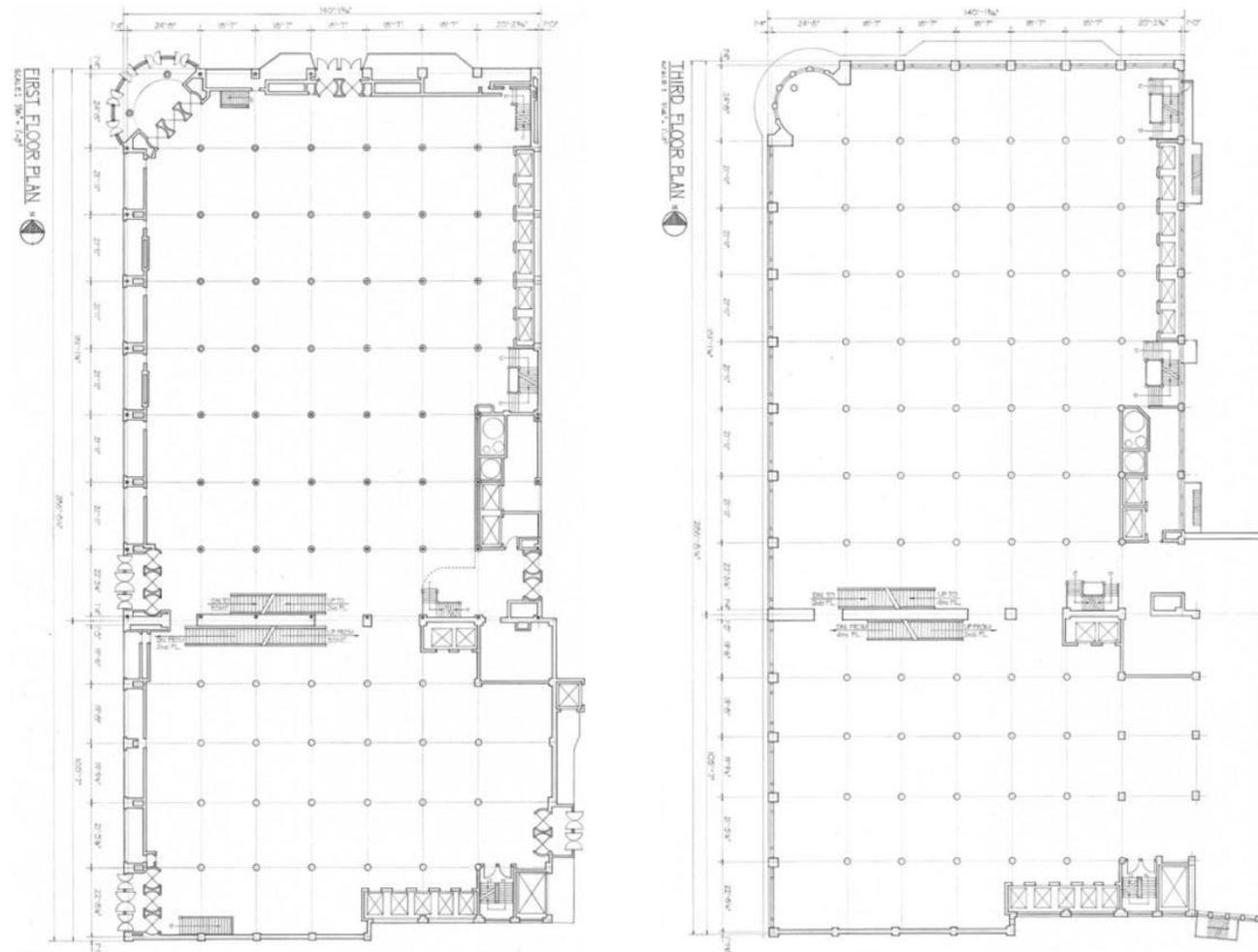


Figura 58. Plantas ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT



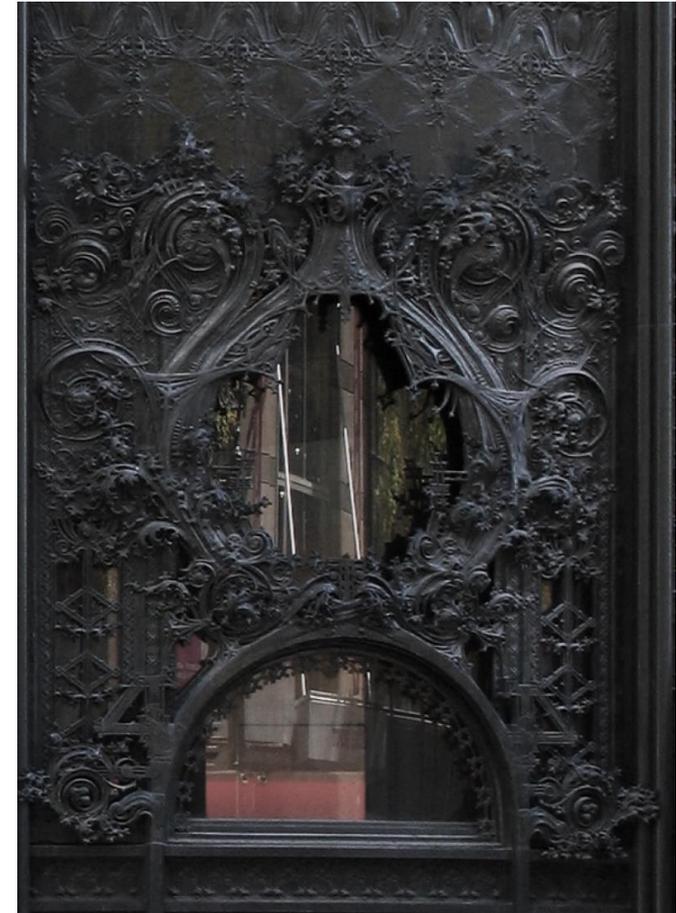
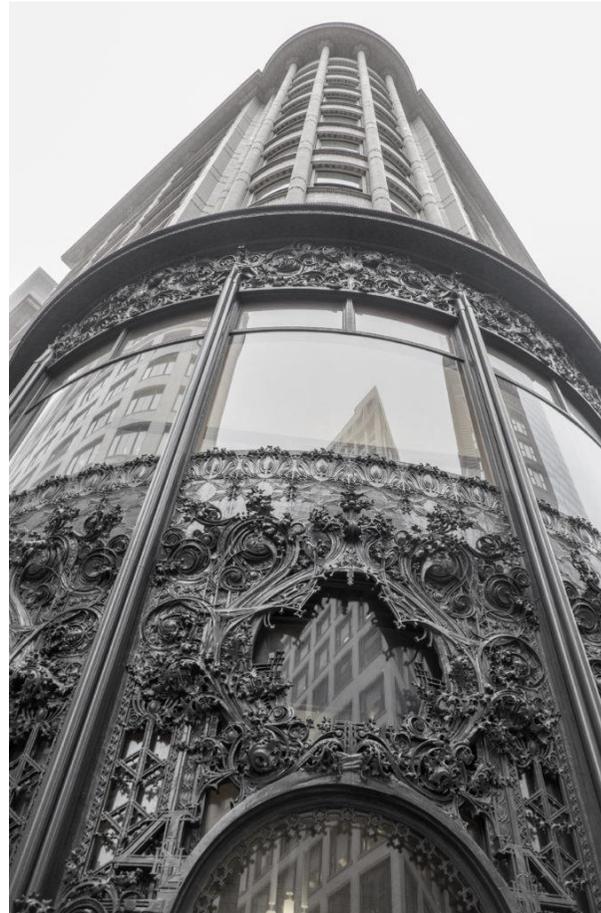
Figura 59. Alzado ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT



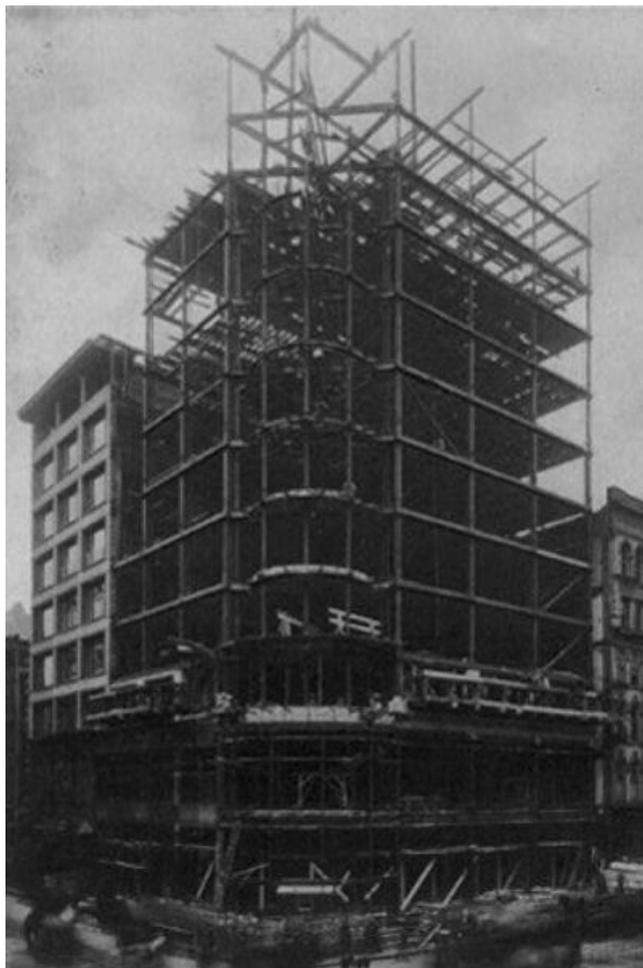
Figura 60. Fachada ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT

Una de las características que convirtió la composición de este edificio en una gran novedad fue sus grandes ventanales que permitían la entrada de luz natural abundante a los interiores. En este edificio fue donde se utilizaron por primera vez las conocidas “ventanas de Chicago”. Estas ventanas son los elementos básicos que conforman la fachada de los almacenes Carson, Pirie, Scott. Estas ventanas son de forma alargadas en horizontal, homogéneas y coinciden con el esqueleto estructural del edificio. Al mismo tiempo, las ventanas se conectan unas con otras con unas delgadas líneas de terracota que sirven para acentuar la horizontalidad del edificio. A pesar de su firme horizontalidad, Sullivan logró con este edificio algo difícil de conseguir, un equilibrio entre lo horizontal y lo vertical. La torre redondeada de la esquina actúa como bisagra gigante de las dos fachadas horizontales a la vez que produce un marcado efecto de verticalidad (figura 60)

En la parte inferior del edificio presenta un diseño de trabajos ornamentales de hierro fundido chapado en bronce (figura 61). Se trata de un adorno orgánico incluido por Sullivan y cuya inspiración vino de las plantas nativas de la pradera del medio oeste (figura 62). Este ornamento no era sólo una belleza aplicada, sino que se introdujeron ideas filosóficas por parte del arquitecto, como la fuerza del universo, la naturaleza y el hombre. La intención de este diseño era que resultara atractiva y elegante y atrajera a los posibles clientes, creando una importante competencia con las tiendas de la zona. Esta parte de la fachada fue restaurada en 1978 reemplazando los hierros oxidados y pintando el hierro fundido en color verde opaco.



Figuras 61 v 62. Detalle de la fachada ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT



Figuras 63 y 64. Construcción ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT

La estructura de este edificio se forma de una retícula de perfiles de acero modulados cada 6,68 m de separación (aprox. 22 pies) entre vigas unidas entre ellas por medio de roblones. Este método de construir era el que se usaba en las estructuras de los edificios de la escuela de Chicago ideado por el ingeniero William Le Baron Jenney para las primeras edificaciones en acero. Se creaba un esqueleto metálico a prueba de fuego con los perfiles tipo de esa época y liberando la fachada de la estructura (figura 63) pasando a tener solamente función de envolvente (figura 64), consiguiendo con esto una planta diáfana y libre como se puede ver en la figura 58, para conseguir diferentes funciones en los edificios.

Un detalle tipo de estas uniones se muestra en la figura 65 de la siguiente página.

LEYENDA

1. Cargadero.
2. Carpintería de aluminio.
3. Enlucido.
4. Viguetas perfil americano S con alas inclinadas.
5. Pilar perfil americano W con alas paralelas.
6. Muro de cerramiento de ladrillos aparejo americano.
7. Acabado de tablas de madera.
8. Capa de compresión de hormigón.
9. Bovedilla cerámica.
10. Anclaje perfil angular con uniones por medio de roblones
11. Viga perfil americano S con alas inclinadas.

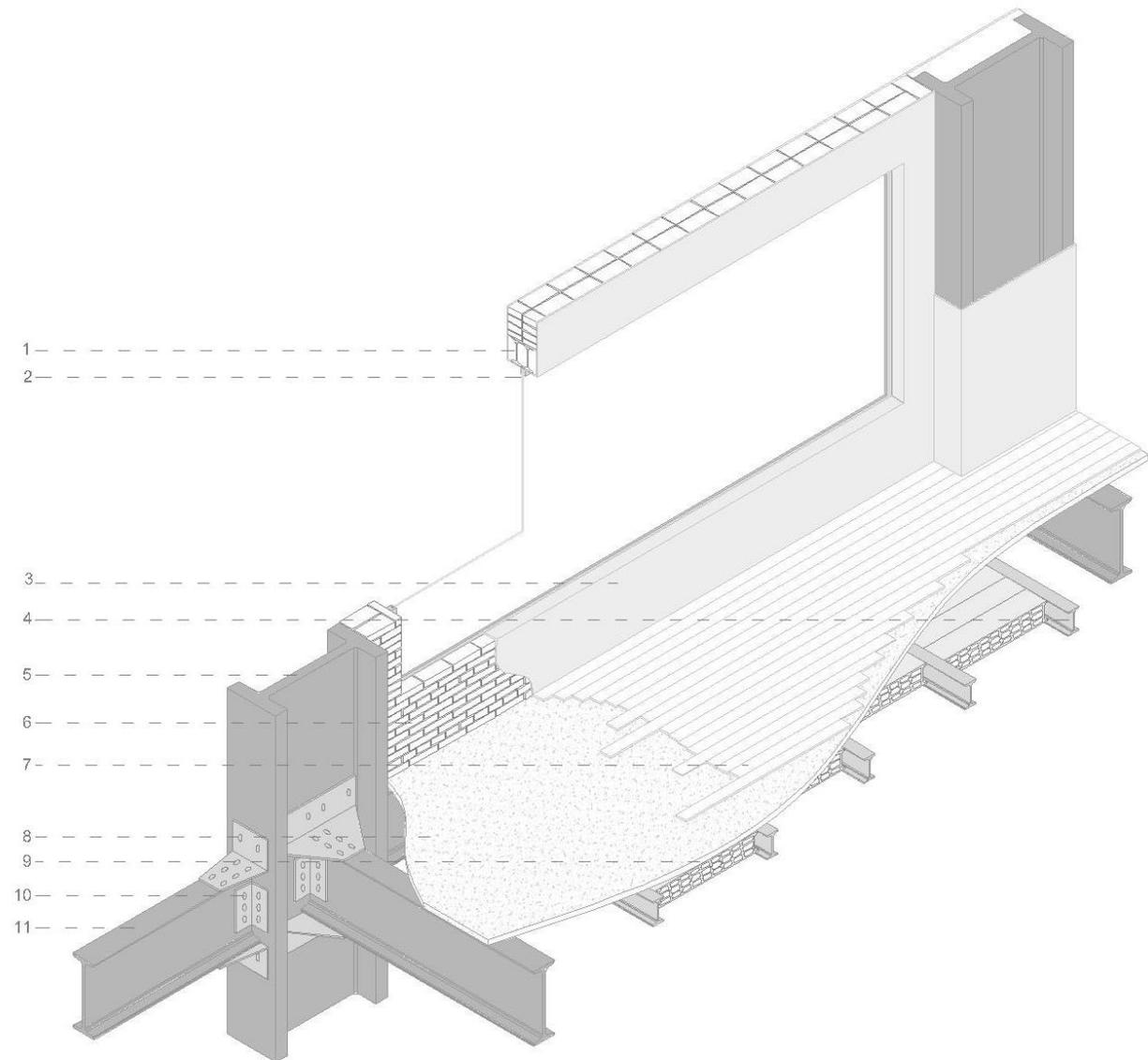


Figura 65. Detalle constructivo tipo de las uniones roblonadas del edificio "Almacenes Carson, pirie, Scott

En la escuela de Chicago, las uniones de los perfiles metálicos se realizaban con el método de roblones. La función principal del roblón es unir las piezas cumpliendo dos necesidades, la de resistencia que era transmitir los esfuerzos y la de acoplamiento que enlaza las piezas proporcionando un cierre hermético de protección. Este medio de conexión trabaja principalmente a cortante y a aplastamiento (compresión contra las superficies donde se encuentran los agujeros). Pese a no soportar ciertos esfuerzos a tracción, su entidad es mínima y no se considera ni en cálculo ni constructivamente.

Para llevar a cabo esta unión, el roblón de debe introducir en el agujero realizado entre las chapas metálicas a unir. El agujero se puede realizar con taladro o mediante punzonado. La relación entre la longitud de la espiga y el diámetro del roblón suele cumplir la siguiente proporción:

$$L = (4d/3) + \sum e_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo “L” la longitud de la espiga, “d” el diámetro nominal del roblón y “ $\sum e_i$ ” la suma de los espesores de los diferentes elementos a unir.

El proceso de ejecución de los roblones es teóricamente sencilla. Primero, se introduce el roblón en el agujero hasta que haga tope la cabeza del roblón con la pieza. Cuando está colocando correctamente, el extremo opuesto se calienta hasta alcanzar la temperatura adecuada, tomando en obra el color de rojo cereza como indicativo visual. Al conseguir esta temperatura la cabeza del roblón de moldea hasta darle la forma que se requiere. Al finalizar de moldear, tomándose como referencia el color rojo sombra, la temperatura debe descender lentamente.

El acero de los roblones se tiene que elegir por el tipo de acero de las piezas a unir, aunque por regla general debe tener una resistencia a tracción de 40/50 kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 25% en la rotura.

Tabla 8. Propiedades principales de algunos tipos de acero utilizados para roblones

CLASE DE ACERO DE LOS ROBLONES	A34b	A34c	A42c
RESISTENCIA A TRACCIÓN, MÍN/MÁX (KG/MM <sup>2</sup> )	-	34/42	42/50
ALARGAMIENTO DE ROTURA MÍNIMO (%)	-	28	23
RESISTENCIA A CORTANTE, MÍN/MÁX (KG/MM <sup>2</sup> )	-	25/36	31/42
TIPO DE ACERO DE LOS PRODUCTOS A UNIR	A37	A42	A52

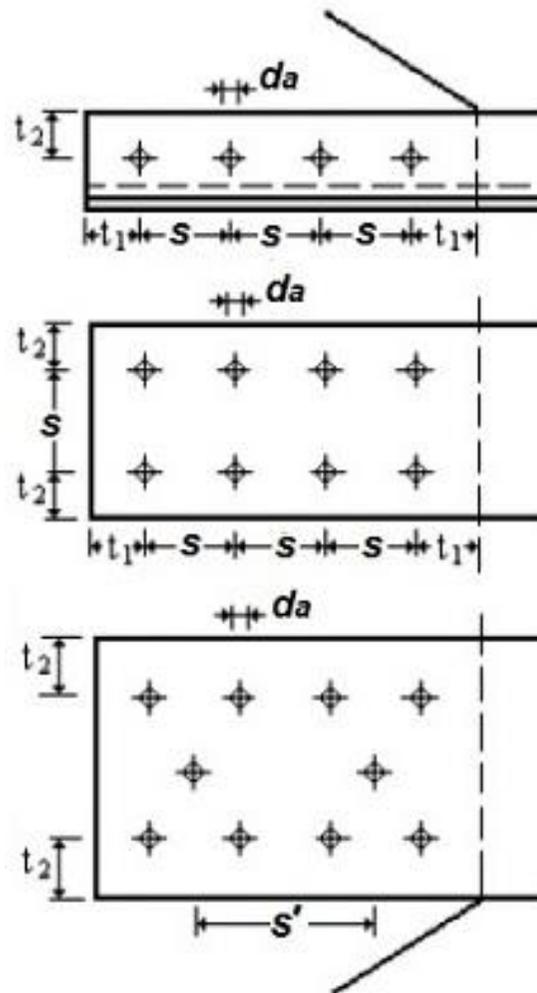


Figura 66. Distribución constructiva de las distancia de los roblones

### EJECUCIÓN DE LAS UNIONES ROBLONADAS

Como se ha explicado en el apartado de “Tipos de uniones –Roblonado” las dimensiones del diámetro del agujero debe ser 1mm mayor que el diámetro nominal del roblón.

