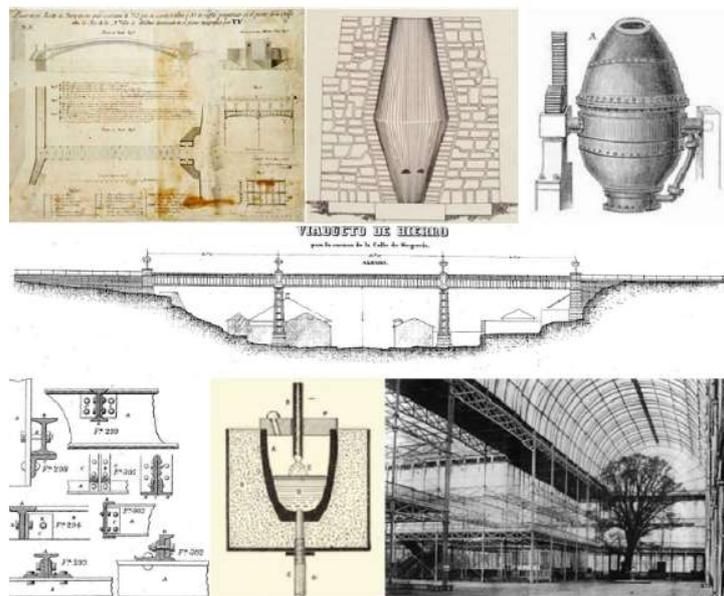


MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE MASTER

REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS: EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO DURANTE EL SIGLO XIX Y PRINCIPIOS DEL XX



Estudiante: Fernández Afonso, Aitor

Director: Marcos Rodríguez, Ignacio

Curso: 2023-2024

Fecha: Bilbao, 1 de marzo de 2024

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETO	1
1.2. ALCANCE	1
2. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS	2
2.1. HISTORIA DE LA ARQUITECTURA DEL HIERRO EN ESPAÑA	4
3. BASES DE CÁLCULO.....	7
3.1. EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO	7
3.2. CARGAS	11
3.2.1. Peso propio y cargas muertas	11
3.2.2. Sobrecarga de uso	12
3.2.3. Cargas de nieve.....	14
3.2.4. Cargas de viento	14
3.3. SEGURIDAD.....	15
3.3.1. Tensión admisible	16
3.3.2. Seguridad contra incendios.....	21
4. MATERIALES	25
4.1. FUNDICIÓN DE HIERRO	25
4.1.1. Características del hierro fundido	25
4.1.2. Historia y evolución del hierro fundido	26
4.2. HIERRO FORJADO	27
4.2.1. Características del hierro forjado	27
4.2.2. Historia y evolución del hierro forjado.....	28
4.3. ACERO.....	29
4.3.1. Características del acero	29
4.3.2. Historia y evolución del acero	30
4.4. TIPOS DE PERFILES METÁLICOS	31
5. MEDIOS DE UNIÓN	33
5.1. REMACHADO	33
5.2. TORNILLERÍA.....	35
5.3. SOLDADURA	37
5.3.1. Soldadura por forja.....	37
5.3.2. Soldadura oxiacetilénica	38
5.3.3. Soldadura por arco eléctrico	39
6. CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFÍA.....	41

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Salón del monasterio de la Trinidad y San Sergio, Rusia construido en 1698 (A.I. Gabitov, 2021)	2
Imagen 2. Puente Iron Bridge, Coalbrookdale (1779)	2
Imagen 3. Fotografía del Pont des Arts	3
Imagen 4. Fotografía del interior del Crystal Palace	3
Imagen 5. Plano del Puente de Hierro proyectado en la ría de la Villa de Bilbao, Archivo Histórico Foral de Bizkaia, A.H.F.B. .	4
Imagen 6. Croquis del Puente Colgante de cadenas y del Puente de Barcas cercano, Archivo Histórico Nacional, A.H.N., Consejos MPD 858	5
Imagen 7. Puente colgante de Aranjuez (Revista de Obras Públicas, 1897)	5
Imagen 8. Puente colgado de Arganda, antes y después de la venida del río (E. Barrón, 1859)	6
Imagen 9. Pasarela del Jardín del Capricho en la Alameda de Osuna, Madrid	6
Imagen 10. Viaducto de hierro de la calle Segovia, Madrid. Revista de Obras públicas (1861)	6
Imagen 11. Resolución gráfica del diagrama de momentos de una viga biapoyada según Culmann (R. Gerhardt, K. Kurrer, G. Pichler, 2003)	7
Imagen 12. Ejemplo de sección el método de Ritter	8
Imagen 13. Celosía con cargas y reacciones y diagrama de Cremona-Maxwell correspondiente (W. F. Baker, L.L. Beghini, A. Mazurek, J. Carrion, A. Beghini; 2013)	8
Imagen 14. Máxima flecha en una viga biarticulada	9
Imagen 15. Circulo de Mohr con tensiones y deformaciones para una tensión uniaxial (R.H.G. Parry, 2004)	9
Imagen 16. Líneas de influencia para cargas en una viga continua apoyada en múltiples vanos (R. Alderliesten, 2024)	10
Imagen 17. Solución iterativa de las reacciones de un pórtico de nudos rígidos mediante el método de Cross	11
Imagen 18. Peso propio en correas de chapa ondulada de acero Hamveyer (Sweet’s architectural catalogue, 1927)	12
Imagen 19. Diagrama de distribución de cargas durante un ensayo (L. Schueremans, H. Porcher & E. Verstrynge, B. Rossi, I.Wouters, 2016)	13
Imagen 20. Regulaciones y colapsos de distintas construcciones desde 1847 a 1909. (L. Schueremans, H. Porcher & E. Verstrynge, B. Rossi, I.Wouters, 2016)	15
Imagen 21. Evolución de la tensión admisible a tracción para distintos materiales metálicos con tendencias lineales a línea discontinua	16
Imagen 22. Sistemas de forjados frente a incendios (a) forjado “jack-arch” y (b) forjado “joist filler” (C. Maraveas, 2015) .	22
Imagen 23. Momento resistente en vigas de fundición de hierro protegidas contra no protegidas (C. Maraveas, 2015)	22
Imagen 24. Horno para ensayo de Bauschinger en columnas (V. Babrauskas, R. Brady Williamson, 1978)	23
Imagen 25. Curva estándar de fuego tiempo-temperatura según ASTM Standard E119 (1918)	24
Imagen 26. Evolución de métodos para la producción de materiales metálicos para construcción (M. de Bouw, I. Wouters, J. Vereecken, L. Lauriks, 2009)	25
Imagen 27. Diagrama tensión-deformación de columnas de hierro fundido del siglo XIX en Lotz, Polonia (M. Goldyn, T. Urban, 2020)	26
Imagen 28. Ilustración del horno stückofen (J.H. Strassburger, 1969)	26
Imagen 29. Diagrama tensión-deformación de hierro forjado con grano recto de finales del siglo XIX de varios puentes en Reino Unido (S.S.J. Moy, H.W.J. Clarke y S.R. Bright; 2009)	27
Imagen 30. Diagrama tensión-deformación de hierro forjado con grano cruzado de finales del siglo XIX de varios puentes en Reino Unido (S.S.J. Moy, H.W.J. Clarke y S.R. Bright; 2009)	28

Imagen 31. Ilustración de un horno bajo.	28
Imagen 32. Fotografía a color de un pudelador en la compañía A.M. Byers en Pittsburgh, Pennsylvania.	29
Imagen 33. Diagrama tensión-deformación del acero de un puente de finales del siglo XIX en Polonia (P. Grzegorz Kossakowski, 2021).....	29
Imagen 34. Diagrama esquemático del convertidor Bessemer.	30
Imagen 35. Ilustración esquemática del horno de arco eléctrico Siemens (A. Stansfield, 1871).....	31
Imagen 36. Distintas secciones de hierro forjado (Keystone Bridge Company, 1874).....	31
Imagen 37. Partes del roblón en una granulometría (Q. Collete, 2014).	33
Imagen 38. Diagrama deformación-tensión en roblones de hierro forjado del puente Saint-Esprit construido en 1864 sobre el río Adour, Francia (L. Gallegos Mayorga & S. Sire, B. Plu, 2016).....	35
Imagen 39. Disposiciones de uniones atornilladas (A. Rovira y Rabassa, 1900).	36
Imagen 40. Procedimientos de soldadura por forja (War Department, 1943)	38
Imagen 41. Proceso de soldadura a tope con aporte (J.R. Campbell, 1919).....	38
Imagen 42. Ilustración del proceso de cortado con equipamiento (War Department, 1943)	39
Imagen 43. Diagramas de la patente del electrodo de carbono en 1882.	39
Imagen 44. Proceso de soldadura SMAW (Miller Welds, 2013).	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Energía de deformación para distintos modos de trabajo	10
Tabla 2. Peso propio de materiales metálicos según Manual del Ingeniero (N. Valdés, 1870).....	11
Tabla 3. Sobrecarga de uso según Encyclopaedia of Architecture (J. Gwilt, 1881).....	12
Tabla 4. Sobrecarga de uso según el código de construcción de la ciudad de Nueva York (1899).	13
Tabla 5. Sobrecarga de uso de acuerdo a London County Council Act (1909).....	13
Tabla 6. Carga de nieve (N/m ²) a principios del siglo XX en diferentes países en comparación con el Eurocódigo 1(L. Schueremans, H. Porcher & E. Verstryngge, B. Rossi, I.Wouters, 2016).....	14
Tabla 7. Presión ejercida por el viento según Manual del Ingeniero (N. Valdés, 1870).....	15
Tabla 8. Carga puntual admisible para una viga carril de hierro fundido (W. Fairbain, 1864).....	17
Tabla 9. Tensión admisible para vigas según Manual del Ingeniero (N. Valdés, 1870).....	17
Tabla 10. Carga admisible (kg) para columnas de hierro fundido según Manual del Ingeniero (N. Valdés, 1870).	18
Tabla 11. Tensiones admisibles (N/mm ²) para hierro fundido, forjado y acero según regulaciones francesas desde 1869 hasta 1927 (Syndicat National Des Entrepeneurs Spécialistes de Travaux de Réparation et Renforcement de Structures, 2014).....	18
Tabla 12. Tensión admisible para vigas según el código de construcción de la ciudad de Nueva York (1899).....	19
Tabla 13. Tensión admisible para columnas biempotradas según el código de construcción de la ciudad de Nueva York (1899).....	19
Tabla 14. Tensión admisible para vigas según normativa London County Council Act (1909).	19
Tabla 15. Tensión admisible para columnas de hierro fundido según normativa London County Council Act (1909).	20
Tabla 16. Tensión admisible para columnas de hierro forjado según normativa London County Council Act (1909).....	20
Tabla 17. Tensión admisible para columnas de acero según normativa London County Council Act (1909).	21
Tabla 18. Punto de fusión de aleaciones en función de su contenido de carbono.	23
Tabla 19. Dimensiones para secciones P.N. francesas de 1928 para perfiles en doble T (W. Bates, 1984).....	32
Tabla 20. Aumento en la tensión admisible a cortante en remaches de hierro forjado y acero a finales del siglo XIX (Q. Collete, 2014).....	34
Tabla 21. Medidas de roscas Brithis Standard Whitworth (J. Whitworth, 1858).....	36

1. INTRODUCCIÓN

La rehabilitación de edificios es una parte fundamental de la construcción, ayuda a caracterizar el comportamiento de estructuras, sus patologías y protege a los usuarios.

En las últimas décadas esta práctica ha aumentado considerablemente. Las razones varían desde el envejecimiento de las estructuras ya construidas, los valores patrimoniales que se les conceden y la sostenibilidad.

No solamente los elementos estructurales acaban presentando patologías que empeoran su comportamiento resistente, también las solicitaciones se ven alteradas debido a la actualización constante de las normativas.

1.1. OBJETO

Este trabajo tiene como objetivo describir los procesos por los cuales el cálculo de las estructuras metálicas evolucionó significativamente durante el siglo XIX y principios del XX.

1.2. ALCANCE

El alcance del presente trabajo consta de la historia de las estructuras metálicas, la evolución de los métodos de cálculo, materiales y medios de unión metálicas.

A su vez, irá acompañado de recomendaciones con el fin de dar información útil sobre la rehabilitación de estructuras metálicas que pueda servir se guía.

2. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

Existen estructuras previas al siglo XIX con elementos metálicos, normalmente consistían en barras metálicas para atar arcos de mampostería o como elementos auxiliares para fachadas. Por ejemplo, el salón del monasterio de la Trinidad y San Sergio en la ciudad de Sérguiyev Posad, Rusia (1698). El salón de este monasterio tiene una luz de 18m, siendo para la época una construcción de gran entidad utilizada por la nobleza¹.



Imagen 1. Salón del monasterio de la Trinidad y San Sergio, Rusia construido en 1698 (A.I. Gabitov, 2021)

La primera construcción con una estructura considerable y enteramente de hierro fundido, y por tanto el comienzo de la Arquitectura del Hierro, es el conocido Iron Bridge en Coalbrookdale (Inglaterra, 1779). El gran desarrollo de los procesos metalúrgicos durante el siglo XVIII en el condado de Shropshire es la razón principal de esta estructura innovadora². El puente salva una luz de 30,63m en el mayor de los tres vanos que lo forman y está formado por cinco arcos.

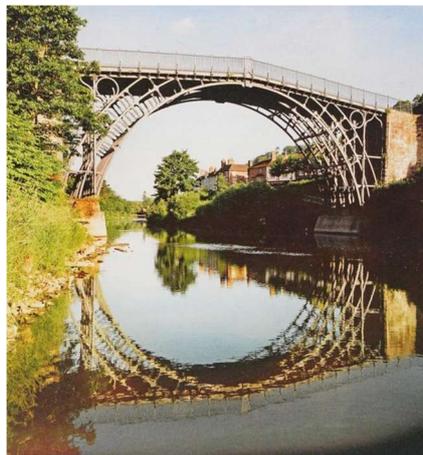


Imagen 2. Puente Iron Bridge, Coalbrookdale (1779).

En el resto de Europa, puede considerarse como la primera estructura metálica el Pont des Arts (1804) en París. La pasarela estaba formada por cinco arcos de fundición a modo de pórticos³. El puente fue

¹ Gabitov, A.I. et al. (2021). *Historical Aspects of Development of Metall Structures and Application Thereof in Buildings and Facilities*. IOP Conf. Series 1079(2):022037. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1079/2/022037>.

² Hayman, R. (2003). *The Shropshire wrought-iron industry c1600.1900 a study of technological change*. [Tesis doctoral, University of Birmingham]. [URL](#).

³ Deswarte, S. y Lemaine, B. (1997). *L'architecture et les ingénieurs: deux siècles de réalisations*. Le Moniteur. [URL](#).

demolido en 1980 tras detectar irregularidades debido a daños de la Primera y Segunda Guerra Mundial y varios impactos de grandes botes. Posteriormente se volvió a construir un puente idéntico.



Imagen 3. Fotografía del Pont des Arts.

La normalización del uso del hierro en estructuras dio un gran cambio tras la construcción del Crystal Palace (1851), diseñado por el arquitecto Joseph Paxton para la Primera Exposición Universal en Londres. Con una planta de 563,25x142,35m y formado por pórticos con pilares de hierro fundido y celosías de hierro forjado, la construcción tuvo una gran difusión internacionalmente. Aunque el sistema estructural mostró fallos a los pocos años, teniendo un colapso parcial de un ala en 1862 y quedando finalmente destruido tras un incendio en 1931⁴.

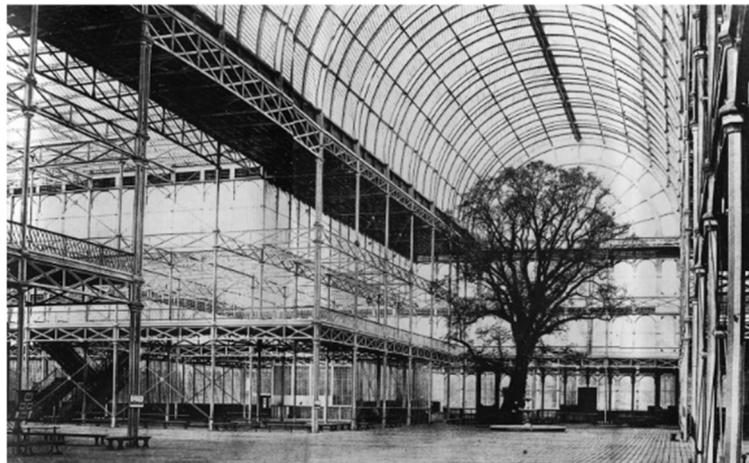


Imagen 4. Fotografía del interior del Crystal Palace.

