

DE LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL A LA GALERÍA DE LAS MÁQUINAS DE 1889 A TRAVÉS DE LAS EXPOSICIONES UNIVERSALES



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Autor: García Alcalá, Elena

Tutor: Fenollosa Forner, Ernesto Jesús



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Curso 2019/2020

RESUMEN

La primera Exposición Universal se celebró en Londres en 1851, más conocida como “The Great Exhibition of the Works of Industry of All Nations”. Este hecho se dio en Inglaterra por primera vez ya que, fue aquí donde se inició la Revolución Industrial. El gran avance tecnológico y de las industrias, se generó por el paso de la mano de obra humana por maquinaria, aumentando notablemente la producción.

Una de las industrias que más auge experimentó, fue la siderúrgica, dando paso a su empleo en el campo de la edificación y de la ingeniería como material estructural.

En el campo de la ingeniería se empezó a utilizar el hierro como material estructural para puentes, utilizando tipologías estructurales cada vez más novedosas. Esta experiencia se llevó, poco después, al campo de la edificación, como estructuras de cubiertas vidriadas. Sin embargo, este desarrollo fue más allá, empleando este material como estructura portante de los edificios. Así fue como en la Exposición Universal de Londres de 1851, Joseph Paxton construyó el Crystal Palace, un impresionante pabellón expositivo con estructura prefabricada de hierro y envolvente de vidrio. Fue un antes y un después en la arquitectura.

Desde ese momento comenzó una ambiciosa competición por construir edificios de luces cada vez mayores, con estructuras más novedosas y tecnológicas. Así fue como se empezó a estudiar los arcos que permitían crear estos edificios. Desde el pórtico rígido del Crystal Palace, pasaron al arco biarticulado, con rótulas en los apoyos; hasta llegar finalmente al arco triarticulado. Esta tipología estructural se componía de dos semiarcos, con rótulas en sus apoyos y una tercera rótula en la clave, en la unión de ambos semiarcos.

Así fue como, con la tipología estructural de arcos triarticulados, Dutert y Contamin diseñan la Galería de las Máquinas para la Exposición Universal de París de 1889. Este pabellón rompió todos los esquemas dimensionales alcanzados hasta el momento, con una luz de 110.60 metros medidos a ejes de rótulas. La Galería de las Máquinas se convirtió en uno de los hitos de la arquitectura del momento, dado que sus dimensiones duplicaban las conseguidas por otros edificios de su época.

En este trabajo vamos a repasar la arquitectura del hierro, vamos a estudiar las tipologías estructurales metálicas a través de algunos de los edificios diseñados para las Exposiciones Universales. Vamos a ver la evolución de las estructuras de hierro desde el auge de la industria siderúrgica de la Revolución Industrial, hasta llegar a la Galería de las Máquinas. Analizaremos la tipología estructural de este edificio, un gran ejemplo de las estructuras metálicas de finales del siglo XIX.

Exposición Universal, Revolución Industrial, estructura metálica, Galería de las Máquinas, arco triarticulado.

RESUM

La primera Exposició Universal es va celebrar a Londres en 1851, més coneguda com “The Great Exhibition of the Works of Industry of All Nations”. Aquest fet es va donar a Anglaterra per primera vegada ja que, va anar ací on es va iniciar la Revolució Industrial. El gran avanç tecnològic i de les indústries, es va generar pel pas de la mà d'obra humana per maquinària, augmentant notablement la producció.

Una de les indústries que més auge va experimentar, va ser la siderúrgica, donant pas al seu ús en el camp de l'edificació i de l'enginyeria com a material estructural.

En el camp de l'enginyeria es va començar a utilitzar el ferro com a material estructural per a ponts, utilitzant tipologies estructurals cada vegada més nous. Aquesta experiència es va emportar, poc després, al camp de l'edificació, com a estructures de cobertes vidriades. No obstant això, aquest desenvolupament va ser més enllà, emprant aquest material com a estructura portant dels edificis. Així va ser com en l'Exposició Universal de Londres de 1851, Joseph Paxton va construir el Crystal Palace, un impressionant pavelló expositiu amb estructura prefabricada de ferro i envolupant de vidre. Va ser un abans i un després en l'arquitectura.

Des d'aqueix moment va començar una ambiciosa competició per construir edificis de llums cada vegada majors, amb estructures més noves i tecnològiques. Així va ser com es va començar a estudiar els arcs que permetien crear aquests edificis. Des del pòrtic rígid del Crystal Palace, van passar a l'arc biarticulat, amb ròtules en els suports; fins a arribar finalment a l'arc triarticulat. Aquesta tipologia estructural es componia de dues semiarcs, amb ròtules en els seus suports i una tercera ròtula en la clau, en la unió de tots dos semiarcs.

Així va ser com, amb la tipologia estructural d'arcs triarticulats, Dutert i Contamin dissenyen la Galeria de les Màquines per a l'Exposició Universal de París de 1889. Aquest pavelló va trencar tots els esquemes dimensionals aconseguits fins al moment, amb una llum de 110.60 metres mesurats a eixos de ròtules. La Galeria de les Màquines es va convertir en un de les fites de l'arquitectura del moment, atés que les seues dimensions duplicaven les aconseguides per altres edificis de la seua època.

En aquest treball repassarem l'arquitectura del ferro, estudiarem les tipologies estructurals metàl·liques a través d'alguns dels edificis dissenyats per a les Exposicions Universals. Veurem l'evolució de les estructures de ferro des de l'auge de la indústria siderúrgica de la Revolució Industrial, fins a arribar a la Galeria de les Màquines. Analitzarem la tipologia estructural d'aquest edifici, un gran exemple de les estructures metàl·liques de finals del segle XIX.

Exposició Universal, Revolució Industrial, estructura metàl·lica, Galeria de les Màquines, arc triarticulat.

ABSTRACT

The first Universal Exhibition was held in London in 1851, better known as "The Great Exhibition of the Works of Industry of All Nations". This event took place in England for the first time, as it was here that the Industrial Revolution began. The great technological and industrial advance was generated by the passage of human labor through machinery, notably increasing production.

One of the industries that experienced the greatest boom was the steel industry, giving way to its use in the field of building and engineering as a structural material.

In the field of engineering, iron began to be used as a structural material for bridges, using increasingly new structural types. This experience was taken, soon after, to the field of building, as structures of glazed roofs. However, this development went further, using this material as a supporting structure for buildings. Thus, at the 1851 World's Fair in London, Joseph Paxton built the Crystal Palace, an impressive exhibition pavilion with a prefabricated iron structure and glass envelope. It was a before and after in architecture.

From that moment began an ambitious competition to build buildings of increasing light, with more innovative and technological structures. This is how the arches that allow the creation of these buildings began to be studied. From the rigid portico of the Crystal Palace, they went on to the bi-articulated arch, with kneecaps on the supports; until finally arriving at the tri-articulated arch. This structural typology was composed of two semi-arches, with ball joints on their supports and a third ball joint on the keystone, at the union of both semi-arches.

This is how, with the structural typology of triarticulated arches, Dutert and Contamin designed the Gallery of the Machines for the 1889 Universal Exhibition in Paris. This pavilion broke all the dimensional schemes reached so far, with a light of 110.60 meters measured at the axis of the ball-and-socket joints. The Machine Gallery became one of the architectural landmarks of the time, since its dimensions were double those achieved by other buildings of its time.

In this work we are going to review the architecture of iron, we are going to study the structural metal typologies through some of the buildings designed for the Universal Exhibitions. We are going to see the evolution of iron structures from the boom of the iron and steel industry of the Industrial Revolution, to the Gallery of the Machines. We will analyze the structural typology of this building, a great example of the metal structures of the end of the 19th century.

Universal Exhibition, Industrial Revolution, metal structure, Gallery of Machines, triarticulated arch.

ÍNDICE

RESUMEN	1
RESUM.....	2
ABSTRACT.....	3
1. Objetivos y metodología	5
2. Historia de las Exposiciones Universales.....	6
2.1. Contexto histórico.....	6
2.2. Revolución Industrial y primeras estructuras de hierro.....	10
2.2.1. Desarrollo del hierro forjado y del hierro fundido.....	13
2.3. The Great Exhibition of Works of Industry of All Nations 1851:.....	14
El Crystal Palace	14
3. La Exposición Universal de París de 1889	19
3.1. Introducción	19
3.2. Principales atracciones: La Torre Eiffel	20
3.3. Principales pabellones de la exposición.....	25
3.3.1. El Pabellón Argentino.....	25
3.3.2. El Pabellón Chileno.....	27
4. La Galería de las Máquinas	30
4.1. Arquitectos e Ingenieros creadores del pabellón	30
4.2. Ubicación dentro de la Exposición	31
4.3. Precedentes en las estructuras metálicas.....	32
4.4. Dimensiones del pabellón de la Galería de las Máquinas.....	36
4.5. La controversia de la luz.....	40
4.6. Estructura del pabellón de la Galería de las Máquinas.....	42
4.7. La cimentación de la Galería de las Máquinas.....	48
4.8. El problema de los movimientos térmicos.....	49
4.9. El problema de la estabilidad horizontal.....	50
4.10. Materialidad de la estructura.....	52
4.11. Sobre la ornamentación.....	53
4.12. El arco triarticulado tras la construcción de la Galería de las Máquinas	56
5. Conclusiones	58
6. Bibliografía	59
7. Índice de imágenes	62

1. Objetivos y metodología

La Revolución Industrial fue un proceso que generó una gran trascendencia en el desarrollo de nuevas tipologías edificatorias y de nuevos sistemas estructurales, gracias al desarrollo de materiales como el hierro forjado o fundido.

El primer objetivo de este trabajo es conocer y explicar la evolución que tuvieron las estructuras metálicas desde la Revolución Industrial. Para ello haremos un recorrido de las tipologías estructurales metálicas: se realizará una revisión desde los inicios y primeros ensayos que generó la Revolución Industrial, hasta llegar a la Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París de 1889. El hilo conductor de este recorrido serán las Exposiciones Universales, aunque también veremos algunos ejemplos al margen de estas exposiciones, en el campo de la ingeniería.

Como objetivos parciales dentro del objetivo nombrado, se realizará una investigación sobre las Exposiciones Universales, y sus edificios más famosos, viendo la evolución de los mismos a través del tiempo. Desde que se construye el famoso Crystal Palace en la primera Exposición Universal en 1851 en Londres, los arquitectos compiten por construir un espacio diáfano con la mayor luz posible. Se analizará con más detalle la tipología estructural de este pabellón a la vista de la repercusión histórica que tuvo en el campo de la arquitectura.

El segundo objetivo principal de este trabajo consiste en analizar más en profundidad, la estructura y construcción de la Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París de 1889. Comprendiendo porqué fue proclamada como uno de los hitos de la arquitectura de finales del siglo XIX.

Para conseguir los objetivos propuestos se ha seguido la siguiente metodología:

Para obtener la información, primero se ha realizado una búsqueda a través de internet, para tener una idea global del tema. A continuación, se realiza una búsqueda más profunda del tema en los buscadores online de diferentes bibliotecas.

Tras encontrar numerosos libros, revistas y artículos con bastante documentación, todos ellos en formato online, debido a las restricciones de acceso a las bibliotecas por la crisis sanitaria derivada del COVID-19, se ha procedido a analizar la información. Para sintetizar toda la documentación, una vez leídos, se han redactado unos esquemas orientativos con la información que se pretendía incorporar al trabajo y su orden.

Siguiendo estos esquemas, se ha redactado el trabajo, utilizando la información de los diferentes documentos estudiados, tratando de seguir un orden cronológico de los acontecimientos.

Finalmente, tras redactar el trabajo, se ha pasado a realizar unas conclusiones sobre lo aprendido en la elaboración de este trabajo.

2. Historia de las Exposiciones Universales

2.1. Contexto histórico

Desde finales del siglo XIX y principios del siglo XX, las Exposiciones Universales constituían escaparates públicos que permitían dar a conocer los nuevos inventos y desarrollo tecnológico, tanto de la industria, como del comercio y las artes, que surgieron en la era de la industrialización. Estas exposiciones tenían un ámbito estrictamente nacional. El precursor de estas exposiciones fue el ministro del Interior francés François de Neufchateau, que en septiembre de 1798 inauguró una exposición de productos artesanos e industriales franceses, en el parisino Campo de Marte. Su idea fue la organización de una exposición anual, que pudiera propagar los avances y nuevas ideas por todo el país y sus alrededores. (López, 2017)

A partir de 1851, estas exposiciones se internacionalizaron, y pasaron a constituir unos mega eventos innovadores que tuvieron un papel fundamental en el intercambio de los nuevos conocimientos. Tenían la capacidad de convocar a cualquier país del mundo que quisiera exhibir sus ideas, progresos, inventos; no solo por el hecho de compartir nuevas ideas, sino para exhibir el poder industrial y comercial de aquellos países participantes. Este carácter universal generó una gran difusión tanto por la visita de millones de personas en cada exposición, (Figura 1.01) como por la publicación de revistas especializadas en todos los ámbitos que mostraban al mundo todas las propuestas y avances de los diversos concursos.

Desde mitad del siglo XX, además de compartir los avances tecnológicos, también se compartían soluciones a los grandes desafíos a los que se enfrentaban la gran mayoría de los países en cuanto al desarrollo urbano, transporte, energía... Estas exposiciones eran la mejor oportunidad que tenían los ingenieros y arquitectos para diseñar sistemas estructurales y comprobar su eficacia, dando forma a la arquitectura futura. (DSIGNO, 2018)



Figura 1.01: Exposición Universal de Londres de 1851. 02: Exposición Universal de París de 1889. (Elías, 2016)

Se diseñan amplios pabellones donde podían exhibir los avances tecnológicos, donde comerciar, y exponer grandes obras de arte de la época. Sus innovadoras estructuras ejercían una gran influencia en las nuevas técnicas constructivas, nuevos materiales... Desde 1851, los pabellones que se diseñan, constituyeron edificios reveladores que impulsaron la innovación, puesto que eran campos de pruebas, oportunidades de ensayar con los nuevos métodos, materiales y formas, para su posterior aplicación en las soluciones de los desafíos de la humanidad.

Para los arquitectos e ingenieros, las Exposiciones Universales son laboratorios que ensanchan los límites de la arquitectura y de la construcción, (Figura 1.02) puesto que son un lienzo en blanco para experimentar. (López, 2017)

Hasta finales del siglo XIX, Inglaterra y Francia se alternaban la organización de las Exposiciones Universales. La primera Exposición Universal fue en 1851 en Inglaterra, donde se llevó a cabo uno de los referentes de estructuras metálicas del momento, el Crystal Palace. Surgido de las ideas de Joseph Paxton, que ya tenía una amplia experiencia en invernaderos en Inglaterra, expuso las posibilidades del uso del hierro para el soporte estructural, pero con la innovación de la prefabricación como sistema constructivo.