Para la correcta disposición constructiva, las distancias entre los centros de los agujeros tienen que cumplir las siguientes condiciones geométricas de separación entre roblones (figura 66):

- En dirección paralela al esfuerzo:  $3 \cdot d_a \leq s \leq 8 \cdot d_a$  Ecuación 2
- En direcciones perpendicular al esfuerzo:  $3 \cdot d_a \leq s \leq 6 \cdot d_a$  Ecuación 3

Siendo, “ $d_a$ ” el diámetro del agujero y “ $s$ ” la distancia entre ellos.

Cuando se prevén más de dos filas paralelas de roblones en la dirección del esfuerzo, el valor máximo de distancia para las filas interiores podrá ser el doble que la distancia “ $s$ ” dicha anteriormente.

Para la distancia entre el borde de la chapa y el centro del agujero debe de cumplir (figura 66):

- En dirección paralela al esfuerzo:  $3 \cdot d_a \leq t_1 \leq 6 \cdot d_a$  Ecuación 4
- En dirección perpendicular al esfuerzo:  $1,5 \cdot d_a \leq t_2 \leq 3 \cdot d_a$ <sup>10</sup> Ecuación 5

Siendo “ $d_a$ ” el diámetro del agujero, “ $t_1$ ” la distancia paralela a la fuerza entre el borde de la chapa y el centro del agujero y “ $t_2$ ” la distancia perpendicular a la fuerza entre el borde de la chapa y el centro del agujero.

<sup>10</sup> <https://ingemecanica.com/tutoria/semanal/tutorialn35.html>

Para la elección de los roblones, se suele mantener una proporcionalidad entre los espesores de chapa a unir y los roblones:

$$d = \sqrt{5 \cdot e} - 0,2 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\sum e_i \leq 4,5 \cdot d \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo “d” el diámetro nominal del roblón, “e” el espesor menor de las piezas a unir (cm) y “ $\sum e_i$ ” la suma de todos los espesores de las piezas a unir.

En la tabla 9 que se encuentra a la derecha se muestra su resumen de los diámetros idóneos para cada espesor de chapa.

Se recomienda que al realizar las uniones roblonadas estas dispongan de al menos dos roblones por unión y no sobrepasar los cinco roblones en la misma fila paralela a la dirección del esfuerzo.

Tabla 9. Limitaciones para los agujeros de los roblones

DIÁMETRO DEL AGUJERO mm	ESPESOR DE CADA PIEZA		MÁX SUMA DE ESPEORES DE LAS PIEZAS mm
	MÍNIMO mm	MÁXIMO mm	
11	4	10	45
13	4	12	55
15	5	14	65
17	6	16	70
19	7	18	80
21	8	20	90
23	10	24	100
25	12	28	115
28	14	36	130

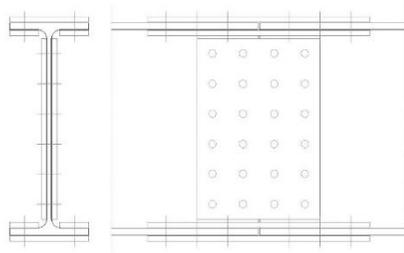


Figura 67. Unión roblonada entre vigas

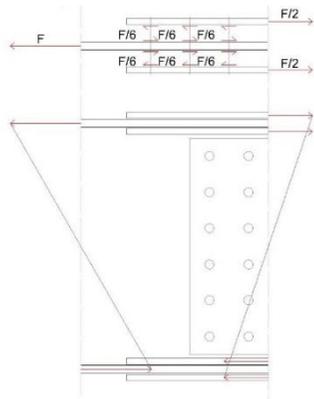


Figura 68. Cargas a cizalladura. Unión de las alas

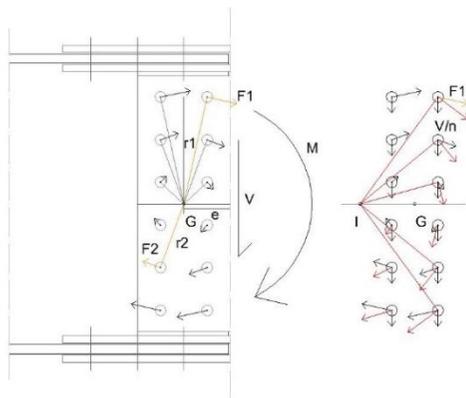


Figura 69. Cargas a tensión cortante y momento. Unión del alma de los perfiles

### PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA UNIÓN ROBLONADA

#### - Unión entre vigas:

La unión entre los perfiles de las vigas se realiza por medio de pletinas colocadas a los dos lados de las alas y del alma. Se perforan las pletinas y los perfiles para poder hacer la conexión por medio de roblones. Como se ha explicado anteriormente, la perforación debe de ser 1mm mayor que el tamaño nominal del diámetro del roblón.

La unión de las alas funciona por cizalladura. Como se puede ver en la figura 68 que se sitúa en la derecha inferior del margen, cogiendo de ejemplo la sección al medio de la unión, la cizalladura consiste en una fuerza horizontal “F” que tira del ala del perfil, y por efecto de esto, esa fuerza se divide en 2 (por las dos chapas) “F/2” creando una tensión de cizalladura. Esta tensión de cizalladura se puede apreciar en las perforaciones, siendo la fuerza “F” dividida entre el número de perforaciones multiplicado por el número de pletinas. De esta manera “F/6” se aplica en la cara de las pletinas en dirección de “F” y en la cara del ala del perfil en dirección contraria.

En el caso de las uniones en el alma, es más complicado al crearse una tensión cortante y un momento (figura 69).

Desde el centro de gravedad “G” (que está aplicado en el centro de la pletina al haber el mismo número de roblones por los dos lados y diámetro) se realiza una recta hasta el centro de un roblón. La distancia de esta recta se llamará “r1”. La fuerza que se crea en el roblón “F1” es perpendicular a la recta “r1”. Ha medida que el roblón está más cerca del centro de gravedad “G” la fuerza aplicada es proporcionalmente más pequeña. La tensión cortante está aplicada a una distancia del centro de gravedad, creando así un momento. Esta distancia se denomina excentricidad “e”.

Se crea la relación:

$$(F_1 \cdot r_1) + (F_2 \cdot r_2) + (F_3 \cdot r_3) + \dots F_i \cdot r_i = V \cdot e \quad \text{Ecuación 8}$$

$$F_1/r_1 = F_2/r_2 = F_i/r_i \quad \text{Ecuación 9}$$

$$F_1 = V \cdot e \cdot r_1 / \sum r_i^2 \quad \text{Ecuación 10}$$

La fuerza cortante “V” se divide entre el número de roblones que tenemos “V/n”, de manera que esta tensión “V/n” esta aplicada en el centro de cada roblón. Se compone la tensión resultante a partir de la fuerza “F<sub>1</sub>” y “V/n”. Esta tensión es denominada “R<sub>m</sub>” obteniendo una dirección. Si se traza una recta perpendicular a la tensión “R<sub>m</sub>” tomada desde el centro del roblón hasta cortar a la línea horizontal del centro de gravedad “G” se encuentra el centro instantáneo de rotación. Es un procedimiento académico pero de esta manera se consigue obtener la suma vectorial del efecto del momento torsor y del cortante. Poniendo la formula en función de esta suma, sin especificar el origen de sus componentes.

Al trazar estas rectas, se obtiene una relación de triángulos y adaptando la nomenclatura de NBE EA-95:

$$R = V \cdot e \cdot r_m / \sum r_m^2 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$R/r_m = R_m/r_{im} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$R_m = V \cdot e \cdot r_{im} / \sum r_m^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

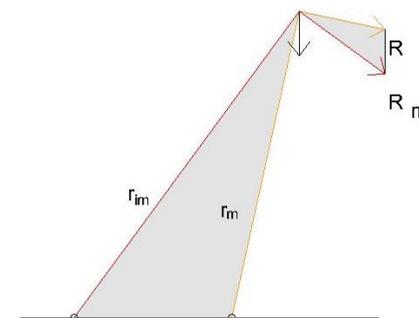


Figura 70. Relación de triángulos. Unión entre vigas

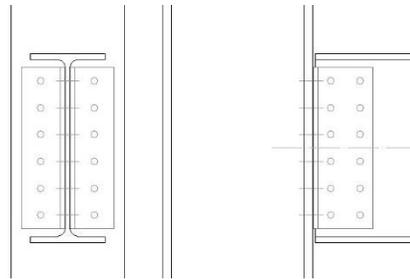


Figura 71. Unión entre viga y pilar

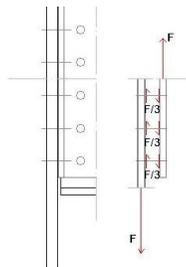


Figura 72. Cargas a cizalladura. Unión ala-pilar y angular

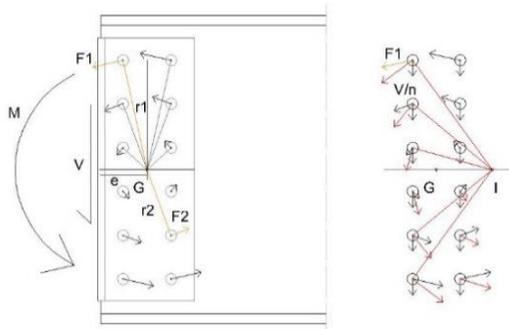


Figura 73. Cargas a tensión cortante y momento. Unión alma-viga y angular

- Unión entre viga y pilar:

La unión entre los perfiles de la viga y el pilar se realiza por medio de angulares colocados en el alma de la viga uniéndose en este caso al ala del pilar. Se perforan las pletinas y los perfiles para poder hacer la conexión por medio de roblones (figura 71).

La unión del ala del pilar y el anclaje angular funciona a cizalla de manera similar a como se ha explicado anteriormente. Al haber una fuerza "F" aplicada en el ala del pilar que ejerce hacia abajo de él, en el anclaje por reacción se crea otra fuerza igual "F" en dirección opuesta realizando un equilibrio de cargas. Al igual que la unión entre vigas aplicada a las alas, "F" se divide entre el número de perforaciones multiplicado por el número de pletinas. En este caso sería hay tres perforaciones y una pletinas, quedando "F/3" con dirección hacia abajo en la cara de la pletina y en dirección contraria en la cara del ala del pilar.

La unión del alma de la viga con el anclaje angular se calcularía de la misma manera que las uniones en el alma entre vigas. Se crea también una tensión cortante y un momento.

Las relaciones que se tiene que tener en cuenta con la nomenclatura de NBE EA-95:

$$R = V \cdot e \cdot r_m / \sum r_m^2$$

Ecuación 11

$$R / r_m = R_m / r_{im}$$

Ecuación 12

$$R_m = V \cdot e \cdot r_{im} / \sum r_m^2$$

Ecuación 13

Donde,

"V" es la tensión cortante.

"e" la excentricidad.

"G" centro de gravedad.

"I" centro instantáneo de rotación.

"R" la tensión relacionada con el centro de gravedad "G".

"R" tensión resultante relacionada con el centro instantáneo de rotación "I".

"r<sub>m</sub>" distancia entre en centro del roblón y "G".

"r<sub>im</sub>" distancia entre el centro del roblón e "I".

### PROCEDIMIENTO PARA LA COMPROBACIÓN DE LA UNIÓN ROBLONADA

#### 1) Por agotamiento del roblón.

En las uniones roblonadas se recomienda que el roblón no trabaje a esfuerzo de tracción (dirección paralela al eje longitudinal del roblón), sino que trabaje a esfuerzos cortantes actuando en la dirección transversal del roblón (figura 74).

##### a. Solicitación de agotamiento a cortante:

La fuerza “F” que está actuando perpendicularmente al eje genera un esfuerzo cortante “V” en la sección del roblón.

$$V = F/A \quad \text{Ecuación 14}$$

Siendo “A” el área del roblón que se puede adquirir con el diámetro:  $A = \pi \cdot d^2/4$  Ecuación 15

Según el criterio de Von-Mises, la tensión cortante límite “ $V_{lim}$ ” que puede soportar el roblón está relacionada con el límite elástico  $\sigma_{lim}$  del material.

$$V_{lim} = \sigma_{lim}/\sqrt{3} \quad \text{Ecuación 16}$$

Para que el agotamiento del roblón no se produzca la tensión cortante “V” debe de ser menor que la tensión cortante límite “ $V_{lim}$ ”.

$$V < V_{lim} \quad P/(\pi \cdot d^2/4) < V_{lim} \quad \text{Ecuación 17}$$

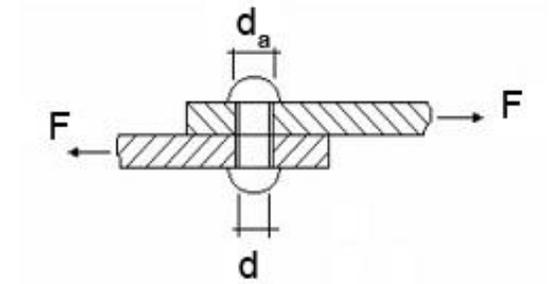


Figura 74. Agotamiento del roblón

Para obtener el esfuerzo de cortante último “ $V_{\text{último}}$ ” de agotamiento del roblón, se debe tener en cuenta el número de roblones “ $n$ ” que resisten el esfuerzo cortante.

$$V_{\text{último}} = V_{\text{lim}} \cdot n \cdot A \quad \text{Ecuación 18}$$

b. Solicitud de agotamiento a tracción:

Cuando una unión roblonada esté actuando a esfuerzo a tracción (excepcionalmente), las solicitudes de agotamiento del esfuerzo de tracción último “ $T_{\text{último}}$ ” se comprueba teniendo en cuenta el número de roblones “ $n$ ”, el límite elástico “ $\sigma_{\text{lim}}$ ” del material y el área de los roblones “ $A$ ”.

$$T_{\text{último}} = 0,25 \cdot n \cdot \sigma_{\text{lim}} \cdot A \quad \text{Ecuación 19}$$

c. Solicitud de agotamiento a cortante y a tracción:

En muy pocas ocasiones el roblón esta solicitado a esfuerzo cortante y a tracción.

$$(T / T_{\text{último}})^2 + (V / V_{\text{último}})^2 \leq 1 \quad \text{Ecuación 20}$$

## 2) Por aplastamiento de las paredes del agujero.

En las uniones roblonadas, el esfuerzo cortante “V” aplicado en los roblones también produce un aplastamiento de las paredes del agujero. Este esfuerzo origina una tensión “σ” en la pared del agujero. Para calcularla se tiene en cuenta el diámetro del roblón “d” y el espesor de la chapa “s” (figura 75).

$$\sigma = V/(d \cdot s) \quad \text{Ecuación 21}$$

Para la comprobación de que el roblón no este aplastando las paredes del agujero debe cumplir que la tensión “σ” sea menor que la tensión máxima admisible “σ<sub>adm</sub>” del material.

$$\sigma < \sigma_{adm} \quad \text{Ecuación 22}$$

## 3) Por desgarro del agujero.

El desgarro del agujero se puede producir por dos motivos. Uno es por el desgarro de la sección de la chapa al estar debilitada y la otra es por el agrietamiento del agujero.

Cuando sucede esto, se produce una tensión de cortante “V” en el área más debilitada de la chapa con el agujero “a”. Para calcular “V” se debe tener también en cuenta el espesor de la chapa más delgada “e” y el diámetro de la cabeza del roblón “d<sub>a</sub>” (figura 76).

$$V = F/(2 \cdot e \cdot (a - (d_a/2))) \quad \text{Ecuación 23}$$

Para asegurar de que el desgarro del agujero no se vaya a producir, debe cumplir que el valor de la tensión cortante “V” no sea mayor que la tensión cortante límite “V<sub>lim</sub>”.

$$V < V_{lim} \quad \text{Ecuación 24}$$

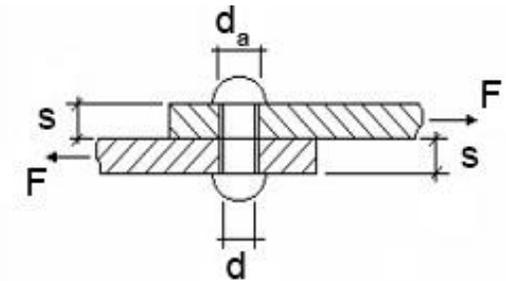


Figura 75. Aplastamiento de las paredes del agujero

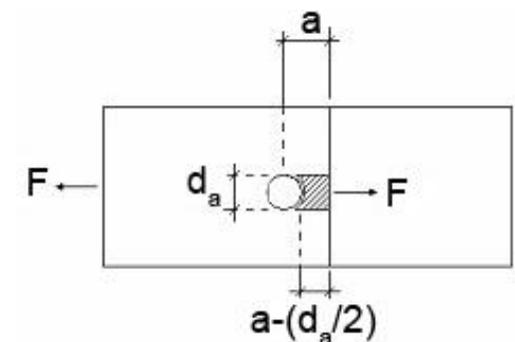


Figura 76. Desgarro del agujero

4) Por rotura de la chapa entre posiciones de roblones.

Esta comprobación se realiza para que no se produzca la rotura de la chapa en la zona de la unión situada entre los roblones. Se produce una fuerza "F" que actúa en el total del ancho de la chapa "L" produciendo el agotamiento por la rotura de la chapa entre la posición de los roblones.

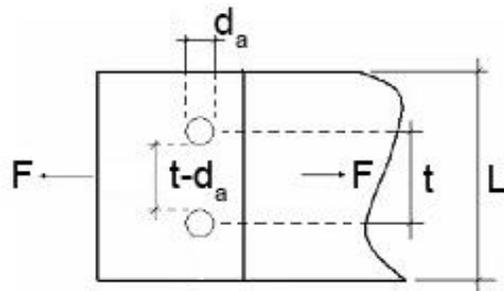


Figura 77. Rotura de la chapa entre las posiciones de los roblones

$$F = \sigma_{adm} \cdot s \cdot \eta \cdot L \quad \text{Ecuación 25}$$

" $\sigma_{adm}$ " tensión máxima admisible del material.

"s" el espesor de la chapa.

" $\eta$ " parámetro que se adquiere por  $(t-d_a)/t$ , siendo "t" la separación entre los agujeros y " $d_a$ " el diámetro de la cabeza del roblón.

Para que la ejecución de las uniones sean óptimas, es necesario que la distancia entre los centros de los agujeros de los roblones "t" sea:  $t_{\min} = 3 \cdot d$ ,  $t_{\max} = 16 \cdot s$

### *COLOCACIÓN DE LOS ROBLONES*

El roblonado se debe realizar de manera que las piezas de unión queden perfectamente juntas unas con otras y no se produzcan curvaturas ni alabeos. El roblón tiene que rellenar completamente el agujero. Para la colocación de los roblones se recomienda seguir los siguientes pasos:

#### 1- Orden de colocación de los roblones:

Se comienza por el centro de la costura y continuar hacia el extremo de manera alterna. Cuando en la unión hay varias filas, la colocación se debe realizar simultáneamente en todas las filas.

#### 2- Formación de la cabeza de cierre:

Al iniciar la colocación del roblón, la temperatura debe de estar entre 1050°C y 950°C (color rojo cereza). Para realizar la cabeza de cierre se usa una roblonadora de presión uniforme mientras que la sufridora debe de mantenerse firme e inmovilizada, evitando el mal contacto, la excentricidad o la deformación de la cabeza original del roblón. Al terminarse este proceso, la temperatura no debe de ser mayor de 700°C (color rojo sombra).

#### 3- Comprobación de los roblones colocados:

Cuando se finaliza de colocar una unión roblonada se debe esperar a que el roblón adquiera la temperatura ambiente y se inspecciona ocularmente, se verifica sus dimensiones y se comprueba el rebote dando con un martillo de bola pequeña.

Si el roblón se aprecia con defectos como quemado, mal ejecutado, dimensiones incorrectas o resulte dudoso el rebote, se debe eliminar y sustituir por otro.