⁴ López César, I. (2014). *La aportación estructural del Crystal Palace de la Exposición Universal de Londres 1851. Una ampliación del enfoque histórico tradicional*. ISSN: 2340-9711. [URL](#).

2.1. HISTORIA DE LA ARQUITECTURA DEL HIERRO EN ESPAÑA

En España la arquitectura del hierro se vio retrasada décadas. El desarrollo tecnológico de la revolución industrial no se vio implementado en los sistemas de producción, a diferencia de naciones como Inglaterra o Francia.

En lo relativo a la legislación, debido al elevado coste de la restauración de varios puentes en el municipio de Marmolejo en Jaén, la Monarquía delegó en 1784 las competencias de aprobación de puentes en la Real Academia de San Fernando. Siendo esta, muy reacia a la aprobación de este tipo de proyectos, ya que mantenía una línea de arquitectura clasicista de influencia francesa.

Es evidente que en el resto de los países europeos la evolución de los conocimientos en ingeniería es importante; sin embargo, este no es el caso de España. Las asignaturas científicas impartidas en la Real Academia de San Fernando no rompieron con las líneas antes comentadas, por lo que los arquitectos debían relegar en profesiones como los ingenieros militares.

Pueden encontrarse tras el final de la guerra de Independencia Española en 1814 distintos ejemplos de proyectos de estructura metálica en puentes de los que, pese a no ser finalmente ejecutados, se conserva su diseño. El primero de estos diseños corresponde al Puente de Fierro diseñado por Juan Bautista Belaunzarán en el punto de la Naja sobre el Nervión en la Villa de Bilbao (1815)⁵.

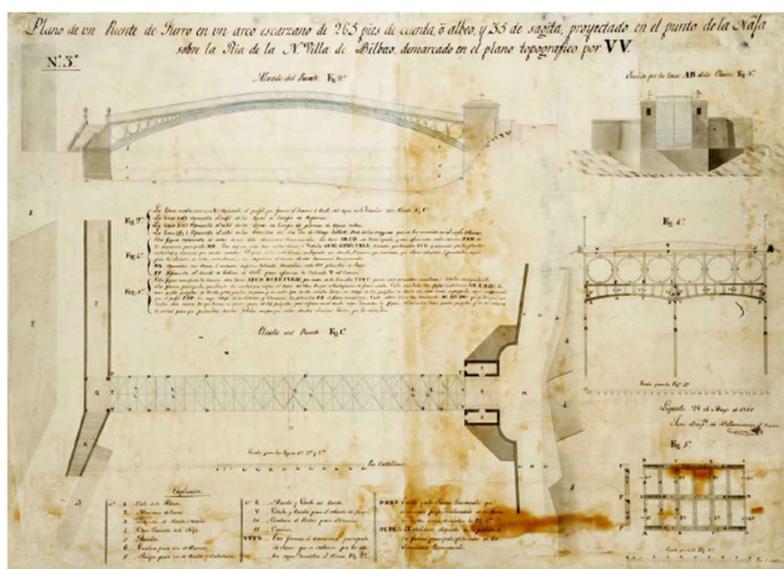


Imagen 5. Plano del Puente de Fierro proyectado en la ría de la Villa de Bilbao, Archivo Histórico Foral de Bizkaia, A.H.F.B.

La primera construcción de obra pública con estructura metálica en España fue del puente colgante de cadenas de hierro sobre el río Cadagua en el barrio de Burceña, Barakaldo (1827). El puente, realizado por Antonio Goicoechea, consistía en una catenaria y unas cadenas de hierro que sujetaban un tablero de madera. Fue demolido un par de décadas después debido a los daños sufridos durante la primera guerra carlista (1833-1840)⁶.

⁵ Luján Díaz, A. (2015). *La modernidad latente de la obra pública: primeras aplicaciones del hierro en puente españoles, (1815-1846)*. [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/25549>.

⁶ Cárcamo, J. (2023). *Los puentes de Burtzeña*. [URL](#).

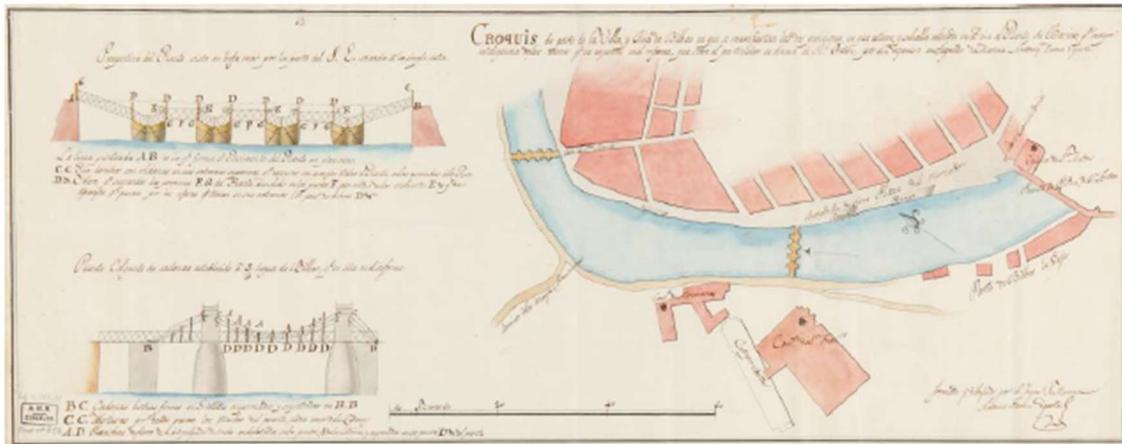


Imagen 6. Croquis del Puente Colgante de cadenas y del Puente de Barcas cercano, Archivo Histórico Nacional, A.H.N., Consejos MPD 858.

Respecto al resto de la península, puede encontrarse como primeros ejemplos el puente colgante de Aranjuez (1832-1833) y los cuatro puentes colgados construidos en la década de 1840 por Jules Seguin: Fuentidueña, Arganda, Santa Isabel y Carandia. Este cambio hacia el uso del hierro, es en parte debido a la Regencia de María Cristina (1833-1840), que promulgó la creación de la Dirección General de Caminos, delegando en esta las competencias respecto a obras públicas⁷.

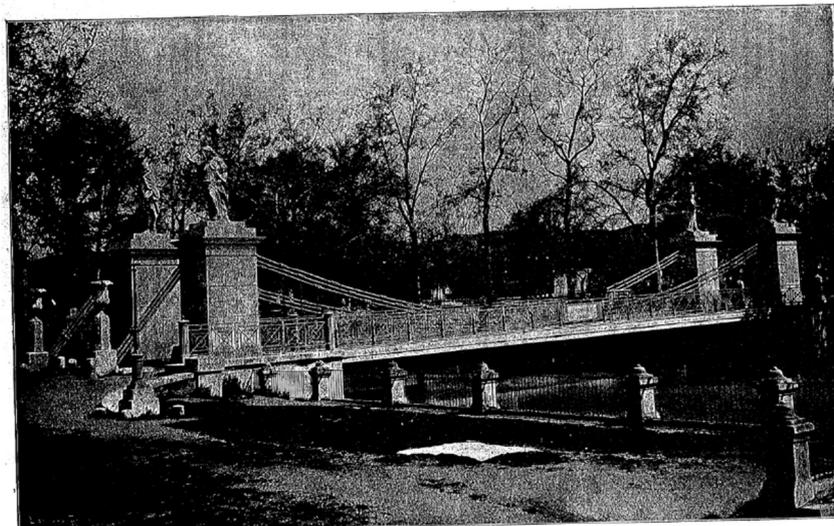


Imagen 7. Puente colgante de Aranjuez (Revista de Obras Públicas, 1897).

⁷ Luján Díaz, A. (2015). *Op. cit.*

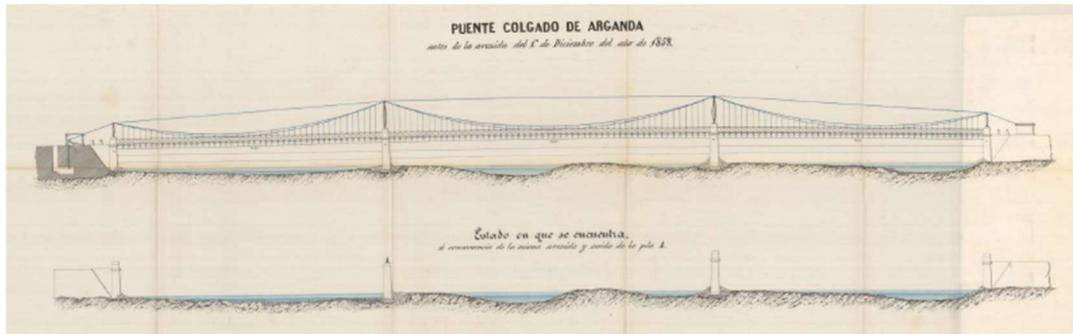


Imagen 8. Puente colgado de Arganda, antes y después de la venida del río (E. Barrón, 1859).

En Madrid, el retraso en la incorporación de una estructura metálica de obra pública es notable. Claro ejemplo es la primera construcción en hierro de la capital, la pasarela del Jardín del Capricho en la Alameda de Osuna (1834-1839), construida para salvar una luz de apenas 6 metros⁸. Al no ser una estructura de una envergadura importante y de uso privado su importancia es anecdótica.



Imagen 9. Pasarela del Jardín del Capricho en la Alameda de Osuna, Madrid.

La primera construcción relevante de la capital es el viaducto de la calle Bailén, originalmente la calle Segovia, diseñado por el arquitecto municipal Eugenio Barrón fue terminado en 1874⁹.

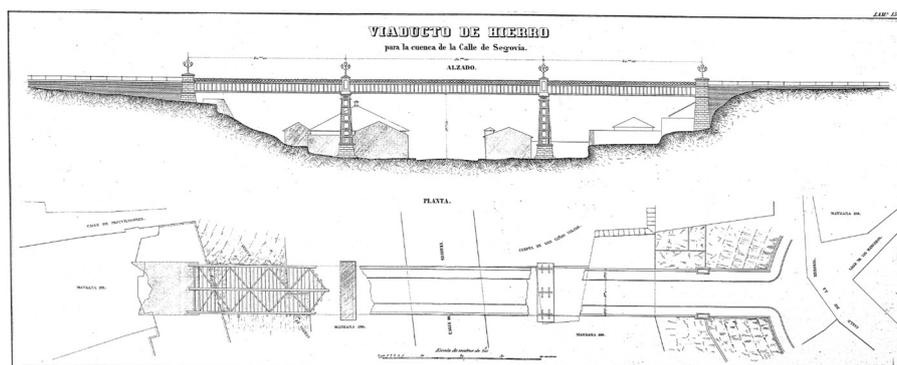


Imagen 10. Viaducto de hierro de la calle Segovia, Madrid. Revista de Obras públicas (1861).

⁸ Patrimonio cultural y paisaje urbano, Ayuntamiento de Madrid. *Puente de hierro sobre la ría*. Recuperado el 27 de febrero de 2024. [URL](#).

⁹ Asociación de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (1861). *Prolongación de la calle Bailén y puente de hierro para la de Segovia*. Revista de Obras Públicas Nº18 Año IX. [URL](#).

3. BASES DE CÁLCULO

3.1. EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO

Los métodos de cálculo primitivos eran empíricos, los arquitectos proyectaban proporciones geométricas conocidas para asegurar la estabilidad en las construcciones. Posteriormente, tras el primer desarrollo en el campo de la resistencia de materiales por Galileo Galilei (1637), los métodos de cálculo científico fueron desarrollándose¹⁰.

Debido al creciente desarrollo del hierro como material estructural, el cálculo se convirtió en algo fundamental para la optimización de secciones y, por tanto, del coste. A mediados del siglo XIX se empezaron a aplicar métodos de cálculo gráfico en proyectos:

- **Culmann (1865)**

Los conceptos desarrollados por Carl Culmann son considerados como el comienzo de la estática gráfica. En su obra recopiló métodos gráfico-estáticos ya conocidos y además contribuyó al conocimiento para la resolución de sistemas funiculares¹¹.

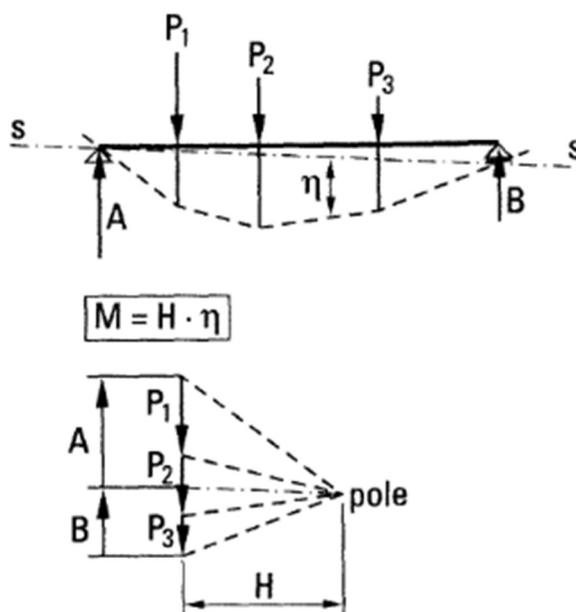


Imagen 11. Resolución gráfica del diagrama de momentos de una viga biapoyada según Culmann (R. Gerhardt, K. Kurrer, G. Pichler, 2003)

- **Ritter (1870)**

El método de Ritter o de las secciones, consiste en realizar un corte a una estructura plana. Se plantea equilibrio estático entre los cortes de la estructura, con un máximo de tres barras cortadas, planteando

¹⁰ González Lisorge, A. (2017). *Del 'empirismo' a la invención: cálculo y proyecto en la arquitectura moderna*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. [URL](#).

¹¹ Ochshorn, J. (2017). *Revisiting Form and Forces: A Critique of Graphical Statics*. American Society of Civil Engineers. [URL](#).

estas como elementos en tensión. La resolución de este sistema de ecuaciones ayuda a obtener de manera sencilla la tensión axial de los miembros deseados¹².

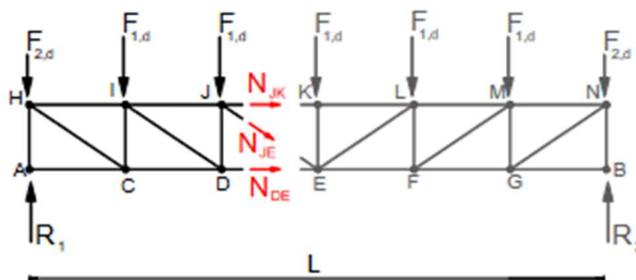


Imagen 12. Ejemplo de sección el método de Ritter.

Es un método con grandes aplicaciones en el cálculo de cerchas, en las que se desprecian los momentos flectores debido a la idealización de las uniones como puramente articuladas.

Es por esto último, que se deben examinar los nudos de las cerchas metálicas antiguas, que pueden presentar nudos que no estén completamente articulados o el eje presente desviaciones en las uniones. Se tendrán en cuenta estas características para el análisis estructural pertinente y también es aplicable a los otros métodos de cálculo de celosías, en los que se realizan simplificaciones para facilitar el cálculo.

- **Diagrama de Cremona-Maxwell (1872)**

El diagrama de Cremona-Maxwell es un método gráfico para la resolución de sistemas de celosías trianguladas estáticamente determinadas. Consiste en la realización de un diagrama para la obtención de los esfuerzos axiales de todos los elementos de la celosía.

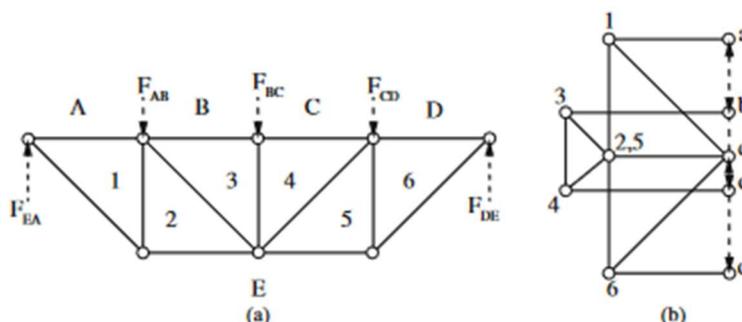


Imagen 13. Celosía con cargas y reacciones y diagrama de Cremona-Maxwell correspondiente (W. F. Baker, L.L. Beghini, A. Mazurek, J. Carrion, A. Beghini; 2013).