En la arquitectura de la época, el uso del hierro industrial tan solo había comenzado a usarse, mientras que el acero todavía no se empleaba en la edificación, y el hormigón armado ni siquiera había sido inventado. Por ello, las Exposiciones Universales han sido testigos de los importantes desarrollos que han ido surgiendo en cuanto a las estructuras se refiere; desde el desarrollo del hierro, el descubrimiento del hormigón armado, la aplicación de la madera laminada encolada, la aparición de las redes de cables, estructuras neumáticas... (DSIGNO, 2018)

Otro hecho que también fue fundamental para lograr estos avances y desarrollo, fue la competencia entre los países participantes, para mostrar todo su poder tecnológico y esplendor, superando los logros que se habían alcanzado en la exposición anterior. Una de las cualidades de las Exposiciones Universales, es su temporalidad, ya que no duraban más de seis meses, lo que generó lo que llamaban "arquitectura efímera". Aunque muchos de los edificios se construyeron con la intención de permanecer en el tiempo, en la mayoría de ellos primaba la provisionalidad. Por lo que, estas arquitecturas son valoradas más por su influencia histórica que por su duración en el tiempo. (López, 2017)

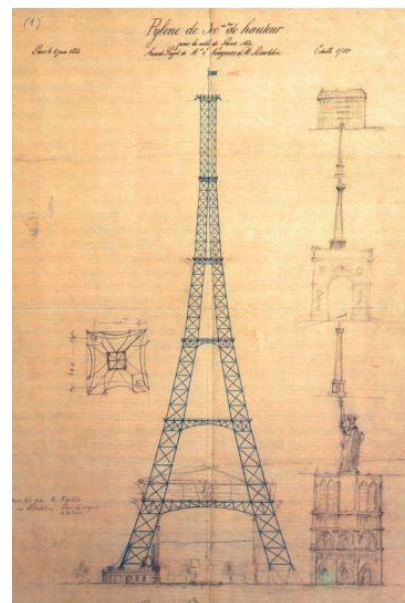


Figura 2 .01: Galería de las Maquinas, durante la exposición. (Dunlop, Beth; Hector, Denis. 1889) 02: Primer croquis de Koechlin de La Torre de los Trescientos metros, comparado con otros monumentos. (Fortier, 1989)

Al principio, la búsqueda principal de los arquitectos e ingenieros de los pabellones de las diferentes exposiciones, eran las luces más grandes, estructuras novedosas capaces de alcanzar mayores luces, cubrir el mayor espacio posible sin pilares ni soportes intermedios. No obstante, otro de los grandes anhelos del hombre siempre ha sido construir el edificio más alto del mundo. La ambición por alcanzar el cielo tiene una connotación religiosa, pero de esta connotación también podemos ver que tiene más aspiraciones políticas, económicas e incluso tecnológicas. (DSIGNO, 2018)

Y como no podía ser de otra forma, las Exposiciones Universales fueron participes de esta gran ambición, desde la Exposición Universal de París de 1889, podemos ver los inicios de esta búsqueda con la Torre de los Trescientos metros, actualmente conocida como la Torre Eiffel. En esta exposición, se vio la mayor manifestación en cuanto a la tecnología estructural de siglo XIX, la Galería de las Máquinas (Figura 2.01) con la mayor luz que se había construido jamás, y la Torre de los Trescientos metros (Figura 2.02), constituyendo el edificio más alto del mundo en aquel momento. A partir de este punto, surgió la carrera por construir un edificio más alto que el anterior. (López-César & Estévez-Cimadevila, 2018)



Figura 3: Mercado de Breslau, Plüdemann y Küster, 1908. (Kind-Barkauskas, Polony, & Brandt, 2002)

El siguiente gran avance en la historia de las estructuras fue el hormigón armado, alrededor del año 1900. Un material que ya utilizaron los romanos, utilizando masas a base de cementos naturales o puzolánicos. Alrededor de la década de 1850 se empezó a utilizar el cemento reforzado con armadura metálica, y se llevaron estas patentes a las exposiciones. En 1848, Jean-Louis Lambot, construye una embarcación de cemento reforzado con armadura metálica; y la lleva a la Exposición Universal de París de 1855. Ese mismo año, patenta lo que denominó el “Ferciment”, un material que, según él, sustituía a la madera. (López, 2017)

Pero no fue hasta principios del siglo XX, cuando se empezaron a llevar a cabo grandes estructuras con el hormigón como material estructural. Fue en 1906, cuando en Francia, se publicó el primer reglamento oficial para el hormigón armado, a partir del cual empezaron a construirse numerosos edificios con este material. Como el Mercado de Breslau (Figura 3), de Plüdemann y Küster en 1908, en el cual utilizaron el arco parabólico de hormigón armado. Sin embargo, a pesar de la novedad del hormigón, puesto que el hierro todavía seguía teniendo una gran influencia, pintaron los arcos simulando hierro roblonado.



Figura 4: Palacio del Centenario en Breslau, Max Berg, 1913. (Kind-Barkauskas et al., 2002)

Al igual que con las estructuras de hierro, también se buscaba alcanzar la mayor luz y altura posible en las edificaciones de hormigón armado. Edificios entre los que podemos destacar los más conocidos como: el Palacio del Centenario en Breslau (Figura 4), en Alemania, construido por Max Berg en 1913; o los Hangares de Orly (Figura 5), del ingeniero francés Eugène Freyssinet en 1923, en el cual se utiliza el hormigón ya no solo para estructuras, sino para cubiertas enteras. (López, 2017)

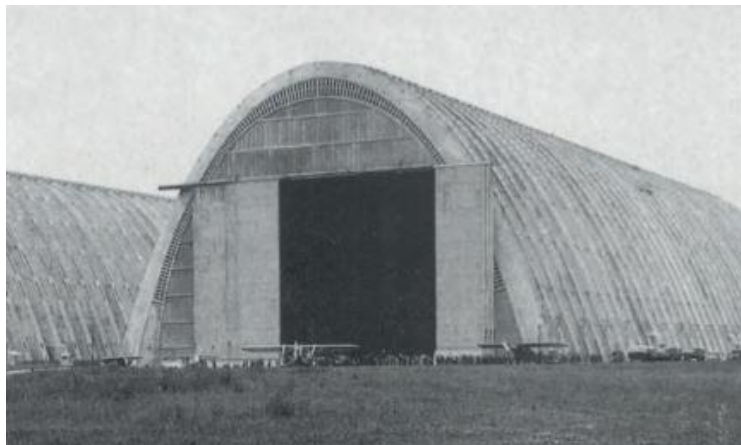


Figura 5: Hangares de Orly, Eugène Freyssinet, 1923. (Kind-Barkauskas et al., 2002)

Todos los ejemplos anteriores, desarrollados al margen de las Exposiciones Universales, lograron estructuras muy vanguardistas de hormigón armado. Sin embargo, este desarrollo no tuvo correspondencia en las Exposiciones Universales, la aportación construida o proyectual a la historia del hormigón armado fue modesta.

En las Exposiciones Universales posteriores, seguirá esa ambición por superar a la anterior y destacar, tanto los países que exponen sus productos, como los arquitectos e ingenieros por diseñar y construir los pabellones más novedosos, con estructuras más tecnológicas, con los materiales más nuevos... En la actualidad, estas exposiciones ya no tienen el peso que tenían en los siglos XIX y XX; sin embargo, los países buscan destacar en un campo, bien fuese un elemento de la exposición o el pabellón en sí. (Elías, 2016)

En este trabajo vamos a repasar la arquitectura del hierro, las estructuras metálicas a través de las Exposiciones Universales, viendo su evolución hasta el icono de esta arquitectura de la época, la Galería de las Maquinas de 1889.

2.2. Revolución Industrial y primeras estructuras de hierro

Aunque en Inglaterra también se celebraban algunas exposiciones de productos con un carácter más local, fue Londres quien acogería en 1851 por primera vez la primera Exposición Universal, una gran exposición en la que todas las naciones tendrían la oportunidad de exhibir sus productos y avances, a la que llamaron “The Great Exhibition of the Works of Industry of All Nations”.

Esto fue propiciado por qué fue en Inglaterra donde primero se dio la Revolución Industrial, a mediados del siglo XVIII, mientras que a otros países llegó durante el siglo XIX. La Revolución Industrial supuso un grandísimo avance tecnológico además de un cambio en el sistema de producción, economía y sobre todo en la sociedad, la cual experimentó un rápido auge demográfico. (López, 2017)

Para entender mejor el significado de esta etapa, tomamos la definición de Revolución Industrial que expone el profesor británico David S. Landes:

“El término Revolución Industrial suele referirse al complejo de innovaciones tecnológicas que, al sustituir la habilidad humana por la maquinaria y la fuerza humana y animal por energía mecánica, provoca el paso desde la producción artesana a la fabril, dando así lugar al nacimiento de la economía moderna”. (Landes, 1979)

La sustitución de la mano de obra humana, por maquinaria supuso un cambio, puesto que un hombre necesita descansar, y una máquina puede funcionar todo el día sin descanso, aumentando así notablemente la producción. Además, el empleo de maquinaria requiere una fuente de energía, que en esta época era el carbón, por ello, las principales áreas industriales en todo el mundo se ubicaban en zonas ricas en carbón. La Revolución Industrial fue una etapa y un proceso prolongado en el tiempo, puesto que un cambio generaba otro cambio. (Chaves, 2004)

Los procesos que caracterizaron a la Revolución Industrial fueron algunos como la mecanización, no solo de la industria, sino también en la agricultura; la aplicación de fuerza motriz; el desarrollo del sistema fabril; la aceleración en los transportes y en las comunicaciones, y el consiguiente aumento del sistema capitalista en la actividad económica. Esto propició que se inventaran maquinas como la de hilar y tejer, y la máquina de vapor (Figura 6.01). (Kemp, 1979)

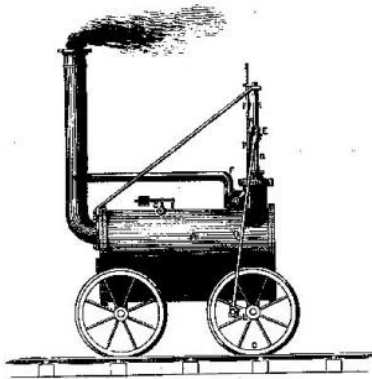


Figura 6. 01: Máquina de vapor de James Watt. 02: Proceso de fabricación del hierro fundido. (Patricia, 2007)

En Inglaterra las industrias que más desarrollo tuvieron fueron las industrias textil y siderúrgica. El aumento de la producción de estas industrias, en nuestro caso la siderúrgica la cual nos concierne, vino dado no solo por la sustitución de la mano de obra humana por la maquinaria, sino por la demanda de los nuevos avances tecnológicos como eran el ferrocarril, sus locomotoras y rieles, y los nuevos barcos de hierro. El carbón no solo era la fuente de energía de la maquinaria, sino que permitía la obtención del hierro a partir de la fusión de minerales ferrosos gracias a su alto poder calorífico. En esta época había dos formas de obtener hierro, mediante la forja o mediante la fundición (Figura 6.02). Con la forja, el hierro era calentado en una fragua y se golpeaba para darle forma y eliminar las escorias; mientras que con la fundición el hierro se fundía y se vertía en un molde para dejarlo enfriar después. (López, 2017)

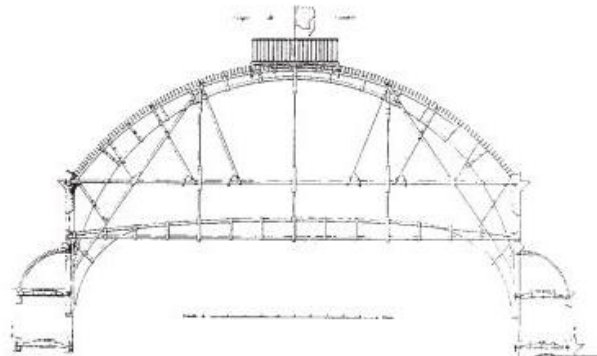


Figura 7: Estructura de hierro de la cubierta abovedada del Teatro Francés de Víctor Luis, 1786. (Blanc, McEvoy, & Plank, 1993)

En la arquitectura los nuevos materiales surgidos de la Revolución Industrial son el hierro y el vidrio, el cual empieza a ser empleado en la construcción, puesto que antes no era común. Hasta este momento el hierro tan solo se utilizaba para crear conexiones entre sillares, tirantes, alguna solución estructural de cubierta como el Teatro Francés de Víctor Luis en 1786 (Figura 7). (Kemp, 1979)

Sin embargo, puesto que la producción de hierro aumenta notablemente, se empieza a utilizar en la arquitectura y en la ingeniería con mucha más frecuencia, en puentes, cubiertas de hierro y vidrio y edificios con estructuras metálicas. Como en las fábricas inglesas, cuyo desarrollo requiere grandes luces y materiales no inflamables; por ello se empezó a generalizar el uso de vigas y pilares de fundición. Con la aparición del hierro, comenzó la carrera por alcanzar cada vez luces más grandes, aunque al principio fue en la ingeniería con los puentes, más tarde esta carrera pasará también al campo de la arquitectura. (Chaves, 2004)

El primer puente de hierro fue el que T. F. Pritchard diseñó, en 1777, sobre el río Severn (Figura 8), al Oeste de Birmingham, con una luz de 30.5 metros y formado por dos semiarcos de una sola pieza de hierro fundido. Desde este momento, empiezan a construirse puentes con luces mayores, como el que proyectó Tom Paine en 1786 sobre el río Wear, con 71.90 metros de luz. En Europa se empiezan a construir estas tipologías a finales del siglo XVIII. Mientras tanto, el uso del hierro empieza a generalizarse en la edificación, principalmente en fábricas, como antes hemos comentado. (López, 2017)

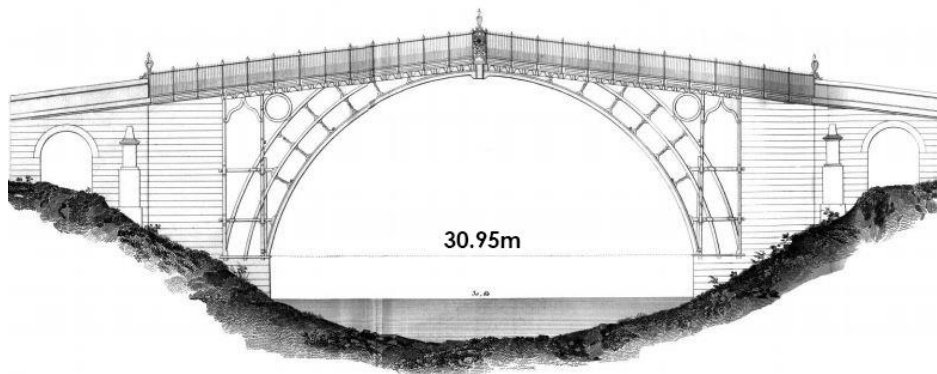


Figura 8: Puente sobre el río Severn. T.F. Pritchard, 1779. (Benévolo, 1996)

En Francia, el desarrollo de la industria siderúrgica fue algo más tardío que en Inglaterra, hacia principios del siglo XIX. Es entonces cuando empieza la construcción de puentes de hierro y la aplicación de este material en obras de edificación de una cierta importancia. Como la Cúpula del Halle au Blé de París en 1811, de Belanger y Brunet (Figura 9), que, con un método inusual, fue el primer sistema de entramado con piezas de hierro, y llegando a alcanzar una luz de 39 metros.