Tabla 10. Edificios realizados con estructura de madera más altos construidos hasta el momento

AÑO	EDIFICIO	UBICACIÓN	ALT
2019	Mjøstårnet	Brumunddal, Noruega	85m
2020	HoHo	Vienna, Austria	84m
2017	Brock Commons Tallwood House	Vancouver, Canadá	57.9m
2015	Treet	Bergen, Noruega	49m
2018	25 King	Brisbane, Australia	46.8m
2017	Origine	Quebec, Canadá	40.9m
2015	Trafalgar Place	Londron, Reino Unido	36.3m
2015	The Cube Building	London, Reino Unido	33m
2012	Forte	Melbourne, Australia	32.2m
2008	Langerhuset	Eslov, Sweden	31m
2009	Stadthaus	London, Reino Unido	30.3m
2018	Carbon12	Prtland, EEUU	29m

#### 4. MADERA.

##### 4.1. MADERA MATERIAL

###### 4.1.1. BREVE HISTORIA.

La madera es uno de los materiales de construcción más empleado por el ser humano en la historia, siendo de todos los materiales naturales (piedra, adobe, ladrillo,... madera) el único que trabaja de forma solvente a tracción y puede, por ello, emplearse para resolver elementos estructurales traccionados o flexionados de forma económica.

Con la llegada de la Revolución Industrial se fabrican de forma industrializada, seriada y económica el acero y otros materiales metálicos, que se introducen por su buena relación coste/propiedades mecánicas en la construcción de estructuras. El acero debido a la manufactura en serie y la capacidad de cubrir mayores luces, pasaron a tener un papel en la construcción más importante relegando la utilización de madera a construcciones de menor identidad. En este sentido, suele citarse el puente Iron Bridge sobre el río Severn (Shropshire) construido en 1775 como la primera gran estructura metálica. Posteriormente, la producción de cemento industrial permite desarrollar un nuevo material estructural, el hormigón armado, pudiendo citarse la patente de un barco de hormigón en 1855 de Lambot (Francia) como el surgimiento de este material. Pese a presentar unas propiedades mecánicas inferiores al acero, este material presentaba dos ventajas fundamentales; su menor coste económico y su facilidad de ejecutar uniones (nudos rígidos).

En las últimas décadas se ha producido un redescubrimiento de la madera como material estructural, sobre todo en los países industrializados, donde se da conciencia a proteger los recursos naturales y el medio

ambiente. Si bien existen cientos de ejemplos del uso de madera para la construcción de edificaciones y estructuras civiles de grandes dimensiones, no debemos perder de vista que el origen de todos los productos industrializados actuales y la expansión actual surgen de principios del S.XX (Figura 78). Las restricciones en el uso de acero y otros metales impuestas durante la Primera Guerra mundial, y el desarrollo industrial de nuevos adhesivos sintéticos, permitió el desarrollo de la madera laminada, para la construcción estructuras de grandes luces (hangares, industrias, barracones,...), y de los tableros contrachapados para el desarrollo y fabricación de los primeros aviones de guerra.

Pese a que la materia prima con la cual se elaboran los distintos productos industrializados de madera es la misma; madera aserrada, durante el proceso de fabricación se corta la madera en pequeñas piezas, se clasifican, eliminan singularidades y unen mediante uniones encoladas. Este proceso permite reducir la influencia de las singularidades de la madera (nudos, gemas, bolsas de resina,...), y al mismo tiempo fabricar secciones de tamaño, forma y longitudes teóricamente ilimitadas. Mejorando por esta razón el comportamiento de la materia prima tal y como se muestra en la figura 79.

Actualmente, además se unen las ventajas de sostenibilidad que la madera representa frente a otros materiales estructurales. Se necesitan grandes cantidades de energía y elevadas emisiones de gases invernaderos para producir materiales de construcción como el acero, el hormigón o el aluminio, incompatibles con el concepto de sostenibilidad. Por este motivo, se está retomando el uso de la madera como material para la edificación. La madera es un material estructural de origen natural, sostenible, reutilizable y teóricamente ilimitado al ser cultivable, y sin necesidad de transformación industrial asociado con el elevado número energético que supone, además que aporta grandes beneficios ecológicos.

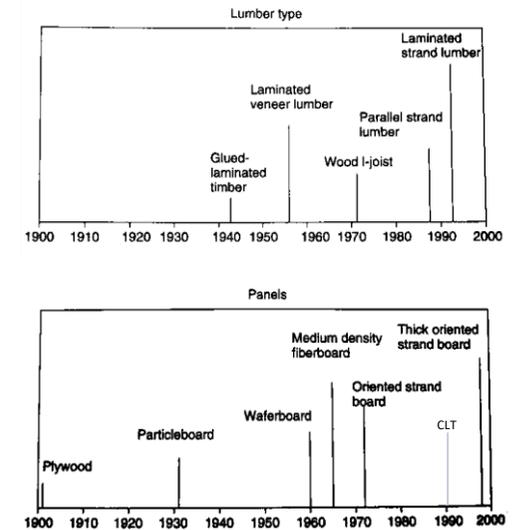


Figura 78. Cronograma del desarrollo de productos de madera industrializada

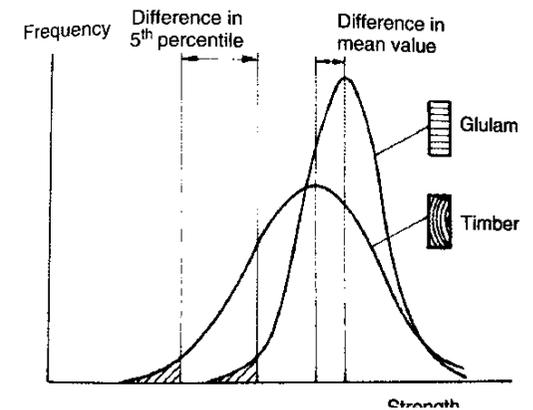
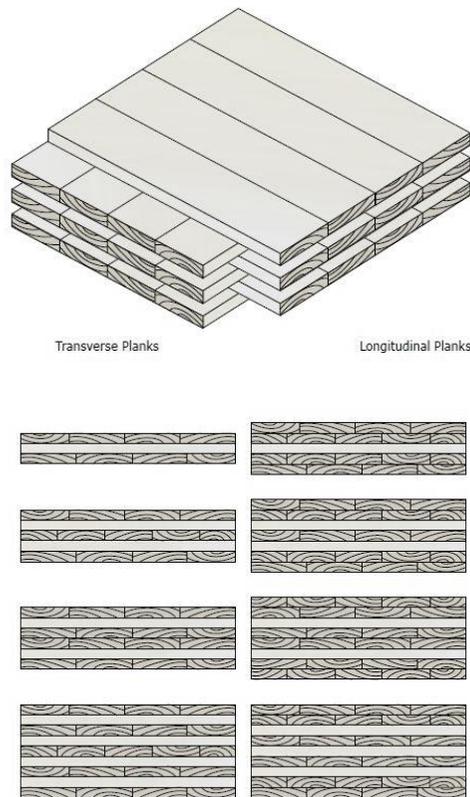


Figura 79. Funciones de densidad de probabilidad para la madera maciza y madera laminada

#### 4.1.2. CLT.



La madera contralaminada (CLT Cross-laminated timber) es un producto estructural relativamente nuevo que es conocida como madera "masiva"<sup>11</sup>. Surge en los años 90 a partir de una tesis doctoral realizada en la Universidad de Graz (Austria) bajo dirección del profesor Gerhard Schickhofer (Institute of Timber Engineering and Wood Technology). En ella, se investiga sobre la optimización de los residuos testeros, en aquel momento desechadas para usos residuales (triturado o biomasa). Es una solución que consisten en varias caras de madera que se unen en direcciones alternas, se pegan y sobre ellas se les aplica presión (figura 80). Al pegar los paneles de esta manera se reducen los movimientos propios por la anisotropía e higroscopicidad de la madera, generando paneles masivos. El resultado de estas piezas de madera de grandes dimensiones son unas excelentes prestaciones mecánicas con una reducción de la anisotropía, muy estables dimensionalmente. CLT es un producto de madera innovador que se introdujo a principios de la década de 1990 en Austria y Alemania y ha ido ganando popularidad en aplicaciones residenciales y no residenciales en Europa, hasta que en los últimos años se está comenzando a utilizar en edificación en altura (tabla 10).

Figura 80. Paneles estructurales tipo de CLT

<sup>11</sup> "CLT handbook: cross-laminated timber". 2011. CLT Manufacturing process. Pág. 17.

### 4.1.3. PROCESO DE FABRICACIÓN.

La fabricación de los paneles de CLT se divide en las siguientes fases (figura 81):<sup>12</sup>

1. Selección de madera.
2. Agrupación de madera.
3. Cepillado de madera.
4. Cortar la madera a medida.
5. Aplicación del adhesivo.
6. Colocación de paneles.
7. Montaje y prensado.
8. Control de calidad, mecanizado y corte.
9. Marcado, embalaje y envío del producto.

Para conseguir con éxito el proceso de fabricación hay que tener en cuenta el tipo y calidad de la madera y el control, con precisión, los parámetros que pueden afectar al adhesivo como la temperatura y/o humedad ambiental, presión o tiempos y temperatura de curado, siendo por todo ello imprescindible un acto de control de calidad.

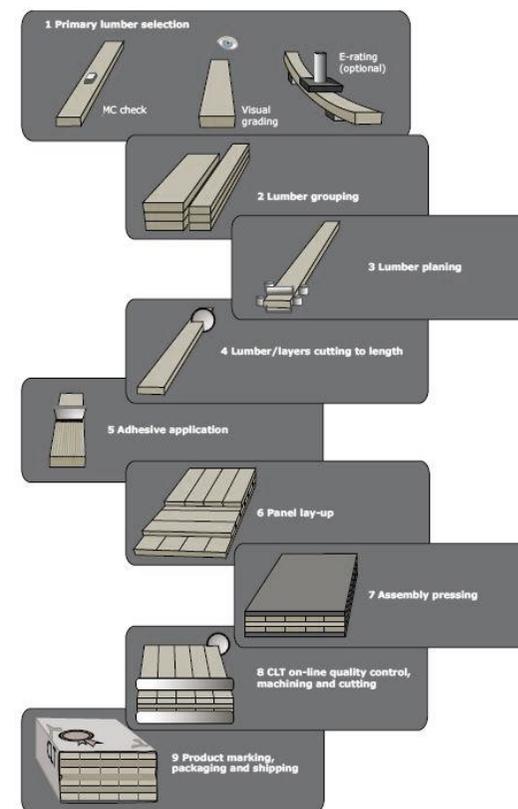


Figura 81. Proceso de fabricación de los paneles CLT

<sup>12</sup> "CLT handbook: cross-laminated timber". 2011. CLT Manufacturing process. Pág. 77-83.

### 1. Selección de madera.

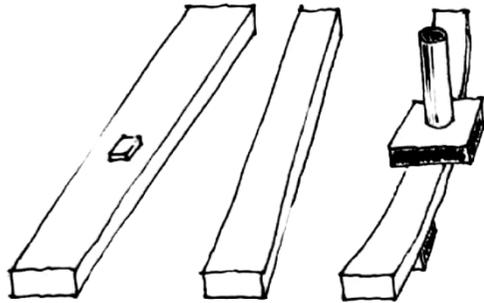


Figura 82. Selección de la madera

Un vez que se elige el tipo de madera que se va a llevar a fábrica, se debe controlar la nivel de humedad y temperatura que requiere el adhesivo. El secado estándar para madera puede no ser adecuada para todos los procesos de fabricación del CLT, ya que algunos adhesivos son más sensibles que otros al nivel de humedad. Se requiere realizar pruebas para controlar la cantidad de humedad, recordando que la humedad varía de una temperatura a otra. Por esto se recomienda que la madera tenga un contenido de humedad de  $12 \pm 3\%$  y una temperatura ambiente de  $15^{\circ}\text{C}$  para garantizar su correcta fabricación.

Además de la cantidad de humedad y la temperatura, existen otras características de la madera que pueden afectar a la calidad de la unión adhesiva, como el cepillado, planeidad de caras o singularidades (nudos) como las bolsas de resina. Es importante que estas características se tengan en cuenta en la fabricación del producto.

### 2. Agrupación de madera.

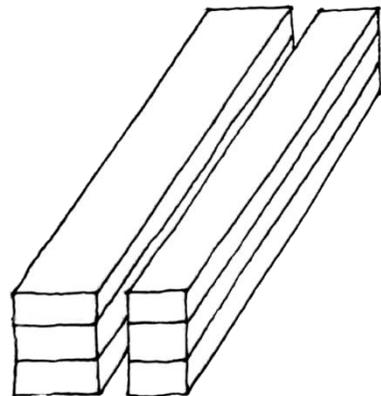


Figura 83. Agrupación de madera

Los paneles de madera contralaminada están formados por varias capas en el que la dirección de las fibras se alterna  $90^{\circ}$  y siempre número total de caras impar. Para la preparación de la madera, las direcciones principales y transversales siguen diferentes procesos, pudiéndose generar tableros con la dirección principal en el lado largo (forjado) o corto (muros) según su uso final. Para asegurar la calidad estética, las superficies expuestas de las capas más externas deben tener un mejor aspecto.

3. Cepillado de madera.

El cepillado de la madera debe lograr la eliminación de una capa superficial muy fina para garantizar una unión óptima. Es necesario cepillar los 4 lados para una uniformidad dimensional, aunque en algunos casos solo se realiza el frontal y posterior, donde la unión encolada es crítica (caras)

4. Cortar la madera a medida.

Los paneles se cortan si se pretende usar la misma calidad y tamaño para las capas paralelas y perpendiculares. A partir de las capas longitudinales se pueden generar las capas transversales con una sección más corta en función de las dimensiones de la prensa.

5. Aplicación del adhesivo.

La aplicación del adhesivo se debe realizar poco después del cepillado para no tener problemas en la oxidación de la superficie de la madera y así mejorar la humectabilidad, impregnación y la efectividad del adhesivo. Las superficies de unión de la madera tienen que estar limpias y libres de sustancias como aceite o grasas.

Este proceso consiste en un sistema de aplicación de pegamento. Generalmente se usan adhesivos tipo PUR (poliuretano) o PRF (fenol-resorcinol-formaldehído). Se aplican hilos paralelos con un sistema hermético con suministro directo al adhesivo y predosificado.

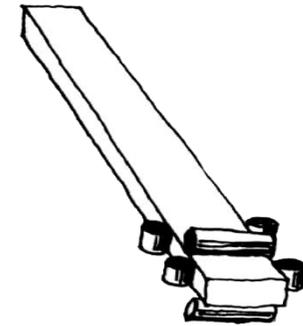


Figura 84. Cepillado de madera

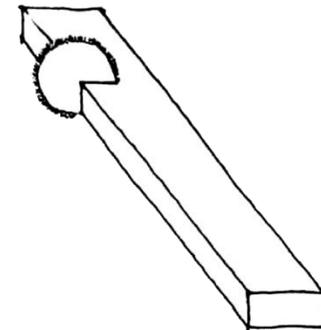


Figura 85. Cortar la madera a medida

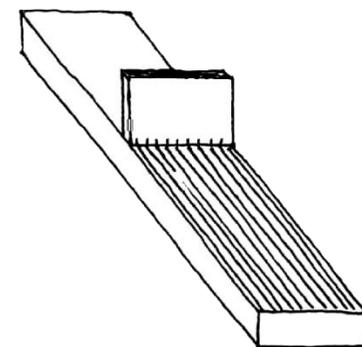


Figura 86. Aplicación del adhesivo

## 6. Colocación de paneles.

La colocación de los paneles se conoce como el intervalo de tiempo entre la aplicación del adhesivo y el montaje de prensado. La disposición del panel CLT se compone de un número de capas impar dispuestas de forma perpendicular al tablero anterior de manera que las fibras cambien de dirección  $90^\circ$ .

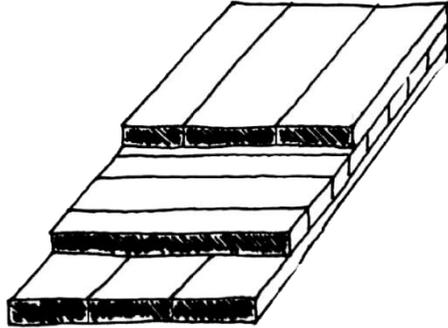


Figura 87. Colocación de los paneles

## 7. Montaje y prensado.

El proceso de prensado es un paso crítico en la fabricación de CLT, por el cual el desarrollo de la unión y la calidad deben ser adecuados. Para la fabricación del CLT se utilizan dos tipos de prensado: prensa de vacío (membrana plástica) y prensa hidráulica (mesa rígida). Al usar la prensa de vacío, la presión puede no ser suficiente para suprimir la deformación de las capas y superar las irregularidades de su superficie para crear una unión de contacto óptima. Una prensa hidráulica rígida puede generar una presión de sujeción vertical y lateral mucho más altas que una prensa de vacío, siendo este el proceso de prensado más habitual.

Tanto el tiempo de montaje (tiempo entre el momento en el que se aplica el adhesivo y se aplica la presión) como el tiempo de prensado y posterior curado, dependen de la temperatura ambiente y la humedad del aire. Si el tiempo de montaje es más corto que el mínimo recomendado por el fabricante del adhesivo, es necesario aumentar el tiempo de prensado para compensar esta irregularidad.

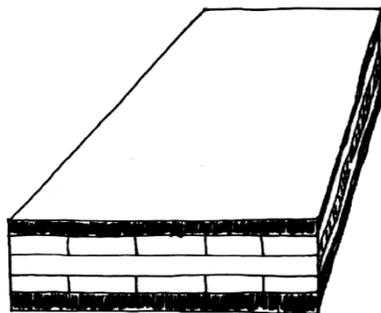


Figura 88. Montaje y prensado

### 8. Control de calidad, mecanizado y corte.

Estando aún en la fábrica, se usa una máquina de control numérico (CNC) para cortar y regruesar los paneles hasta sus dimensiones finales. Posteriormente se pasa un control de calidad en el que se verifica el nivel de humedad y forma visual. Después, los paneles CLT se transportan a otra estación de mecanizado donde una maquina multieje (CNC) realiza el mecanizado necesario para las conexiones con pernos y los cortes de ventanas y puertas con máxima precisión para las piezas de CLT.

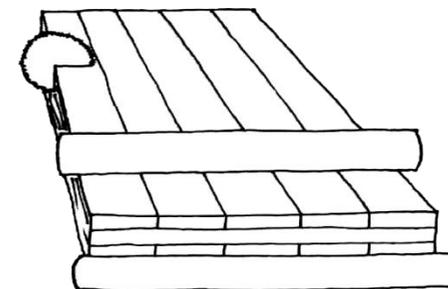


Figura 89. Control de calidad, mecanizado y corte

### 9. Marcado, embalaje y envío del producto.

El marcado del producto garantiza una descripción, entrega e instalación correctas. Los productos CLT que cumplen la norma ANSI/APA PRG 320 deben verificarse con un marcado que contenga la siguiente información:

- a) Referencia de conformidad con la norma ANSI/APA PRG 320
- b) Logo del fabricante
- c) Grado de laminado y especie de la madera
- d) Grosor de los paneles para informar de la capacidad
- e) Clase de adhesivo
- f) Algunos marcados pueden mostrar la dirección principal de carga de los paneles estructurales y las zonas diseñadas para los conectores.

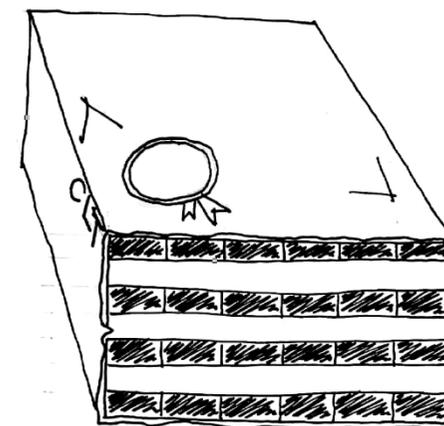
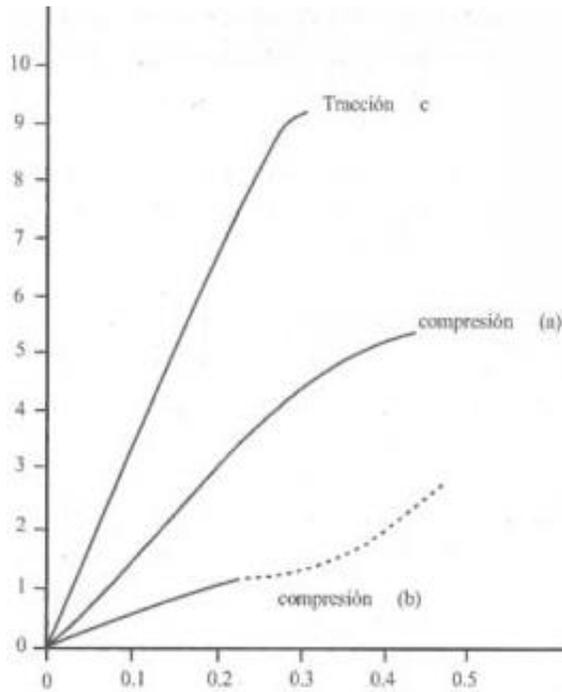


Figura 90. Marcado, embalaje y envío del producto

Debido a que los paneles CLT están diseñadas para usarse en condiciones secas de servicio clase 1 y 2, los paneles deben protegerse del clima durante el transporte, almacenamiento y lugar de trabajo.