Fue ampliamente utilizado para la obtención de fuerzas axiales en cerchas de manera rápida hasta la implementación de los métodos de cálculo modernos, como el cálculo matricial.

¹² Pons Poblet, J.M. y Arboix Alió, A. (2020). *La estática gráfica, pasado y presente de una metodología singular*. [Universitat Politècnica de València]. [URL](#).

- **Teoremas de Mohr (1873)**

Christian Otto Mohr es uno de los mayores contribuyentes a la teoría de estructuras y a la resistencia de materiales. Siendo sus obras más importantes el círculo y los teoremas de Mohr.

El primer y el segundo teorema de Mohr son herramientas muy útiles para la obtención de rotaciones y deformaciones respectivamente en elementos estructurales bajo la influencia de momentos flectores. Las rotaciones y deformaciones son el resultado de la relación entre el área del diagrama de momentos, la inercia de la sección y el módulo de elasticidad del material.

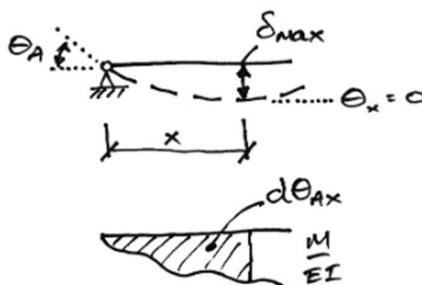


Imagen 14. Máxima flecha en una viga biarticulada.

La autoría de los métodos es realmente del británico Benjamin Greene en 1873, pero fue Mohr el que años más tarde popularizó la utilización de estos.

El círculo de Mohr (1882) consiste en una circunferencia que relaciona las tensiones y deformaciones normales con las cortantes. Es un teorema fundamental para el análisis de tensiones en el campo de resistencia de materiales.

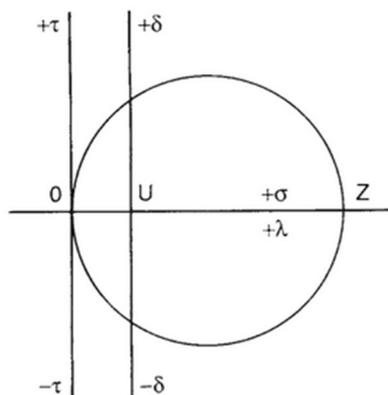


Imagen 15. Círculo de Mohr con tensiones y deformaciones para una tensión uniaxial (R.H.G. Parry, 2004)

- **Castigliano (1873)**

Es un método creado en 1873 por Alberto Castigliano en su disertación *Intorno ai sistemi elastici*. Permite la obtención de deflexiones y rotaciones en estructuras isostáticas, al igual que los mencionados teoremas de Mohr. Sin embargo, este método se basa en la energía de deformación para

la obtención de los resultados y no se limita únicamente a las deformaciones provocadas por los momentos flectores, pudiendo estudiarse diferentes tipos de solicitaciones.

Member loading type	Strain energy: load-based	Strain energy: displacement-based
axial	$U = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{F^2 dx}{EA}$	$U = \frac{1}{2} \int_0^L EA \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx$
torsion	$U = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{T^2}{GI_p} dx$	$U = \frac{1}{2} \int_0^L GI_p \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx$
bending - flexural	$U_\sigma = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI} dx$	$U_\sigma = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{d^2u}{dx^2} \right)^2 dx$
bending - shear	$U_\tau = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{V^2}{GA} dx$	

Tabla 1. Energía de deformación para distintos modos de trabajo.

- Müller-Breslau (1883)

El método Müller-Breslau es un método gráfico creado en 1883. Sirve para determinar los esfuerzos en vigas continuas hiperestáticas, quitando uno de los apoyos y aplicando una reacción y deformación ficticia para obtener la resolución del sistema. De esta manera se puede resolver el sistema de ecuaciones hiperestático al resolver la reacción ficticia mediante las condiciones de apoyo.

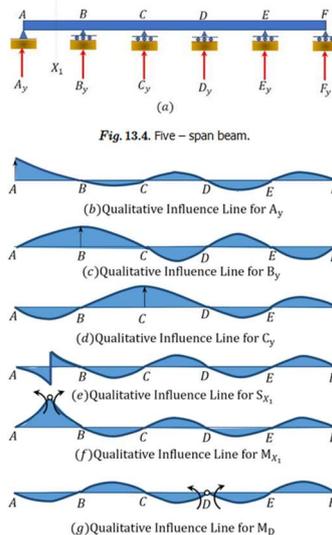


Imagen 16. Líneas de influencia para cargas en una viga continua apoyada en múltiples vanos (R. Alderliesten, 2024).

- Cross (1930)

El método de Cross fue publicado en 1930 por Hardy Cross. Es un método con gran importancia ya que permite el cálculo de diagramas de momentos en estructuras hiperestáticas de manera rápida¹³.

¹³ Hardy, C. (1930). *Analysis of continuous frames by distributing fixed-end moments*. American Society of Civil Engineers.

Las cargas muertas de cerramientos y forjados eran, al igual que actualmente, suministrados por el catálogo del suministrador.



Fig. 21. Havemeyer $\frac{3}{8}$ -in. Rib Lath

MAXIMUM SPANS RIB LATH

Weight lb. per sq. yd.	Ceilings		Partitions	
	Steel furring, in.	Wood joists, in.	Steel studs, in.	Wood Studs, in.
4.0	30	36	36	40
3.5	24	30	30	36
3.0	19	24	24	30
2.75	16	19½	19½	24

Imagen 18. Peso propio en correas de chapa ondulada de acero Hamveyer (Sweet's architectural catalogue, 1927).

3.2.2. Sobrecarga de uso

La sobrecarga de uso es un parámetro fundamental para la caracterización de estructuras. Esta es dependiente del uso que se esté considerando para la construcción.

Es notable la gran diferencia de sobrecarga de uso en las tablas presentadas en este subapartado, aunque observando la clase de uso doméstico, se puede ver una tendencia decreciente. Respecto a las demás clases, la comparación es más complicada, ya que se aprecia como en la evolución de las clases de uso el número de estas crece con el fin de caracterizar aplicaciones más concretas.

Clase de uso	Sobrecarga de uso (kg/m ²)
Industrial	625
Almacén	1172
Doméstico	488

Tabla 3. Sobrecarga de uso según Encyclopaedia of Architecture (J. Gwilt, 1881).

Clase de uso	Sobrecarga de uso (kg/m ²)
Oficina, docente, establos o cocheras	366
Doméstico	293
Edificio público	439
Fábrica o almacén	732

Cubiertas con pendiente > 20°	146
Cubiertas con pendiente < 20°	244

Tabla 4. Sobrecarga de uso según el código de construcción de la ciudad de Nueva York (1899).

Clase de uso	Sobrecarga de uso (kg/m ²)
Doméstico	342
Oficina	488
Taller o tienda	547
Almacén	1094
Cubiertas con pendiente > 20°	137
Cubiertas con pendiente < 20°	273

Tabla 5. Sobrecarga de uso de acuerdo a London County Council Act (1909).

Las regulaciones francesas de 1877 y 1891 describen el ensayo al que debían someterse los puentes ferroviarios. Consistía en el paso de dos trenes con dos locomotoras de peso distinto, 56 y 24 toneladas respectivamente, cada uno con vagones de 16 toneladas. Las cargas de este ensayo pasaron a ser la sobrecarga de uso con la que se diseñaba este tipo de construcciones.

En cuanto al cálculo de puentes de carretera en Francia y Bélgica, se debía utilizar una carga distribuida de 4000kg/m². Posteriormente se realizaban ensayos con caballos y carros¹⁴.

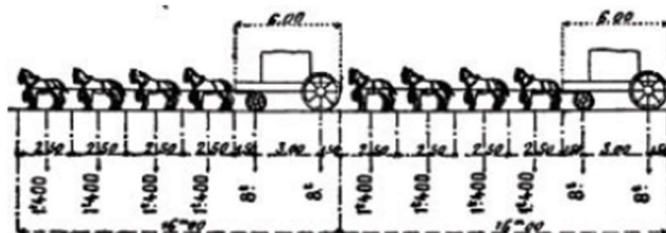


Imagen 19. Diagrama de distribución de cargas durante un ensayo (L. Schueremans, H. Porcher & E. Verstryngne, B. Rossi, I. Wouters, 2016).

¹⁴ Schueremans, L. Porcher, H. Vestryngne, E. Rossi, B. y Wouters, I. (2016). *On the evolution in design and calculation of steel structures over the 19th century in Belgium, France and England*. ISBN 978-1-138-02951-4. <http://dx.doi.org/10.1201/9781315616995-81>.

3.2.3. Cargas de nieve

La carga de nieve no se tuvo en cuenta para el cálculo de estructuras hasta 1902 en Francia, año en el que ocurrió el colapso de la cubierta de una estación de trenes. Dicha carga de nieve era minorada hasta la mitad de su valor en caso de actuar simultáneamente con el viento.

Country Date	France 1902 ¹	Belgium 1920 ²	England 1896 ³	EN1993-1-3* 2009 ⁴
Snow load	600	500	575	500–1200

*: Characteristic snow load on the ground depending on the altitude of the location; (¹: Aragon, 1904; ²: Vierendeel, 1920b; ³: Bovey, 1896; ⁴: EN1993-1-3, 2009).

Tabla 6. Carga de nieve (N/m²) a principios del siglo XX en diferentes países en comparación con el Eurocódigo 1 (L. Schueremans, H. Porcher & E. Verstryngge, B. Rossi, I. Wouters, 2016).

No fue hasta posteriormente, que se empezaron a tener en cuenta parámetros, como la altitud y la inclinación de la cubierta, que son fundamentales actualmente para la caracterización correcta de esta carga.

3.2.4. Cargas de viento

En las normas contemporáneas se utilizan coeficientes de mayoración para ciertas zonas, como pueden ser los aleros; y la carga es función de la zona, geometría, clase de exposición y hipótesis de viento considerada.

Es probable que exista una gran diferencia entre las cargas utilizadas en proyectos antiguos y las aplicables según normativa, por lo que debe extremarse su estudio en cubiertas, marquesinas y edificios que estén expuestos al viento o tengan una altura considerable.

La carga de viento era un tema al que poca atención se le prestaba en el siglo XVIII y durante la mayoría del siglo XIX. De las primeras expresiones para el cálculo de la fuerza de viento era la fórmula de Smeaton, publicada en 1759.

$$p = 0,005v^2$$

Durante los tres primeros cuartos del siglo XIX, pueden encontrarse distintas fórmulas y tablas para la caracterización del viento.

CLASE DE VIENTO.	Velocidad por segundo.	Presion por metro cuadrado.
	m	k
Viento débil.....	2,00	0,54
Viento suave ó brisa (tiende bien las velas de los barcos ó molinos)...	6,00	4,87
Viento mas conveniente á los molinos.....	7,00	6,64
Viento fresco, bueno para la marcha de los barcos.....	9,00	10,97
Viento muy fresco (obliga á recoger velas).....	12,00	19,30
Viento fuerte.....	15,00	30,47
Viento tempestuoso.....	20,00	34,16
Tempestad.....	24,00	78,00
Tempestad violenta.....	30,03	122,28
Huracan.....	36,15	176,98
Grandes huracanes.....	48,50	277,87
Váguinos, tyffons (los mayores en la zona tórrida).....	50,	375,00

Tabla 7. Presión ejercida por el viento según Manual del Ingeniero (N. Valdés, 1870).

Tras el colapso del Tay Bridge en 1879, la caracterización de la carga de viento pasó a tener gran importancia. La comisión sobre aquel incidente determinó que la carga de viento que se había usado en su diseño era nula o insuficiente¹⁵; también determinaron que la expresión más adecuada para el cálculo de la carga del viento sería:

$$P = \frac{v^2}{100}$$

3.3. SEGURIDAD

Los parámetros que consideran la seguridad de las personas son fundamentales a la hora de diseñar y calcular una construcción. Estos aspectos son la propia seguridad estructural de la construcción y la seguridad contra incendios de la estructura.

Conviene recordar que tanto en obra nueva como en rehabilitación lo primordial es la seguridad de los usuarios y los bienes respectivamente.

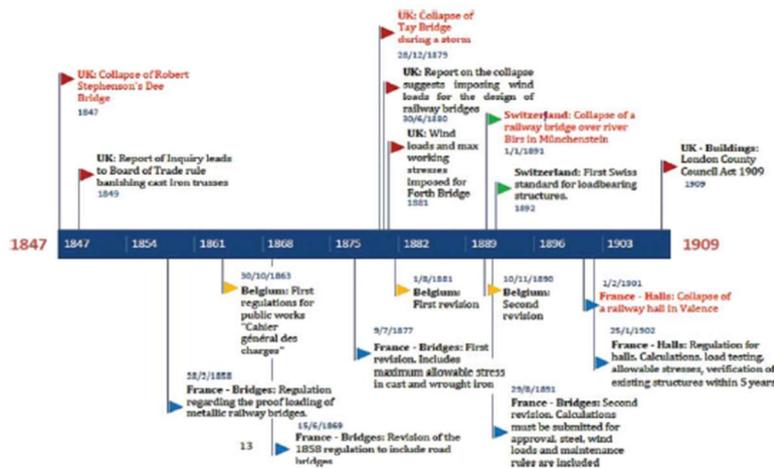


Imagen 20. Regulaciones y colapsos de distintas construcciones desde 1847 a 1909. (L. Schueremans, H. Porcher & E. Verstryngne, B. Rossi, I.Wouters, 2016).

¹⁵ MacLeod, I. y Martin, T. (2018). *The legacy of the Tay Bridge collapse*. ISIS Journal of Engineering Vol.157. [URL](#).

3.3.1. Tensión admisible

La tensión admisible es la máxima tensión para la que se calcula un elemento estructural. Depende del factor de seguridad, que es función de la resistencia del material y del modo de trabajo, con el que se minorra la tensión de fluencia.

La caracterización resistente del material a rehabilitar es fundamental; conocer sus propiedades mecánicas es lo que permite valorar su comportamiento mecánico y el cálculo del refuerzo oportuno de ser necesario.

Sin embargo, como se observará en este apartado, las características resistentes de los materiales fueron variables durante su evolución. En el gráfico de la *Imagen 21* pueden apreciarse las tensiones admisibles a tracción y su tendencia de 1869 a 1927, que se expondrán en el presente subapartado.

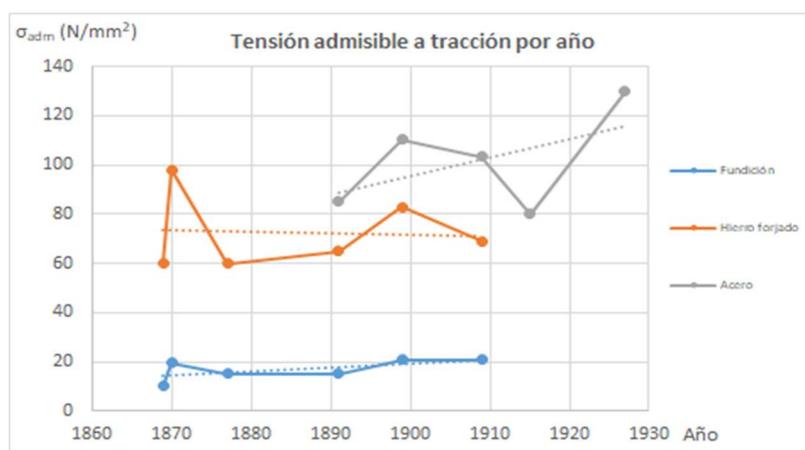


Imagen 21. Evolución de la tensión admisible a tracción para distintos materiales metálicos con tendencias lineales a línea discontinua.

Además, los elementos estructurales pueden haberse deteriorado con el tiempo, debiendo realizarse un estudio patológico por un experto con el fin de detectar si en algún caso se han podido verse afectadas sus propiedades resistentes.