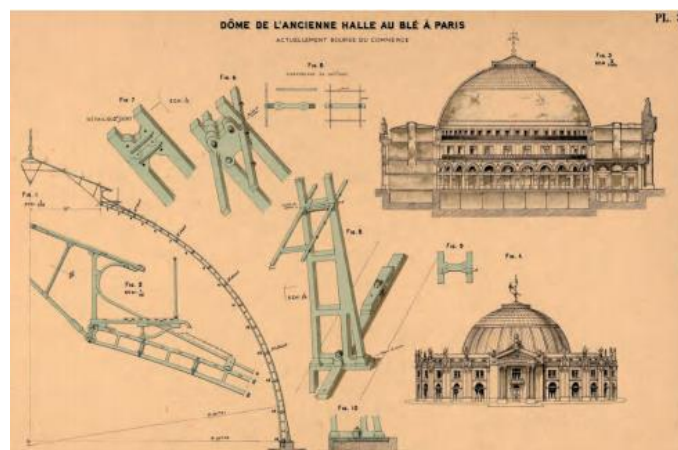


Figura 9: Entramado de hierro de la Cúpula del Halle au Blé. Belanger y Brunet, 1811. (Vierendeel, 1902)

Las características del hierro permiten la desmaterialización de sus muros y de las cubiertas, ya que su esbeltez permite que el vidrio pueda ser usado como envolventes. Uno de los ejemplos más conocidos de estos primeros edificios en los que las envolventes empezaban a desmaterializarse, es la Galerie d'Orleans del Palais Royal (Figura 10.01) en 1829; o el Jardín des Plantes de París (Figura 10.02) en 1833.



Figura 10. 01: Galerie d'Orleans del Palais Royal. Percier y Fontaine. 1829. 02: Jardín des Plantes de París. Rouhault. 1833. (Loyer, 1983)

Sin embargo, el edificio que consiguió desmaterializarse por completo, y que generó un gran revuelo dadas sus magnitudes y sus novedosos avances, fue el Crystal Palace de Joseph Paxton para la Primera Exposición Universal que se celebró en Londres en 1851. (López, 2017)

2.2.1. Desarrollo del hierro forjado y del hierro fundido.

La transformación de los minerales con elevado contenido en hierro por procesos industriales da lugar a lo que llamamos materiales ferrosos, que, además de hierro contienen carbono y otros elementos, considerados impurezas si no aportan ninguna cualidad al producto, y aleantes si modifican favorablemente algunas de sus propiedades. Si su contenido en carbono es menor al 2% se denominan aceros; sus propiedades son muy sensibles a la proporción de este elemento y los que se utilizan en estructuras de edificación no superan el 0.20-0.30%.

El proceso de fabricación tiene su origen en la prehistoria y la producción fue muy limitada hasta que, en 1720, Darby inventó el alto horno utilizando carbón mineral como combustible, en lugar del vegetal. Del alto horno se obtiene arrabio y escorias; el arrabio fundido con chatarra se convierte en fundición, cuyo contenido en carbono oscila entre 2-6%, y es un material frágil que resiste bastante a compresión y poco a tracción.

En 1766 Cranage afina la fundición y produce hierro maleable mediante el horno de reverbero con compartimentos separados para el combustible y el mineral; y en 1784, Cort lo modifica con aberturas para remover el metal fundido eliminando las impurezas que flotan. Este proceso no era competitivo por lo que se utilizaba la fundición para elementos comprimidos y el hierro forjado en los traccionados, por su mejor resistencia a esta sollicitación.

En 1857 se perfeccionó el procedimiento cuando se implantó el primer horno de pudelado rotativo mecánico, aunque el cambio más importante se dio con el convertidor de Bessemer

en 1855, que elimina parte del carbono e impurezas de la fundición, obteniendo por primera vez acero mediante un proceso industrial. En 1878 se revistió el convertidor con materiales básicos para eliminar el azufre y el fósforo que aumentan la fragilidad del acero.

Estos procesos de obtención del material se han ido desarrollando junto con otros para darle forma. Al principio el único procedimiento era la forja, golpeando la masa caliente con martillo; la fusión del material permitió verterlo en moldes obteniendo acero o hierro colado. Hasta que en 1850 se desarrolla la laminación, agrupando barras que se calientan e introducen en trenes de laminación, que proporcionan al principio un material con estructura de hoja, falta de homogeneidad y anisótropo, inconvenientes que han desaparecido con el desarrollo de la tecnología y permiten la utilización de una gama de perfiles muy alta como la actual.

La aplicación de estos materiales en estructuras se inicia en 1779 con el ya nombrado puente sobre el río Severn, en el campo de la ingeniería, y con una fábrica textil en Salford en 1801, en el campo de la edificación, empleando la fundición en ambos casos.

Como veremos más adelante, Las Exposiciones Universales extendieron el uso de este material en la arquitectura, con connotaciones un tanto revolucionarias, ya que creían que estos materiales acabarían sustituyendo al resto de materiales.(Monfort Lleonart, 2006)

2.3. The Great Exhibition of Works of Industry of All Nations 1851: El Crystal Palace

Tras la convocatoria de dos concursos para la construcción del edificio que albergaría la primera Exposición Universal, fue finalmente, el constructor de invernaderos experimentado Joseph Paxton (Figura 11), quien logró impresionar al príncipe Alberto y conseguir la adjudicación con unos dibujos y esquemas a mano (Figura 12).



Figura 11: Joseph Paxton. (Britannica, 2020)

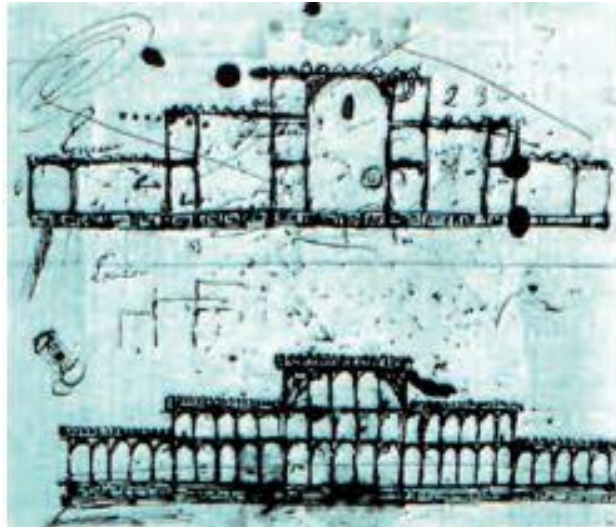


Figura 12: Primeros bocetos de la sección y el alzado del Crystal Palace. (Dunlop & Hector, 1999)

Basado en su experiencia en la construcción de invernaderos, como el invernadero de Chatsworth, diseñó un edificio de escala monumental hecho de hierro y vidrio con la capacidad de albergar toda la exposición. Estaba constituido por un gran volumen longitudinal (Figura 13) escalonado de 563.25 metros de largo y 124.35 metros de ancho, atravesado en la zona central por un cruceo coronado con una bóveda de cañón. Transversalmente estaba formado por cinco naves, dos laterales, una central, y dos intermedias. En las exposiciones posteriores la organización se desarrolla en diversos pabellones, mientras que en esta primera se desarrolla todo dentro de un gran espacio, en el cual las diferentes naciones participantes exponen sus productos, avances, inventos, poder, arte... (López-César & Estévez-Cimadevila, 2018)

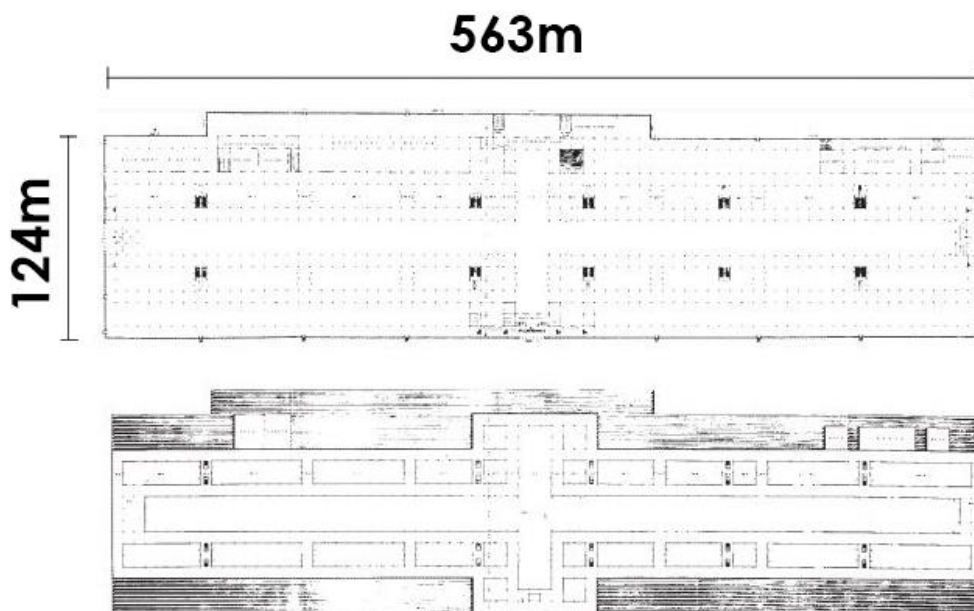


Figura 13: Planta baja y planta superior del Crystal Palace. (Dunlop & Hector, 1999)



Figura 14: El Crystal Palace en Hyde Park. Joseph Paxton. 1851. Ilustración de la época. (McKean, 1994)

El Crystal Palace fue una revolución en muchos sentidos ya que fue el primer edificio que recogía todos los avances tecnológicos de la Revolución Industrial aplicados en la arquitectura: es la primera edificación con estructura metálica y con mayor superficie construida (Figura 14); fue uno de los primeros edificios en utilizar la prefabricación de sus elementos a gran escala, de forma tridimensional y estandarizando sus componentes; y sus envolventes están formadas en su totalidad por hierro, tanto forjado como fundido, y vidrio. Puesto que una de las exigencias era que el edificio debía ser desmontable, se optó por la prefabricación de las piezas. Utilizaron un módulo estructural (Figura 15) de 7.315 x 7.315 metros de base y 7.5 metros de alto, mientras que las luces son múltiplos de esta misma modulación, 7.315 metros, 14.63 metros, 21.945 metros... Este módulo estructural se componía de cuatro pilares de fundición y cuatro celosías también de fundición. De esta forma, el número de piezas diferentes se reducía considerablemente. (López, 2017)

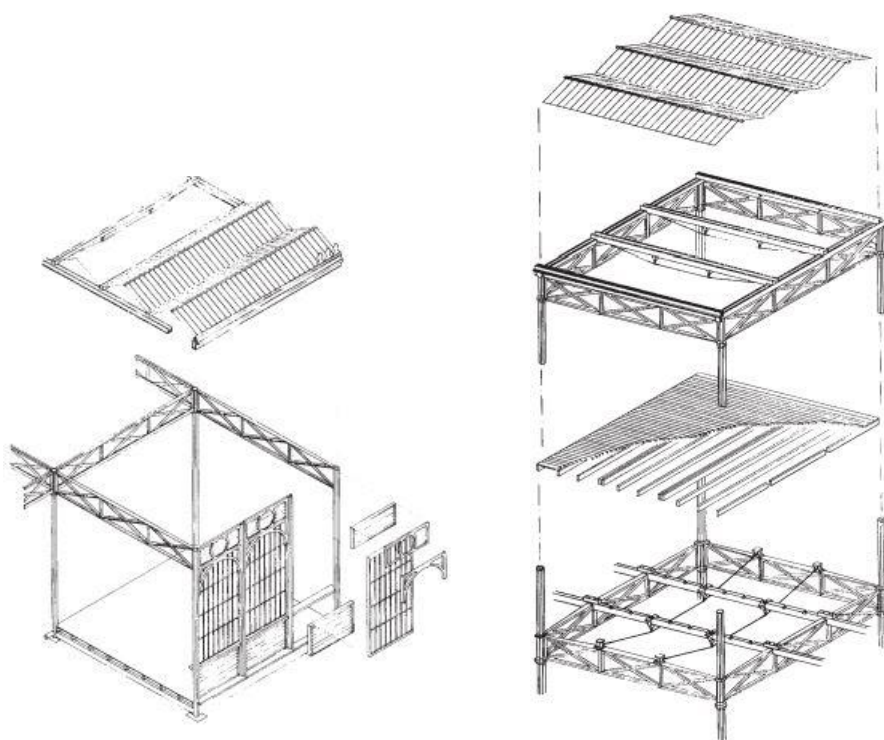


Figura 15: Esquemas axonómicos de un módulo estructural. (Peters, 1996) (Araujo, 1995)

Las estructuras metálicas presentaban un problema de diseño que no conseguían resolver, la estabilidad frente a las fuerzas horizontales del viento. No existe documentación de edificios que, teniendo estructura de vigas y pilares de hierro y varios pisos, hubieran conseguido esta estabilidad horizontal, hasta que en 1851 el Crystal Palace lo consiguió. Se logró la estabilidad horizontal gracias al diseño de unos pórticos rígidos que no necesitaban sistemas de estabilización, como muros de fábrica. Por lo que podemos decir que el Crystal Palace es el primer edificio con pórticos rígidos estable frente a las fuerzas horizontales del viento.



Figura 16: Ilustración del transepto y la bóveda de cañón del Crystal Palace. (Dickinson, 1852)

Anteriormente se había conseguido en edificios pequeños y con ayuda de muros de fábrica, sin embargo, el Crystal Palace es un edificio totalmente diferente, ya que es un edificio desmontable, con espacios diáfanos y una geometría rectilínea (Figura 16). Para conseguir un pórtico rígido se buscó materializar la unión entre la viga de celosía y el pilar, utilizaron una pieza de fundición que se colocaba entre ambas y se atornillaba.