**4.1.4. PROPIEDADES DE LA MADERA.**



- (a) Compresión paralela a las fibras:
- (b) Compresión perpendicular a las fibras
- (c) Tracción paralela a las fibras

Figura 91. Resistencia de la madera frente a diferentes situaciones de esfuerzo

El desarrollo en las técnicas de fabricación de elementos estructurales en madera ha facilitado la mejora de las propiedades mecánicas de este material, permitiendo su empleo en edificaciones en altura.

Así mismo, la innovación en técnicas constructivas mediante la correcta colocación de las piezas que conforman el conjunto estructural junto con el empleo de uniones metálicas entre las mismas, hace de este un material competitivo frente a otros materiales empleados en grandes estructuras que coronan el skyline urbano, consiguiendo un correcto comportamiento estructural ante todo tipo de esfuerzos.

Como se observa en la tabla inferior la resistencia de la madera frente a esfuerzos es baja. Sin embargo, una comparativa realizada entre la relación densidad y resistencia de acero y madera revela la escasa separación en los valores obtenidos en uno y otro.

Tabla 11. Propiedades de la madera

CLASIFICACIÓN	FLEXIÓN N/mm <sup>2</sup>	TRACCIÓN N/mm <sup>2</sup>		COMPRESIÓN N/mm <sup>2</sup>		CORTANTE N/mm <sup>2</sup>	MÓDULO DE ELASTICIDAD N/mm <sup>2</sup>	DENSIDAD kg/m <sup>3</sup>	
		PARALELO	PERPENDICULAR	PARALELO	PERPENDICULAR				
MADERA ASERRADA C24	24	14	0.4	22	2.5	4	11 000	420	
MADERA LAMINADA ENCOLADA HOMOGÉNEA GL24H	24	16.5	0.4	24	2.7	2.7	11 600	380	
MADERA LAMINADA ENCOLADA COMBINADA GL24C	24	14	0.35	21	2.4	2.2	11 600	350	
MADERA CONTRALAMINADA CLT	24	14	0.4	21	2.5	3.1	11 600	520	

**4.1.5. PRINCIPALES VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA MADERA EN ESTRUCTURAS.**

VENTAJAS	
<i>MATERIAL NATURAL</i>	Proceso productivo con bajo consumo energético e impacto ambiental, al ser un producto reciclable
<i>RENOVABLE</i>	Concepto de material sostenible por tala en bosques adecuadamente y replantación de forma cuidadosa (FSC o PEFC)
<i>MATERIAL AISLANTE</i>	Condiciones naturales de aislamiento térmico y absorción acústica
<i>PROPIEDADES MECÁNICAS</i>	Resistencia a tracción como a compresión. Baja densidad y alta resistencia mecánica
<i>RAPIDEZ DE MONTAJE</i>	Gran facilidad de construir las estructuras por medio de conectores
<i>DIVERSIDAD DE FORMA</i>	Piezas con dimensiones estructurales de cualquier tamaño y forma, por los procesos de laminado y máquina corte CNC
<i>COMPORTAMIENTO AL FUEGO</i>	Durante el proceso de combustión, la sección de madera, protegida por la cara carbonizada, no pierde resistencia ni rigidez. Velocidad de carbonización conocida
INCONVENIENTES	
<i>VULNERABLE A PLAGAS</i>	Bajo condiciones ambientales adversas puede ser atacado por hongos e insectos xilófagos
<i>VULNERABILIDAD AL FUEGO</i>	En el caso de la madera contralaminada CLT la debilidad contra el fuego se mide por caras

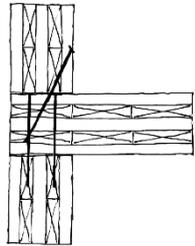


Figura 92. Unión tirafondos

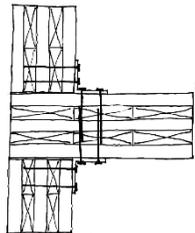


Figura 93. Unión con herraje metálico

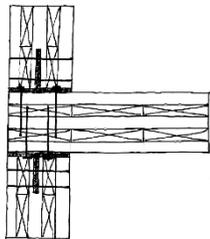


Figura 93. Unión con placas de metal ocultas

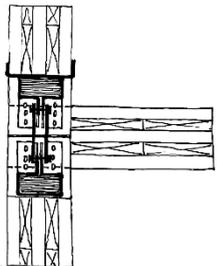


Figura 93. Unión industrializada patentada

## 4.2. MADERA UNIONES.

### 4.2.1. UNIONES DE ESTRUCTURAS DE CTL.

Las conexiones de las estructuras de madera contralaminada desempeñan un papel esencial para proporcionar resistencia, rigidez, estabilidad y ductilidad a la construcción, por lo que requiere una cuidadosa atención por parte de los arquitectos.

El diseño eficiente y la fabricación de la unión a menudo determinan la calidad de los edificios de madera para las estructuras de CLT de varios pisos. El uso de paneles de CLT permite un alto grado de prefabricación y facilita la instalación del sistema de conexión con un alto grado de precisión y eficacia.

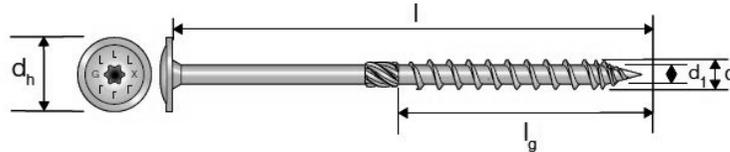
La eficiencia estructural del sistema de forjado que actúa como un diafragma y la de los muros para resistir cargas laterales depende de la eficiencia de los sistemas de sujeción y los detalles de conexión utilizados para interconectar paneles individuales y conjuntos. Los fabricantes de CLT generalmente recomiendan una combinación de placas de metal y clavos o tirafondos de gran longitud, y se usan comúnmente para conectar paneles a paneles en planta y ensamblajes de forjado a muro.

Sin embargo, existen otros tipos de conectores; desde sistemas de conectores tradicionales hasta las uniones industriales innovadoras, que se pueden usar de manera eficiente en uniones de CLT. Dada la reciente introducción de la madera contralaminada en el mercado de la construcción, se espera que con el tiempo al igual que ha sucedido con las estructuras de acero, se desarrollen nuevos tipos de conexión.

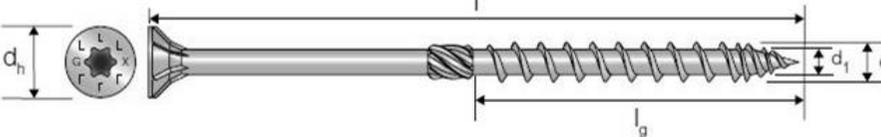
**TIPOS DE UNIONES.**

- TIRAFONDOS

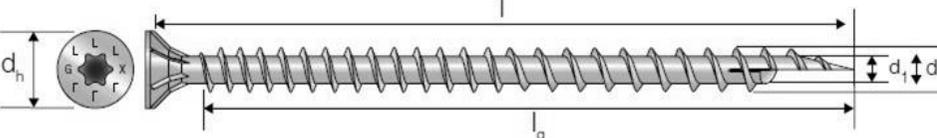
ESCR – TORNILLO DE CABEZA PLANA



ESCRC – TORNILLO CON CABEZA FRESADA



ESCRFTC – TORNILLO CON CABEZA FRESADA DE ROSCA COMPLETA



ESCRFTZ – TORNILLO DE CABEZA CILÍNDRICA DE ROSCA COMPLETA

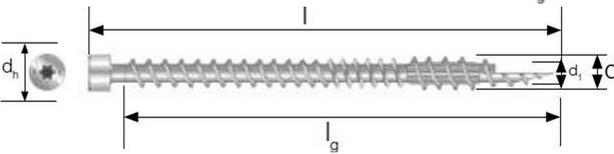


Figura 94. Tipos de tirafondos

Tabla 12. Principales propiedades de los tipos de tirafondos

CÓDIGO DEL ARTÍCULO	MOMENTO DE FLUJO PLÁSTICO CARACTERÍSTICO $M_{v,k}$ Nmm	PARÁMETRO DE RESISTENCIA CARACTERÍSTICO AL ARRANQUE $f_{ax,k,90^\circ}$ N/mm <sup>2</sup>	PAÁMETRO DE RESISTENCIA CARACTERÍSTICA DE INCRUSIÓN DE LA CABEZA $f_{head,k}$ N/mm <sup>2</sup>	CAPACIDAD RESISTENTE CARACTERÍSTICA DE TRACCIÓN $f_{tens,k}$ kN
ESCR6	10100	13	16,7	12,8
ESCR8	22600	10,7	17,6	22,7
ESCR10	33000	9,5	15,2	33,2
ESCRC8	22600	10,7	12,4	22,7
ESCRC10	33000	9,5	12,2	33,2
ESCRFTC8	20300	13,1	12,4	24,1
ESCRFTC10	36700	12,5	12,2	40
ESCRFTC12	48500	11,2	10,3	46,7
ESCRFTZ8	20300	13,1	-	24,1
ESCRFTZ10	36700	12,5	-	40

Para conectar un forjado a los muros inferiores, el método más simple es usar tirafondos largos que se colocan desde el forjado CLT directamente en el lado estrecho del borde de la pared, como se puede apreciar en la figura 94. Los tirafondos también pueden usarse accionado en ángulo para maximizar la capacidad de fijación en el borde del panel. De otra forma, se puede conectar los muros a los forjados inferiores, donde los tirafondos se colocan en ángulo en la pared cerca de la unión con el piso. Dependiendo del ángulo y la longitud de los tornillos, los tirafondos podrían llegar a las paredes inferiores, reforzando aún más la conexión entre los paneles superior e inferior y el forjado.

En la tabla 12 se muestra un resumen de las propiedades mecánicas de este tipo de tirafondos.

Los herrajes metálicos (figura 95) se utilizan de forma común para unir los forjados con los muros inferiores y superiores. Con estas conexiones se transmiten las cargas de un sistema de resistencia de carga lateral a otro (esfuerzo cortante) o a tracción en borde (Hold-Down). Para sujetar los herrajes metálicos se pueden usar clavos estriados o tornillos de media caña (rosca parcial) para madera.

En la tabla 13 se resumen las propiedades mecánicas.

- HERRAJE METÁLICOS.

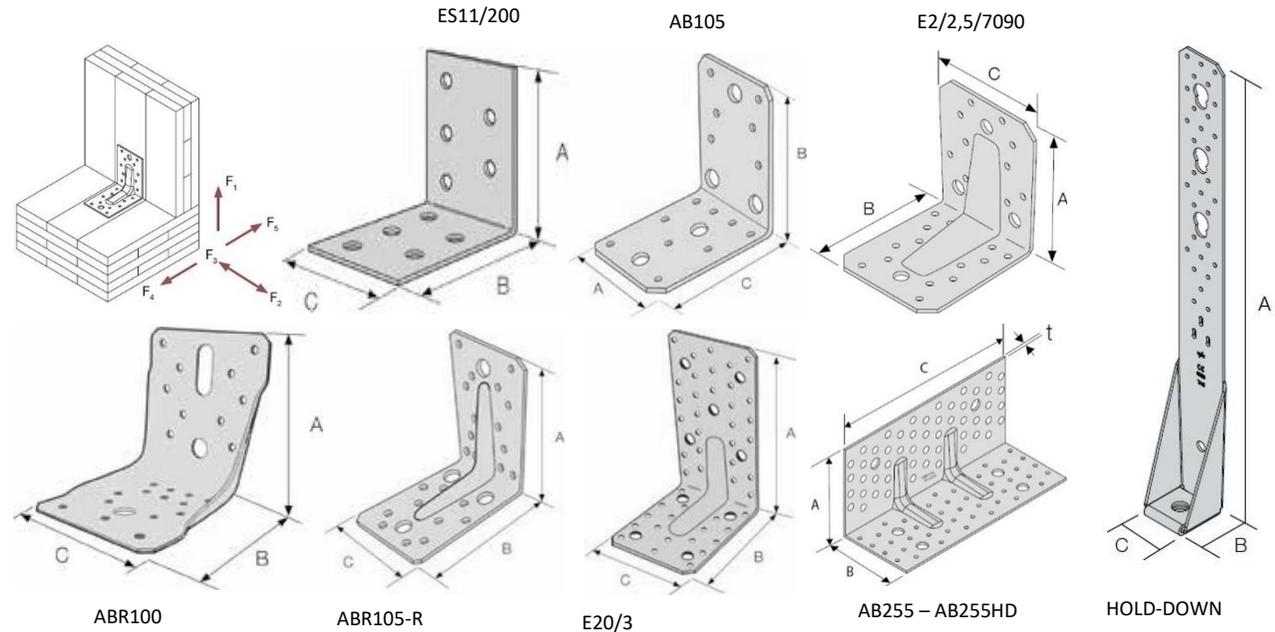


Figura 95. Tipos de herrajes metálicos

Tabla 13. Principales propiedades de los tipos de herrajes metálicos

CÓDIGO DE ARTICULO	DIMENSIONES mm				PERFORACIÓN ALA "A"	PERFORACIÓN ALA "B"	FIJACIONES		VALORES CARACTERÍSTICOS kN	
	A	B	C	GROSOR	TORNILLOS O PUNTAS	TORNILLOS O PUNTAS	ALA "A"	ALA "B"	TRACCIÓN R <sub>1,k</sub>	CIZALLADURA R <sub>2,k</sub> =R <sub>3,k</sub>
ES11/200	80	80	200	2,5	30 ø5	30 ø5	25CNA4*50	20CNA4*50	6,65	22,85
AB105	103	103	90	3	8 ø5	11 ø5	8CNA4*50	11CNA4*50	5,2	7,8
E2/2,5/7091	88	88	65	2,5	6 ø5	9 ø5	6CNA4*50	9CNA4*50	2,8	4,3
E2/2,5/7090	90	90	65	2,5	10 ø5	10 ø5	8CNA4*50	10CNA4*50	5,3	5,2
ABR100	100	100	90	2	10 ø5	14 ø5	8CNA4*50	11CNA4*50	7,9	8,7
ABR105-R	105	105	90	3	10 ø5	14 ø5	14CNA4*50	10CNA4*50	7,1	9,5
E20/3	170	113	95	3	24 ø5	16 ø5	13CNA4*50	8CNA4*50	4,3	7,8
E9/2,5	154	152,2	65	2,5	14 ø5	14 ø5	10CNA4*50	14CNA4*50	5	8,5
ABR255	120	100	255	3	52 ø5	41 ø5	24CNA4*60	21CNA4*60	Min. (18,1/k <sub>mod</sub> <sup>0,4</sup> ; 26,2/k <sub>mod</sub> )	31,4
AB255HD	123	100	255	3	56 ø5	41 ø5	26CNA5*50	5ESCRFTC8*160+13CSA5*50	CONSULTAR	CONSULTAR

- PLACAS DE METAL OCULTAS.

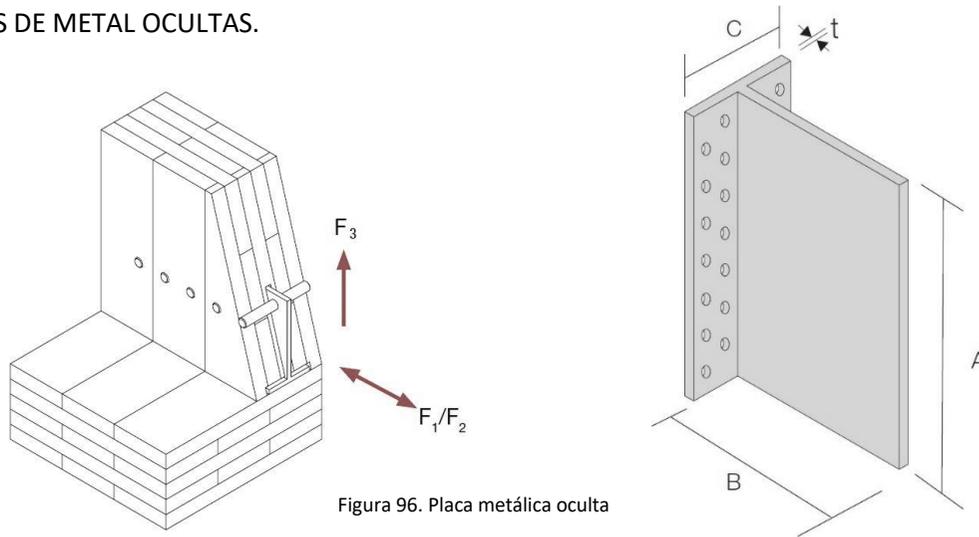


Figura 96. Placa metálica oculta

Otro tipo de unión son las placas de metal ocultas. Se aplica en la base del muro para ocultar completamente la conexión. Absorbe las cargas de elevación y laterales. Este sistema tiene ventajas considerables sobre las uniones expuestas, especialmente frente al fuego. Las perforaciones para las clavijas se realizan al mismo tiempo que las de la madera.

Tabla 14. Principales propiedades de las placas de metal ocultas

CÓDIGO DE ARTICULO	DIMENSIONES mm				PERFORACIÓN ALA "A"	FIJACIONES				VALORES CARACTERÍSTICOS kN							
	A	B	C	t		TORNILLOS O PUNTAS	ALA "A"		ALA "B"		R <sub>1,k</sub>						
							CANTIDAD	TIPO	CANTIDAD	TIPO	CNA4*50						R <sub>3,k</sub>
											60	80	100	120	140	160	
BTALU1200/120	1180	109	62	6	∅5	20	CNA4*50	3	STD12	14,7	15,5	16,6	17,9	19,4	20,7	5,9	
BTALU1200/160						28	CNA4*50	4	STD12	23,2	24,4	26	27,9	30	32	7,8	
BTALU1200/200						36	CNA4*50	5	STD12	32,4	34,1	36,2	38,7	41,2	43,4	14,7	
BTALU1200/240						44	CNA4*50	6	STD12	42,1	44,3	46,8	49,7	52,3	53,2	12	
BTALU1200/280						52	CNA4*50	7	STD12	52	54,7	57,5	60,5	62	62	14	
BTALU1200/320						60	CNA4*50	8	STD12	61,8	65,1	68,1	70,7	70,9	70,9	16	
BTALU1200/360						68	CNA4*50	9	STD12	71,1	75,5	78,5	79,8	79,8	79,8	18	
BTALU1200/400						76	CNA4*50	10	STD12	81,4	85,7	88,4	88,6	88,6	88,6	20	
BTALU1200/440						84	CNA4*50	11	STD12	91	95,8	97,5	97,5	97,5	97,5	22	
BTALU1200/480						92	CNA4*50	12	STD12	100	106	106	106	106	106	24	
BTALU1200/520						100	CNA4*50	12	STD12	106	111	115	115	115	115	26	
BTALU1200/560						108	CNA4*50	12	STD12	110	116	120	124	124	124	27	
BTALU1200/600						116	CNA4*50	12	STD12	114	120	125	131	133	133	29	

- UNIONES INDUSTRIALIZADAS PATENTADAS

Las últimas innovaciones en este campo han desarrollado el sistema de conexión X-RAD que puede utilizarse para construcciones de todo tipo en CLT. Es un sistema sencillo que consta de 3 elementos: X-ONE (conectores universales), X-PLATE (placas de conexión), X-SEAL (sistema completo para la estanqueidad térmica y acústica). Este tipo de unión simplifica todas las operaciones en obra siendo sus principales características innovadoras la elevada precisión que ofrece, una importante reducción de los tiempos de ejecución en obra, así como una mayor seguridad para su colocación en la misma y una sustancial reducción del número de elementos necesarios para asegurar unos excelentes rendimientos estáticos.