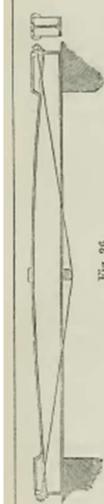
Estas casuísticas traen una gran incertidumbre al cálculo, que generalmente debe ser resuelta con documentación de la época o mediante ensayos para poder obtener la tensión de fluencia del material. Es preferible esta última opción, que también es la más costosa.

Según los códigos de edificación actuales, la tensión admisible no es un parámetro que se facilite de por sí. La tensión admisible se calcula a partir de la tensión de fluencia y módulo de rigidez del material para cada elemento estructural según sus condiciones de apoyo y esfuerzos a los que está sometido. Esto permite un cálculo óptimo, pudiendo caracterizar que situaciones son las más desfavorables para el elemento estructural considerado.

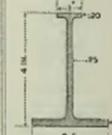
A continuación, se expondrán los valores de tensión admisible según varios libros técnicos y normativas:

- On the application of Cast and Wrought Iron to Building Purposes (1864)

Las primeras ordenanzas, recomendaciones y libros técnicos no proporcionan una tensión admisible; los elementos estructurales se calculaban con una carga admisible que se obtenía empíricamente para cada sección y material. El acero no fue considerado en este libro técnico.



Experiment I.			Experiment II.			Experiment III.		
No. of Experiment.	Weight laid on in lbs.	Deflection in inches.	No. of Experiment.	Weight laid on in lbs.	Deflection in inches.	No. of Experiment.	Weight laid on in lbs.	Deflection in inches.
1	406	·05	1	406	·045	1	406	·012
2	910	·10	2	874	·076	2	1,674	·120
3	1,358	·15	3	1,322	·150	3	2,470	·162
4	1,806	·20	4	1,770	·173	4	3,366	·223
5	2,254	·23	5	2,462	·234	5	4,262	·284
6	2,478	·28	6	2,910	·287	6	5,158	·326
7	2,792	·31	7	3,358	·342	7	5,606	·400
8	2,926	·34	8	3,806	·404	8	6,056	·470
9	3,150	·37	9	4,354	·440	9	6,502	·528
10	3,262	·38	10	4,578	·485	10	6,950	·571
11	3,374	·40	11	4,690	·500	11	7,398	·620
12	3,486	·41	12	4,802	·531	12	7,846	·670
13	3,710	·44	13	4,914	·560	13	8,294	·733
14	3,934	·47	14	5,026	·584	14	8,742	·780
15	4,046	·48	15	5,138	·600	15	8,854	Broke
16	4,158	·50	16	5,250	·620			Ultimate deflection } ·790
17	4,290	·51	17	5,304	·640			
18	4,382	·52	18	5,496	·672			
19	4,494	·53	19	5,610	·690			
20	4,606	·55	20	5,722	·710			
21	4,718	·56	21	5,834	·756			
22	4,830	·57	22	5,946	·740			
23	4,942	·59	23	6,038	·760			
24	5,054	·61	24	6,160	·772			
25	5,166	·62	25	6,272				
26	5,278	·64	26	6,384				
27	5,390	·65	27	6,496				
28	5,502	Broke from one of the truss-rods yielding to tension.	28	6,608	·826			
		Ultimate deflection } ·66	29	6,720				
			30	6,832				
			31	6,934				
			32	7,046				
			33	7,136				
			34	7,270				
			35	7,384				
			36	7,496				
			37	7,608	·934			
			38	7,720				
			39	7,832				
			40	7,944	Broke			
					Ultimate deflection } ·988			



Area of bottom flange } 1·05
 Area of top flange } ·20
 Bottom flange, 2·5 x 42, area = 1·05 inches.
 Top flange 1·0 x 20, area = ·20 inches.
 Depth of beam in the middle, 4 inches.

Tabla 8. Carga puntual admisible para una viga carril de hierro fundido (W. Fairbain, 1864)

- Manual del Ingeniero y Arquitecto (1870)

Material	Tensión admisible (N/mm ²)	
	Tracción	Compresión
Hierro fundido	19,6	196,1
Hierro forjado	98,1	81,1
Acero	163,5	160,8

Tabla 9. Tensión admisible para vigas según Manual del Ingeniero (N. Valdés, 1870).

La carga admisible en columnas (Tabla 10) viene dada para columnas circulares huecas de fundición en función de su altura y su diámetro exterior e interior. El hierro forjado y el acero no fueron caracterizados para columnas en este manual.



DIÁMETRO	Interior		Altura	Carga	Interior		Altura	Carga	Interior		Altura	Carga	Interior		Altura	Carga							
	cent.	cent.			cent.	cent.			cent.	cent.			cent.	cent.									
4,5	6	1,20	9 103	2,00	25 133	8	10	3,00	11 000	12	15	4,00	31 836	16	20	7,50	30 860						
		1,30	8 000															3,25	20 500	4,50	25 720	8,00	27 601
		1,40	7 100															3,50	17 100	5,00	21 786	8,50	24 700
		1,50	6 230															3,75	13 500	5,50	18 500	9,00	22 500
		1,60	5 600															4,00	12 013	6,00	15 579	9,50	20 600
	1,70	5 000	3,25	11 000	6,50	13 880	10,00	18 888															
	1,80	4 370	3,50	9 707	7,00	12 240	10,50	17 400															
	1,90	4 180	3,75	8 730	7,50	10 800	11,00	16 000															
	2,00	3 830	4,00	7 916	8,00	9 705	11,50	14 750															
	2,10	3 316	4,25	7 000	8,50	8 800	12,00	13 850															
2,20	3 000	4,50	6 370	9,00	8 100																		
2,30	3 000	4,75	5 740	9,50	7 380																		
2,30	3 000	5,00	5 200	10,00	6 705	4,00	200 210																
2,40	2 892			10,50	6 250	4,50	162 000																
2,60	2 300	4,00	14 287	11,00	5 800	5,00	137 030																
2,80	2 150	4,50	11 650	11,50	5 370	5,50	118 500																
3,00	1 918	5,00	9 730	12,00	4 918	6,00	100 200																
		5,50	8 250			6,50	87 600																
		6,00	7 100			7,00	77 700																
		6,50	6 240			7,50	69 000																
		7,00	5 570	16	20	8,00	61 632																
		7,50	4 900			8,50	55 500																
		8,00	4 388			9,00	50 200																
		8,50	4 000			9,50	46 230																
		9,00	3 650			10,00	42 176																
		9,50	3 350			10,50	38 200																
		10,00	3 000			11,00	35 300																
		10,50	2 750			11,50	32 546																
		11,00	2 500			12,00	30 836																
		11,50	2 240																				
		12,00	2 000																				

Tabla 10. Carga admisible (kg) para columnas de hierro fundido según Manual del Ingeniero (N. Valdés, 1870).

• Regulaciones francesas (1877-1927)

Material	Fundición de hierro				Hierro forjado	Acero
	Tracción	Compresión	Flexotracción	Flexocompresión	Tracción o Compresión	Tracción o Compresión
Regulación del 15/06/1869	10	50	-	-	60	-
Regulación del 09/07/1877	15	50	30	50	60	-
Regulación del 29/08/1891	15	60	25	60	65 o 85	85 o 115
Regulación del 08/01/1915	0	65	0	65	-	80 o 135
Regulación del 10/05/1927	-	-	-	-	-	130 o 140

Tabla 11. Tensiones admisibles (N/mm²) para hierro fundido, forjado y acero según regulaciones francesas desde 1869 hasta 1927 (Syndicat National Des Entrepreneurs Spécialistes de Travaux de Réparation et Renforcement de Structures, 2014)

Como puede observarse, el acero no fue considerado hasta 1891. El uso del hierro forjado fue descartado en 1915; en cambio, el hierro fundido siguió utilizándose para pilares hasta 1927.

- **The Building Code of the City of New York (1899)**

Material	Tensión admisible (N/mm ²)		
	Tracción	Compresión	Cortante
Hierro fundido	20,7	110,4	20,7
Hierro forjado	82,8	82,8	48,3
Acero	110,4	110,4	62,1

Tabla 12. Tensión admisible para vigas según el código de construcción de la ciudad de Nueva York (1899).

Ratio de esbeltez	Tensión admisible (N/mm ²)		
	Hierro fundido	Hierro forjado	Acero
10	75,9	91,1	100,9
20	73,8	85,6	96,9
30	71,8	80,0	92,9
40	69,7	74,5	88,9
50	67,6	69,0	84,9
60	65,6	63,5	80,9
70	63,5	58,0	76,9
80	-	52,4	72,9
90	-	46,9	68,9
100	-	41,4	64,9
110	-	35,9	60,9
120	-	30,4	56,9

Tabla 13. Tensión admisible para columnas biempotradas según el código de construcción de la ciudad de Nueva York (1899).

- **London Council Act (1909)**

Material	Tensión admisible en vigas (N/mm ²)		
	Tracción	Compresión	Cortante
Hierro fundido	20,7	110,3	20,7
Hierro forjado	68,9	68,9	55,2
Acero	103,4	103,4	75,8

Tabla 14. Tensión admisible para vigas según normativa London County Council Act (1909).

En cuanto a pilares metálicos, se consideró la esbeltez de los elementos y sus condiciones de apoyo para la caracterización de la tensión admisible.

Ratio de esbeltez	Tensión admisible en columnas de hierro fundido (N/mm ²)		
	Apoyos articulados	Apoyo articulado y apoyo empotrado	Apoyos empotrados
20	48,3	55,2	62,1
30	41,4	48,3	55,2
40	34,5	41,4	48,3
50	27,6	34,5	41,4
60	20,7	27,6	34,5
70	13,8	20,7	27,6
80	6,9	13,8	20,7

Tabla 15. Tensión admisible para columnas de hierro fundido según normativa London County Council Act (1909).

Ratio de esbeltez	Tensión admisible en columnas de hierro forjado (N/mm ²)		
	Apoyos articulados	Apoyo articulado y apoyo empotrado	Apoyos empotrados
20	36,8	46,0	55,2
40	32,2	41,4	50,6
60	27,6	36,8	46,0
80	23,0	32,2	41,4
100	18,4	27,6	36,8
120	9,2	23,0	32,2
140	0,0	18,4	27,6
160	-	9,2	23,0
180	-	0,0	13,8
200	-	-	4,6
210	-	-	0,0

Tabla 16. Tensión admisible para columnas de hierro forjado según normativa London County Council Act (1909).

Ratio de esbeltez	Tensión admisible en columnas de acero (N/mm ²)		
	Apoyos articulados	Apoyo articulado y apoyo empotrado	Apoyos empotrados
20	55,2	68,9	82,7
40	48,3	62,1	75,8
60	41,4	55,2	68,9
80	34,5	48,3	62,1
100	27,6	41,4	55,2

120	13,8	34,5	48,3
140	0,0	27,6	41,4
160	-	13,8	34,5
180	-	0,0	20,7
200	-	-	6,9
210	-	-	0,0

Tabla 17. Tensión admisible para columnas de acero según normativa London County Council Act (1909).

3.3.2. Seguridad contra incendios

Las estructuras metálicas presentan una gran desventaja en caso de incendio frente a estructuras de hormigón o de madera. A diferencia de estas dos últimas, el acero ve sus propiedades resistentes disminuidas con rapidez a medida que la temperatura aumenta.

El parámetro de diseño que se considere para la estructura será la indicada según normativa, normalmente es la resistencia de la estructura al fuego en minutos que depende de la planta del edificio considerada y el uso de esta.

Como muestra el presente apartado, existen elementos y sistemas constructivos antiguos que pueden ser determinantes para el análisis de la estructura metálica a resistencia contra el fuego. El análisis de estos es complejo, siendo óptimos los métodos de elementos finitos. Aunque en proyectos que se quiera obtener una mayor seguridad, se puede despreciar la protección de los elementos.

En un proyecto de rehabilitación, no solamente se deben atender a los criterios estructurales para la protección contra el fuego, también se examinarán los factores arquitectónicos como la sectorización del edificio, ruta de evacuación y la reacción al fuego de los elementos envolventes, revestimientos, paredes y cualquier elemento que sea susceptible a entrar en contacto con el fuego.

Atendiendo a la documentación histórica, según las primeras recomendaciones frente a protección contra incendios, se considera una construcción residencial ignífuga la que se componga de particiones de mampostería, escaleras de material pétreo y vigas de hierro forjado recubiertas de hormigón. Sin embargo, estas protecciones pueden ser insuficientes en almacenes que requieran gran resistencia frente a incendios, en los que se almacenen bienes combustibles; por lo que, se recomienda realizar dichas construcciones únicamente con mampostería. En cuanto a almacenes con estructuras metálicas, que son más convenientes debido al coste más bajo y la menor ocupación de espacio, se recomienda la división en sectores mediante dobles puertas de hierro forjado¹⁶.

En los sistemas estructurales metálicos para forjados más comunes del siglo XIX con resistencia frente a incendios, se encuentran las vigas metálicas recubiertas por hormigón primitivo o mampostería¹⁷.

¹⁶ Braidwood, J. (1866). *Fire prevention and fire extinction*. [URL](#).

¹⁷ Fairbairn, W. (1857). *On the application of cast and wrought iron to building purposes*. Tercera edición. Spottiswoode and Co. [URL](#).

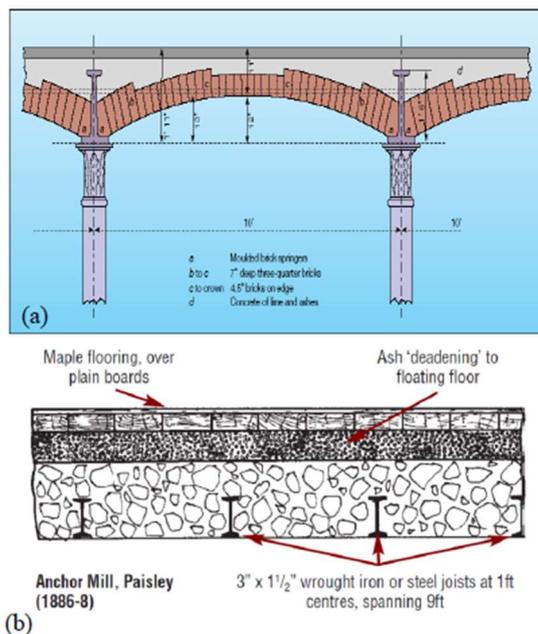


Imagen 22. Sistemas de forjados frente a incendios (a) forjado "jack-arch" y (b) forjado "joist filler" (C. Maraveas, 2015).

El análisis de resistencia al fuego para perfiles de fundición de hierro resulta en una resistencia de un mínimo 60 minutos; mientras que, la resistencia de las secciones sin proteger corresponde a un mínimo de 20 minutos. En la Imagen 23 puede observarse el momento resistente de secciones protegidas con el sistema "jack-arch" frente a perfiles sin protección en función al tiempo de exposición al fuego¹⁸.

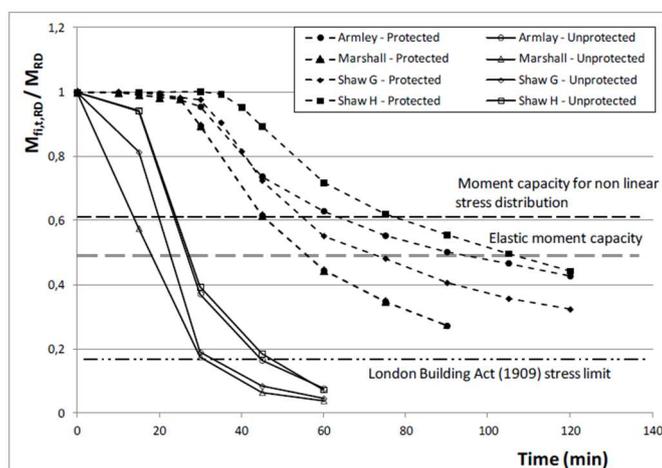


Imagen 23. Momento resistente en vigas de fundición de hierro protegidas contra no protegidas (C. Maraveas, 2015).

Por lo que puede afirmarse que estos sistemas son determinantes para la caracterización de la resistencia al fuego de estructuras metálicas de la época, que, de estar compuestas por materiales como el hierro fundido, disponen de una baja resistencia al fuego de por sí.

¹⁸ Maraveas, C. (2015). Fire resistance of metal framed historical structures. [Tesis doctoral, University of Manchester]. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1233.1601>.

Aleación	Contenido de carbono (%)	Punto de fusión (°C)
Hierro fundido	2,1 - 4,5	1.238
Acero al carbono	0,08 - 2,00	1.400 - 1.500
Hierro forjado	0,03 - 0,08	1.538

Tabla 18. Punto de fusión de aleaciones en función de su contenido de carbono.