Estas celosías se fijaban con cuñas, que en los encuentros de los pórticos principales en la dirección transversal eran también de hierro fundido. En la dirección longitudinal, estas celosías servían de arriostramiento de los pórticos principales. Además, también fue necesario la introducción de diagonales en los planos verticales para que así, los pilares, trabajaran fundamentalmente a compresión. (López, 2017)

Tras finalizar la Exposición Universal, se buscó una nueva ubicación para el edificio, al sudeste de Londres, para que al año siguiente albergara otras exposiciones. Dado que el edificio era desmontable, esto fue posible, sin embargo, tuvieron que añadir más diagonales para arriostrar los pilares. El Crystal Palace albergó durante 60 años exposiciones, la coronación del rey Jorge V de Inglaterra en 1910 y se convirtió en la Royal Navy. Hasta que en 1936 un incendio acabó por colapsarlo, ya que la estructura sufrió un deterioro importante. (El obrero, 2017)

En resumen, este edificio sintetiza todos los conocimientos y avances que se habían conseguido en edificios anteriores tras la Revolución Industrial. El Crystal Palace se coronará como referencia a nivel internacional, ya que servirá de inspiración a cientos de arquitectos en Europa y América. Sin embargo, no solo reunirá muchos de los avances de la época, sino que también pondrá en evidencia los problemas que conllevan estas estructuras: la estabilidad de la estructura frente a las cargas de viento y frente a las variaciones que provocan las variaciones térmicas, dado que el hierro es un material con un gran coeficiente de dilatación lineal. (López, 2017)

3. La Exposición Universal de París de 1889

3.1. Introducción

Tras el gran éxito de la exposición de Londres, se generó un gran auge en las exposiciones venideras, y ya no solo se realizarán en Londres o París, sino que otras muchas ciudades del mundo se convertirían en anfitrionas de este evento internacional.

La exposición que nos concierne es la que se realizó en París en 1889 (Figura 17.01), para conmemorar el centenario del Asalto a la Bastilla (Figura 17.02), que marcó el comienzo de la Revolución Francesa; además de para fomentar la economía del país. Esta fue la cuarta exposición universal que se llevó a cabo en París, inaugurada el 5 de mayo de 1889 ante un numeroso público, y finalizada el 31 de octubre de 1889. Fue la exposición que albergó la más importante manifestación en cuanto a desarrollo estructural del siglo XIX. (Société d'Exploitation de la Tour Eiffel, 2020)



Figura 17: Cartel conmemorando el centenario de la Revolución Francesa a de 1789. (Société d'Exploitation de la Tour Eiffel, 2020)

Estaba ubicada en el Campo de Marte o le Champ de Mars; (Figura 18) se extendía por el río Sena hasta el Palacio de Trocadero, construido para la Exposición Universal de París de 1878; y también se distribuyó en la explanada de Los Inválidos o Hôtel des Invalides. La explanada de Los Inválidos se comunicaba con el Campo de Marte con un enorme corredor de pabellones. Todos los espacios se llenaron de restaurantes, terrazas, jardines, fuentes... un despliegue enorme que cubría de clase y belleza a la exposición, en la que incluso las farolas vestían los colores de la nación de Francia. La exposición reflejaba dos de las facetas de Francia más importantes en la época: la faceta social de Francia, la cual destacaba la educación y el arte, sobre todo en el Palacio de las Artes Liberales y en el Campo de Marte, en el cual había una sección llamada "Paz Social" que se volcó en cuestiones sociales, como las condiciones de los trabajadores; y la faceta militar de Francia, ya que el Ministerio de Guerra mostró sus éxitos y memorias en la explanada de Los Inválidos y más concretamente en la Exposición Colonial. (BIE, 2020)

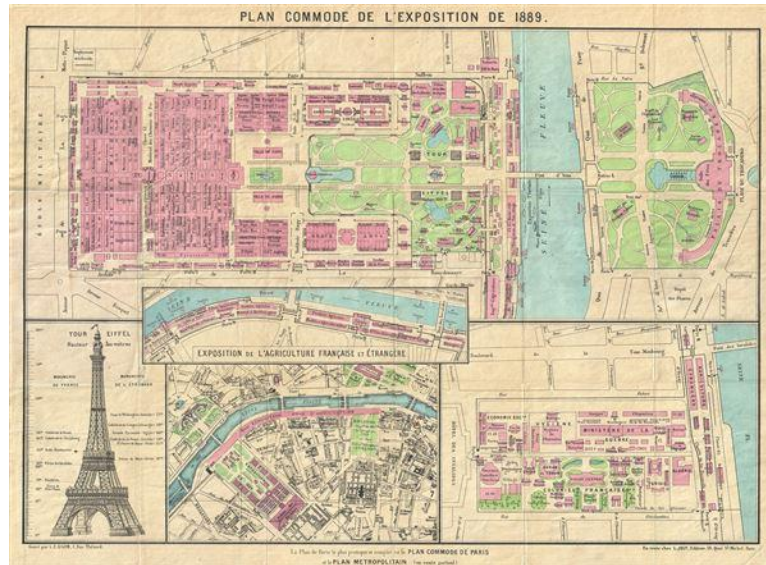


Figura 18: Plano de la Exposición Universal de París de 1889.(Baez, 2017)

Los pabellones eran los edificios que las naciones participantes diseñan y construyen para albergar los productos. Los pabellones más destacados de esta exposición fueron: la Galería de las Máquinas, del cual hablaremos con mucha más profundidad; el pabellón Chileno y el pabellón Argentino. Estos fueron los más admirados; sin embargo, hubo otros muchos como el pabellón Mexicano o el pabellón de Egipto, que también fueron muy admirados. (Elías, 2016)

3.2. Principales atracciones: La Torre Eiffel

No obstante, estas exposiciones no solo exhiben avances e inventos novedosos para la época, también había muchas otras atracciones para el público, como fue el caso del zoológico humano (Figura 19). Un suceso impensable y racista para la sociedad actual, pero que, para la sociedad de finales del siglo XIX, no lo era tanto. Aunque la verdadera intención de esta “exposición” era mostrar las diferentes culturas que existían a lo largo y ancho del mundo, se trató de recrear los diferentes tipos de casas y sus habitantes, sobre todo de las culturas exóticas que por aquel entonces los visitantes consideraban culturas raras y atrasadas. (Baez, 2017)

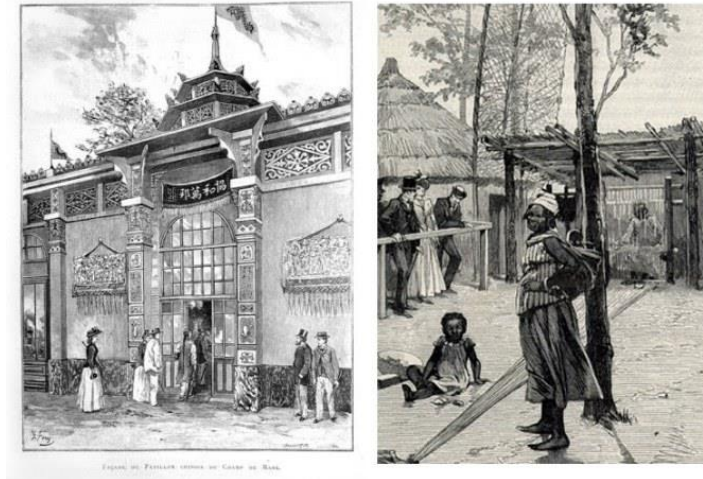


Figura 19: Ilustraciones del zoológico humano de la Exposición Universal de París de 1889. (Baez, 2017)

Pero si hay algo que realmente no podemos pasar por alto de esta exposición, fue la aportación como atracción turística más famosa e icónica, no sólo de París sino de toda Francia, la Torre de Trescientos metros.

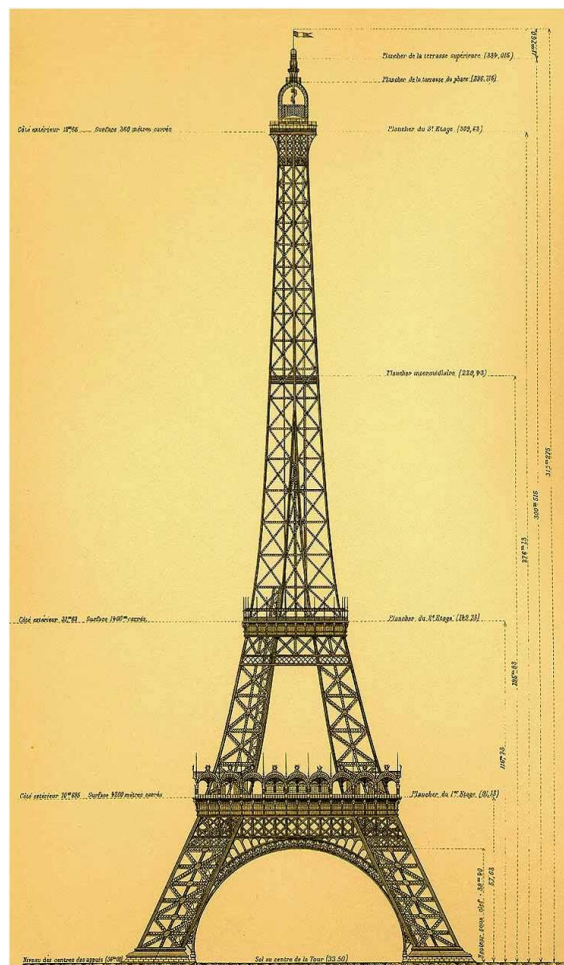


Figura 20: Alzado de la Torre de Trescientos metros de Gustave Eiffel. (Eiffel, 2015)

La Torre de Trescientos metros o, actualmente, la Torre Eiffel, es una de las estructuras metálicas más conocidas en todo el mundo (Figura 20). Fue diseñada por el ingeniero francés Gustave Eiffel (1832-1923), experto en la construcción de puentes, estaciones de ferrocarril y edificios de hierro, y que realizó la Galería de las Máquinas de 1867. La Torre de Trescientos metros se convirtió en la torre más alta del momento con nada menos que 300 metros de altura, la cual necesitó de más de 5.000 dibujos para detallar las más de 18.000 piezas distintas y más de 2.5 millones de remaches para ensamblar. Con la ayuda de un promedio de 250 obreros y poco más de dos años de trabajo hicieron posible su construcción, a pesar de que, desde el inicio de su construcción (Figura 21), numerosos especialistas y matemáticos se empeñaron en desprestigiar y demostrar su derrumbamiento cuando la torre alcanzase los 228 metros de altura, cosa que sabemos que no llegó a ocurrir. (Eiffel, 2015)

Se considera que la Torre de Trescientos metros se mantendría en pie con la mitad de las uniones que tiene, puesto que, la otra mitad están realizadas por motivos de seguridad, ya que muchos parisinos tenían miedo de que pudiera llegar a caerse generando una catástrofe. Debido a la naturaleza del suelo, dado por su proximidad al río, cada uno de sus cuatro apoyos tiene unos cimientos de 30 metros de profundidad, los cuales descansan sobre 8 gatos hidráulicos.



Figura 21: Construcción de la Torre Eiffel. (Société d'Exploitation de la Tour Eiffel, 2020)

Esta torre fue construida en hierro pudelado, un proceso de refinamiento del hierro en el cual se reducen los porcentajes de carbono y azufre, dando lugar a un metal de mayor pureza y mejores propiedades mecánicas. Se distinguen dos partes fundamentales, la primera es la parte inferior desde la base hasta la segunda planta, constituida por cuatro grandes pilares unidos rígidamente por vigas horizontales. La segunda parte se desarrolla a partir de la

segunda planta, en la cual los cuatro pilares se enlazan mediante barras horizontales y mediante triangulaciones. La unidad estructural básica de la torre es el cuadrilátero triangulado (Figura 22), constante en toda la torre, y pretende la total rigidización frente a las acciones del viento. (Eiffel, 2015)

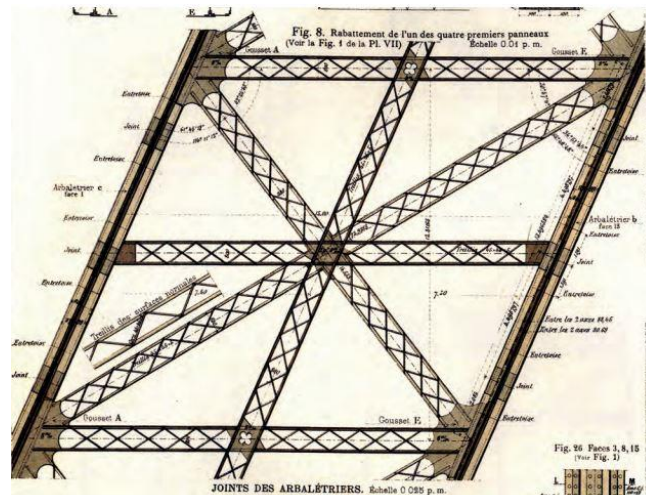


Figura 22: Alzado de uno de los cuadriláteros triangulados que constituyen la unidad básica de la torre. (Eiffel, 1889)

La cimentación de la torre fue compleja, sobre todo en los pilares Norte y Oeste, los más próximos al río Sena. Fue necesario excavar cinco metros por debajo del nivel freático, para ello utilizaron el sistema Triger, un sistema que Eiffel ya había utilizado en la construcción de algunos puentes. Es sistema Triger consistía en un tubo metálico en el que se insuflaba aire a presión, generando una cámara de trabajo para que los operarios pudiesen excavar en seco.

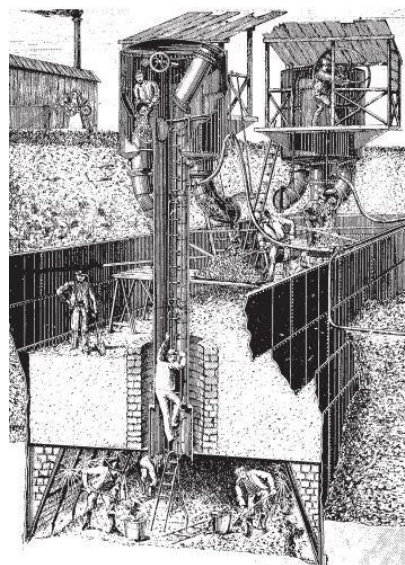


Figura 23: Perspectiva seccionada de los trabajos de excavación, mediante el sistema Triger, de la Torre de Trescientos metros. (Watson, 1892)

En el caso de la Torre de Trescientos metros, se utilizaron cajones neumáticos constituidos por una caja metálica hermética de dos niveles (Figura 23). En el nivel superior se lastraba con hormigón para evitar que la presión hidráulica levantara el cajón. En el nivel inferior se inyectaba aire a presión para evitar el ascenso del nivel freático y permitiendo la excavación en seco. Una vez realizada la excavación se llevaron a cabo unos macizos de hormigón sobre el que se construyeron cuatro zapatas de fábrica de piedra por pilar (Figura 24), una por cada montante, conectadas por muros de fábrica. (López, 2017)



Figura 24: Cimentación de uno de los pilares en fábrica de piedra, con las esperas de los montantes y los muros de fábrica de conexión. (Martin & Barthes, 1989)

Otro de los logros de la Torre de Trescientos metros fue el desarrollo de sus ascensores, era la primera vez que se planteó la construcción de unos ascensores para subir 276 metros. Los ascensores tenían una larga trayectoria a lo largo de la historia, desde Arquímedes en el siglo III antes de Cristo. En esta torre se utilizaron ascensores hidráulicos diferentes, entre los que destacan el de Otis, que subía hasta la segunda planta; y el ascensor Edoux que se elevaba hasta la tercera planta. (Société d'Exploitation de la Tour Eiffel, 2020)

La Torre de Trescientos metros fue la principal atracción de la Exposición Universal de París de 1889, todos los visitantes se aglomeraban para subir en el ascensor y disfrutar de las impresionantes vistas aéreas de la ciudad de París. El monumento contaba con todo tipo de tiendas y restaurantes (Figura 25). Además, no solo era admirada de día con la luz del sol, sino que por la noche se iluminaba con cientos de lámparas de gas con luces rojas, blancas y azules, de tal forma que era vista desde cualquier punto de la ciudad, tanto de día como de noche.