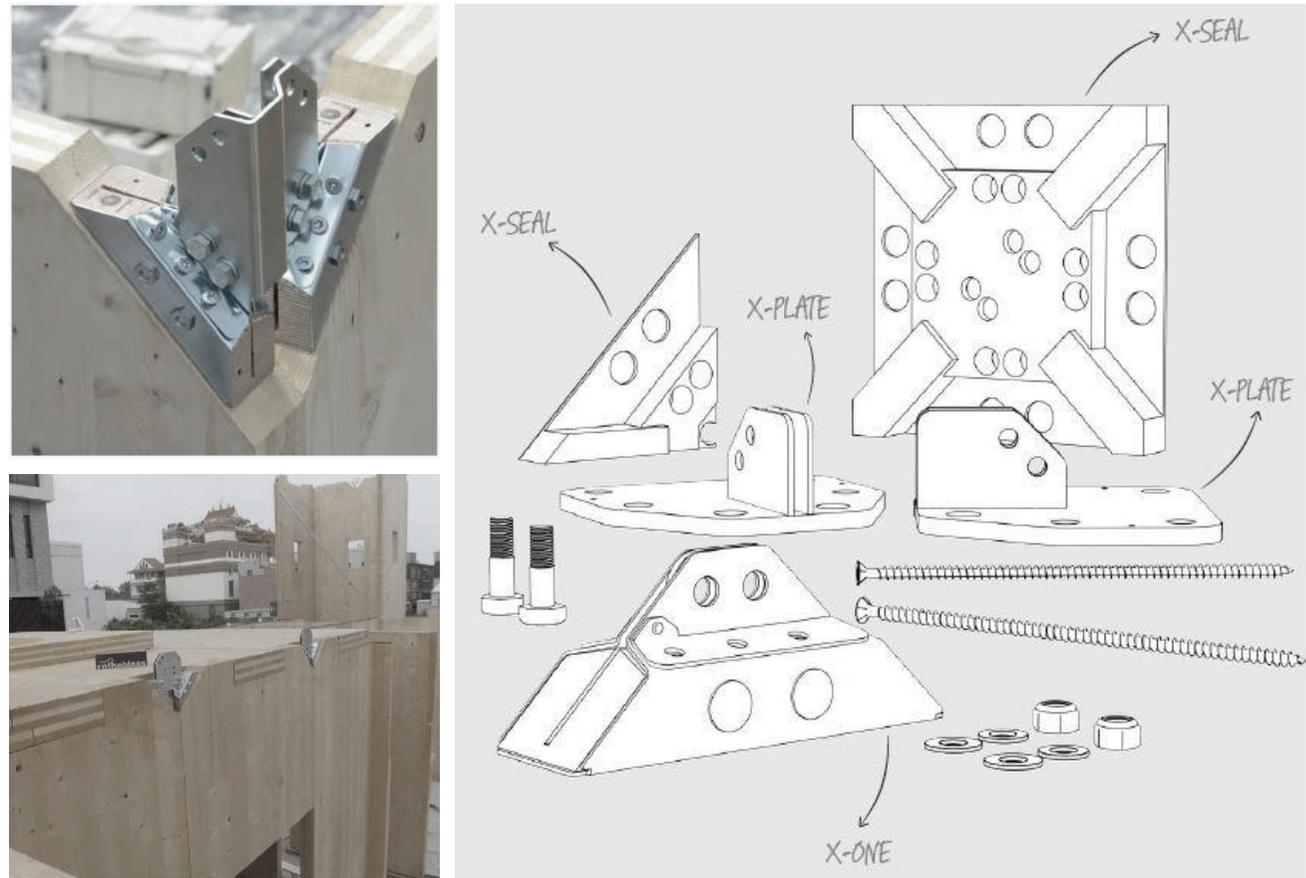


Figura 97. Uniones industrializadas patentadas

#### 4.2.2. EDIFICACIONES CON CLT.

Se propone una breve presentación de varios ejemplos seleccionados en los que destaca el empleo de paneles de madera CLT con el fin de observar las técnicas constructivas y tipo de uso del material en cuestión en cada uno de ellos.

No todos los modelos seleccionados tienen un uso completamente estructural por si solos como se puede observar en el edificio HOHO, en el que se puede observar una colaboración con otros materiales para la creación de núcleos rígidos, y mediante la implementación de la madera conseguir un correcto funcionamiento estructural.

Por último, para la realización de un estudio y análisis más exhaustivo se ha escogido el edificio Stadthaus debido al empleo de los paneles CLT como único elemento estructural en el desarrollo de la edificación en altura, para lo que se estudiarán las uniones aplicadas y se facilitarán las técnicas de cálculo empleadas a día de hoy para aclarar el funcionamiento mecánico de esta técnica.

**HOHO.**

**Arquitecto:** RLP Rüdiger Lainer + Partner.

**Año:** 2017 – 2020.

**Altura:** 84m.

**Pisos:** 24.

**Ubicación:** Vienna, Austria.

**Estructura:** Pilares y vigas a base de madera laminada, forjado y fachada con paneles estructurales de CLT y los núcleos de comunicación de hormigón armado.

Se prescinde de cualquier tipo de revestimiento para dejar vista los elementos de la estructura de madera. Se realiza con la intención de poner en manifiesto la técnica innovadora, la sostenibilidad y la conciliación vida-trabajo.

El edificio contiene oficinas, espacio co-working, hotel, restaurante, apartamentos y equipamientos/ocio.

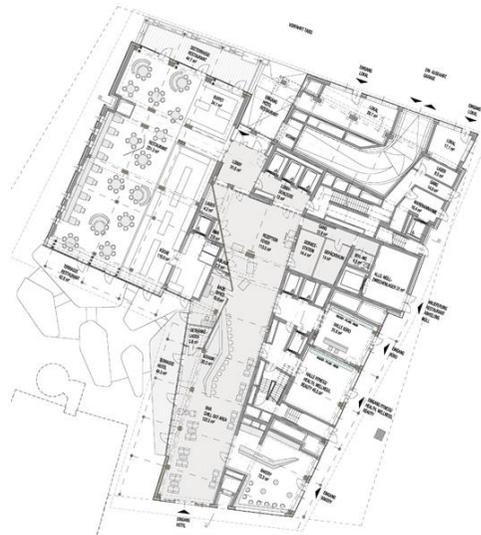


Figura 98. Planta HoHo



Figura 99. Fachada HoHo



Figura 100. Proceso constructivo HoHo

## MJØSTÅRNET.



Figura 101. Fachada Mjøstårnet



Figura 102. Planta tipo Mjøstårnet

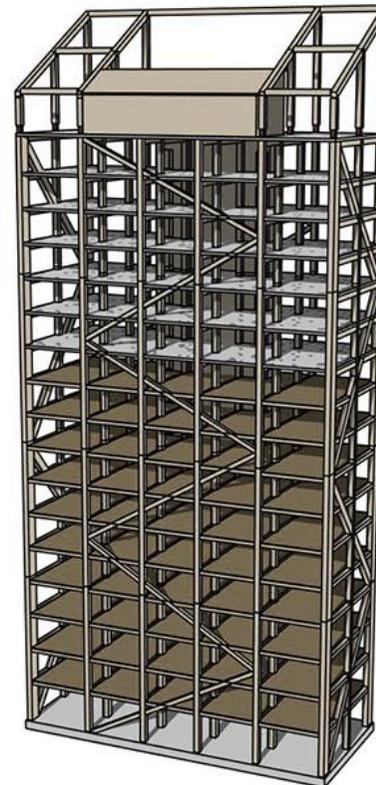


Figura 103. Estructura Mjøstårnet

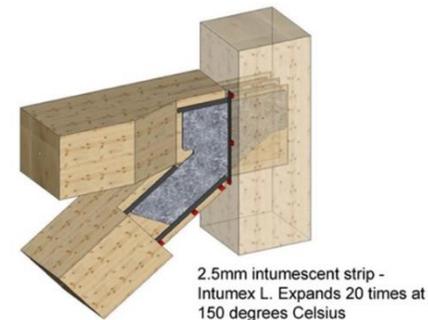


Figura 104. Detalle unión Mjøstårnet

**Arquitecto:** Voll Arkitekter.

**Año:** 2017 – 2019.

**Altura:** 85.4m.

**Pisos:** 18.

**Ubicación:** Brumunddal, Noruega.

**Estructura:** Pilares y vigas son de madera laminada, los núcleos de comunicación están realizados con CLT.

Los forjados de las 10 primeras plantas están formados por madera laminada, madera microlaminada y madera serrada, con aislamiento de lana de roca y una membrana protectora de PVC en la cara superior. Los 7 pisos siguientes están hechos de hormigón armado incrementando el peso para reducir las oscilaciones por viento.

Las uniones son con piezas metálicas ocultas conectando la viga al pilar.

Está hecho de unos 3500 m<sup>3</sup> de madera, unos 14000 árboles.

**BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE.**

**Arquitecto:** Architekten Hermann Kaufmann.

**Año:** 2015 - 2017.

**Altura:** 57.9m.

**Pisos:** 18.

**Ubicación:** Vancouver, Canadá.

**Estructura:** asentamiento de hormigón, dos núcleos de hormigón armado, forjados y fachadas de CLT y pilares de madera laminada unidos entre sí con conectores de acero.

La estabilidad lateral es proporcionada por los núcleos, mientras que las cargas verticales son transportadas por la estructura de madera.

Diseño híbrido que combina madera con hormigón en masa, equiparable en costes de las estructuras realizadas en hormigón o acero.

A través de esta construcción en madera se absorberán 2563 toneladas de carbono.



Figura 105. Plantas Brock Commons

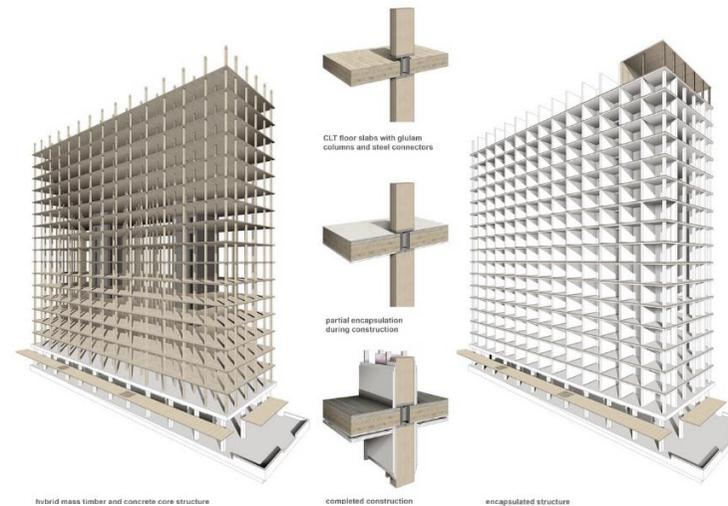


Figura 106. Proceso constructivo Brock Commons



Figura 107. Fachada Brock Commons

**FORTE.**

Figura 108. Planta tipo Forte



Figura 109. Interior Forte



Figura 110. Fachada Forte

**Arquitecto:** Lend Lease.**Año:** 2012.**Altura:** 32.2m.**Pisos:** 10.**Ubicación:** Melbourne, Australia.

**Estructura:** se emplea tableros de madera contralaminada en muros, forjados y núcleos de ascensores, de alrededor 15 cm de espesor.

Con esta construcción de madera se ha reducido 1400 toneladas en emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación si se hubieran realizado con hormigón o acero.

Primer edificio residencial en Australia en lograr la calificación de construcción de 5 estrellas Green Star en el mercado.

#### 4.2.3. EJEMPLO UNIÓN CLT. STADTHAUS, 24 MURRAY GROVE.

**Arquitecto:** Waugh Thistleton Architects.

**Año:** 2007 - 2009.

**Altura:** 30.3m.

**Pisos:** 9.

**Ubicación:** Hoxton, Londres, Reino Unido.

**Estructura:** paneles de madera de contralaminada CLT.

Se considera el edificio residencial más alto realizado en su totalidad con madera CLT.

1<sup>er</sup> edificio en altura de viviendas de alta densidad construido, no solo los muros y forjados sino que también se ha realizado las escaleras y los núcleos de ascensores con madera contralaminada.

Interiores convencionales ocultando la innovación de su estructura.



Figura 111. Fachada Stadthaus

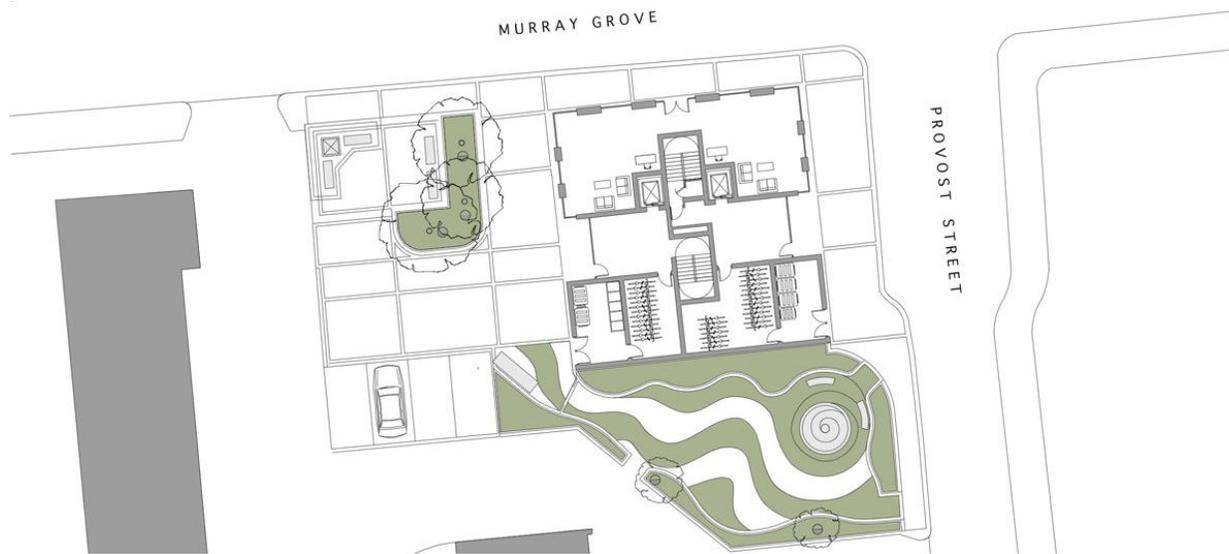


Figura 112. Planta situación Stadthaus

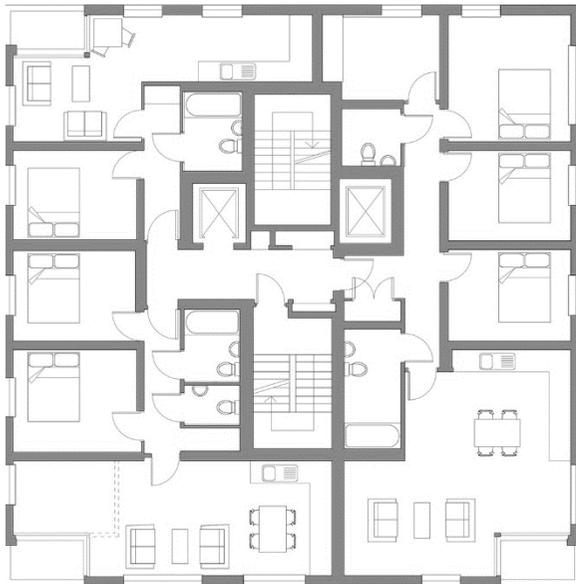


Figura 113. Planta viviendas sociales Stadthaus



Figura 114. Planta venta libre Stadthaus

Stadthaus es considerado el primer edificio en altura construido con paneles prefabricados de madera CLT. La primera construcción de esta altura no solo con muros y forjado de madera sino también las escaleras y el núcleo de los ascensores de CLT.

La planta del edificio tiene una dimensión de 17 x 17 m<sup>2</sup>. La forma en planta del edificio fue fijada por una extrusión del terreno y la altura máxima de nueve plantas por el problema de sombras arrojadas.

Se proyectó con la intención de que la planta baja tuviera locales comerciales, las 3 siguientes plantas destinadas a viviendas sociales y las 5 últimas de venta libre (figura 113 y 114).

La construcción de este edificio de nueve plantas de altura duro 49 semanas.

Este edificio (figura 115) se proyectó con la intención de reducir el impacto ambiental de la arquitectura por lo que se eligió la madera como material principal para la construcción. Se lleva varios años investigando que el uso de las estructuras de madera solidas (figura 116) en viviendas ayuda el medio ambiente pudiendo reemplazar las construcciones de acero y hormigón. De esta manera se consigue reducir el impacto en el planeta, no solo con el uso de la energía necesaria en la vida del edificio, sino también la energía que se gasta para producirlo.

Si se compara con la producción del hormigón o el acero que necesitan una gran cantidad de energía liberando dióxido de carbono a la atmosfera, la madera absorbe 0,8t de carbono en 1m<sup>3</sup>.



Figura 115. Fachada Stadthaus

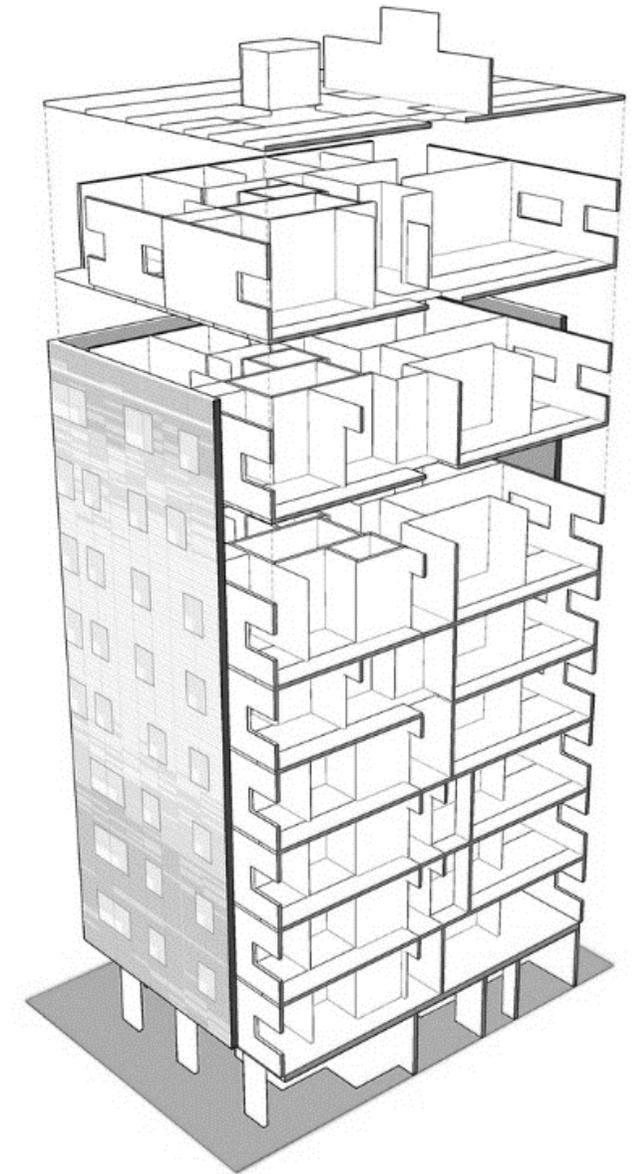


Figura 116. Perspectiva seccionada Stadthaus



Figura 117. Construcción CLT Stadthaus



Figura 118. Interior revestido con placas carton-yeso Stadthaus

Los paneles de madera empleados son de la firma KLH. Está construido con una estructura que utiliza el sistema de paneles de madera contralaminada. El montaje de la estructura tardó 27 días y  $900 \text{ m}^3$  de material. Una ventaja de construir en seco es que el material estructural tiene su máxima resistencia desde el principio, sin esperar tiempos de fraguado para continuar con la construcción.

Las fachadas y los tabiques son estructurales (figura 117) y se revisten con paneles de cartón-yeso (figura 118). Al revestir la madera con cartón-yeso se consigue una alta resistencia al fuego que es necesaria para un edificio residencial.

El aislante que lleva al exterior es de 7 cm, que junto con la madera alcanza un valor  $U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

LEYENDA

1. Carpintería de aluminio.
2. Aislamiento térmico de 7cm.
3. Montante sujeción fachada.
4. Placas de composite de 135\*15cm con unión oculta.
5. Panel CLT 128mm KLH.
6. Aislamiento acústico 5cm.
7. Acabo de suelo madera 15mm.
8. Capa de hormigón 55mm.
9. Banda elástica.
10. Unión de CLT modelo E2/2,5/7090 con clavos aplicados en la parte superior e inferior.
11. Aislamiento acústico 25mm.
12. Panel CLT 146mm KLH.