A principios del siglo XX, se empezaron a normalizar la realización de ensayos sobre elementos y sistemas estructurales, debido a la aparición de grandes incendios y aparatos de medición específicos¹⁹. En 1899, la ciudad de Nueva York estableció en su código de edificación la necesidad de realizar ensayos de fuego para vigas en forjados. Estos ensayos consistían en construir una plataforma en un recinto cerrado de cuatro vigas con una carga de 37,2 kg/m y realizar un fuego que no supere los 700°C con madera; los elementos estructurales debían proporcionar una resistencia al fuego de 4 horas²⁰.

En las décadas posteriores, los ensayos se realizaban calentando las piezas uniformemente y aplicando una fuerza axial o cortante similar a la de trabajo mediante cilindros hidráulicos (*Imagen 24*), para después, mediante termopares o termómetros determinar la temperatura de la pieza. De esta manera, se podía caracterizar el descenso del límite elástico del elemento estructural en función de la temperatura²¹.

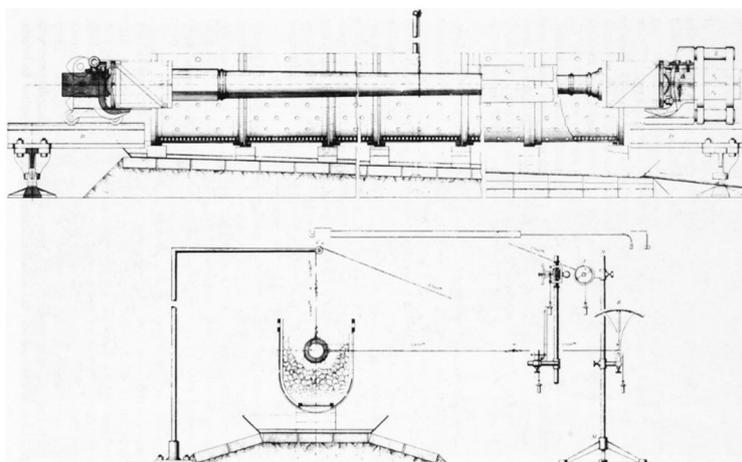


Imagen 24. Horno para ensayo de Bauschinger en columnas (V. Babrauskas, R. Brady Williamson, 1978).

Tras la aparición de la primera edición de la norma [ASTM Standard E119](#) (1918), los ensayos para la caracterización de los incendios fueron desapareciendo ya que los resultados de estos raramente hacían un impacto significativo respecto a la norma, que estableció la curva estándar de fuego (*Imagen 25*)²².

¹⁹ Randall Lawson, J. (2009). *A History of Fire Testing*. NIST Technical Note 1628. [URL](#).

²⁰ Ash, M. y Ash, W. Greater New York Charter. (1899). *The Building Code of the City of New York*. Weed-Parsons Printing Company. [URL](#).

²¹ Babrauskas, V. y Brady Williamson, R. (1978). *The Historical Basis of Fire Resistance Testing-Part I*. University of California, Berkeley. [URL](#).

²² Babrauskas, V. y Brady Williamson, R. (1978). Op. Cit.

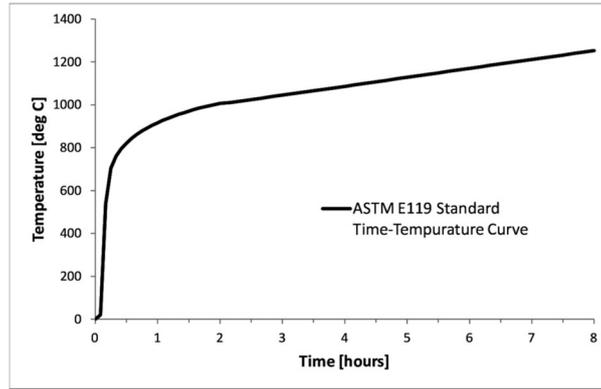


Imagen 25. Curva estándar de fuego tiempo-temperatura según ASTM Standard E119 (1918).

4. MATERIALES

La evolución de los distintos materiales férreos en la construcción está directamente relacionada con su proceso de producción. Mediante el desarrollo de nuevas técnicas a través de la Primera y Segunda Revolución Industrial se fueron obteniendo materiales metálicos de mayor resistencia.

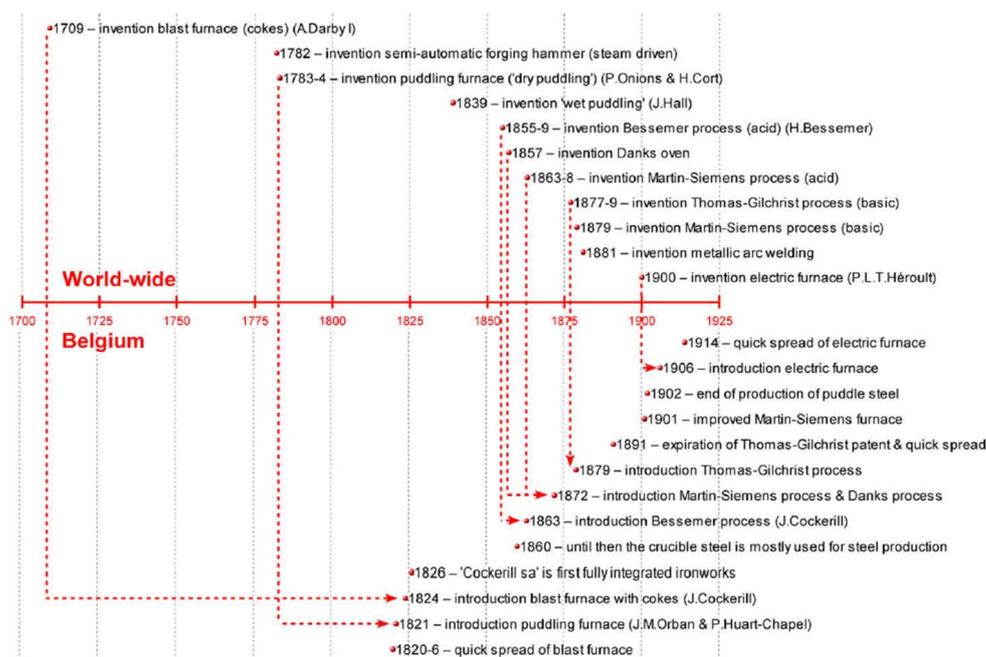


Imagen 26. Evolución de métodos para la producción de materiales metálicos para construcción (M. de Bouw, I. Wouters, J. Vereecken, L. Lauriks, 2009).

Las aleaciones ferrosas más comunes son el hierro fundido, el hierro forjado y el acero. Su principal diferencia, en cuanto a composición química, es el contenido de carbono entre ellas.

Debe considerarse que, entre dos muestras de un mismo material de la misma época puede existir una gran variación en sus características resistentes. Esto se debe a varios motivos, como los procesos de fabricación y los tipos de pruebas realizados sobre estos.

4.1. FUNDICIÓN DE HIERRO

4.1.1. Características del hierro fundido

La fundición de hierro o hierro fundido es un grupo de aleaciones férreas ricas en carbono que superan el 2% de contenido de este. Se obtiene fundiendo el mineral de hierro y siendo vertido en moldes. Concretamente se analizará la fundición gris, que es el tipo de hierro fundido más conocido y común.

El carburo de hierro en las aleaciones de hierro fundido confiere una alta dureza, resistencia al desgaste y fragilidad. Es un material con muy buen comportamiento a compresión, pero con una baja resistencia frente a tracción (Imagen 27). El punto de fusión de la aleación, 1238°C, es el más bajo de las tres aleaciones descritas.

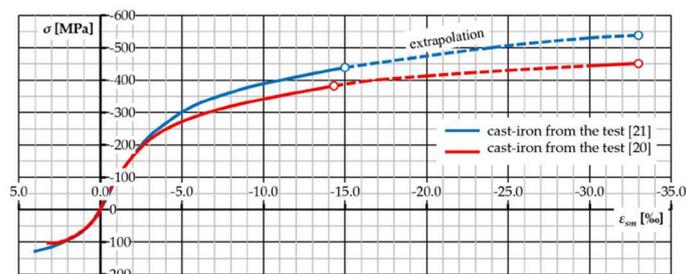


Imagen 27. Diagrama tensión-deformación de columnas de hierro fundido del siglo XIX en Lotz, Polonia (M. Goldyn, T. Urban, 2020).

4.1.2. Historia y evolución del hierro fundido

El principal desarrollo de fundiciones de hierro corresponde al siglo VI a.C. en la Antigua China. Se obtenía utilizando hornos de cuba o cubilotos con carbón vegetal como combustible para la elaboración de herramientas agrícolas, armas y esculturas mediante moldes de arena.

Pese a no existir ilustraciones ni información hasta la Época Moderna, existen numerosos hallazgos arqueológicos de altos hornos primitivos en la Antigua China a partir del siglo IV a.C., lo que permitió producir hierro fundido en mayor cantidad²³.

La producción del material en Europa no vivió una gran evolución hasta el siglo VIII d.C., cuando se desarrolló la forja catalana produciendo un hierro fundido de superior resistencia y durabilidad. Posteriormente en la Edad Media, se desarrolló el horno alemán *stückerofen* en el siglo XIII d.C., el primer horno alto europeo. Fue a partir del desarrollo de una variedad de hornos altos durante los siguientes siglos, que la producción en el continente fue creciendo debido a la mejor calidad del hierro fundido producido. El hierro fundido producido en gran escala se utilizó para una variedad de productos durante el siglo XV: cañones, armas de fuego, herramientas, etc²⁴.

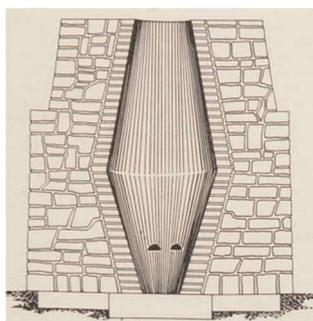


Imagen 28. Ilustración del horno *stückerofen* (J.H. Strassburger, 1969).

En 1709, Abraham Darby empezó a usar coque como combustible de alto horno, lo que a través de la primera mitad del siglo supuso un aumento de la producción de hierro fundido y arrabio, ya que el carbón vegetal era un producto cuya demanda era difícilmente suplida. Este proceso, en contra de las creencias de la época de que el uso del coque producía impurezas en el metal, pudo ser utilizado para

²³ Qian, W. y Huang, X. (2021). *Invention of cast iron smelting in early China: Archaeological survey and numerical simulation*. KeAi Chinese Roots Global Impact. <https://doi.org/10.1016/j.ia.2021.04.001>.

²⁴ Strassburger, J.H. (1969). *Blast furnace theory and practice Volume 1*. Gordon and Breach Science Publishers. [URL](#).

producir hierro forjado debido a la calidad del material obtenido; sin embargo, se optó por utilizarlo para fundiciones²⁵.

El hierro fundido fue poco a poco desapareciendo como elemento estructural a lo largo del siglo XIX, aunque siguió usándose para la construcción de pilares hasta principios del siglo XX. El uso creciente de materiales con mejores propiedades estructurales y varios colapsos como el del Dee Bridge (1847) o del Tay Bridge (1879)²⁶ pusieron de manifiesto los peligros del uso del hierro fundido en estructuras.

4.2. HIERRO FORJADO

4.2.1. Características del hierro forjado

El hierro forjado, hierro pudelado o hierro dulce es un grupo de aleaciones férreas cuyo contenido en carbono varía entre el 0,03% y el 0,08%. Se obtiene forjando y dando la forma requerida al hierro fundido.

Su bajo contenido en carbono lo hace menos resistente que el hierro fundido; sin embargo, es más dúctil. Por ello, pese a tener menos resistencia frente a compresión, tiene mejor comportamiento frente a tracciones en comparación con la fundición. Su temperatura de fusión es de 1538°C.

En los siguientes diagramas, se puede observar la diferencia entre un hierro forjado cuyo grano es recto, debido a procesos de laminado, y otro cuyos granos son asimétricos, seguramente fabricado mediante martillado o prensa. El hierro forjado laminado posee mejores propiedades resistentes que el prensado²⁷.

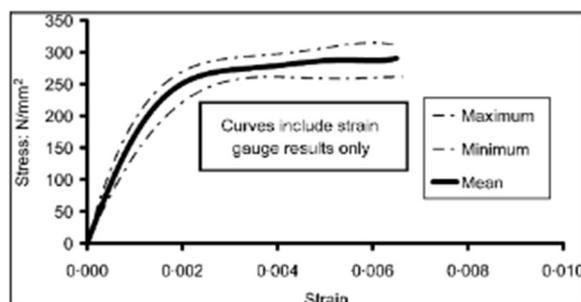


Imagen 29. Diagrama tensión-deformación de hierro forjado con grano recto de finales del siglo XIX de varios puentes en Reino Unido (S.S.J. Moy, H.W.J. Clarke y S.R. Bright; 2009).

²⁵ Hayman, R. (2003). *Op. cit.*

²⁶ Taylor, W.M. (2013). *Iron, Engineering and Architectural History in Crisis: Following the Case of the River Dee Bridge Disaster, 1847*. *Architectural Histories*, 1(1): 23, pp.1-13. <http://dx.doi.org/10.5334/ah.ao>.

²⁷ S.S.J. Moy, H.W.J. Clarke y S.R. Bright. (2009). *The engineering properties of Victorian structural wrought iron*. Institution of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1680/coma.2009.162.1.1>.

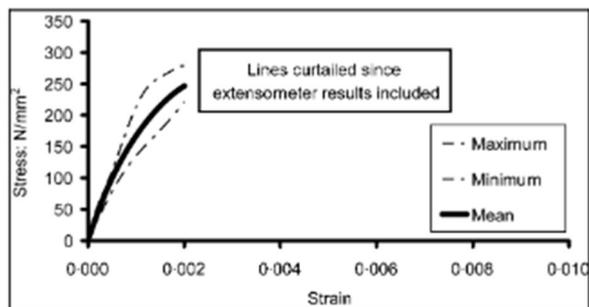


Imagen 30. Diagrama tensión-deformación de hierro forjado con grano cruzado de finales del siglo XIX de varios puentes en Reino Unido (S.S.J. Moy, H.W.J. Clarke y S.R. Bright; 2009).

4.2.2. Historia y evolución del hierro forjado

Las primeras obtenciones del hierro forjado datan del 3000 a.C. en las civilizaciones mesopotámicas, su normalización fue entre el 2000 y 1000 a.C. en la península de Anatolia dando paso a la Edad de Hierro (desde 1200 hasta 500 a.C. dependiendo de la región). El mineral de hierro era calentado en un horno bajo quemando carbón vegetal, que podía alcanzar los 1200 °C, y se forjaba martillando el metal caliente, consiguiendo quitar la escoria superficial mezclada con el hierro²⁸.



Imagen 31. Ilustración de un horno bajo.

Hacia la década de 1750, se empezó a fundir hierro producido con coque como combustible para realizar hierro forjado. Era necesario utilizar mineral de hierro con bajo contenido en fósforo, lo que aumentaba la ductilidad del material durante el proceso de forjado. Tras este descubrimiento, fue patentado por John Wood en 1761 un método de producción de hierro forjado llamado *potting and stamping* (fraguado y estampado) que consistía en fundir el arrabio en una atmósfera oxidante, dejarlo enfriar, golpear con un martillo y ser lavado. El proceso de forjado ocurría posteriormente tras recalentar el hierro en un horno de reverbero, un tipo de horno en el que se separa la zona de combustión de la zona de reacción química²⁹.

El método que más éxito cosechó fue el proceso de pudelado, patentado por Henry Cort en 1784. El proceso también se realizaba en un horno de reverbero, el arrabio se descarburizaba añadiendo chatarra o óxido de hierro mientras un operario llamado pudelador removía la mezcla para activar la reacción y que las impurezas ardieran o se convirtiesen en escoria. Pese a no inventar el laminado de

²⁸ Walker, R. (2002). *The Production, Microstructure, and Properties of Wrought Iron*. Journal of Chemical Education Vol.79. <http://dx.doi.org/10.1021/ed079p443>.

²⁹ Hayman, R. (2003). *Op. cit.*

barras metálicas, el proceso fue el primero en patentar este método de acabado en vez del uso de un martillo o prensa de forja, lo que lo convirtió en el primer método capaz de producir hierro forjado de calidad a gran escala³⁰.