Figura 25: Fotografía de uno de los restaurantes de la Torre de Trescientos metros en 1889. (Société d'Exploitation de la Tour Eiffel, 2020)

Sin embargo, aunque hoy en día es uno de los iconos de Francia, tanto a nivel turístico como estructural de la época, los parisinos mostraron, en la década de 1910 su gran descontento con la torre. Tal fue el descontento que el gobierno estuvo a punto de derribarla, pero la gran antena ubicada en su cima servía para recibir las ondas de las radios alemanas en la Primera Guerra Mundial, lo cual fue de grandísima ayuda en el bando de los aliados. (Elías, 2016)

3.3. Principales pabellones de la exposición

3.3.1. El Pabellón Argentino

Por aquella época, la República de Argentina ganaba notoriedad dado su potencial agrícola y ganadero, por lo que fue invitada por el gobierno francés a participar en la Exposición Universal de París de 1889. Se designó un delegado en París para que se ocupara de todas las cuestiones. La primera de ellas fue obtener un lugar en el Campo de Marte para ubicar el pabellón, sin embargo, el gobierno francés pretendía ubicar todas las exposiciones de América Latina en un mismo espacio, a lo cual el delegado se negó rotundamente. En un primer lugar solicitaron 6.000 m² exclusivamente para la República de Argentina, pero solo se les concedieron 1.600 m² cerca de la Torre Eiffel, a las orillas del Sena. (Otaegui, 2015)

Tras publicar un concurso, finalmente ganó el proyecto de Albert Ballu arquitecto de la École de Beaux-Arts graduado en 1872, que también se encargó de realizar el pabellón argentino. Una de las exigencias del gobierno argentino, era que el edificio debía ser desmontable para que al finalizar la exposición fuese trasladado a Buenos Aires (Figura 26).



Figura 26: Grabado de la apertura del Pabellón Argentino en Buenos Aires. (Chiesa & Brodaric, 2020)

Siguiendo el modelo del Crystal Palace, Ballu proyectó una novedosa estructura de vigas, pilares y plataformas de hierro atornilladas que se comportaban como nervios, a los cuales se adosaban posteriormente el resto de materiales de revestimiento y decoración. Todos los materiales eran prefabricados y ensamblables, que permitían un rápido y sencillo montaje. El pabellón se componía de un gran volumen de dos plantas (Figura 27), y una cúpula de 30 metros de altura, y otras 4 cupulas más pequeñas alrededor. (Otaegui, 2015)

La estructura se asimilaba a la del resto de pabellones construidos para esa exposición. Sin embargo, el Pabellón Argentino destacaba por las coloridas envolventes hechas de cerámicos esmaltados, vitrales, el color dorado de la estructura... Además, se encargaron bellísimas telas pintadas, y grandes esculturas de bronce que coronaban el pabellón. Era uno de los pabellones que más brillaba durante el día.



Figura 27: Construcción de la estructura del primer piso del Pabellón Argentino. (Chiesa & Brodaric, 2020)

El pabellón se inauguró más tarde que el resto, ya que muchos productos nacionales que se enviaron, tardaron en llegar. Por el contrario, no tardó nada en ser desmontado, al día siguiente de finalizar la exposición, comenzaron las labores de desmontaje y enviado a Buenos Aires. A pesar de que hubo incidentes durante el traslado, ya que con una tormenta se perdió parte del cargamento, el pabellón fue montado en 1894 en la plaza San Martín (Figura 28). Tras varias concesiones, el edificio acabó albergando la sede del Museo Nacional de Bellas Artes, hasta que finalmente en 1933 fue desarmado por la creación del parque del Retiro. Sus piezas fueron desmontadas y almacenadas. Sin embargo, en 1935 las piezas fueron subastadas públicamente, y tan solo quedan las esculturas que fueron repartidas por la ciudad. (Chiesa & Brodaric, 2020)



Figura 28: El Pabellón Argentino ubicado en la plaza San Martín. (Chiesa & Brodaric, 2020)

3.3.2. El Pabellón Chileno

El Pabellón Chileno o Pabellón París, es uno de los pocos supervivientes en la actualidad. Al igual que Argentina, Chile también fue invitado por el gobierno francés a participar en la Exposición Universal de París de 1889 (Figura 29). Se llevó a cabo un concurso, y tras varias propuestas y discusiones, el pabellón fue diseñado por Henry Picq. Fue una propuesta que incluía el uso vanguardista de los metales de la época, el hierro. (Scarano, 2008)



Figura 29: Dibujo del Pabellón Chileno en la Exposición Universal de París de 1889. (Biblioteca Nacional de Chile, 2018)

El Pabellón Chileno marcó un momento de transición entre el pasado y la modernidad, puesto que mantuvo las normas neoclásicas a la vez que incorporó elementos constructivos de la época como el Art Nouveau.

Se componía de un volumen central con una bóveda regular enmarcado entre cuatro polígonos rectangulares y unas bóvedas esféricas en su arte más alta (Figura 30). Se destaca por un sistema de estructura de hierro de dos pisos y una cobertura de placas de vidrio, que incorpora vitrales en una base cuadrada de 10 metros de lado. El espacio central se encuentra es de doble altura, y gracias a una galería perimetral dispuesta en el segundo piso, se ilumina de forma natural a través de un techo conformado por cinco cúpulas vidriadas. (Barvosa, 2018)

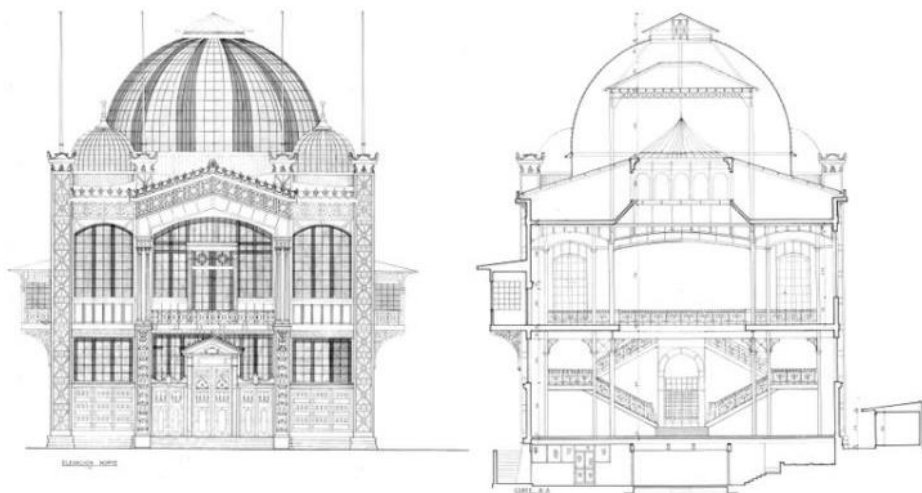


Figura 30: Alzado Norte y sección del Pabellón París. (Artequin, 2020)

En cuanto a la ornamentación, la fachada principal se componía de la entrada principal, un acceso monumental compuesto de un pórtico que ocupaba las dos alturas del edificio; mientras que la fachada opuesta tenía una estructura que simulaba un jardín de invierno.

Fue uno de los primeros pabellones en ser desmontado, y trasladado a su nación. En 1894 fue instalado en la Quinta Normal de Chile (Figura 31), llamado Pabellón París, ha llegado hasta nuestros días como el Museo de Artequín. (Biblioteca Nacional de Chile, 2018)



Figura 31: Fotografía del Pabellón Chileno en su ubicación actual. (Biblioteca Nacional de Chile, 2018)

4. La Galería de las Máquinas

4.1. Arquitectos e Ingenieros creadores del pabellón

El Palais des Machines o la Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París de 1889, es un icono de la arquitectura del siglo XIX, dada su impresionante espacialidad y la tecnología de su novedosa estructura. Junto con la Torre Eiffel, fue muy aclamada, a pesar del rechazo inicial que ambos edificios tuvieron. (Linares de la Torre, 2018)

Fue diseñada por el arquitecto Charles Louis Ferdinand Dutert (Figura 32.01) (1845-1906), arquitecto francés que estudió en la Escuela Nacional Superior de Bellas Artes; y el ingeniero Victor Contamin (Figura 32.02) (1840-1893), experimentado ingeniero estructural francés, experto en hierro y acero, que además fue pionero en el uso del hormigón armado. Contamin fue también el encargado de revisar y comprobar todas las estructuras metálicas de los pabellones y la Torre Eiffel de la Exposición Universal de París de 1889, se encargaba de recibir los materiales y del control de la construcción de las estructuras. Los autores fueron asistidos por los arquitectos Blavette, Deglane y Eugène Hénard; y por los ingenieros Charton y Pierron. (Nansouty, 1889)

La Galería de las Máquinas contaba con una amplia nave central cubierta mediante arcos triarticulados de hierro de 110,6 metros de luz. Una novedosa estructura, que ya había sido ensayada y llevada a cabo en el campo de la ingeniería.



Figura 32.01: Charles Louis Ferdinand Dutert, arquitecto de la Galería de las Máquinas. 02: Victor Contamin, ingeniero estructural de la Galería de las Máquinas. (Belhoste, 2008) (Nansouty, 1889)

A pesar de que este edificio tan solo se mantuviera en pie 20 años, ya que en 1910 fue demolido para despejar las vistas del Campo de Marte, este icono de la arquitectura del siglo XIX destaca debido a tres aspectos arquitectónicos, los cuales trataremos más adelante: las impresionantes dimensiones del espacio, el particular y novedoso sistema estructural y la forma de utilizar el ornamento. (Linares de la Torre, 2018)

4.2. Ubicación dentro de la Exposición

La Galería de las Maquinas se ubicaba en el Campo de Marte, de forma perpendicular con respecto al eje del conjunto de la exposición. Esta ubicación no fue aleatoria y fue uno de los determinantes de la forma que Dutert y Contamin tuvieron que dar al edificio. El pabellón debía alinearse al resto de edificios, y también a dos grandes avenidas, la Avenue de Suffren y la Avenue de la Bourdonnais (Figura 33). Además, su lado largo también debía alinearse con la Avenue de la Motte-Picquet, lo que la única libertad de los diseñadores era el ancho del pabellón. (Linares de la Torre, 2018)

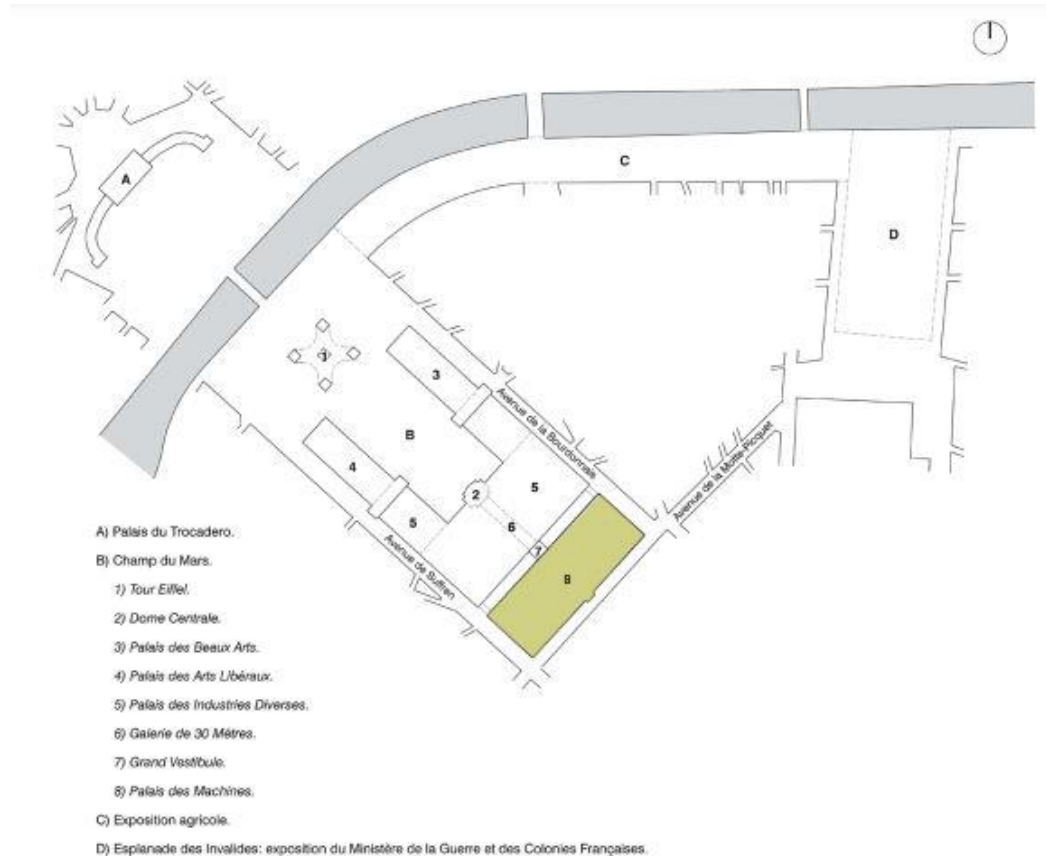


Figura 33: Ubicación de la Galería de las Máquinas en el conjunto expositivo de la Exposición Universal de París de 1889. (Linares de la Torre, 2018)

Este pabellón cerraba las vistas del conjunto de la exposición, ubicado detrás del Palais des Industries Diverses, separado de esta por el Gran Vestíbulo. Al superar en altura al Palais des Industries Diverses, la Galería de las Máquinas podía ser admirada desde cualquier punto del Campo de Marte (Figura 34). (Linares de la Torre, 2018)



Figura 34: Vista frontal del conjunto expositivo desde la Torre Eiffel. Al fondo la Galería de las Máquinas cerrando el conjunto. (Linares de la Torre, 2018)

4.3. Precedentes en las estructuras metálicas

La Galería de las Máquinas fue un hito en las estructuras metálicas en el campo de la edificación, sin embargo, esta estructura de arcos triarticulados ya había sido ensayada en el campo de la ingeniería con puentes.

Gracias a la Revolución Industrial, la disponibilidad de hierro tanto forjado, como de fundición, aumenta considerablemente y empieza a predominar su uso como material estructural tanto en la edificación como en la ingeniería. Será primero en el campo de la ingeniería donde lleguen los primeros ejemplos de estructuras metálicas. (López, 2017)

El más conocido es el puente sobre el río Severn, cerca de Coalbrookdale en 1777, diseñado por el arquitecto T. F. Pitchard (Figura 35). Formado por arcos de medio punto de hierro de fundición, consiguió alcanzar los 30,5 metros de luz.