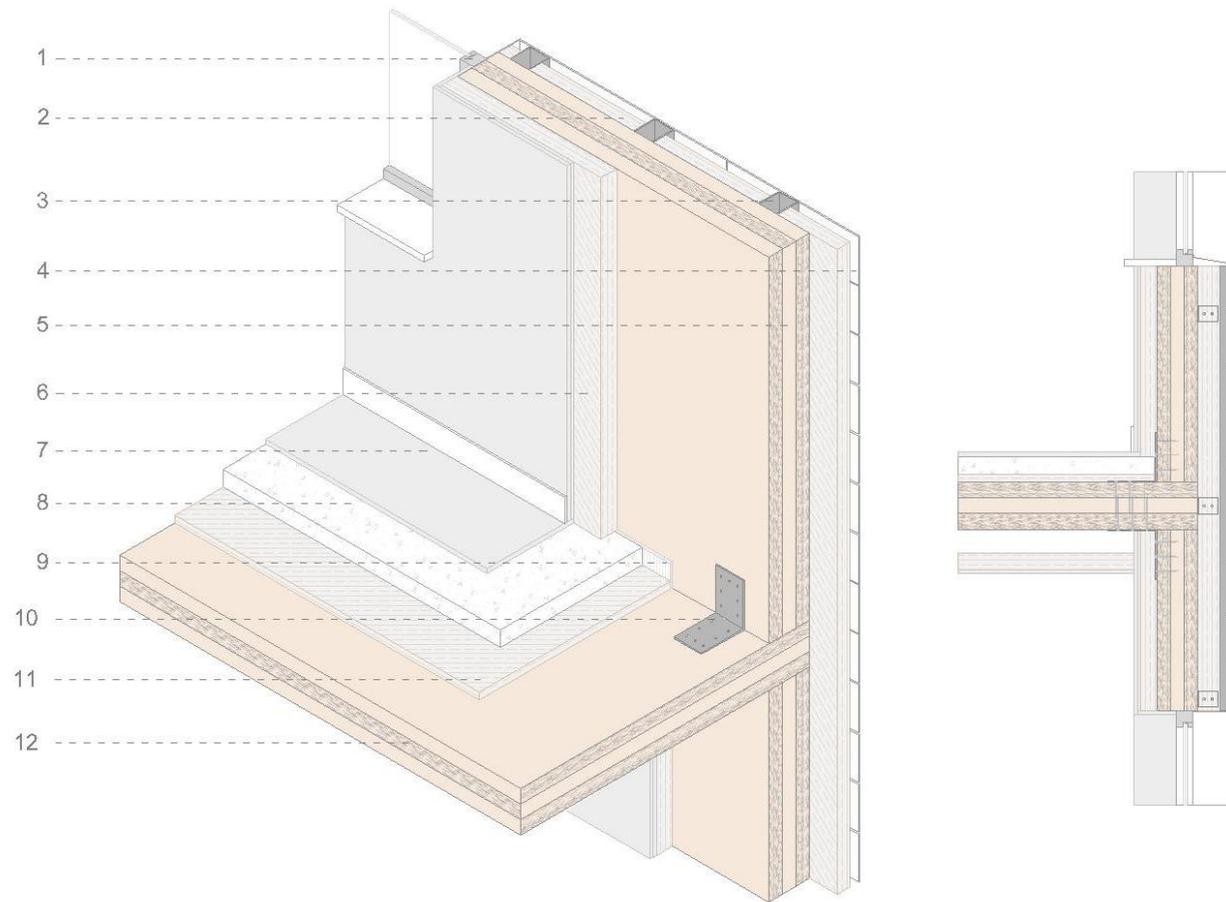


Figura 119. Detalle constructivo tipo de las uniones con herraje metálico edificio y clavos de Stadthaus

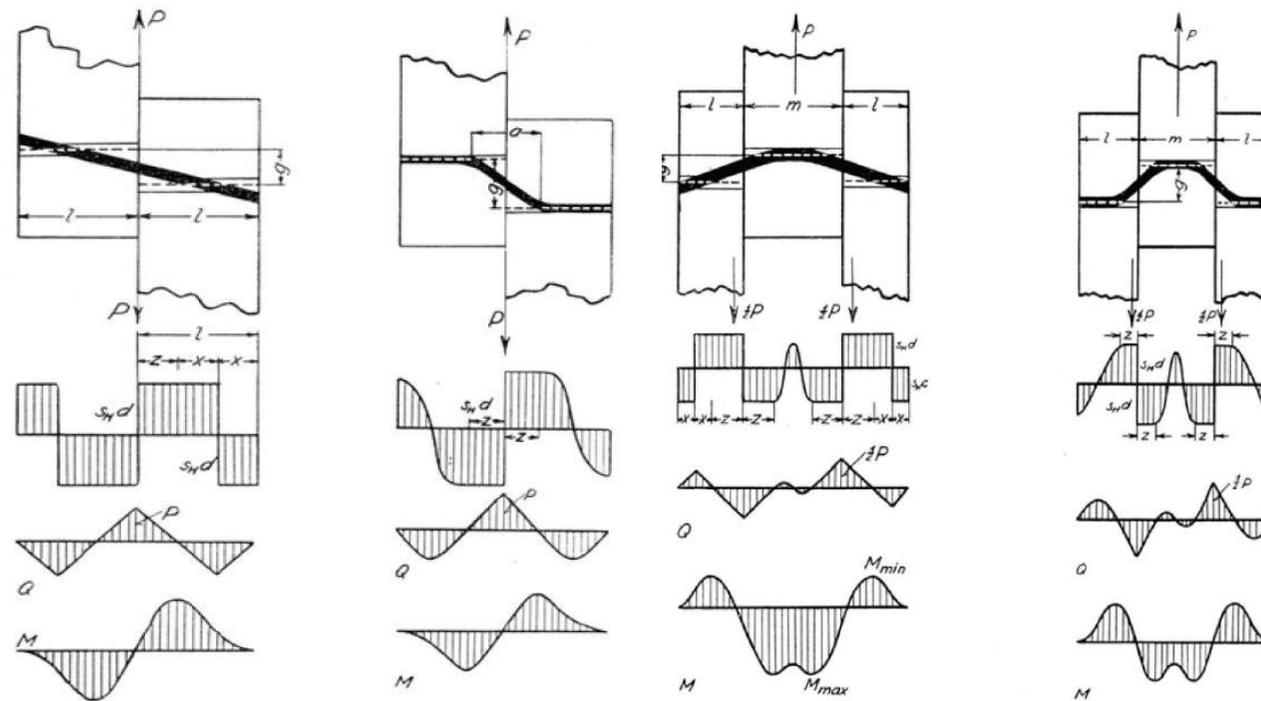
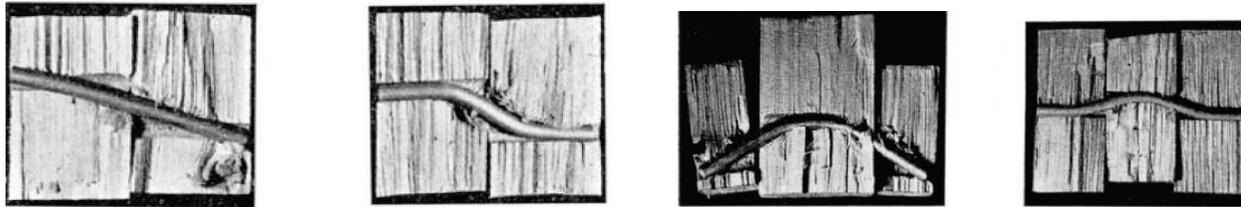


Figura 120. Diferentes configuraciones de la madera y de la deformación de la clavija con gráficas de tensiones

Las uniones de este edificio están realizadas por medio de herrajes metálicos y clavos. Para realizar la explicación de estos tipos se aplicará la teoría de cálculo de uniones con clavija de Johansen, 1949. Esta teoría calcula la carga resultante de la unión dependiendo de las diferentes configuraciones de la madera y de la deformación de la clavija. Teniendo en cuenta esto, la resistencia de la unión se debe a dos componentes:

- Efecto clavija. Depende de la resistencia a flexión de la clavija y a aplastamiento de la madera.
- Efecto tensional. Depende de la resistencia a la tensión de la clavija y presencia de fricción entre las superficies.

Para el estudio de la unión que propuso Johansen se consideran diferentes hipótesis de las tensiones según se deforma la clavija. Actualmente, el “Eurocódigo 5” y el “Código técnico” continúan aplicándolas.

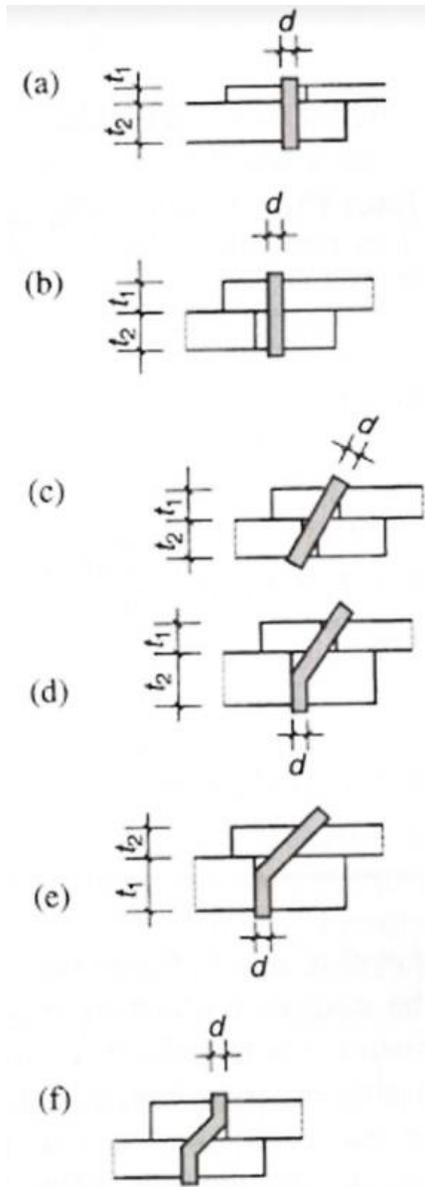


Figura 121. Uniones de madera con madera simple.

Para los cálculos de las uniones con clavija se tiene que tener en cuenta las propiedades de la madera, de las uniones y de la geometría de la unión. Con estos valores se procede a obtener la carga resultante de la unión. Se debe tener en cuenta el fallo por aplastamiento o las roturas plásticas en la unión.

- UNIÓN MADERA – MADERA (SIMPLE).

a. Aplastamiento en pieza de espesor  $t_1$ .

$$R = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \quad \text{Ecuación 26}$$

b. Aplastamiento en pieza de espesor  $t_2$ .

$$R = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \cdot \beta \quad \text{Ecuación 27}$$

c. Aplastamiento en piezas de espesor  $t_1$  y  $t_2$ .

$$R = \frac{f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left\{ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right\} + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \quad \text{Ecuación 28}$$

d. Rótula plástica de clavija en pieza de espesor  $t_2$ .

$$R = \frac{f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) \left\{ \frac{4\beta(2 + \beta)M_y}{f_{h,1} t_1^2 \cdot d} \right\}} - \beta \right] \quad \text{Ecuación 29}$$

e. Rótula plástica de clavija en pieza de espesor  $t_1$ .

$$R = \frac{f_{h,1} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) \left\{ \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_y}{f_{h,1} t_2^2 \cdot d} \right\}} - \beta \right] \quad \text{Ecuación 30}$$

f. Roble rótula plástica en clavija.

$$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_y \cdot f_{h,1} \cdot d} \quad \text{Ecuación 31}$$

- UNIÓN MADERA – MADERA (DOBLE).
  - a. Aplastamiento en piezas laterales.

$$R = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \quad \text{Ecuación 32}$$

- b. Aplastamiento en pieza central.

$$R = 0,5 \cdot f_{h,1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta \quad \text{Ecuación 33}$$

- c. Rótula central en clavija.

$$R = \frac{f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) \left\{ \frac{4\beta(2+\beta)M_y}{f_{h,1} t_1^2 \cdot d} \right\}} - \beta \right] \quad \text{Ecuación 34}$$

- d. Rótulas en clavija central y laterales.

$$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_y \cdot f_{h,1} \cdot d} \quad \text{Ecuación 35}$$

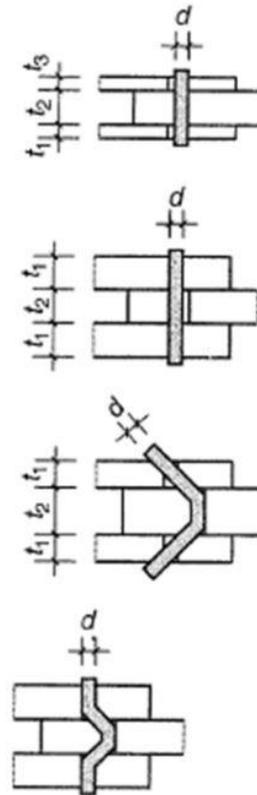


Figura 122. Uniones de madera con madera doble.

- UNIÓN MADERA – ACERO (CHAPA GRUESA SIMPLE)  $t \geq d$ .

- a. Fallo a cortadura simple.

$$R = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \left\{ \frac{4M_y}{f_{h,1} t_1^2 \cdot d} \right\}} - 1 \right] \quad \text{Ecuación 36}$$

$$R = \sqrt{2} \sqrt{2M_y \cdot f_{h,1} \cdot d} \quad \text{Ecuación 37}$$

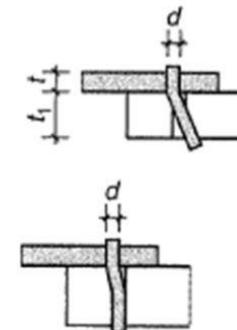


Figura 123. Uniones de madera con chapa de acero gruesa simple

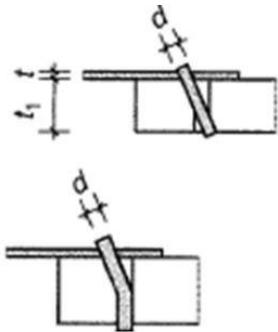


Figura 124. Uniones de madera con chapa de acero delgada simple

- UNIÓN MADERA – ACERO (CHAPA DELGADA SIMPLE)  $t \leq 0,5d$ .
  - a. Fallo a cortadura simple.

$$R = (\sqrt{2}-1) \cdot f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \quad \text{Ecuación 38}$$

$$R = \sqrt{2M_y \cdot f_{h,1}} \cdot d \quad \text{Ecuación 39}$$

- UNIÓN MADERA – ACERO (CHAPA GRUESA DOBLE) cualquier espesor.
  - a. Fallo con chapas gruesas laterales.

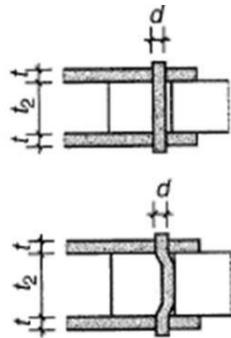


Figura 125. Uniones de madera con chapas de acero gruesas dobles

$$R = 0,5 \cdot f_{h,2} \cdot t_2 \cdot d \quad \text{Ecuación 40}$$

$$R = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2M_y \cdot f_{h,2}} \cdot d \quad \text{Ecuación 41}$$

- UNIÓN MADERA – ACERO (CHAPA DELGADA DOBLE) cualquier espesor.
  - a. Fallo con chapas delgadas laterales.

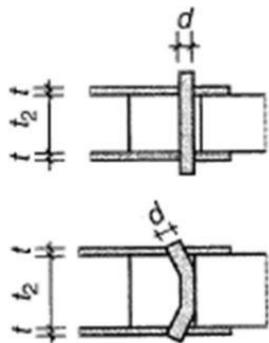


Figura 126. Uniones de madera con chapas de acero delgadas dobles

$$R = 0,5 \cdot f_{h,2} \cdot t_2 \cdot d \quad \text{Ecuación 42}$$

$$R = \sqrt{2M_y \cdot f_{h,2}} \cdot d \quad \text{Ecuación 43}$$

- UNIÓN MADERA – ACERO (CHAPA INTERNA) para placa gruesa  $t \geq d$ , chapa delgada  $t \leq 0,5d$ .
  - b. Fallo a cortadura doble con chapa central.

$$R = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \left\{ \frac{4M_y}{f_{h,1} \cdot t_1^2 \cdot d} \right\} - 1} \right] \quad \text{Ecuación 44}$$

$$R = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2M_y \cdot f_{h,1} \cdot d} \quad \text{Ecuación 45}$$

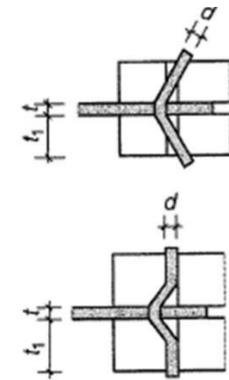


Figura 127. Uniones de madera con chapa de acero interna

De todas las fórmulas de Johansen para el cálculo de la unión que se han mostrado, en este caso, al tener un herraje metálico de poco espesor, se elegiría la unión de madera – acero de chapa delgada simple.

$$R = (\sqrt{2} - 1) \cdot f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \quad \text{Ecuación 38}$$

$$R = \sqrt{2M_y \cdot f_{h,1} \cdot d} \quad \text{Ecuación 39}$$

Siendo,

“t” el espesor de la chapa de acero en mm.

“t<sub>1</sub>” y “t<sub>2</sub>” los espesores de las piezas de madera. Cuando es cortadura doble “t<sub>1</sub>” es el espesor de las piezas laterales.

“f<sub>h,1</sub>” es la resistencia al aplastamiento en la pieza correspondiente con el espesor “t<sub>1</sub>”.

“f<sub>h,2</sub>” es la resistencia al aplastamiento en la pieza correspondiente con el espesor “t<sub>2</sub>”.

“d” el diámetro de la clavija.

“M<sub>y</sub>” es el momento plástico de la clavija.

“β” relación de aplastamiento de las piezas de unión, f<sub>h,2</sub> / f<sub>h,1</sub>.

“R” es la carga resultante al valor de cálculo de cortante para el elemento de unión.

Se elige siempre, la fórmula para calcular la unión que sea la más desfavorable para el caso en particular.

Las uniones con escuadra estructural y clavos funcionan a carga lateral. Cuando la densidad de los paneles de madera sea superior o igual a  $500 \text{ kg/m}^3$ , o el diámetro mayor a 6mm, debe realizarse un taladrado previo en la madera.

- *RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO.*

La resistencia al aplastamiento en clavos con diámetro menor a 8mm se obtiene:

a) Sin taladro previo realizado:  $f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad \text{N/mm}^2$  Ecuación 46

b) Con taladro previo realizado:  $f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad \text{N/mm}^2$  Ecuación 47

- *MOMENTO PLASTICO.*

Hay que tener en cuenta que para los clavos comunes de sección circular con una resistencia mínima a tracción de  $600 \text{ N/mm}^2$ , el momento plástico de obtendrá a través de la siguiente formula aplicando la resistencia a tracción del clavo ( $f_u$ ):

$$M_y = (f_u/600) \cdot 180 \cdot d^{2,6} \quad \text{Ecuación 48}$$

- *SOLAPE DE CLAVOS.*

En las uniones en las que los clavos se introduzcan por ambas caras se pueden solapar en la pieza central, deben de cumplir la distancia  $(t-t_2) > 4 \cdot d$ .

Ecuación 49

- SEPARACIÓN Y DISTANCIA MINIMA DE LOS CLAVOS.

Tabla 15. Separación mínima de los clavos

SEPARACIÓN Y DISTANCIA	ÁNGULO	DISTANCIA MÍNIMA		
		SIN PRETALADRADO		CON PRETALADRADO
		$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$	
$a_{1, \text{ paralela a la fibra}}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$d < 5\text{mm}; (5+5\cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}; (5+7\cos \alpha)d$	$(7+8\cos \alpha)d$	$(4+\cos \alpha)d$
$a_{2, \text{ perpendicular a la fibra}}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	5d	7d	$(3+\cos \alpha)d$
$a_{3,t, \text{ testa cargada}}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(10+5\cos \alpha)d$	$(15+5\cos \alpha)d$	$(7+5\cos \alpha)d$
$a_{3,c, \text{ testa no cargada}}$	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	10d	15d	7d
$a_{4,t, \text{ borde cargado}}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$d < 5\text{mm}; (5+2\cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}; (5+5\cos \alpha)d$	$d < 5\text{mm}; (7+2\cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}; (7+5\cos \alpha)d$	$d < 5\text{mm}; (3+2\cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}; (3+4\cos \alpha)d$
$a_{4,c, \text{ borde no cargada}}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	5d	7d	3d

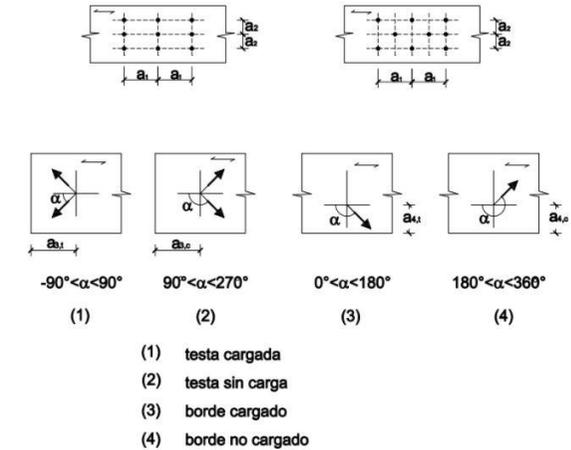


Figura 128. Separación mínima de los clavos

Las separaciones que se han indicado en la tabla anterior son las distancias aplicadas a las uniones clavadas de madera – madera. Para las uniones donde interviene el acero, los resultados de la tabla 15 deberán de multiplicarse por un factor de 0,7. Los herrajes metálicos, al ser una escuadra estructural industrializada, las separaciones vienen asignadas en ella, cumpliendo las distancias mínimas necesarias para el correcto funcionamiento.