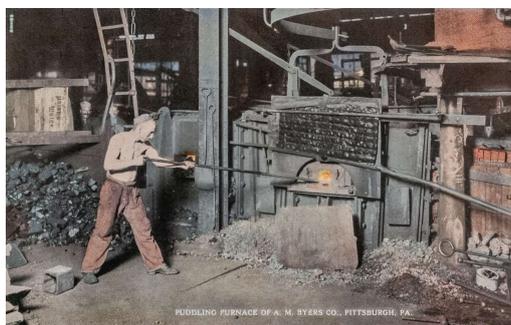


Imagen 32. Fotografía a color de un pudelador en la compañía A.M. Byers en Pittsburgh, Pennsylvania.

La producción de hierro forjado decayó rápidamente en la década de 1870 debido a las ventajas competitivas del acero, tanto mecánica como económicamente, en su proceso de fabricación.

4.3. ACERO

4.3.1. Características del acero

El acero consiste en aleaciones de carbono que tienen un contenido de carbono de entre 0,08-2,00%. Su obtención a partir del hierro fundido se basa en un proceso llamado afinado

La resistencia y ductilidad depende de la aleación que se considere ya que su contenido de carbono es bastante variable; sin embargo, el acero suele ser, de las tres aleaciones la que, en general, mejor comportamiento resistente tiene frente a cualquier modo de trabajo. Su temperatura de fusión puede variar entre 1400°C y 1500°C.

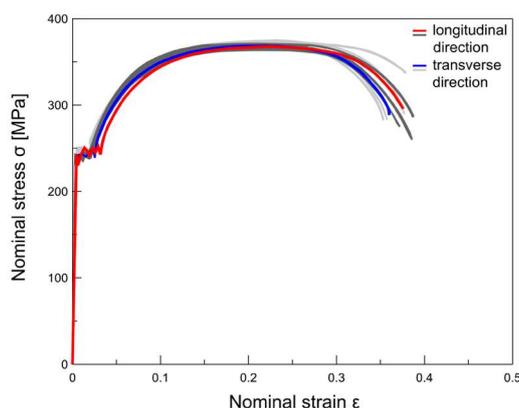


Imagen 33. Diagrama tensión-deformación del acero de un puente de finales del siglo XIX en Polonia (P. Grzegorz Kossakowski, 2021).

³⁰ Mott, R.A. (1983). *Henry Cort, the great finer: creator of puddled iron*. The Metals Society. [URL](#).

4.3.2. Historia y evolución del acero

El acero se pudo producir en civilizaciones mesopotámicas a partir del año 2000 a.C. gracias a que el carbón vegetal introducía al hierro forjado una pequeña cantidad de carbono. Su trabajabilidad era muy laboriosa en comparación con la del hierro forjado, lo que lo convirtió en un material escaso y caro hasta el siglo XIX. Se utilizaba principalmente para armas, armaduras y herramientas.

En 1855, Henry Bessemer patentó el proceso Bessemer, el primer proceso industrial de bajo costo para la producción en masa de acero. El convertidor Bessemer era llenado con el arrabio fundido procedente de un horno alto para que después se le inyectase oxígeno desde el fondo gracias a la ayuda de unos orificios. El proceso de soplado descarburiza la aleación, además que debido a las altas temperaturas alcanzadas se elimina el fósforo, azufre y silicio³¹.

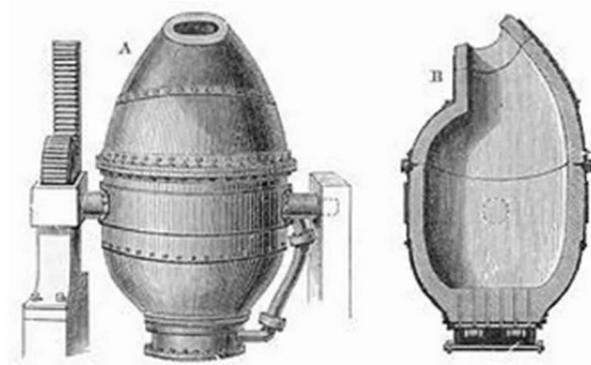


Imagen 34. Diagrama esquemático del convertidor Bessemer.

La calidad del mineral de hierro que era necesario utilizar era muy dependiente de la cantidad de fósforo que este contuviese. El convertidor Thomas, patentado en 1877, fue una solución para este problema ya que, a diferencia del convertidor Bessemer, permite la adición de cal para que reaccione con el fósforo y forme fosfatos en forma de escoria.

El horno de arco eléctrico fue inventado por William Siemens en 1879, aunque fue finalmente usado para producción comercial de acero por Paul Héroult en 1905. El arco eléctrico producido entre los dos electrodos sumergidos en el hierro fundido llega a generar una temperatura de 1500°C. En la actualidad sigue siendo el método más común para la producción de acero debido a la alta calidad del acero producido y el bajo coste³².

³¹ Bauerman, H. (1868). *The Bessemer Process and Works in the United States*. New York. The D. Van Nostrand Company. [URL](#).

³² Kershwa, J.B.C. (1909). *The Electric Furnace In Iron And Steel Production*. The D. Van Nostrand Company. [URL](#).

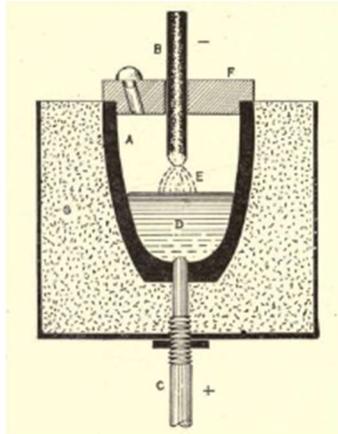


Imagen 35. Ilustración esquemática del horno de arco eléctrico Siemens (A. Stansfield, 1871).

El acero ha sido hasta el día de hoy uno de los materiales más importantes del mundo, utilizándose en una amplia gama de aplicaciones e industrias.

4.4. TIPOS DE PERFILES METÁLICOS

Cuando sea necesario el estudio de secciones antiguas, realizar mediciones es fundamental para obtener sus características geométricas, ya que no son elementos normalizados.

La clave para el diseño de secciones óptimas fue llevada a cabo por William Fairbain que, a través de consulta científica y la realización de ensayos, determinó que la sección más óptima para puentes ferroviarios eran las secciones en doble T³³.

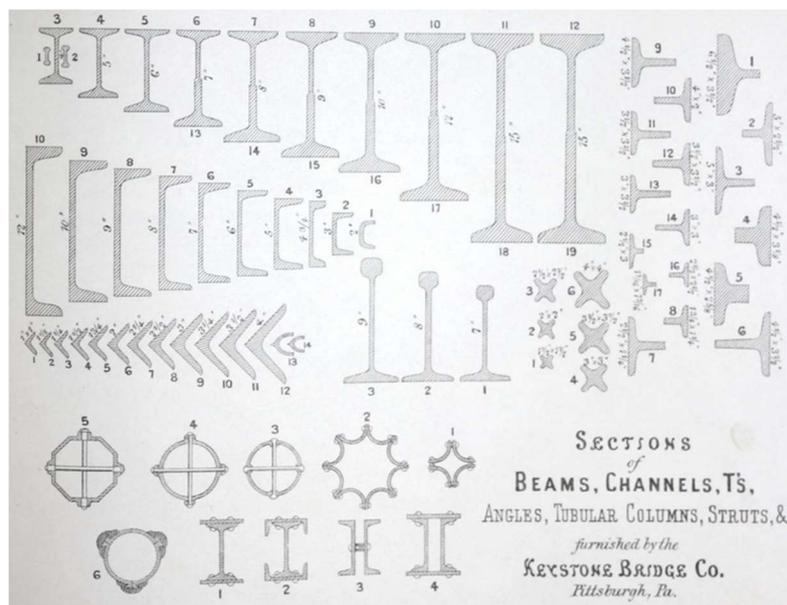


Imagen 36. Distintas secciones de hierro forjado (Keystone Bridge Company, 1874).

³³ Di Lorenzo, G. Formisano, A. y Landolfo, R. (2017). *On the Origin of I beams and Quick Analysis on the Structural Efficiency of Hot-rolled Steel Members*. The Open Civil Engineering Journal 11(Suppl-1, M3):332-344. <http://dx.doi.org/10.2174/1874149501711010332>.



Los procesos de laminación durante el siglo XIX permitieron, de manera rápida y económica, desarrollar perfiles metálicos en una amplia gama de variedades y tamaños. En la década de 1920 aparece, por primera vez, el uso de perfiles normalizados (con las letras PN) en países como Alemania, Francia e Italia³⁴.

METRIC UNITS		NORMAL PROFILES (P.N.)										
		See separate page for notes										
Size D x B	Mass/m	Imperial Size D x B	Equivalent Mass/ft	Thickness Web	Flange	Area	Moment of Inertia X - X Y - Y		Radius of Gyration X - X Y - Y		Section Modulus X - X Y - Y	
mm	kg	ins	lbs	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	cm	cm	cm ³	cm ³
80x42	5.95	3.15x1.65	4.00	3.9	5.9	7.58	77.7	6.28	3.20	0.91	19.4	2.99
80x48	9.72	3.15x1.89	6.53	9.9	5.9	12.38	103.3	10.21	2.89	0.91	25.8	4.25
90x46	7.06	3.54x1.81	4.74	4.2	6.3	8.99	117.0	8.76	3.61	0.99	26.0	3.81
90x51	10.59	3.54x2.01	7.12	9.2	6.3	13.49	147.4	12.82	3.31	0.98	32.7	5.03
100x50	8.34	3.94x1.97	5.60	4.5	6.8	10.63	170.0	12.20	4.00	1.07	34.0	4.86
100x56	13.05	3.94x2.20	8.77	10.5	6.8	16.63	220.0	18.30	3.64	1.05	44.0	6.54
110x54	9.66	4.33x2.13	6.49	4.8	7.2	12.31	238.0	16.20	4.40	1.15	43.2	5.99
110x59	13.98	4.33x2.32	9.39	9.8	7.2	17.81	293.4	22.50	4.06	1.12	53.3	7.61
120x58	11.13	4.72x2.28	7.78	5.1	7.7	14.18	327.0	21.40	4.80	1.23	54.5	7.38
120x64	16.78	4.72x2.52	11.28	11.1	7.7	21.38	413.4	30.90	4.40	1.20	68.9	9.64
130x62	12.62	5.12x2.44	8.48	5.4	8.1	16.08	435.0	27.40	5.20	1.30	66.9	8.85
130x67	17.72	5.12x2.64	11.91	10.4	8.1	22.58	526.5	36.50	4.83	1.27	81.0	10.90
140x66	14.32	5.51x2.60	9.62	5.7	8.6	18.24	572.0	35.20	5.60	1.39	81.7	10.70
140x72	20.91	5.51x2.83	14.05	11.7	8.6	26.64	669.2*	48.60	5.01*	1.35	101.3	13.49
150x70	16.01	5.91x2.76	10.76	6.0	9.0	20.39	734.0	43.70	6.00	1.46	97.8	12.50
150x76	23.07	5.91x2.99	15.50	12.0	9.0	29.39	902.8	59.30	5.54	1.42	120.3	15.61
160x74	17.90	6.30x2.91	12.03	6.3	9.5	22.80	933.0	54.50	6.40	1.55	116.6	14.70
160x79	24.18	6.30x3.11	16.25	11.3	9.5	30.80	1103	70.20	5.98	1.51	137.9	17.70
170x78	19.77	6.69x3.07	13.28	6.6	9.9	25.19	1165	66.50	6.80	1.62	137.0	17.10
170x84	27.78	6.69x3.31	18.67	12.6	9.9	35.39	1410	88.90	6.31	1.58	166.0	21.20
180x82	21.88	7.09x3.23	14.70	6.9	10.4	27.87	1444	18.30	7.20	1.71	160.4	19.80
180x88	30.36	7.09x3.46	20.40	12.9	10.4	38.67	1735	106.4	6.70	1.66	192.8	24.20
190x86	23.95	7.48x3.39	16.09	7.2	10.8	30.51	1759	97.20	7.59	1.78	185.1	22.60
190x91	31.40	7.48x3.58	21.10	12.2	10.8	40.00	2045	120.4	7.15	1.73	215.1	26.50
200x90	26.24	7.87x3.54	17.63	7.5	11.3	33.43	2139	117.0	8.00	1.87	214.0	25.90
200x96	35.66	7.87x3.78	23.96	13.5	11.3	45.43	2539	147.8	7.48	1.80	254.0	30.80
210x94	28.47	8.27x3.70	19.13	7.8	11.7	36.27	2558	137.0	8.40	1.94	243.6	29.30
210x99	36.71	8.27x3.90	24.67	12.8	11.7	46.77	2943	166.7	7.93	1.89	280.3	33.70
220x98	31.02	8.66x3.86	20.84	8.1	12.2	39.51	3055	163.0	8.79	2.03	277.7	33.30
220x104	41.38	8.66x4.09	27.81	14.1	12.2	52.71	3587	203.4	8.25	1.96	326.1	39.10
230x102	33.46	9.06x4.02	22.48	8.4	12.6	42.63	3605	188.0	9.20	2.10	313.4	36.90
230x107	42.49	9.06x4.21	28.55	13.4	12.6	54.13	4112	226.3	8.72	2.04	357.5	42.30
240x106	36.17	9.45x4.17	24.31	8.7	13.1	46.08	4239	220.0	9.59	2.19	353.3	41.5
240x112	47.48	9.45x4.41	31.91	14.7	13.1	60.48	4930	271.2	9.03	2.12	410.8	48.4
250x110	38.98	9.84x4.33	26.19	9.0	13.6	49.65	4954	255.0	9.99	2.27	396.3	46.4
250x115	48.79	9.84x4.53	32.79	14.0	13.6	62.15	5605	300.4	9.50	2.20	448.4	52.2
260x113	41.83	10.24x4.45	28.11	9.4	14.1	53.29	5735	287.0	10.37	2.32	441.1	50.8
260x119	54.08	10.24x4.69	36.34	15.4	14.1	68.89	6614	357.9	9.80	2.28	508.7	60.2
270x116	44.89	10.63x4.57	30.16	9.7	14.7	57.18	6623	325.0	10.76	2.40	490.5	56.0
270x121	55.48	10.63x4.76	37.28	14.7	14.7	70.68	7453	382.8	10.27	2.33	552.0	63.3
280x119	47.89	11.02x4.69	32.18	10.1	15.2	61.01	7575	363.0	11.14	2.44	541.0	61.0
280x124	58.88	11.02x4.88	39.57	15.1	15.2	75.01	8489	405.0	10.64	2.32	606.4	65.3
290x122	50.81	11.42x4.80	34.14	10.4	15.7	64.73	8619	403.0	11.54	2.49	594.4	66.1
290x127	62.20	11.42x5.00	41.80	15.4	15.7	79.23	9635	472.8	11.03	2.44	664.4	74.5

Tabla 19. Dimensiones para secciones P.N. francesas de 1928 para perfiles en doble T (W. Bates, 1984).

³⁴ Bates, W. (1984). *Historical Structural Steelwork Handbook*. The British Constructional Steelwork Association Limited. URL.

5. MEDIOS DE UNIÓN

La técnica óptima, tanto para análisis de uniones de obra nueva como de rehabilitación, son los métodos por elementos finitos. Gracias a ellos se pueden examinar zonas con concentraciones de tensiones complejas como pueden ser los encuentros en elementos estructurales. Además, se puede analizar la unión a fatiga, que es la razón principal por la que suelen fallar las uniones.

5.1. REMACHADO

Un remache o roblón es un elemento de unión metálico que consiste en una primera cabeza de roblón, un vástago y una cabeza de cierre. El vástago del remache se coloca a través de los agujeros de las piezas a unir, se corta el vástago, si es necesario, y se golpea con un molde para formar la cabeza de cierre. Los roblones solamente pudieron ejecutarse con hierro forjado y posteriormente acero.