Poco después, en 1796, sobre el río Wear, Tom Paine construye un puente también de hierro de fundición que estaba formado por un arco rebajado, alcanzando una luz de 71,9 metros. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)



Figura 35: Puente sobre el río Severn. T.F. Pitchard, finalizado en 1779. (Kemp, 1979)

En cuanto al campo de la edificación, este tipo de estructuras no llega hasta mediados del siglo XIX. En la Exposición Universal de París de 1855, M. M. Barrault y Bridel construyen el Palacio de la Industria. Un pabellón con una bóveda central de 48 metros de luz, y otras dos laterales de 24 metros de luz, todas ellas resueltas con arcos en celosía de hierro forjado. En aquella época tuvo un gran mérito por tener la cubierta más amplia que se había intentado llevar a cabo. (Barrault, 1856)

Sin embargo, el precedente más importante de la Galería de las Máquinas de 1889, es la Estación de St. Pancras en Londres, que, aunque tiene algunas modificaciones, todavía sigue en uso. Fue construida por William H. Barlow en 1868, y logró alcanzar los 73 metros de luz (Figura 36). La estructura se constituye de unos arcos de hierro en celosía de Cruz de San Andrés, dada su inspiración gótica, estos arcos tienen una geometría ligeramente apuntada. Estos arcos arrancaban desde una pilastra de fábrica, y tenían un intereje de 9 metros de distancia. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

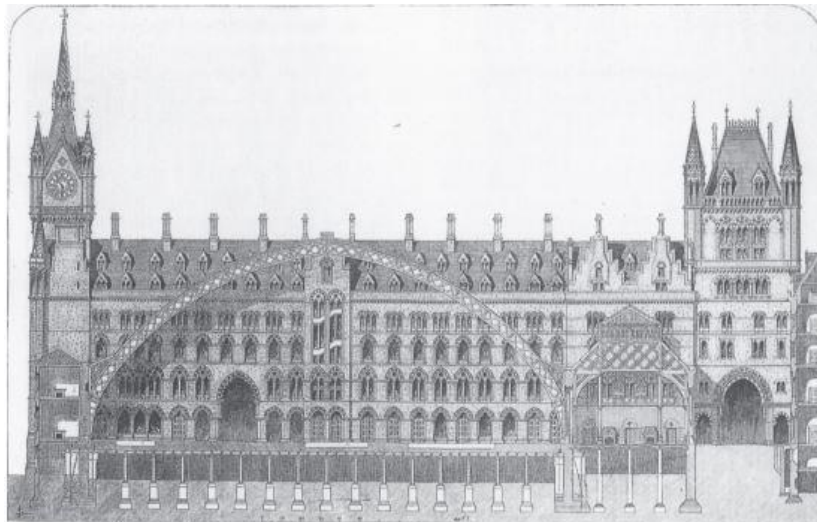


Figura 36: Sección transversal de la Estación St. Pancras en Londres. William H. Barlow. 1868. (López-César & Estévez-Cimadevila, 2018)

Todos estos ejemplos que hemos tratado, tenían una estructura metálica de arcos sin ninguna articulación en los apoyos. Por lo que se comenzó a investigar cómo evitar que los momentos se transmitieran a los arranques de fábrica, bien fuesen de muros o macizos de cimentación. Por lo que se empezó a ensayar con arcos biarticulados.

El arco biempotrado o sin articulaciones tiene la ventaja de que la flexión que se desarrolla es menor que en los arcos biarticulados y triarticulados que veremos más adelante. Sin embargo, al no tener articulaciones es más hiperestático y las tensiones procedentes de las variaciones térmicas y de los asientos llegan a una mayor magnitud, y en algunas ocasiones pueden llegar a ser mayores a las procedentes de la flexión. Este fue uno de los motivos por los que se introdujeron rótulas en los arranques, dando lugar a los arcos biarticulados, de forma que se reduce el grado de hiperestaticidad externa, a la vez que, no transmite los momentos flectores a la cimentación. (López, 2017)

Uno de los ejemplos más conocidos en la construcción de estructuras con arcos biarticulados fue el Puente María Pía sobre el río Duero que diseñó Gustave Eiffel, en Oporto en el año 1875 (Figura 37). Este puente logró alcanzar los 160 metros de luz, medidos a ejes de rótulas. Formado por un arco apoyado en sus extremos, de canto variable, y que alcanza una altura de 63 metros. Daba continuidad a la línea de ferrocarril que venía desde Lisboa, y lleva el nombre de la reina María Pía de Saboya, quien inauguró el puente. Actualmente está en desuso, y en 1996 fue declarado Patrimonio Mundial. (Plasencia, 2011)



Figura 37: Puente María Pía sobre el río Duero en Oporto, diseñado por Gustave Eiffel en 1875. (Plasencia, 2011)

El arco biarticulado, a pesar de funcionar estructuralmente mejor que los arcos sin rótulas, seguía sin cubrir todas las necesidades que los arquitectos e ingenieros buscaban. Es por esto que los ingenieros de la época empiezan a experimentar con el arco triarticulado. Este tipo de arcos ofrece una mayor facilidad en el montaje de estructuras de luces medias, además de una simplificación en su cálculo y una considerable reducción de las tensiones que se generaban por los movimientos térmicos o asentamientos diferenciales. En las estructuras de grandes luces el montaje de los semiarcos se realizaba mediante roblonado en altura, dado el enorme peso de cada semiarco. Sin embargo, este método de montaje no resultó novedoso ya que era algo que se había utilizado previamente en edificios como el ya nombrado Palacio de la Industria de 1855.

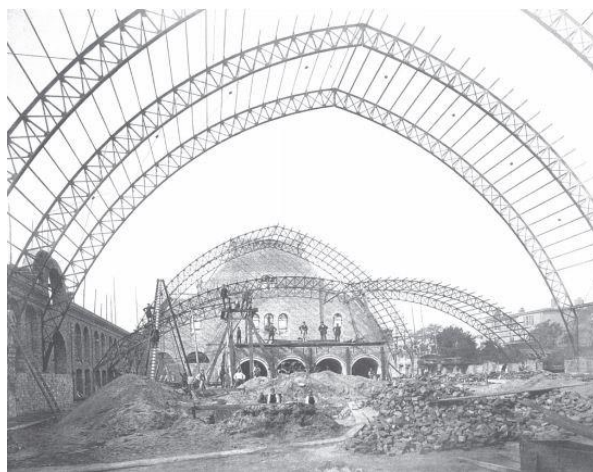


Figura 38: Construcción de la Gran Sala de la Imperial Continental Gass Association en Berlín. Johann Wilhelm Schwedler. 1863. (Gössel & Leuthäuser, 2005)

La primera estructura conocida formada por arcos triarticulados es la Gran Sala de la Imperial Continental Gass Association en Berlín (Figura 38), llevada a cabo por el ingeniero alemán Johann Wilhelm Schwedler en el año 1863. Formado por doce arcos triarticulados en celosía de Cruz de San Andrés que alcanzaban los 32,95 metros de luz (Figura 39). Pero en este caso, los empujes que generaban los arcos eran absorbidos por contrafuertes de fábrica. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

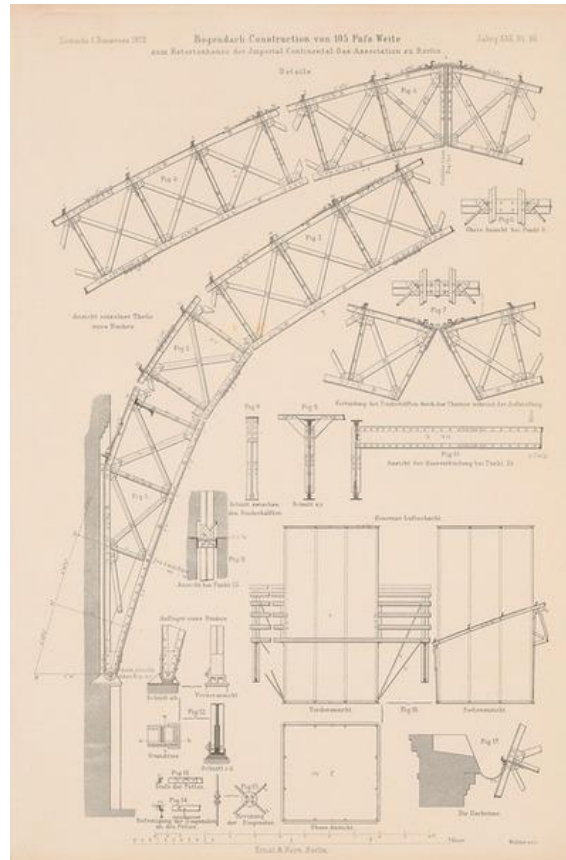


Figura 39: Despiece de la estructura de la Gran Sala de la Imperial Continental Gass Association en Berlín. (Gössel & Leuthäuser, 2005)

Uno de los ejemplos de edificios con estructura de arco, es la Estación del Este también en Berlín (Figura 40). Fue construida por el ya nombrado Johann Wilhelm Schwedler en el año 1866. Su estructura logró alcanzar los 36,25 metros de luz, aunque a diferencia de la Galería de las Maquinas, este edificio disponía de contrafuertes de fábrica que neutralizaban los empujes del arco.

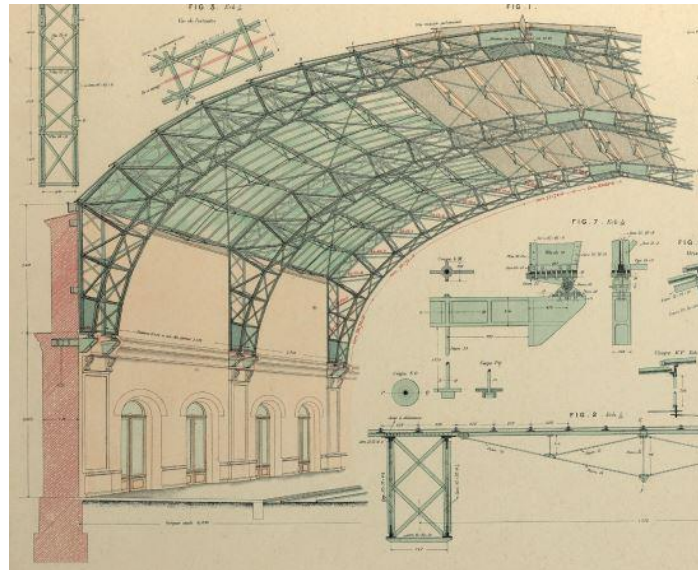


Figura 40: Estructura de la Estación del Este en Berlín. J. W. Schwedler. 1866. (Vierendeel, 1902)

En Alemania también se construyeron otras dos estaciones con estructura de arcos triarticulados, son la Estación Alexanderplatz en 1880, con una luz de 37,10 metros, llevada a cabo por Johann Eduard Jacobstahl; y la Estación de Frankfurt am Main en 1887, con una luz de 55,75 metros, ambas construidas por J. W. Schwedler.

Por lo tanto, hemos visto que, el uso de las estructuras de arcos triarticulados antes de la Galería de las Máquinas de 1889, estaba extendido, en la resolución de cubiertas de luces grandes. Sin embargo, el empleo de esta estructura en la Galería de las Máquinas supuso un hito en la arquitectura de la época, ya que llevó los arcos triarticulados a su máximo esplendor y potencial, alcanzando una luz de 110,60 metros. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

4.4. Dimensiones del pabellón de la Galería de las Máquinas

Como ya hemos dicho anteriormente, La Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París de 1889 se coronó como el edificio con la mayor luz del mundo y con una desarrollada tecnología de su estructura metálica de la época. Volumétricamente, este pabellón estaba conformado por una nave central cubierta con arcos triarticulados y dos naves laterales cubiertas con bóvedas metálicas perpendiculares a la nave central.

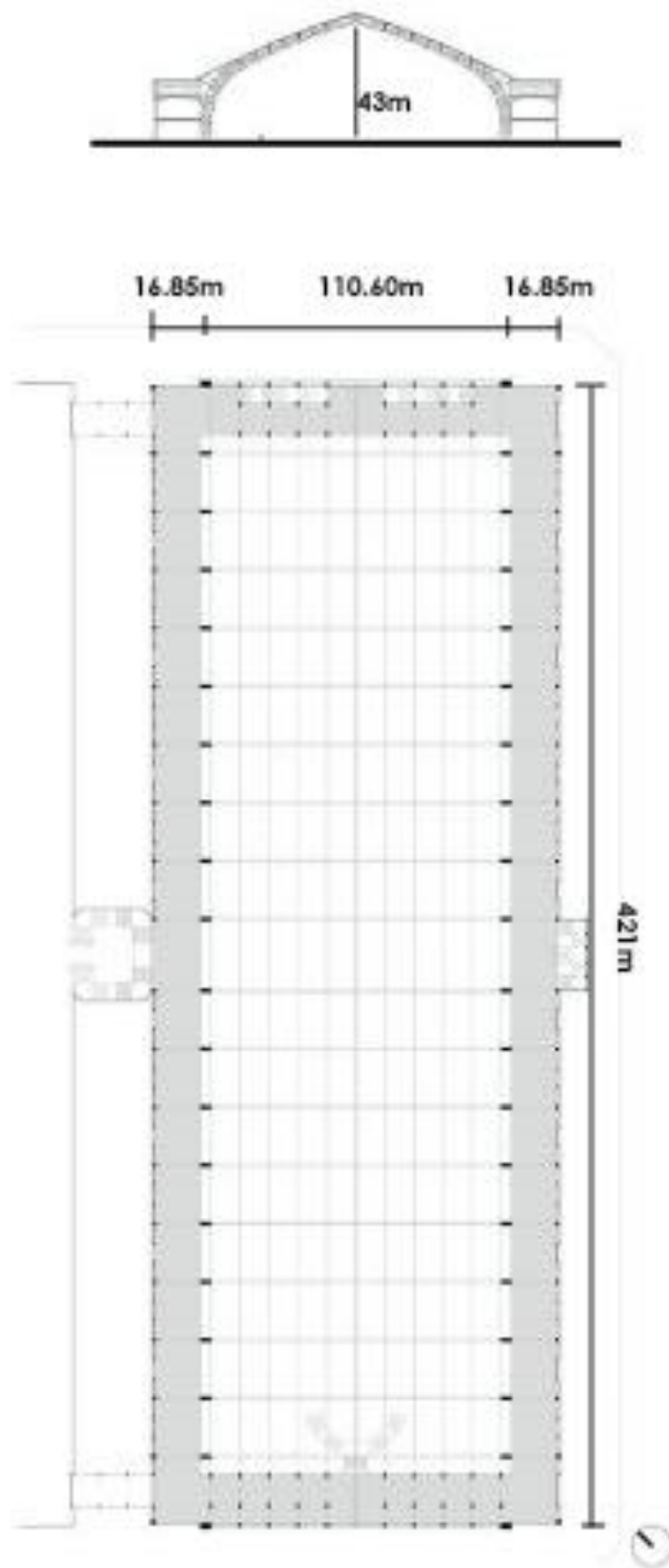


Figura 41: Planta y sección del pabellón de la Galería de las Máquinas de 1889. (Linares de la Torre, 2018)

El espacio definido por la nave central (Figura 41) está constituido por un rectángulo en planta de 421 metros de largo, aproximadamente, y 110,60 metros de ancho. Por lo que, con estas dimensiones, la nave principal cubre una superficie de 48.200 metros cuadrados aproximadamente. La estructura alcanza, en su parte central, poco más de 43 metros. En su totalidad, el pabellón conforma un volumen de más de 1.730.000 metros cúbicos. (López, 2017)

El mérito de este proyecto se refiere, en gran parte, a sus dimensiones. Nunca antes en la historia de la arquitectura se había construido un espacio de estas proporciones.