- DISPOSICIÓN CONSTRUCTIVA.

Para el taladro previo, el diámetro a realizarse tendrá un valor entre 0,7d y 0,8d. Salvo que se especifique lo contrario en el tipo de unión, los clavos deben introducirse perpendicular a la fibra de la madera y con profundidad de manera que la superficie de la cabeza del clavo quede enrasada.





## 5. DISCUSIÓN.

En los capítulos anteriores se han expuesto los orígenes de dos sistemas constructivos de edificación en altura con materiales y tipología constructiva muy diferentes; las primeras construcciones en altura en acero de finales del S.XIX (Estados Unidos) y las primeras edificaciones en altura en madera industrializada (CLT) de finales del S.XX (Europa). Materiales, tecnología, sistema estructural,... incluso épocas, sin aparente conexión posible que se han pretendido comparar a partir de uno de sus elementos constructivos más básicos y determinantes; sus uniones estructurales.

En ambos casos las uniones analizadas responden a las primeras, y quizá poco evolucionadas, soluciones de unión; y en ambos casos responden a la necesidad de montar y unir en obra, “fácil” y “eficientemente”, piezas estructurales industrializadas (perfiles metálicos en un caso, paneles CLT en otro) acopiadas en obra con dimensiones, mecanizados y herrajes ya realizados previamente en taller. Se trataría por tanto más propiamente de “ensamblar” en obra una estructura que de “construirla”. Además de responder a una primera solución para resolver las uniones de una nueva tipología constructiva (edificación en altura), ambas uniones (roblonadas en acero / herrajes clavados en madera) trabajan fundamentalmente bajo esfuerzos de cortante (cizalla) al no ser capaces este tipo de uniones de asumir tracciones elevadas de forma solvente y segura. Este quizá sea el punto de mayor proximidad entre ambas.

Por otro lado, la problemática real de la edificación en altura desde el punto de vista estructural no es “solo” asumir las elevadas tensiones de compresión que pueden acumularse en plantas bajas, sino “ante todo” resolver los problemas de inestabilidad global generada por los empujes de viento (o incluso sismo) que se multiplican al aumentar la altura de la estructura. Ante este problema existen diferentes soluciones, siendo la combinación de uniones articuladas (total o parcialmente) y elementos arriostrantes (cruces, diafragmas,

núcleos rígidos,...) sin duda la más básica. Y por supuesto más económica que la de intentar resolver el problema recurriendo a complejos y masivos nudos rígidos. En ambos casos, tanto en los primeros edificios en altura en acero y como en madera, este será un nexo común a la hora de enfrentarse a las uniones estructurales; uniones sencillas y elementos secundarios arriostrantes.

#### - PROPIEDADES MECÁNICAS.

Aparentemente las propiedades del acero y de la madera son antagónicas. El acero representa a un material industrial (no existe acero de forma natural), relativamente moderno, homogéneo, de altas prestaciones y alta rigidez. Mientras que la madera representa a un material natural, presente en estructuras desde el origen de la construcción, heterogéneo, anisótropo, con una resistencia limitada y una rigidez baja (o incluso muy baja dependiendo de la especie). No obstante, en su aplicación estructural la eficacia y eficiencia de ambos materiales se aproximan mucho más de lo que esperaríamos a primera vista.

Tabla 16. Comparación de las propiedades mecánicas de acero y de madera

	Resistencia Compresión (MPa)	Rigidez (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Relación resistencia/peso (-)	Relación rigidez/peso (-)	Altura máxima colapso a su propio peso (m)
Acero	275	210.000	7850	0.035	26.75	3500
Madera	24	11600	480	0.05	24.16	5000
<b>Comparación madera-acero</b>	Acero 11 veces más resistente	Acero 18 veces más rígido	Acero 16 veces más pesado	La madera es 1.4 veces mejor	El acero es 1.1 veces mejor	

Si bien es cierto que al comparar las propiedades mecánicas del acero y la madera (Tabla XX) de una forma directa (MPa/MPa), el acero es un material más resistente (11 veces) y más rígido (18 veces) que la madera. Sin embargo, también es mucho más denso (16 veces) que la madera por lo que comparamos la resistencia del cada material en relación a su densidad, esta aparente superioridad del acero se ve condicionada. En relación prestaciones mecánicas/peso la madera es superior en resistencia (1.4 veces) y semejante en rigidez al acero; siendo además uno de los materiales estructurales con mejor relación de todos los utilizados actualmente; solamente superado por los polímeros (fibras de carbono, vidrio, etc), aunque a un coste infinitamente superior.

Por estas razones, en aquellas estructuras en las cuales el peso propio de la estructura es determinante sobre el resto de acciones; por ejemplo estructuras de gran luz o estructuras de gran altura, la madera puede ser tan competitiva (o incluso mejor) que el acero.

En este sentido el único límite real para el uso de madera en edificaciones en altura, único pero no por ello sencillo, es la elevada tensión que debe soportar la estructura en las plantas bajas. Debido a la inferior resistencia de la madera respecto al acero, se necesitará un aumento significativo de la sección, aunque el menor peso de la estructura de madera del edificio en su conjunto, también sea menor. En este sentido, nuevamente la ligereza de la madera es una ventaja que reduce (aunque no elimina) las elevadas tensiones de compresión que deben soportar en planta baja este tipo de edificaciones, y la hacen viable como material estructural en este tipo de edificios.

## - SISTEMA CONSTRUCTIVO.

Los elementos estructurales industrializados en ambos materiales representan dos sistemas constructivos antagónicos; la edificación en altura en acero se realiza con elemento puntuales (perfiles) que concentran la carga en pequeñas secciones, permitiendo grandes espacios libres, flexibilidad en la distribución, tamaño, forma y materialidad de los espacios. Por el contrario, la edificación en altura en madera masiva analizada se realiza con elemento murarios (paneles CLT) que reparten las cargas a lo largo de todo el muro y reducen la tensión final del material.

En este sentido, pese a que ambos sistemas constructivos resuelven la edificación en altura, los edificios en madera presentan una limitación en la distribución y futuros cambios de uso al no poder eliminar muros ni poder generar espacios libres con la libertad del acero. Este punto obliga, en la actual configuración de construcción con paneles CLT, a destinar este tipo de edificios principalmente a viviendas.

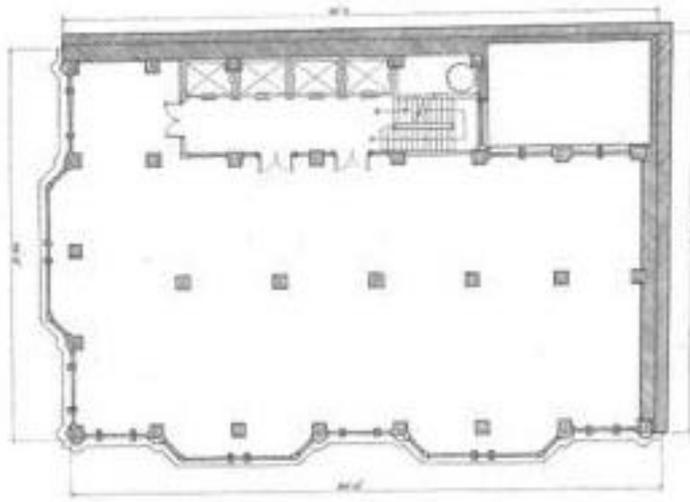


Figura 129. Planta ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT

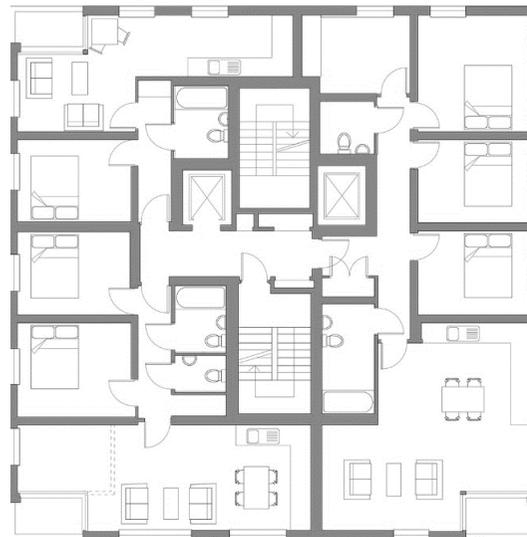


Figura 130. Planta Stadthaus

- **UNIONES.**

Las uniones analizadas son uniones parcialmente articuladas, donde si bien es cierto que se limita el giro parcialmente, la unión es incapaz por sí sola de generar un nudo rígido siendo preciso la aparición de elementos de arriostramiento secundarios (diagramas o cruces) para resolver la estabilidad global del edificio. Respecto a los principales esfuerzos a los que se ven sometidas en ambas uniones es a cortante (cizalla).

Sin embargo, más allá de estas similitudes cada tipo de unión presenta un comportamiento sensiblemente diferenciado. Las uniones roblonadas se resuelven con pasadores (roblones) de diámetro grueso, poco número, y con unas prestaciones mecánicas elevadas. Cada uno de los roblones puede soportar una gran tensión a cortante, por lo que cada unión es capaz de asumir una gran carga. Además, las uniones roblonadas atraviesan y unen piezas del mismo material (chapa de acero), con la gran rigidez y deformación limitada. Esto, unido a las tensiones de compresión perpendicular que genera cada roblón al enfriarse ofrece uniones que pueden llegar a ser realmente rígidas y capaces estructuralmente.

Por el contrario, las uniones en CLT analizadas, se resuelven con muchas pequeñas uniones de herrajes metálicos de chapa de pequeño espesor (2-3mm) ancladas con gran número de clavos estriados de pequeño diámetro (6-8 mm). Por sí solas las uniones son incapaces de soportar más allá de las pocas decenas de kN antes de colapsar. Además, otra diferencia importante respecto a las uniones roblonadas es que en este caso se unen dos materiales distintos, acero y madera; por lo que el comportamiento final de la unión se verá comprometido por el comportamiento propio de cada tipo de madera. Así especies de madera de mayor densidad (y por ello normalmente de mayor rigidez y resistencia), son capaces de asumir un mejor comportamiento en el conector, deformando menos el fuste del clavo, y permitiendo una mayor rigidez de la unión en su conjunto. Como se mostró con las ecuaciones de Johansen, el comportamiento de la unión; su

resistencia y rigidez final, depende inevitablemente más de la propia madera que de las prestaciones mecánicas, diámetro o longitud del propio clavo.

Por todo ello, existe una gran diferencia, insalvable desde el punto de vista de resistencia o rigidez comparada, entre las primeras uniones roblonadas de la edificación en altura y las primeras uniones para madera CLT.

No obstante, existe otro punto muy interesante, más allá de la propia unión, y es la evolución esperable en las uniones de madera. Como se ha expuesto en el TFG, las uniones roblonadas son un tipo de uniones de hace casi un siglo, y que pese a ser eficaces y eficientes han evolucionado en otras soluciones que permiten esfuerzos tanto de cortante como de tracción; las uniones atornilladas (obra) y la soldadura (taller). Las uniones en madera deben indefectiblemente seguir una evolución similar, desarrollándose soluciones atornilladas (tirafondos) como evolución y unión generalista en detrimento de las actuales uniones con herrajes ligero y clavo. Pero, además, a diferencia del acero donde la soldadura estructural en obra debe, en la medida de lo posible, evitarse y limitarse a talleres con los adecuados controles de calidad; en la madera la “soldadura en obra” es posible y viable. El uso de adhesivos de altas prestaciones mecánicas, curado en condiciones ambientales, y sin necesidad de prensado (adhesivos epoxi), unido a las bajas prestaciones mecánicas de la madera en comparación con el acero, permitiría realizar con garantías de éxito uniones encoladas en obra. Si bien estas uniones encoladas deberán recurrir a elementos intermedios como conectores tipo barra (metálicas, carbono, fibra de vidrio, o incluso de madera de altas prestaciones) para facilitar el montaje y garantizar unas longitudes mínimas de interacción entre adhesivo y madera. Estas uniones encoladas son mucho más rígidas que las actuales uniones de herraje y clavo, y permitirían optimizar y aumentar la resistencia y rigidez global. Sin embargo, el uso extensivo y habitual de este tipo de uniones necesita aún continuar evolucionado.

- **ARRIOSTRAMIENTO.**

Como hemos observado a lo largo del TFG, las uniones analizadas no permiten por sí solas resolver la estabilidad global del edificio. Necesitan obligatoriamente de unos elementos secundarios de arriostramiento.

En el caso de los edificios de acero analizados, en un inicio para los edificios de menor altura la propia fachada de ladrillo, de gruesos muros de ladrillo, permitía arriostrar al edificio. Una solución poco eficiente y masiva que no permitía resolver con seguridad más allá de la poca decena de metros. Posteriormente, y poco a poco, se introducen arriostramientos en cruces metálicas, núcleos de comunicación cada vez más rígido,... Y que durante es S.XX se irán evolucionando hasta las actuales, ingeniosas y complejas, soluciones de arriostramiento de los grandes rascacielos.

En los edificios de madera masiva con paneles CLT analizada los problemas de arriostramiento se resuelven con los propios paneles, colocado a 90º y funcionando como diafragmas rígidos. La sencillez que permiten los paneles CLT para resolver de forma eficiente este problema implica, por el contrario, una debilidad que difícilmente puede superarse; las plantas del edificio se llenan de muros estructurales en varias direcciones que, al aumentar de altura necesariamente aumentan en espesor y presencia en las plantas bajas del edificio para asumir su cometido arriostrante. Este sistema murario en varias direcciones, más parecido a las estructuras de fábrica tradicionales que a la de los grandes rascacielos de acero, es el verdadero talón de Aquiles de la actual construcción con paneles CLT.

## - SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS FUTURAS.

Analizando la evolución que ha sufrido la edificación en acero desde sus inicios hasta la actualidad, no cabe duda de que la construcción con madera debe (y lo hará sin duda) evolucionar hacia nuevas soluciones constructivas. El actual sistema de madera masiva con paneles CLT es seguro, de rápido montaje y suficientemente económico; pero la necesidad de utilizar los paneles como estructura vertical (muro) y arriostrante (diafragma) limita la posibilidad de continuar aumentando su altura de forma significativa.

Por ello, debemos nuevamente mirar hacia los sistemas en altura de acero para aprovecharnos de sus aciertos y evitar sus errores. Para alcanzar alturas competitivas con el acero, debe recurrirse a estructuras mixtas, donde la madera asuma los esfuerzos de compresión y flexión, y otro material (¿hormigón?) solvente el arriostramiento general del edificio a través de elementos rígidos y masivos (¿núcleos de comunicación?). En la fig.131 se muestran algunos sistemas constructivos mixtos madera/hormigón que permitirían aumentar significativamente la altura actual de la edificación en altura en madera.

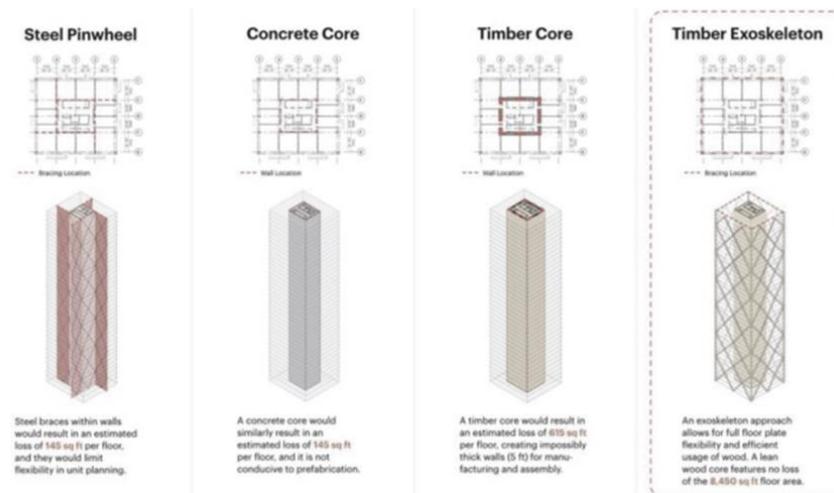


Figura 131. Configuraciones estructurales de edificación en altura





## 6. CONCLUSIÓN.

Después del estudio y análisis realizado de ambos materiales respecto a su aplicación en la edificación en altura, y sus diferentes soluciones constructivas, las aparentes diferencias entre ambos no están tan alejadas como cabría pensar en un principio. Las principales conclusiones alcanzadas son las siguientes:

- De las técnicas constructivas analizadas en acero y madera (CLT) para la edificación en altura, se puede observar que debido a las diferentes propiedades de cada material presentan soluciones diferentes; puntuales frente a muros, y difieren entre sí en otros aspectos importantes tales como uniones y arriostramientos. Aunque exista una necesidad aparentemente de utilizar mayores secciones de madera para alcanzar alturas similares a las del acero, a día de hoy, con la relativamente limitada altura de los primeros edificios en altura en madera (similares a los primeros edificios en altura en aceros), la madera es competitiva frente a otros materiales empleados en las grandes estructuras en altura.
- Aunque la resistencia y rigidez de la madera sean inferiores a la del acero, si se comparan estas prestaciones mecánicas en relación entre la densidad y la resistencia, la madera presenta una eficacia similar e incluso superior al acero. Por esta razón, la madera industrializada (en este caso CLT), junto con su sistema constructivo que funciona estructuralmente repartiendo los esfuerzos como si de muros de carga se tratase, se muestra como un material provechoso para su uso en grandes estructuras en altura.
- No se trata de desvalorizar al acero si no de potenciar el uso de la madera nuevos retos constructivos como la edificación en altura, donde el empleo de la madera como material natural tiene ventajas tales como eficiencia estructural, material sostenible y de impacto ambiental nulo, retenedor de CO<sub>2</sub> y con unas propiedades térmicas y acústicas muy favorables.

- Si bien los diseños actuales de edificios en altura con madera (CLT) son eficientes y económicamente viables, la evolución de la edificación en altura con estructuras de acero demuestra que para alcanzar alturas más importantes deberá recurrirse a sistemas mixtos, con núcleos o elementos masivos de otros materiales que ayuden a soportar la estabilidad global del edificio frente a acciones horizontales desestabilizadoras (viento, sismos,...)
- Del mismo modo, las principales uniones actualmente utilizadas en CLT, herrajes ligeros y clavos, deberán evolucionar hacia uniones más eficientes y rígidas. En este sentido las uniones encoladas con adhesivos de altas prestaciones (epoxi) pueden suponer una revolución en este tipo de edificaciones.

Por tanto, se puede deducir que la diferencia de tiempo con el que se lleva empleando el acero en edificaciones en altura (más de un siglo), frente a los escasos años que se lleva utilizando la madera con los mismos fines, puede ser un factor determinante para aprender de los logros y errores, potenciar las evoluciones de los sistemas constructivos actuales hacia otros más eficientes estructuralmente, y conseguir que, en un futuro próximo, la madera puedan llegar a remplazar a muchos de los materiales empleados actualmente en la construcción.





## 7. BIBLIOGRAFÍA.

### LIBROS.

Departamento de medio ambiente, planificación territorial, agricultura y pesca, (2010), *Arquitectura y madera. Guía de diseño de elementos estructurales adaptada al cte.*, Victoria-Gasteiz, Gobierno Vasco.

Mario Hernández, (1990), *El hierro en la Construcción*, Barcelona, Ediciones CEAC.

Jean-Pierre Jaspart, Klaus Weynand, (2016), *Design of Joints in Steel and Composite Structures*, ECCS.

Borjen Yeh; Dave Kretschmann; Brad (Jianhe) Wang, 2013, *CLT handbook: cross-laminated timber*, Canada, U.S.

FSC España, 2018, *En Madera, otra forma de construir. El material constructivo del siglo XXI*, Madrid.

Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA), *Tomo 13, Diseño de Uniones*.

Guía para edificios en CLT, Rothoblass.

Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), *Steel Construction Manual*, Munich, GmbH.

Adif, (2001), *Estructuras metálicas. Medios de Unión. Roblones y tornillos*, NAP 2-1-2.1.

AiTIM, (2008), *Productos de la madera para la arquitectura*.

Egoín, (2016), *Prontuario Técnico para la construcción con Paneles de Madera Contralaminados EGO CLT*, País Vasco.

Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA), *Tomo 1, Construcción en acero. Factores económicos y comerciales.*

Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA), *Tomo 2, Construcción en acero. Introducción al diseño.*

### **TESIS, TRABAJOS, REVISTAS Y PUBLICACIONES ACADÉMICAS.**

*Antecedentes históricos del acero.*

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5193/02\\_Memorial.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5193/02_Memorial.pdf)

Diego García-Setién Tenol, (2015), *TRANSARQUITECTURA.*

Francisco Ant<sup>o</sup> GarcíaPérez, Bernardino LíndezVílchez, (2013), *Historia de la Arquitectura II. Tema 5. Arquitectura y Ciudad en los EEUU. De los orígenes a la Escuela de Chicago*, Granada.

Bernardino LíndezVílchez, (2009), *Evolución del tipo estructural “torre” en España*, Madrid.

Álvaro Picazo Iranzo, (2007), *Medios de unión de estructuras metálicas.* Madrid.

José Enrique Martínez Gayá, *Madera en altura*, Madrid.

Amaya Álvarez del Río, (2016), *El panel de la madera contralaminada*, Valladolid.

Manuel Domínguez Lorenzo, (2015), *Estudio de uniones en estructuras de madera con uso de elementos clavija*, Zamora.

## PÁGINAS WEB

- <http://www.demaravilla.com/vivir-nubes-evolucion-rascacielos-lujo/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Primeros\\_rascacielos](https://es.wikipedia.org/wiki/Primeros_rascacielos)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Elisha\\_Graves\\_Otis](https://es.wikipedia.org/wiki/Elisha_Graves_Otis)
- <https://www.emagister.com/blog/escuela-chicago-inicios-del-mundo-contemporaneo/>
- <https://debabilonia.info/la-torre-de-babel/>
- [https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553167229\\_981390.html](https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553167229_981390.html)
- <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-44191/historia-del-acero>
- [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5193/02\\_Memorial.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5193/02_Memorial.pdf)
- <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-7.pdf>
- <http://estructurasacero.blogspot.com/2007/06/ventajas-y-desventajas-del-uso-de-acero.html>
- <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn35.html>
- <https://maderame.com/construcciones-madera/>
- <https://es.calameo.com/read/000764082958cef3872b1?authid=bCx9NNBOfedn>

## FOTOGRAFÍAS

### • Antecedentes

- Figura 1. Torre BBVA. <http://ingenieria-civil.org/GOING/obra.php?id=105>
- Figura 2. Torres Petronas. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/torres-petronas/#petronas-towers-cesar-pelli-kuala-lumpur-malaysia-wikiarquitectura-21>
- Figura 3. Shanghai Tower. <http://www.tekton.es/construcciones-acero-singulares-la-shanghai-tower/>
- Figura 4. Torre de Babel, año 1750 a.C. <https://debabilonia.info/la-torre-de-babel/>
- Figura 5. Pirámide de Keops, año 2570 a.C. <https://www.culturagenial.com/es/piramides-de-egipto/>
- Figura 6. Faro de Alejandría, año 280 a.C. [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/faro-alejandria-luz-mediterraneo\\_14214/1](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/faro-alejandria-luz-mediterraneo_14214/1)
- Figura 7. Skyline de los rascacielos de mayor altura. <https://www.skyscrapercenter.com/tallest-in-2020>
- Figura 8. Chicago antes del incendio. <http://algargosarte.blogspot.com/2014/10/la-escuela-de-chicago-el-origen-de-los.html>
- Figura 9. Chicago durante el incendio. <http://algargosarte.blogspot.com/2014/10/la-escuela-de-chicago-el-origen-de-los.html>
- Figura 10. Chicago después del incendio. <http://algargosarte.blogspot.com/2014/10/la-escuela-de-chicago-el-origen-de-los.html>
- Figura 11. Edificio en construcción en Chicago. <http://algargosarte.blogspot.com/2014/10/la-escuela-de-chicago-el-origen-de-los.html>
- Figura 12. Exposición del New York Crystal Palace en 1854. Invención del ascensor. <https://www.brandstocker.com/otis-y-el-origen-del-ascensor/>
- Figura 13. Fachada Home Insurance Building. <http://architectuul.com/architecture/home-insurance-building>
- Figura 14. Edificio Auditorium. <https://www.artehistoria.com/es/obra/auditorium-building-chicago>
- Figura 15. Edificio Flatiron. <https://megaconstrucciones.net/?construccion=edificio-flatiron>
- Figura 16. Edificio Rockeller Center. [https://es.wikipedia.org/wiki/Rockefeller\\_Center](https://es.wikipedia.org/wiki/Rockefeller_Center)
- Figura 17. Edificio Mjøstårnet. <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter>
- Figura 18. Edificio Brock Commons. <https://www.structuremag.org/?p=11624>
- Figura 19. Edificio 65 viviendas en Hondarribia. <https://egoin.com/portfolio/hondarribia-visesa-vpo/>

### • Acero

- Figura 20. Edificio Chrysler. [https://es.wikipedia.org/wiki/Edificio\\_Chrysler](https://es.wikipedia.org/wiki/Edificio_Chrysler)
- Figura 21. Edificio Empire State Building. [https://es.wikipedia.org/wiki/Empire\\_State\\_Building](https://es.wikipedia.org/wiki/Empire_State_Building)
- Figura 22. Diagrama constitución para hierro-carbono. Schultz, Sobek, Habermann, (2000), *Steel Construction Manual*, Munich, GmbH. (pág. 80).
- Figura 23. Proceso de fabricación del acero. Los altos hornos. [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/406/contenido\\_publico/recursos/tema00.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/406/contenido_publico/recursos/tema00.pdf)
- Figura 24. Ejemplo de horno eléctrico. Schultz, Sobek, Habermann, (2000), *Steel Construction Manual*, Munich, GmbH. (pág. 82)
- Figura 25. Fases de fabricación del acero por hornos eléctricos. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-7.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Figura 26. Proceso de laminación del acero. [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/406/contenido\\_publico/recursos/tema00.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/406/contenido_publico/recursos/tema00.pdf)  
Schultz, Sobek, Habermann, (2000), *Steel Construction Manual*, Munich, GmbH. (pág. 85)
- Figura 27. Evolución de los diagramas tensión-deformación de hierro y acero. Schultz, Sobek, Habermann, (2000), *Steel Construction Manual*, Munich, GmbH. (pág. 11)
- Figura 28. Unión roblonada. Schultz, Sobek, Habermann, (2000), *Steel Construction Manual*, Munich, GmbH. (pág. 124)
- Figura 29. Unión atornillada. Schultz, Sobek, Habermann, (2000), *Steel Construction Manual*, Munich, GmbH. (pág. 128)

- Figura 30. Unión soldada. Álvaro Picazo Iranzo, (2007), Medios de unión de estructuras metálicas. Madrid. (pág. 10)
- Figura 31. Tipos de roblones según la forma de la cabeza. Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 124)
- Figura 32. Diferentes posiciones de los roblones en las uniones. Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 17)
- Figura 33. Proceso de roblonado. <https://www.youtube.com/watch?v=vhSuL1cVStk>
- Figura 34. Tipo de tornillos. Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 129)
- Figura 35. Diferentes uniones de roblones y soldadura. Mario Hernández, (1990), El hierro en la Construcción, Barcelona, Ediciones CEAC. (pág. 19)
- Figura 36. Uniones soldadas eficaces y menos eficaces. Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 133)
- Figura 37. Distribucion de esfuerzos en uniones soldadas. Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 133)
- Figura 38. Cargas aplicadas a las uniones soldadas. Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 133)
- Figura 39. Fachada Home Insurance Building. <https://acerobsv.com/blog/insurance-building.html>
- Figura 40. Contrucción Home Insurance Building. <https://acerobsv.com/blog/insurance-building.html>
- Figura 41. Plantas Home Insurance Building. <https://sites.google.com/site/homeinsurancebuilding/03-programa>
- Figura 42. Detalle Home Insurance Building. <https://sites.google.com/site/homeinsurancebuilding/03-programa>
- Figura 43. Fachada The Rookery Building. <http://www.architecture.org/learn/resources/buildings-of-chicago/building/the-rookery/>
- Figura 44. Planta The Rookery Building. [https://www.slideshare.net/a\\_luengogil/131-la-escuela-de-chicago](https://www.slideshare.net/a_luengogil/131-la-escuela-de-chicago)
- Figura 45. Alzado, sección The Rookery Building. [https://www.pinterest.es/pin/570057265319279588/?nic\\_v2=1a581NQPT](https://www.pinterest.es/pin/570057265319279588/?nic_v2=1a581NQPT)
- Figura 46. Sección Auditorium Building. <https://funcionlenguaje.com/index.php/es/sala-de-lectura/noticias/451-louis-sullivan-la-poesia-de-los-rascacielos.html>
- Figura 47. Fachada Auditorium Building. <https://sites.google.com/site/arquitectolouishsullivan/home/analisis-de-auditorium-building>
- Figura 48. Planta Auditorium Building. <https://sites.google.com/site/arquitectolouishsullivan/home/analisis-de-auditorium-building>
- Figura 49. Planta Monadnock Building. <https://en.wikiarquitectura.com/building/the-monadnock-block-phase-1/#>
- Figura 50. Fachada Monadnock Building. [https://es.wikipedia.org/wiki/Monadnock\\_Building](https://es.wikipedia.org/wiki/Monadnock_Building)
- Figura 51. Sección Monadnock Building. <https://en.wikiarquitectura.com/building/the-monadnock-block-phase-1/#>
- Figura 52. Detalle Monadnock Building. <https://en.wikiarquitectura.com/building/the-monadnock-block-phase-1/#>
- Figura 53. Planta Reliance Building. [https://ar.pinterest.com/pin/111041947044762594/?nic\\_v2=1a581NQPT](https://ar.pinterest.com/pin/111041947044762594/?nic_v2=1a581NQPT)
- Figura 54. Fachada Reliance Building. <http://asombrosaarquitectura.blogspot.com/2014/07/edificio-reliance-reliance-building.html>
- Figura 55. Fachada Manhattan Building. <https://en.wikiarquitectura.com/building/manhattan-building-chicago/#>
- Figura 56. Fachada Manhattan Building. <https://en.wikiarquitectura.com/building/manhattan-building-chicago/#>
- Figura 57. Fachada ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/almacenes-carson-pirie-scott-sullivan-center/#>
- Figura 58. Plantas ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/almacenes-carson-pirie-scott-sullivan-center/#>
- Figura 59. Alzado ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/almacenes-carson-pirie-scott-sullivan-center/#>
- Figura 60. Fachada ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/almacenes-carson-pirie-scott-sullivan-center/#>
- Figuras 61 y 62. Detalle de la fachada ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT. <https://www.metalocus.es/es/noticias/louis-sullivan-y-la-escuela-de-chicago-los-almacenes-carson>
- Figuras 63 y 64. Construcción ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/almacenes-carson-pirie-scott-sullivan-center/#>
- Figura 65. Detalle constructivo tipo de las uniones roblonadas del edificio “Almacenes Carson, pirie, Scott. PROPIO.
- Figura 66. Distribución constructiva de las distancia de los roblones. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn35.html>
- Figura 67. Unión roblonada entre vigas. PROPIO
- Figura 68. Cargas a cizalladura. Unión de las alas. PROPIO

- Figura 69. Cargas a tensión cortante y momento. Unión del alma de los perfiles. PROPIO
- Figura 70. Relación de triángulos. Unión entre vigas. PROPIO
- Figura 71. Unión entre viga y pilar. PROPIO
- Figura 72. Cargas a cizalladura. Unión ala-pilar y angular. PROPIO
- Figura 73. Cargas a tensión cortante y momento. Unión alma-viga y angular. PROPIO
- Figura 74. Agotamiento del roblón. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn35.html>
- Figura 75. Aplastamiento de las paredes del agujero. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn35.html>
- Figura 76. Desgarro del agujero. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn35.html>
- Figura 77. Rotura de la chapa entre las posiciones de los roblones. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn35.html>

## ·Madera

- Figura 78. Cronograma del desarrollo de productos de madera industrializada. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.429.
- Figura 79. Funciones de densidad de probabilidad para la madera maciza y madera laminada. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.429.
- Figura 80. Paneles estructurales tipo de CLT. Borjen Yeh; Dave Kretschmann; Brad (Jianhe) Wang, 2013, CLT handbook: cross-laminated timber, Canada, U.S. (pág. 20)
- Figura 81. Proceso de fabricación de los paneles CLT. Borjen Yeh; Dave Kretschmann; Brad (Jianhe) Wang, 2013, CLT handbook: cross-laminated timber, Canada, U.S. (pág. 78)
- Figura 82. Selección de la madera. PROPIO
- Figura 83. Agrupación de madera. PROPIO
- Figura 84. Cepillado de madera. PROPIO
- Figura 85. Cortar la madera a medida. PROPIO
- Figura 86. Aplicación del adhesivo. PROPIO
- Figura 87. Colocación de los paneles. PROPIO
- Figura 88. Montaje y prensado. PROPIO
- Figura 89. Control de calidad, mecanizado y corte. PROPIO
- Figura 90. Marcado, embalaje y envío del producto. PROPIO
- Figura 91. Resistencia de la madera frente a diferentes situaciones de esfuerzo. [http://bdigital.unal.edu.co/6167/20/9589322824\\_Parte6.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/6167/20/9589322824_Parte6.pdf)
- Figura 92. Unión tirafondos. PROPIO
- Figura 93. Unión con herraje metálico. PROPIO
- Figura 93. Unión con placas de metal ocultas. PROPIO
- Figura 93. Unión industrializada patentada. PROPIO
- Figura 94. Tipos de tirafondos. <https://es.calameo.com/read/000764082958cef3872b1?authid=bCx9NNBOfedn>
- Figura 95. Tipos de herrajes metálicos. <https://es.calameo.com/read/000764082958cef3872b1?authid=bCx9NNBOfedn>
- Figura 96. Placa metálica oculta. <https://es.calameo.com/read/000764082958cef3872b1?authid=bCx9NNBOfedn>
- Figura 97. Uniones industrializadas patentadas. [https://issuu.com/rothoblaas/docs/placas\\_y\\_conectores?fr=sNjJlMTEyMA](https://issuu.com/rothoblaas/docs/placas_y_conectores?fr=sNjJlMTEyMA)
- Figura 98. Planta HoHo. <http://baumad.com/2016/10/17/hoho-wien-torre-oficinas-24-pisos-viena/>
- Figura 99. Fachada HoHo. <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/>
- Figura 100. Proceso constructivo HoHo. <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/>
- Figura 101. Fachada Mjøstårnet. <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/#>
- Figura 102. Planta tipo Mjøstårnet. <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitektur>
- Figura 103. Estructura Mjøstårnet. <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/#>

- Figura 104. Detalle unión Mjøstårnet. <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/#>
- Figura 105. Plantas Brock Commons. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/790749/la-construccion-del-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo-se-esta-llevando-a-cabo-en-vancouver>
- Figura 106. Proceso constructivo Brock Commons. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/790749/la-construccion-del-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo-se-esta-llevando-a-cabo-en-vancouver>
- Figura 107. Fachada Brock Commons. <https://www.skyscrapercenter.com/building/brock-commons-tallwood-house/22424>
- Figura 108. Planta tipo Forte. <https://www.architectureanddesign.com.au/projects/multi-residential/forte-by-lend-lease>
- Figura 109. Interior Forte. <https://www.architectureanddesign.com.au/projects/multi-residential/forte-by-lend-lease>
- Figura 110. Fachada Forte. <https://www.architectureanddesign.com.au/projects/multi-residential/forte-by-lend-lease>
- Figura 111. Fachada Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 112. Planta situación Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 113. Planta viviendas sociales Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 114. Planta venta libre Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 115. Fachada Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 116. Perspectiva seccionada Stadthaus. <http://baumad.com/2017/06/02/murray-grove-pionero/>
- Figura 117. Construcción CLT Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 118. Interior revestido con placas carton-yeso Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 119. Detalle constructivo tipo de las uniones con herraje metálico edificio y clavos de Stadthaus. PROPIO
- Figura 120. Diferentes configuraciones de la madera y de la deformación de la clavija con gráficas de tensiones. Manuel Domínguez Lorenzo, (2015), Estudio de uniones en estructuras de madera con uso de elementos clavija, Zamora.
- Figura 121. Uniones de madera con madera simple. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.319.
- Figura 122. Uniones de madera con madera doble. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.320.
- Figura 123. Uniones de madera con chapa de acero gruesa simple. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.321.
- Figura 124. Uniones de madera con chapa de acero delgada simple. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.321.
- Figura 125. Uniones de madera con chapas de acero gruesas dobles. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.321
- Figura 126. Uniones de madera con chapas de acero delgadas dobles. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.321
- Figura 127. Uniones de madera con chapa de acero interna. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.321
- Figura 128. Separación mínima de los clavos. Documento Básico SE-M. Seguridad estructural Madera. Pág. 57

## ·Discusión

- Figura 129. Planta ALMACENES CARSON, PIRIE, SCOTT. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/almacenes-carson-pirie-scott-sullivan-center/#>
- Figura 130. Planta Stadthaus. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects#>
- Figura 131. Configuraciones estructurales de edificación en altura. Thelandersson, S.; Larsen, H. J (2003). Timber engineering. Ed. John Wiley & Sons. pp.429.

## TABLAS

- Tabla 1. Rascacielos de mayor altura contruidos. <https://www.skyscrapercenter.com/tallest-in-2020>
- Tabla 2. Edificios con estructura de acero que tuvieron el record por edificación con más altura. <https://www.ctbuh.org/>
- Tabla 3. Propiedades del acero. Mario Hernández, (1990), El hierro en la Construcción, Barcelona, Ediciones CEAC. Pág 16  
Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 80).
- Tabla 5. Relación espesor chapa con el diámetro del agujero. Mario Hernández, (1990), El hierro en la Construcción, Barcelona, Ediciones CEAC. Pág 27
- Tabla 6. Principales propiedades mecánicas y secciones más comunes de roblón. Mario Hernández, (1990), El hierro en la Construcción, Barcelona, Ediciones CEAC. Pág 28
- Tabla 7. Principales propiedades mecánicas y diámetros más comunes de los tornillos. Mario Hernández, (1990), El hierro en la Construcción, Barcelona, Ediciones CEAC. Pág 29
- Tabla 8. Propiedades principales de algunos tipos de acero utilizados para roblones. Schulitz, Sobek, Habermann, (2000), Steel Construction Manual, Munich, GmbH. (pág. 124).
- Tabla 9. Limitaciones para los agujeros de los roblones. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn35.html>
- Tabla 10. Edificios realizados con estructura de madera más altos contruidos hasta el momento. <https://www.ctbuh.org/>
- Tabla 11. Propiedades de la madera. Borjen Yeh; Dave Kretschmann; Brad (Jianhe) Wang, 2013, CLT handbook: cross-laminated timber, Canada, U.S.
- Tabla 12. Principales propiedades de los tipos de tirafondos. [https://www.conectore.com/uploads/media\\_items/catalogo-conexiones-para-ensambladuras-de-madera.original.pdf?dl=1](https://www.conectore.com/uploads/media_items/catalogo-conexiones-para-ensambladuras-de-madera.original.pdf?dl=1)
- Tabla 13. Principales propiedades de los tipos de herrajes metálicos. [https://www.conectore.com/uploads/media\\_items/catalogo-conexiones-para-ensambladuras-de-madera.original.pdf?dl=1](https://www.conectore.com/uploads/media_items/catalogo-conexiones-para-ensambladuras-de-madera.original.pdf?dl=1)
- Tabla 14. Principales propiedades de las placas de metal ocultas. [https://www.conectore.com/uploads/media\\_items/catalogo-conexiones-para-ensambladuras-de-madera.original.pdf?dl=1](https://www.conectore.com/uploads/media_items/catalogo-conexiones-para-ensambladuras-de-madera.original.pdf?dl=1)
- Tabla 15. Separación mínima de los clavos. Documento Básico SE-M. Seguridad estructural Madera. Pág. 57
- Tabla 16. Comparación de las propiedades mecánicas de acero y de madera. PROPIO