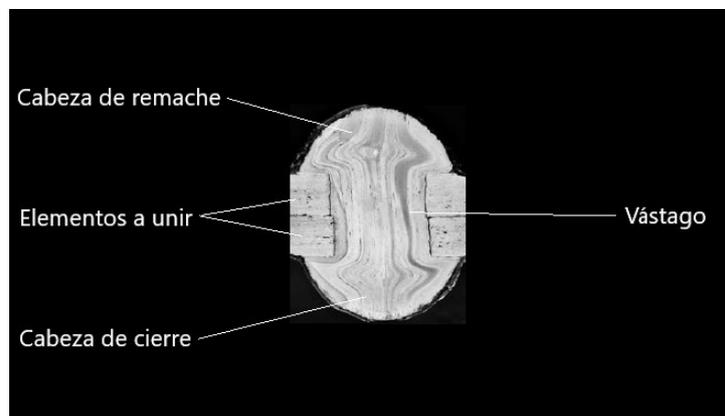


Imagen 37. Partes del roblón en una granulometría (Q. Collete, 2014).

La primera cuestión al analizar remaches en un análisis de rehabilitación es determinar el diámetro del vástago. Existen tanto métodos no destructivos, en los que se relaciona el diámetro de la cabeza y del vástago, como métodos destructivos, en los que se corta el roblón para tomar mediciones. La elección del método dependerá de la fiabilidad que se considere para el análisis.

Otro parámetro a tener en cuenta son las imperfecciones de puesta en obra de la unión remachada; para ello, consúltese la Tabla 8-1 y la Tabla 8-2 de la tesis doctoral "Riveted Connections in Historical Metal Structures (1840-1940)" por Quentin Collete.

Las intervenciones más comunes son el refuerzo o sustitución de elementos auxiliares (placas, angulares...) o la sustitución de remaches fracturados.

Los remaches en frío llevan siendo utilizados durante milenios, siendo de los primeros tipos de unión estructural. Ya eran utilizados por los antiguos egipcios para construir herramientas e incluso civilizaciones romanas y galas disponían de un molde primitivo para realizar la cabeza de cierre de los roblones³⁵.

³⁵ Collete, Q. Wouters, I. y Lauriks, L. (2011). *Evolution of historical riveted connections: Joining typologies, installation techniques and calculation methods*. Department of Architectural Engineering, Vrije Universiteit Brussel. <http://dx.doi.org/10.2495/STR110251>.

La técnica de ejecución de remaches en caliente fue desarrollada por los campos de la calderería y la construcción naval respectivamente en el contexto de la primera revolución industrial. Su primera aplicación en la construcción fue la de elemento de unión para realizar perfiles compuestos desde simples pletinas o perfiles angulares. La utilización de esta técnica permitía realizar uniones permanentes, de bajo coste respecto a los materiales y que podían compensar la desalineación de agujeros³⁶.

El roblonado en caliente presenta grandes ventajas frente a los remaches en frío, aumentando la fricción debido a la precarga generada en el enfriamiento del remache.

Antes de 1870, el diámetro de remaches y su correspondiente agujero se seleccionaban mediante tablas en función del espesor de los elementos a unir o con fórmulas empíricas para cualquier espesor³⁷.

$$d = 1,5e + 4 \text{ [mm]}$$

Posteriormente, tras el desarrollo de fórmulas analíticas, se llegó a la conclusión que la resistencia de un remache era función de su geometría, material y carga aplicada. En cuanto al diseño de uniones remachadas, se evaluaban tres parámetros: la resistencia última de la placa, la resistencia a aplastamiento de la placa y la resistencia a cortante admisible en el roblón. Este último era el criterio de mayor influencia a la hora calcular uniones³⁸.

En la *Tabla 20* puede observarse una comparativa de tensiones admisibles a cortante en roblones de distintos años y materiales. Se utilizaban valores desde 3 hasta 6 como factor de seguridad para el cálculo de la tensión admisible a cortante.

MATERIAL	ALLOWABLE RIVET SHEAR STRESS R_s (MPa)		
	1870s	1880s	1890s
Wrought-iron splices	40	60	70
Steel splices	/	/	90

Tabla 20. Aumento en la tensión admisible a cortante en remaches de hierro forjado y acero a finales del siglo XIX (Q. Collete, 2014).

Se han realizado ensayos en roblones del siglo XIX, dando resultados dentro del rango anteriormente expuesto. En la *Imagen 38* pueden observarse tres ensayos realizados a cortante sobre distintos remaches de hierro forjado del puente Saint-Esprit en Francia, construido en 1864.

³⁶ Collete, Q. (2014). *Riveted Connections in Historical Metal Structures (1840-1940)*. [Tesis doctoral, Vrije Universiteit Brussel]. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3157.2801>.

³⁷ Armengaud, A. (1841). *Publication industrielle des machines, outils et appareils les plus perfectionnés et les plus récents employés dans les différentes branches l'industrie française et étrangère*. [URL](#).

³⁸ Collete, Q. (2014). *Op. cit.*

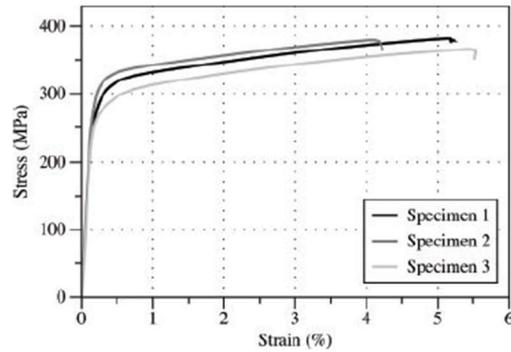


Imagen 38. Diagrama deformación-tensión en roblones de hierro forjado del puente Saint-Esprit construido en 1864 sobre el río Adour, Francia (L. Gallegos Mayorga & S. Sire, B. Plu, 2016).

Sin embargo, los remaches presentan varias desventajas frente a las uniones atornilladas:

- - Imposibilidad de realizar uniones fácilmente desmontables
- - Mala distribución tensional en la junta
- - Imposibilidad de calcular la precarga
- - Se requiere mayor número de mano de obra

En cuanto a desventajas frente a las uniones soldadas:

- - Mayor peso propio
- - Mayor coste
- - Mayor tiempo de ejecución
- - Se requiere mayor número de mano de obra

El uso de remaches fue decayendo tras el incremento en la utilización de uniones atornilladas hacia el último cuarto del siglo XIX, generalmente debido al encarecimiento de la mano de obra. Las técnicas de soldadura modernas fueron ampliamente desarrolladas en la Segunda Guerra Mundial por la industria naval, lo que produjo que finalmente el remachado cayera en desuso hacia la década de 1960³⁹.

5.2. TORNILLERÍA

Las uniones atornilladas son un tipo de unión desmontable que se utiliza para unir dos o más piezas mediante el uso de tornillos y tuercas.

³⁹ Collete, Q. (2014). *Op. cit.*

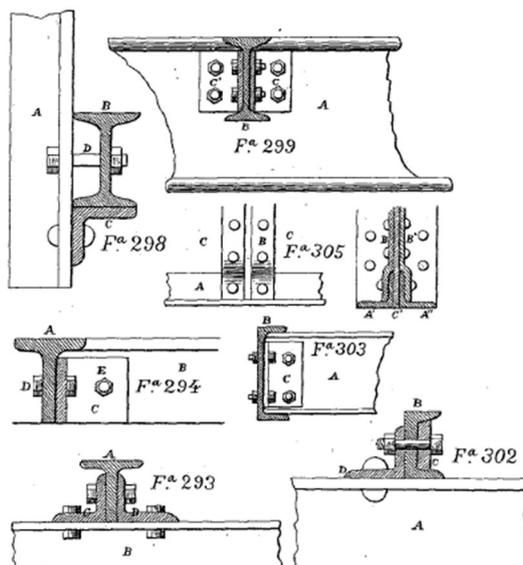


Imagen 39. Disposiciones de uniones atornilladas (A. Rovira y Rabassa, 1900).

La rehabilitación de este tipo de uniones presenta una gran ventaja, ya que al ser elementos desmontables pueden sustituirse los elementos de tornillería por actuales. Desmontar algunas uniones deterioradas puede ser problemático, por lo que se puede llegar a cortar. Es esencial el análisis de las placas, angulares o elementos auxiliares que componen la unión frente a aplastamiento y deformaciones.

La evolución de su diseño y cálculo es análoga al de los remaches, explicado en el apartado previo. La principal diferencia es que se puede variar la precarga de los tornillos, ya que esta se genera con el par de apriete al ser ejecutada la unión⁴⁰.

El desarrollo de las uniones atornilladas vio un gran avance durante el siglo XIX gracias al desarrollo del acero como material para la construcción y el uso de nuevas máquinas herramienta⁴¹. En 1841, Joseph Whitworth creó la primera estandarización de roscas con un ángulo de rosca de 55°, denominada British Standard Whitworth⁴².

Diameter in Inches ..	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2	5/8	3/4	7/8	1	1 1/8	1 1/4
Threads to the Inch ..	20	18	16	14	12	11	10	9	8	7	7
Diameter in Inches ..	1 3/8	1 1/2	1 5/8	1 3/4	1 7/8	2	2 1/4	2 1/2	2 3/4	3	3 1/4
Threads to the Inch ..	6	6	5	5	4 1/2	4 1/2	4	4	3 1/2	3 1/2	3 1/4
Diameter in Inches ..	3 1/2	3 3/4	4	4 1/4	4 1/2	4 3/4	5	5 1/4	5 1/2	5 3/4	6
Threads to the Inch ..	3 1/4	3	3	2 7/8	2 7/8	2 1/4	2 3/4	2 5/8	2 5/8	2 1/2	2 1/2

Tabla 21. Medidas de roscas Brithis Standard Whitworth (J. Whitworth, 1858).

⁴⁰ Bates, W. (1984). *Op. cit.*

⁴¹ W.R, Wilbur. (1905). History of the Bolt and Nut Industry of America. Ward&Shaw. [URL](#).

⁴² Atkinson, N. (1996). Sir Joseph Whitworth 'The World's Best Mechanician'. Sutton Publishing. [URL](#).

Hasta mediados del siglo XX, existe una gran variedad de estándares de roscas que varían entre el ángulo de rosca, diámetro, longitud, etc. Normalmente, estos estándares eran definidos por el fabricante de tornillos y venía recogido en el catálogo de venta, por lo que, el diseño y cálculo de estos elementos era muy dependiente de la época y el lugar.

En cuanto a la normalización a nivel estatal, es de mencionar la métrica DIN creada en Alemania en 1919. Las roscas estandarizadas ISO, con un ángulo de rosca de 60º, fueron creadas en 1948, adoptando su utilización por varios países como Reino Unido, Estados Unidos y Canadá ⁴³.

5.3. SOLDADURA

La soldadura es un proceso de unión permanente para la unión de piezas metálicas. Es una técnica esencial en multitud de industrias modernas como pueden ser la construcción, la naval, la electrónica, etc.

En cuanto a las soldaduras de estructuras a rehabilitar, se recomienda hacer una campaña de ensayos por líquidos penetrantes, por un laboratorio o inspector experto, de manera que se pueda determinar el estado del cordón de soldadura. Lo más habitual en soldaduras que requieran rehabilitación es que se presenten grietas en el cordón de soldadura, signos de que el cordón se encuentra prefatigado.

Con el fin de evitar el fallo estructural se pueden aplicar distintos métodos, en función del espesor de garganta del cordón de soldadura y el compromiso de la unión para la integridad del conjunto estructural. Dentro de los métodos más tradicionales: si dicho compromiso es alto, como puede ser en el caso de soportes, la resoldadura puede ser una opción viable; mientras que, si hay bajo compromiso y poco espesor de garganta, se sueldan las zonas agrietadas mediante soldadura TIG. Otro método más moderno que está mostrando muy buenos resultados para todo tipo de refuerzos de soldadura es el tratamiento HFMI (High Frequency Mechanical Impact), que consiste en la utilización de un martillo percutor con un bulón de 3mm de diámetro a altas frecuencias sobre el cordón⁴⁴.

Existen diversos métodos de soldadura:

5.3.1. Soldadura por forja

Es el método de soldadura más antiguo de todos, remontándose sus primeras utilizaciones a la Edad de Bronce.

Consiste en calentar las piezas a unir en una forja y ser unidas con martillo, soldadura por percusión, o con prensa, soldadura por presión. Se le puede añadir *flux*, un agente químico cuya función es la de limpiar la soldadura para evitar la oxidación, comúnmente eran usados arena y bórax⁴⁵.

⁴³ Nord-Lock Group. *The History of the Bolt*. Recuperado el 27 de febrero de 2024. [URL](#).

⁴⁴ Leitner, M. y Barsoum, Z. (2016). *Crack propagation analysis and rehabilitation by HFMI of pre-fatigued welded structures*. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-016-0316-x>.

⁴⁵ JernBerg, J. (1919). *Forging: Manual of Practical Instruction in Hand Forging of Wrought Iron, Machine Steel, and Tool Steel*. American Technical Society. [URL](#).

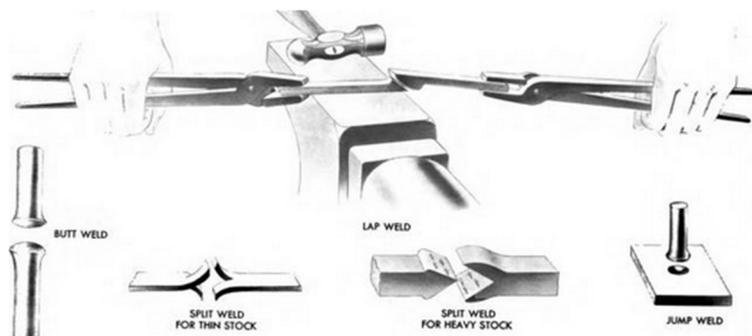


Imagen 40. Procedimientos de soldadura por forja (War Department, 1943)

La mayor dificultad en la soldadura por forja es calentar el material correctamente. Si la temperatura es demasiado baja las piezas no se unirán correctamente y si es muy alta el metal se quemará provocando oxidaciones, lo que resultará en una soldadura frágil. Además, es difícil realizar este proceso en piezas grandes ya que es difícil controlar la temperatura a la que se deben calentar las piezas, que ronda los 1200°C tanto para hierro forjado como para el acero⁴⁶.

5.3.2. Soldadura oxiacetilénica

El desarrollo de la soldadura oxiacetilénica empezó tras el descubrimiento de la efectividad del oxiacetileno para soldar en 1895 por parte de M. Le Chatelier. Su utilización industrial comienza a partir de 1903⁴⁷.

Esta tipología de soldadura puede utilizarse con o sin aporte, generalmente en función del espesor de los elementos a unir. La soldadura oxiacetilénica con aporte de material genera uniones más fuertes y de mayor calidad⁴⁸.

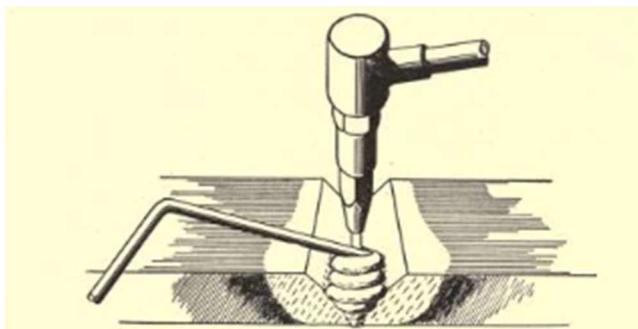


Imagen 41. Proceso de soldadura a tope con aporte (J.R. Campbell, 1919)

La combustión de oxígeno y acetileno en sus correctas proporciones llega a alcanzar temperaturas superiores a 1800°C. Su temperatura es tan alta que, si el caudal de oxiacetileno es suficiente, puede utilizarse equipamiento concreto para cortar piezas.

⁴⁶ War Department. (1943). *TM 9-2852 Instruction Guide: Welding Theory and Applications*. [URL](#).

⁴⁷ Calvin, M.E. (1915). *Oxy-Acetylene Welding and Cutting*. Frederick J. Drake & CO. [URL](#).

⁴⁸ Lorn Campbell, J.R. (1919). *Oxy-Acetylene Welding Manual*. John Wiley & Sons, Inc. [URL](#).

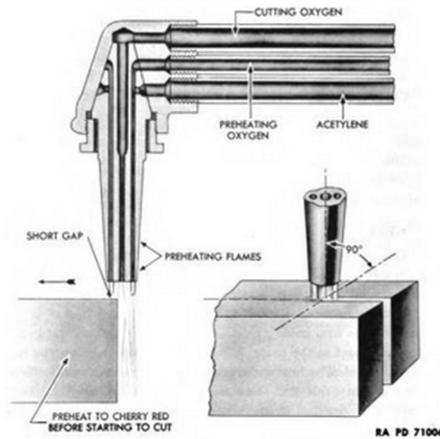


Imagen 42. Ilustración del proceso de cortado con equipamiento (War Department, 1943)

Su rápido desarrollo provocó que esta técnica fuese la dominante hasta 1927 en el campo de la soldadura, debido a que ninguna otra tipología de soldadura en el momento podía crear fuertes uniones de soldadura en casi todos los metales.