En la investigación de Oscar Linares de la Torre, profesor de la Universidad Politécnica de Cataluña, compara el espacio que cubre la Galería de las Máquinas con las manzanas completas del ensanche que proyectó Ildelfons Cerdà para la ciudad de Barcelona (Figura 42). Dentro de la superficie del pabellón cabrían, sobradamente, tres manzanas completas, separadas entre ellas. (Linares de la Torre, 2018)

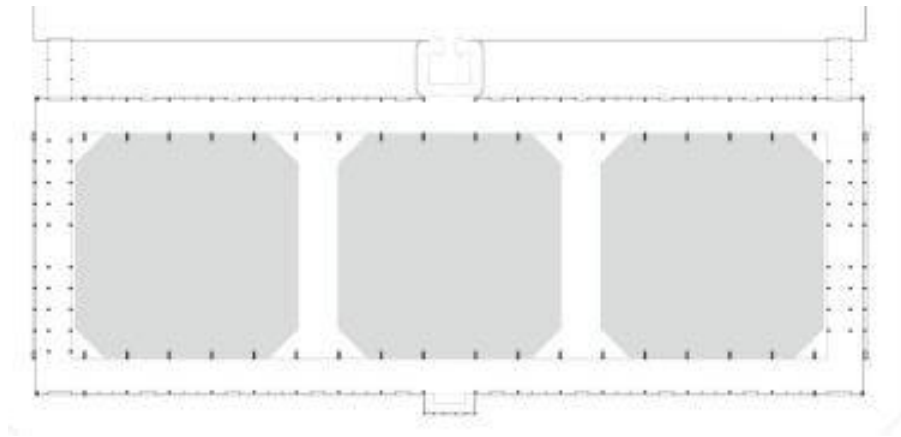


Figura 42: Comparación de la superficie entre el pabellón de la Galería de las Máquinas y las manzanas del ensanche de Barcelona de Cerdà. (Linares de la Torre, 2018)

Además, Linares de la Torre también realiza una comparación de alturas entre la Galería de las Máquinas y dos conocidos edificios, los cuales son el Pantheon de Roma y la Catedral de Amiens (Figura 43). Cuyas alturas son comparables a la del espacio expositivo del pabellón.



Figura 43: Comparación de la altura en sección entre la Galería de las Máquinas y el Pantheon de Roma de 128, y la Catedral de Amiens de 1220. (Linares de la Torre, 2018)

Durante el siglo XIX se desarrolló una competencia por la construcción de grandes espacios cubiertos cada vez mayores, innovando en las estructuras metálicas. En el caso que nos concierne de las exposiciones universales, se buscaba construir espacios diáfanos expositivos de mayor luz y dimensión.

Si realizamos una comparativa de los mayores logros de las exposiciones universales hasta la de París en 1889, podemos observar que las luces han ido en aumento progresivo hasta llegar al icono de la Galería de las Máquinas. Desde el famoso y pionero Crystal Palace con una anchura libre de la crujía central de poco más de 20 metros, en la Exposición Universal de Londres de 1851; luz duplicada 22 años después, en 1873, en la exposición de Viena, y triplicada tres años después en la exposición de Philadelphia de 1876. Como ya hemos hablado antes, el edificio previo que más luz alcanzó, fuera de las exposiciones universales, fue la estación de St. Pancras de Londres, también de 1876, con 70 metros de luz. Hasta que, superando en más de 40 metros la luz de su antecesor, la Galería de las Máquinas representó en aquel momento un logro estructural como nunca se había visto. (Linares de la Torre, 2018)

No obstante, fue un hito en el ámbito de la edificación, pero no en el de la ingeniería, ya que en aquella época ya se estaban construyendo puentes de luces mayores que las de la Galería de las Máquinas. Como el famoso puente de Brooklyn en 1883, que alcanzaba una luz de nada menos que 486 metros; o el Firth of Forth, finalizado en 1890, tan solo un año después que el pabellón, logró alcanzar los 521 metros de luz.



Figura 44: Nave central de la Galería de las Máquinas antes de montar la exposición. (Dunlop & Hector, 1999)

Si indagamos un poco en los motivos que llevaron a Dutert y Contamin a configurar este espacio con tales dimensiones (Figura 44), veremos que las dimensiones de la planta de la Galería de las Máquinas responden a su ubicación urbana. Como ya hemos comentado antes, el edificio debía alinearse, al igual que el resto de edificios de la exposición con la

Avenida de Suffren y la Avenida de la Bourdonnais. Dado que la Galería de las Máquinas se encontraba en posición perpendicular con respecto al conjunto expositivo, la longitud se quedó limitada a los 420 metros de largo aproximadamente. Por lo que las únicas dimensiones que quedaban por definir eran el ancho del edificio y su altura, y fue ahí donde los arquitectos e ingenieros tuvieron mayor libertad para crear e innovar. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)



Figura 45: Nave central de la Galería de las Máquinas con la exposición ya montada. (Dunlop & Hector, 1999)

Sin embargo, tampoco fue decisión de Dutert y Contamin el hecho de que la estructura no tuviera apoyos intermedios, sino que fue una exigencia del Plan General de la Exposición. El diseño final tenía que realizarse de un solo trazo, ya que el espacio debía albergar unas máquinas (Figura 45) en un mismo lugar, era necesario un espacio diáfano de unos 400x100 metros, un programa muy difícil de conseguir.

En cuanto a la altura de la nave central, la maquinaria no requería ninguna altura específica. El resultado de los 43 metros de altura libre fue fruto de la elección de la tipología estructural. La altura del extradós del arco era de 46.67 metros, una gran altura que le permitió ser concebida como el telón de fondo del conjunto expositivo. (Linares de la Torre, 2018)

4.5. La controversia de la luz

Una de las grandes controversias de la Galería de las Máquinas de 1889, es la determinación de la luz exacta de su estructura, muchos autores discrepan en las dimensiones de la luz. En

varias fuentes bibliográficas de la época se exponen diferentes dimensiones: en “La Construction Moderne” hay una sección del montaje del edificio acotada, en la cual se fija una distancia de eje a eje de rótulas de 110.60 metros; en “Engineering” se incluye una media sección acotada con una media luz de 55.50 metros, lo que supondría una luz de 111 metros; en la publicación de “Nouvelles Annales de la Construction” también se incluye una media sección acotada en 55.30 metros, dando una luz de 110.60 metros; y por último en la publicación de “Paris Universal Exposition 1889. Civil Engineering, Public Works and Architecture” se incluye otra media sección acotada también en 55.30 metros, dando lugar a 110.60 metros de luz.

Por lo que podemos ver, que, en la mayoría de las publicaciones de la época, se acota la luz de los arcos triarticulados en 110.60 metros. Sin embargo, en publicaciones más modernas, asignan al edificio luces de entre 109 metros hasta 115 metros: “The Railroad Station: an Architectural History” le asigna una luz de 110.33 metros; Donal Hoffman da por válida una luz de 111 metros; Nikolaus Pevsner sostiene que el edificio tiene 109 metros de luz; y Sigfried Giedion le asigna una luz de 115 metros.

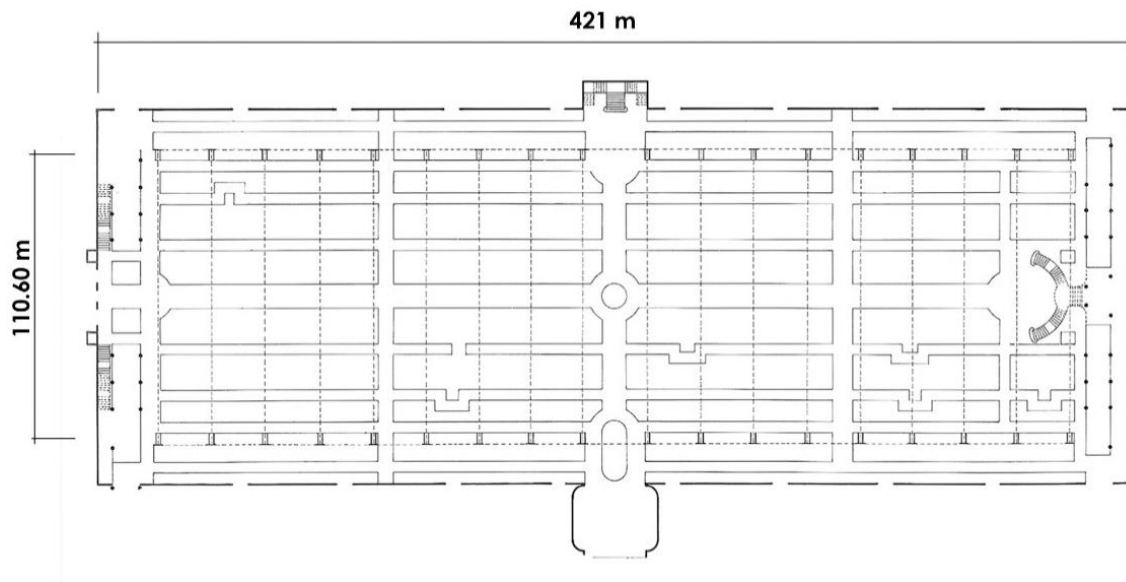


Figura 46: Planta general de la Galería de las Máquinas acotando sus medidas principales. (Hénard, 1891)

Para solventar esta controversia se tuvo especial atención a la fuente primaria y de mayor fiabilidad, la cual es la publicación de Eugène Hénard, arquitecto encargado del proceso de ejecución de la Galería de las Máquinas: “Exposition Universelle de 1889. Le Palais des Machines. Notice sur l’édifice et sur la marche des travaux”. Publicada en 1891, venía acompañada de 41 figuras que proceden de los documentos originales. En los planos que adjunta Hénard, se puede observar un plano de montaje en el que queda acotada la distancia entre las rótulas de arranque del arco, una distancia de 110.60 metros (Figura 46), lo cual coincidiría con la mayoría de las fuentes de la época en la que se llevó a cabo la Galería de las Máquinas. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

4.6. Estructura del pabellón de la Galería de las Máquinas

La estructura fue uno de los rasgos más celebrados de la Galería de las Máquinas. El empleo de arcos triarticulados, una tipología que en aquel momento era muy expresiva estéticamente, y que, aunque muchos lo piensan así, este hecho no fue fruto completamente de sus autores, sino que tuvieron una serie de exigencias que debían cumplir y los llevó a tomar ciertas decisiones de diseño.

La Galería de la Máquinas de 1889 estaba formada por una nave central de 110.60 metros de luz medidos de eje a eje de rótulas, flanqueada por dos naves laterales de 16.85 metros (Figura 47). (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

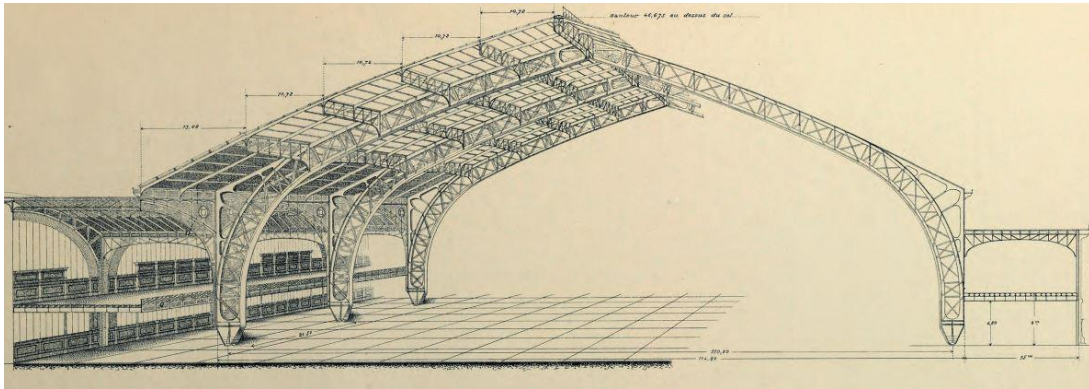


Figura 47: Perspectiva seccionada y acotada de la Galería de las Máquinas de 1889. (Vierendeel, 1902)

La primera idea que Dutert propuso para cubrir transversalmente la nave central fue la misma solución que se empleó en su predecesor, la Estación de St Pancras de Londres: un arco rígido elíptico encastado en sus extremos. Sin embargo, para Contamin esta no era la mejor opción desde el punto de vista estructural. Fue entonces cuando propuso la tipología estructural de arcos triarticulados, una tipología formada por dos semiarcos rígidos, los cuales descansan en el suelo sobre sus extremos y la otra extremidad sobre el otro semiarco.