5.3.3. Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco eléctrico consiste en la unión de piezas metálicas gracias a la temperatura generada por corriente eléctrica.

El descubrimiento del arco eléctrico fue a manos de Sir Humphry Davy, considerado fundador de la electroquímica, en 1800. Aunque sus primeras utilidades industriales se remontan a la patente del electrodo de carbono no consumible (CAW) por parte de Nicholas de Bernardos y Stanislaw Olszewski en 1882.

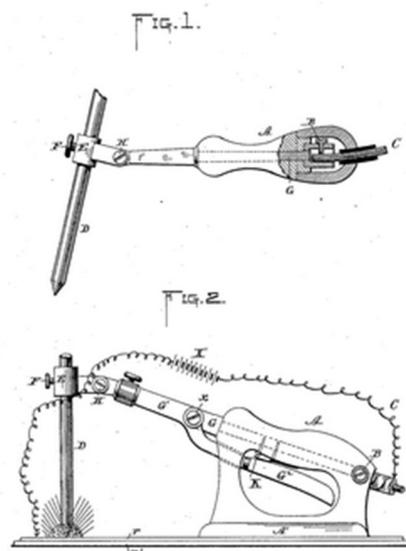


Imagen 43. Diagramas de la patente del electrodo de carbono en 1882.

La soldadura CAW se caracterizó por tener cordones cuya calidad y resistencia era difícil de garantizar en cuanto a uniones estructurales. Teniendo que utilizarse material de aporte revestido para obtener mejores soldaduras⁴⁹.

Pocos años después, en 1889, el ruso Nikolay Slavyanov y el americano Charles Coffin desarrollaron de manera independiente el proceso de soldadura de electrodo de metal consumible con revestimiento (SMAW). Este proceso generaba grandes ventajas ya que la propia protección y metal de aporte de la soldadura venían en el propio electrodo.

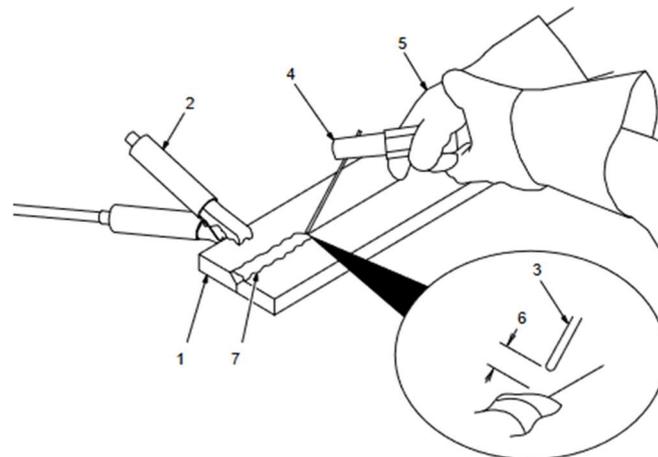


Imagen 44. Proceso de soldadura SMAW (Miller Welds, 2013).

Este proceso tardó décadas en normalizarse en el mercado industrial, ya que la producción de electrodos de buena calidad acarrea un alto costo. Finalmente, la utilización de esta tipología de soldadura vio un gran aumento en 1927, tras desarrollarse un proceso de extrusión que disminuyó los costes de fabricación de electrodos revestidos. En los años previos a la Segunda Guerra Mundial, los procesos de soldadura vieron un gran aumento en sus tipologías, desarrollándose la soldadura por arco sumergido (SAW), la soldadura por arco con electrodo consumible bajo gas protector (MIG/MAG) y la soldadura por arco con electrodo de tungsteno no consumible bajo gas protector (TIG)⁵⁰.

⁴⁹ War Department. (1943). *Op. Cit.*

⁵⁰ Lincoln Electric Company. (1973). *The procedure handbook of arc welding. Twelfth Edition.* [URL](#).

6. CONCLUSIONES

En este documento se han aportado datos diversos para la caracterización de estructuras metálicas. Los métodos y cargas con las que se concibieron estas estructuras son muy distintas a las actuales, debiendo comprobar con métodos y cargas actuales su integridad estructural tanto resistientemente (ELU) como en deformaciones (ELS).

Los métodos gráficos, aunque primitivos, eran funcionales para la época. Sin embargo, las herramientas modernas como el cálculo matricial de estructuras y los métodos de elementos finitos permiten realizar un análisis estructural de mucha mayor calidad. Es indispensable utilizar estos últimos métodos para el correcto análisis de estructuras a rehabilitar.

Determinar las propiedades resistentes de los materiales estructurales es lo idóneo, esto permitirá conocer que capacidad resistente tienen los elementos estructurales frente a las solicitaciones actuales. A su vez, se debe atender a los criterios de protección contra el fuego pertinentes a la normativa vigente. La estructura metálica presenta grandes facilidades para implementar refuerzos, ya que se puede de manera rápida obtener las propiedades geométricas de una sección mediante herramientas de dibujo de CAD.

Los criterios para la selección del refuerzo están relacionados con las intenciones arquitectónicas que se le quieran dar al proyecto, que suelen tener que ver con la visibilidad del refuerzo. Disponer de elementos nuevos como vigas de arriostramiento puede ser una solución óptima, ya que rigidiza el conjunto de la estructura, puede reducir el pandeo de un elemento y compensar deformaciones excesivas.

Al analizar estructuras que se compongan de celosías, se debe prestar especial atención a que tipología corresponden sus nudos y medir la longitud de los elementos. Así mismo las cargas se deberán considerar como distribuidas o lineales, ya que al aplicar las cargas solamente en nudos los elementos estructurales pueden quedar dimensionados por debajo de sus solicitaciones reales. Al examinar estructuras metálicas compuestas por nudos rígidos se deberá comprobar la rigidez de estos nudos para asegurar la transmisión de momentos.

Existen diversos métodos de unión, realizar un análisis patológico y validar su capacidad estructural es fundamental.

Idealmente las estructuras antiguas deberían ser inspeccionadas periódicamente para garantizar la conservación de estas. En la realidad esto no suele ocurrir hasta que se le quiere dar un uso distinto o el edificio obtiene un grado de protección patrimonial; sin embargo, debido a la conciencia social y las políticas patrimoniales esto se está cambiando, catalogando las estructuras antiguas como un bien cultural. En el caso de las estructuras metálicas, estas no siempre se vieron como representativas, ya que su uso estaba muy relacionado con el industrial.

Como se ha podido observar, el estudio de estructuras metálicas, pese a tener una gran cantidad de datos y bibliografía accesible, es un tema complejo que debe abordarse por profesionales expertos en

la materia. Cada caso de rehabilitación puede ser único, debiendo abordar estrategias que garanticen la seguridad de las personas y los bienes.

BIBLIOGRAFÍA

Alderstein, R. (2024). Introduction to aerospace structures and materials. LibreTexts Engineering.

Armengaud, A. (1841). *Publication industrielle des machines, outils et appareils les plus perfectionés et les plus récents employés dans les différentes braches l'industrie française et étrangère*. [URL](#).

Ash, M. y Ash, W. Greater New York Charter. (1899). *The Building Code of the City of New York*. Weed-Parsons Printing Company. [URL](#).

Asociación de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (1861). *Prolongación de la calle Bailén y puente de hierro para la de Segovia*. Revista de Obras Públicas Nº18 Año IX. URL.Año IX. [URL](#).

Atkinson, N. (1996). *Sir Joseph Whitworth 'The World's Best Mechanician'*. Sutton Publishing. [URL](#).

Babrauskas, V. y Brady Williamson, R. (1978). *The Historical Basis of Fire Resistance Testing-Part I*. University of California, Berkeley. [URL](#).

Baker, W.F. Beghini, L.L. Mazurek, A. Carrion, J y Beghini, A. (2013). *Maxwell's reciprocal diagrams and discrete Michell frames*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0910-0>.

Bates, W. (1984). *Historical Structural Steelwork Handbook*. The British Constructional Steelwork Association Limited. [URL](#).

Bauerman, H. (1868). *The Bessemer Process and Works in the United States*. New York. The D. Van Nostrand Company. [URL](#).

Braidwood, J. (1866). *Fire prevention and fire extinction*. [URL](#).

Calvin, M.E. (1915). *Oxy-Acetylene Welding and Cutting*. Frederick J. Drake & CO. [URL](#).

Cárcamo, J. (2023). *Los puentes de Burtzeña*. [URL](#).

Collete, Q. (2014). *Riveted Connections in Historical Metal Structures (1840-1940)*. [Tesis doctoral, Vrije Universiteit Brussel]. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3157.2801>.

Collete, Q. Wouters, I. y Lauriks, L. (2011). *Evolution of historical riveted connections: Joining typologies, installation techniques and calculation methods*. Department of Architectural Engineering, Vrije Universiteit Brussel. <http://dx.doi.org/10.2495/STR110251>.

De Bouw, M. Wouters, I. Vereecken, J. y Lauriks, L. (2009). *Iron and steel varieties in building industry between 1860 and 1914 - A complex and confusing situation resolved*. Construction and Building Materials Volume 23, Issue 8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.009>.

Deswarte, S. y Lemaine, B. (1997). *L'architecture et les ingénieurs: deux siècles de réalisations*. Le Moniteur. [URL](#).

Di Lorenzo, G. Formisano, A. y Landolfo, R. (2017). *On the Origin of I beams and Quick Analysis on the Structural Efficiency of Hot-rolled Steel Members*. The Open Civil Engineering Journal 11(Suppl-1, M3):332-344. <http://dx.doi.org/10.2174/1874149501711010332>.

Fairbairn, W. (1857). *On the application of cast and wrought iron to building purposes*. Tercera edición. Spottiswoode and Co. [URL](#).

Gabitov, A.I. et al. (2021). *Historical Aspects of Development of Metall Structures and Application Thereof in Buildings and Facilities*. IOP Conf. Series 1079(2):022037. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1079/2/022037>.

Gallegos Mayorga, L. & Sire, S. y Plu, B. (2016). *Experimental investigation on hot riveted double shear connections, a friction analysis*. Van Balen & Vestrynge. ISBN 978-1-138-02951-4. <http://dx.doi.org/10.1201/9781315616995-180>.

General Powers of London County Council. (1909). *London County Council Act*. [URL](#).

Gerhardt, R. Kurrer, K. y Pichler, G. (2003). *The methods of graphical statics and their relation to the structural form*. First International Congress on Construction History, Madrid. [URL](#).

Goldyn, M. y Urban, T. (2020). *Failures of the Cast-Iron Columns of Historic Building-Case Studies*. Lodz University of Technology. <http://dx.doi.org/10.3390/infrastructures5090071>.

González Lisorge, A. (2017). *Del 'empirismo' a la invención: cálculo y proyecto en la arquitectura moderna*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. [URL](#).

Grzegorz Kossakowski, P. (2021). *Mechanical Properties of Bridge Steel from the Late 19th Century*. Kielce University of Technology. <https://doi.org/10.3390/app11020478>.

Gwilt, J. (1881). *Encyclopaedia of Architecture*. Longmans, Green, and Co. [URL](#).

Hardy, C. (1930). *Analysis of continuous frames by distributing fixed-end moments*. American Society of Civil Engineers.

Hayman, R. (2003). *The Shropshire wrought-iron industry c1600.1900 a study of technological change*. [Tesis doctoral, University of Birmingham]. [URL](#).

JernBerg, J. (1919). *Forging: Manual of Practical Instruction in Hand Forging of Wrought Iron, Machine Steel, and Tool Steel*. American Technical Society. [URL](#).

Kershwa, J.B.C. (1909). *The Electric Furnace In Iron And Steel Production*. The D. Van Nostrand Company. [URL](#).

Leitner, M. y Barsoum, Z. (2016). *Crack propagation analysis and rehabilitation by HFMI of pre-fatigued welded structures*. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-016-0316-x>.

López César, I. (2014). *La aportación estructural del Crystal Palace de la Exposición Universal de Londres 1851. Una ampliación del enfoque histórico tradicional*. ISSN: 2340-9711. [URL](#).

Lorn Campbell, J.R. (1919). *Oxy-Acetylene Welding Manual*. John Wiley & Sons, Inc. [URL](#).

Luján Díaz, A. (2015). *La modernidad latente de la obra pública: primeras aplicaciones del hierro en puente españoles, (1815-1846)*. [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/25549>.

- MacLeod, I. y Martin, T. (2018). *The legacy of the Tay Bridge collapse*. ISIS Journal of Engineering Vol.157. [URL](#).
- Maraveas, C. (2015). *Fire resistance of metal framed historical structures*. [Tesis doctoral, University of Manchester]. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1233.1601>.
- Miller Welds. (2013). *Guidelines For Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*.
- Mott, R.A. (1983). *Henry Cort, the great finer: creator of puddled iron*. The Metals Society. [URL](#).
- Nord-Lock Group. *The History of the Bolt*. Recuperado el 27 de febrero de 2024. [URL](#).
- Ochshorn, J. (2017). *Revisiting Form and Forces: A Critique of Graphical Statics*. American Society of Civil Engineers. [URL](#).
- Parry, R.H.G. (2004). *Mohr circles, stress paths and geotechnics*. Spon Press. ISBN 0-203-44040-4.
- Patrimonio cultural y paisaje urbano, Ayuntamiento de Madrid. *Puente de hierro sobre la ría*. Recuperado el 27 de febrero de 2024. [URL](#).
- Pons Poblet, J.M. y Arboix Alió, A. (2020). *La estática gráfica, pasado y presente de una metodología singular*. [Universitat Politècnica de València]. [URL](#).
- Qian,W. y Huang,X. (2021). *Invention of cast iron smelting in early China: Archaeological survey and numerical simulation*. KeAi Chinese Roots Global Impact. <https://doi.org/10.1016/j.aia.2021.04.001>.
- Randall Lawson,J. (2009). *A History of Fire Testing*. NIST Technical Note 1628. [URL](#).
- Rovira y Rabassa, A. (1900). *El hierro sus cortes y enlaces*. Librería de Ribó y Marín.
- S.S.J. Moy, H.W.J. Clarke y S.R. Bright. (2009). *The engineering properties of Victorian structural wrought iron*. Institution of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1680/coma.2009.162.1.1>.
- Schueremans, L. Porcher, H. Vestrynge, E. Rossi, B. y Wouters, I. (2016). *On the evolution in design and calculation of steel structures over the 19th century in Belgium, France and England*. ISBN 978-1-138-02951-4. <http://dx.doi.org/10.1201/9781315616995-81>.
- Stansfield, A. (1914). *The electric furnace; its construction, operation and uses*. McGraw-Hill Book Company. [URL](#).
- Strassburger, J.H. (1969). *Blast furnace theory and practice Volume 1*. Gordon and Breach Science Publishers. [URL](#).
- Sweet's Catalogue Service. (1927). *Sweet's Architectural Catalogue*. [URL](#).
- Syndicat National Des Entrepeneurs Spécialistes de Travaux de Réparation et Renforcement de Structures. (2014). *Réparation et rénovation des structures métalliques*. Stres. [URL](#).

Taylor, W.M. (2013). *Iron, Engineering and Architectural History in Crisis: Following the Case of the River Dee Bridge Disaster, 1847*. *Architectural Histories*, 1(1): 23, pp.1-13. <http://dx.doi.org/10.5334/ah.ao>.

The Keystone Bridge Company. (1874). *Descriptive catalogue of wrought-iron bridges*. Allen, Lane & Scott. [URL](#).

Valdés, N. (1870). *Manual del Ingeniero y Arquitecto*. Imprenta de Gabriel Alhambra.

W.R, Wilbur. (1905). *History of the Bolt and Nut Industry of America*. Ward&Shaw. [URL](#).

Walker, R. (2002). *The Production, Microstructure, and Properties of Wrought Iron*. *Journal of Chemical Education* Vol.79. <http://dx.doi.org/10.1021/ed079p443>.

War Department. (1943). TM 9-2852 Instruction Guide: Welding Theory and Applications. [URL](#).

Whitworth, J. (1858). *Miscellaneous papers on mechanical subjects*. Harrison and Sons.