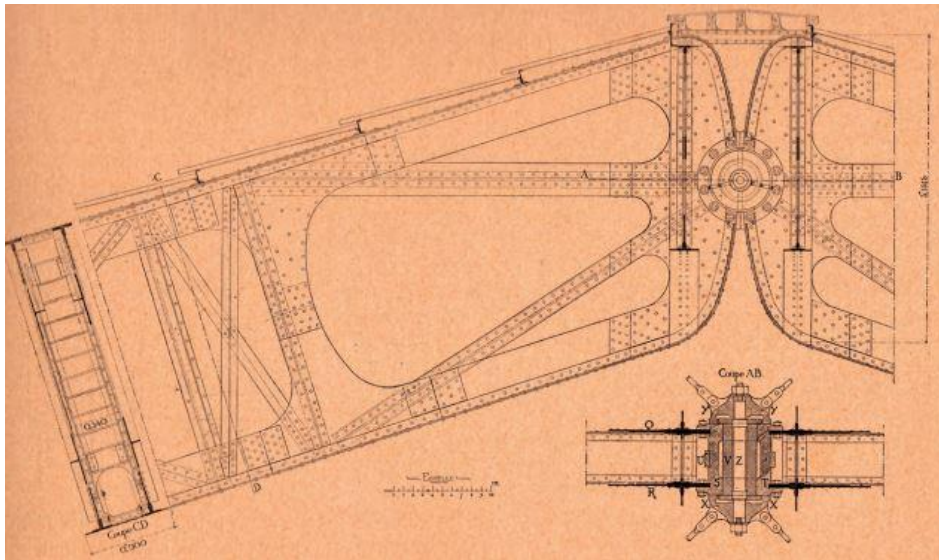
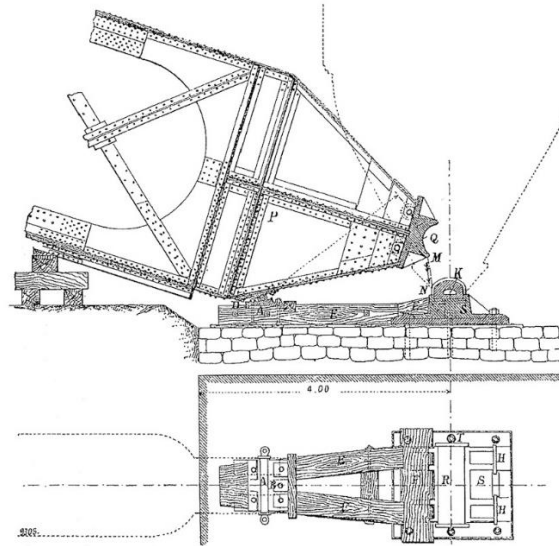


Figura 48.01: Detalle de las rótulas de arranque de los arcos triarticulados de la nave principal. 02: Detalle de la rótula de la clave de los arcos triarticulados de la nave principal. (Hénard, 1888)

Lo que caracteriza a esta tipología estructural es que, en los tres puntos de contacto, dos en el suelo (Figura 48.01) y uno entre los dos semiarcos en la cúspide (Figura 48.01), se resuelven mediante rótulas. El ingeniero Victor Contamin se decantó por esta tipología ya que presentaba notables ventajas frente al arco rígido. En cuanto al cálculo, el del arco triarticulado es mucho más sencillo que el de un arco rígido, la cual al ser una estructura hiperestática el cálculo es mucho más complejo que el de la estructura isostática del arco triarticulado. (Linares de la Torre, 2018)

Conviene apuntar que, la elección de la tipología estructural de arcos triarticulados, no fue una decisión arriesgada de Contamin, ya que esta tipología estructural había sido ensayada por inventada por los ingenieros alemanes C. Köpke y J. W. Schwedler en 1861, casi tres décadas antes de la Galería de las Máquinas de 1889. Antes de que Dutert y Contamin lo utilizarán para este edificio, esta tipología ya había sido utilizada, como ya hemos visto anteriormente, en puentes y estaciones ferroviarias en Alemania y Austria. Lo que si

podemos decir de la Galería de las Máquinas es que fue el arco triarticulado de mayor potencia tectónica jamás construida en una obra de arquitectura.

La nave central estaba resuelta con veinte arcos de hierro forjado triarticulados, esto es, con articulaciones en los arranques y una tercera en la clave del arco. Estos arcos estaban dispuestos según un intereje general de 21.50 metros, por lo que la longitud total del edificio era de 421 metros aproximadamente. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

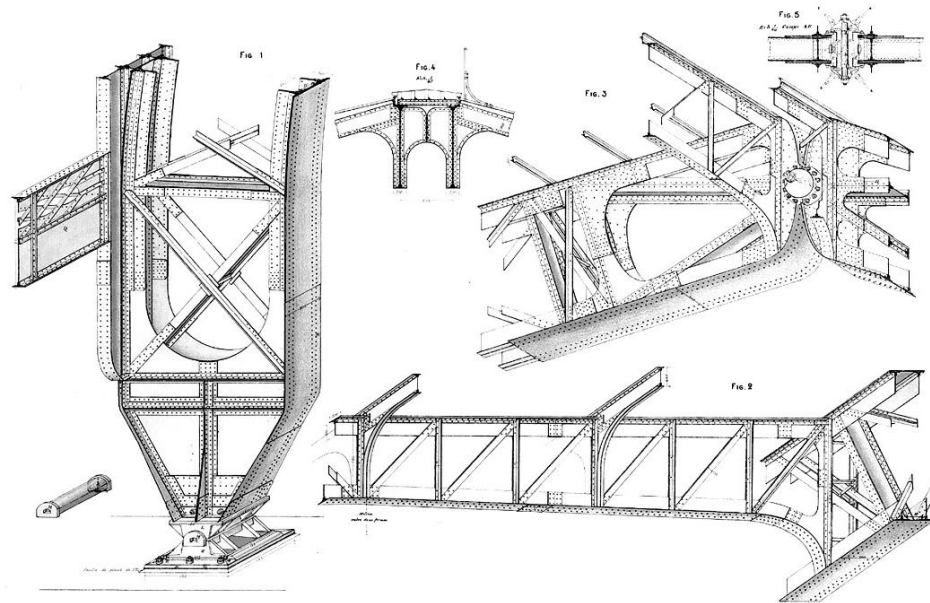


Figura 49: Despiece estructural de la nave central de la Galería de las Máquinas, con los cuatro niveles estructurales: arcos triarticulados, vigas de celosía de canto variable, vigas de sección H y barras de carpintería de cubierta. (Vierendeel, 1902)

La estructura estaba compuesta por tres niveles estructurales más (Figura 49): unas vigas en celosía de canto variable, entre pórticos, con un intereje de 10.72 metros; unas vigas de sección H con un intereje de 5.37 metros, entre las celosías; y las barras de hierro de la carpintería de la cubierta con un intereje de 1.78 metros.

La nave central se encontraba flanqueada por dos naves laterales de 16.85 metros de luz (Figura 50), formadas por un piso intermedio y cubiertas con bóvedas metálicas perpendiculares a la nave central; completando así el conjunto de la Galería de las Máquinas. La rigidización longitudinal de los pórticos transversales se confía a los forjados de las plantas de piso de las naves laterales, ayudando así a reducir las tensiones y la estabilidad horizontal. (Linares de la Torre, 2018)



Figura 50: Nave lateral de la Galería de las Máquinas. (Dunlop & Hector, 1999)

Cada semiarco descansa únicamente sobre la articulación de su base, concentrando todo el peso y las cargas en un punto (Figura 51). Gracias a las propiedades mecánicas del acero con el que está formado el perno de las articulaciones, hacen que se reduzca la cantidad de materia que se emplea en ese punto si se compara con las enormes dimensiones del pórtico. Esta inmaterialidad del apoyo se ve reforzada por el ahusamiento progresivo del soporte del arco desde una altura de dos metros y medio hasta la cota del pavimento. Al contrario que pasa con la potente basa sobre la que descansan los fustes clásicos, en la Galería de las Máquinas se libera de materia a la base del apoyo.

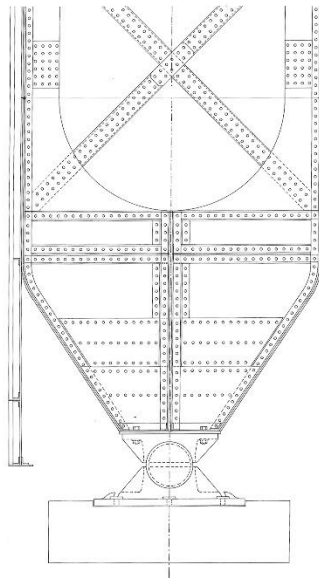


Figura 51: Detalle de la articulación de los apoyos de los arcos triarticulados de la nave principal. (Hénard, 1888)

Gracias a esta inmaterialidad del apoyo, la carga real de la gran cubierta del edificio se ve notablemente minorizada por la delicadeza del apoyo sobre el que descansa, reducido a un contacto puntual que realmente parece inverosímil, provocando en el espectador y en los organizadores de la exposición una gran impresión y nerviosismo. Por este motivo, Dutert

se planteó ocultar los apoyos de los arcos, pero, como veremos más adelante, descartó esta idea. (López, 2017)

Aunque la Galería de las Máquinas constituye un gran logro tecnológico, la geometría llevada a cabo de los arcos no es la más eficiente desde la perspectiva estructural. Esto es porque el trazado de los arcos no sigue la línea antifunicular que corresponde a una carga distribuida, que sería la parábola, garantizando así el trabajo a compresión.

Cada uno de los miembros del arco son trazados prácticamente en recto en su mitad superior, lo que conlleva a la reducción considerable que provocaría el arco parabólico, y apuntándose ligeramente como si de un edificio gótico se tratara. Esta desviación en el diseño de la estructura provoca flexiones en el arco, siendo de gran magnitud en la zona en la que la curvatura es mayor. De ahí viene el canto variable de los arcos, y que los cordones inferior y superior sean de mayor espesor en esta zona (obtenido por superposición de platabandas, ya que el espesor máximo alcanzable de las platabandas en la época era de 10 mm).

Las cruces de San Andrés de los arcos siguen un patrón de separaciones grandes y pequeñas, aumentando la dimensión de las separaciones pequeñas desde la clave del arco hacia el arranque del arco, de forma que siempre haya montantes verticales para ensamblar las celosías transversales. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

En el tema de la absorción de los empujes, en los ejemplos que hemos visto en los apartados anteriores, se resuelven con métodos como: contrafuertes de fábrica en la Estación del Este de Berlín, mediante tirantes subterráneos en la Estación de St Pancras o con la disposición de naves laterales con una gran rigidez horizontal como en el Palacio de la Industria de 1855. Sin embargo, en la Galería de las Máquinas se utilizó un método totalmente diferente: la cimentación se dimensionó para resistir el empuje de los arcos en su totalidad. Este empuje se equilibra por rozamiento del macizo de cimentación, aunque las naves laterales colaboran, en parte, a resolver los empujes de los arcos.

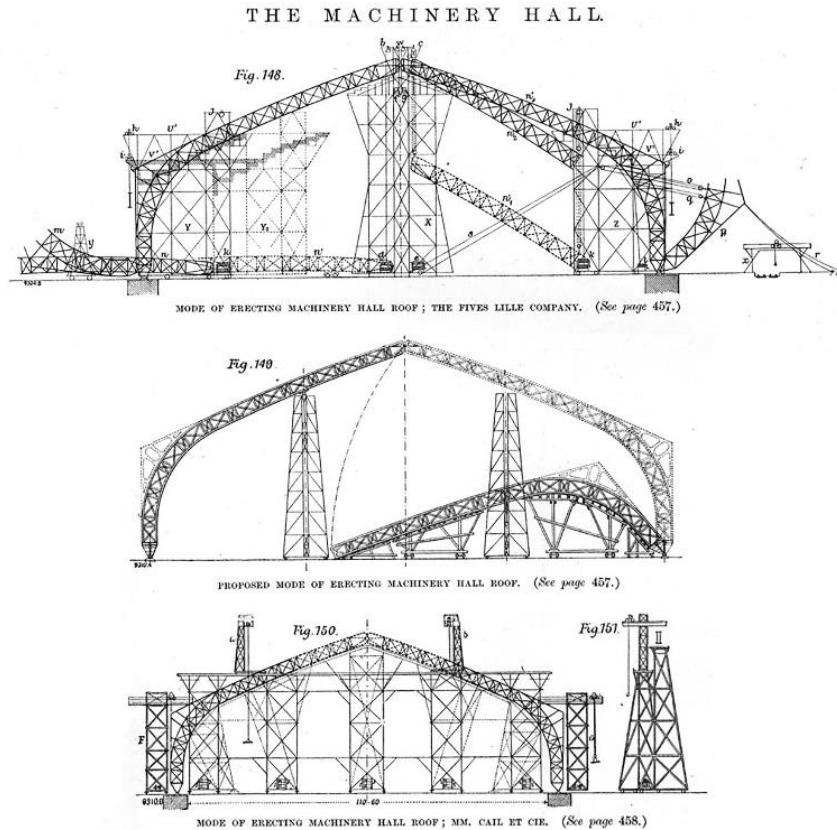


Figura 52: Proceso de construcción de los arcos triarticulados de la nave principal de la Galería de las Máquinas. (Atlas of Places, 2017)

Así lo afirmaba el arquitecto encargado de los trabajos de ejecución, Eugene Hénard:

“El arco se ha considerado aislado desde el punto de vista de su resistencia y capaz de soportar por sí solo toda la carga del edificio. Añadir que las galerías laterales forman una serie de contrafuertes naturales que contribuyen de una manera más eficaz a la estabilidad lateral del edificio.” (Hénard, 1888)

Por ello, tanto en los planos de ejecución como en las fotografías del montaje de la estructura podemos ver como se llevaron a cabo los arcos junto con las celosías y vigas montados, sin las naves laterales (Figura 52); siendo todo este entramado de la cubierta la carga principal de la estructura. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

4.7. La cimentación de la Galería de las Máquinas

El edificio contaba con ochenta puntos de cimentación, de los cuales cuarenta de ellos correspondían a las cimentaciones de los veinte arcos principales. Tras realizar los sondeos del terreno, se encontraron diversos perfiles estratigráficos, por lo que, aunque en la mayoría de los puntos de cimentación se dispuso una cimentación superficial, en doce de estos puntos de los arcos principales se tuvo que hacer una cimentación por pilotaje (Figura 53).

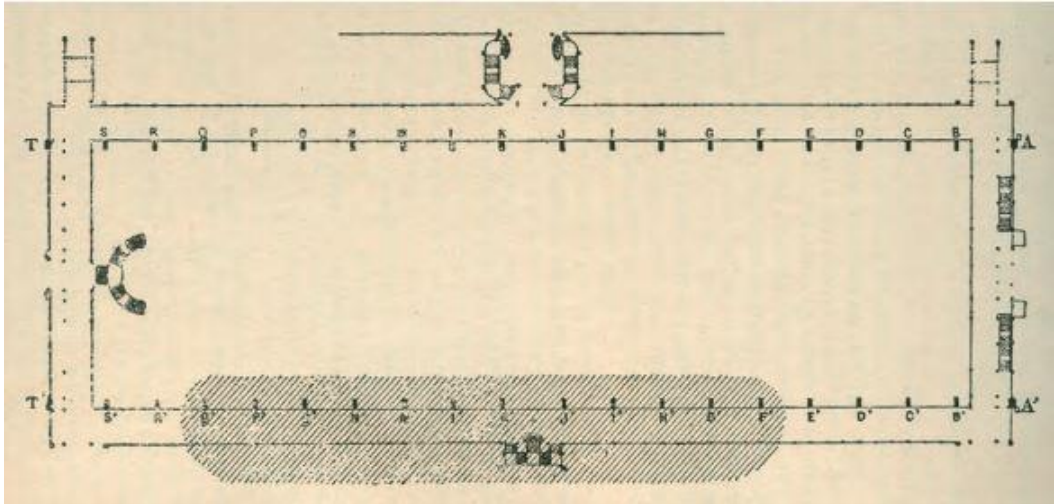


Figura 53: Planta de cimentación de la Galería de las Máquinas indicando los puntos de cimentación de los arcos triarticulados. La zona rayada corresponde a los doce puntos de cimentación de los arcos principales con cimentación por pilotaje. (Watson, 1892)

Se utilizaron unos pilotes de madera con abrazaderas de hierro, y se llevó a cabo con la ayuda de un martillo de vapor de 1.2 toneladas (Figura 54); una técnica que ya se venía usando en las cimentaciones de puentes, desde que, en 1839, James Nasmyth inventara un martillo pilón o ariete hidráulico que permitía la mecanización de la complicada hincada de pilotes. (López, 2017)

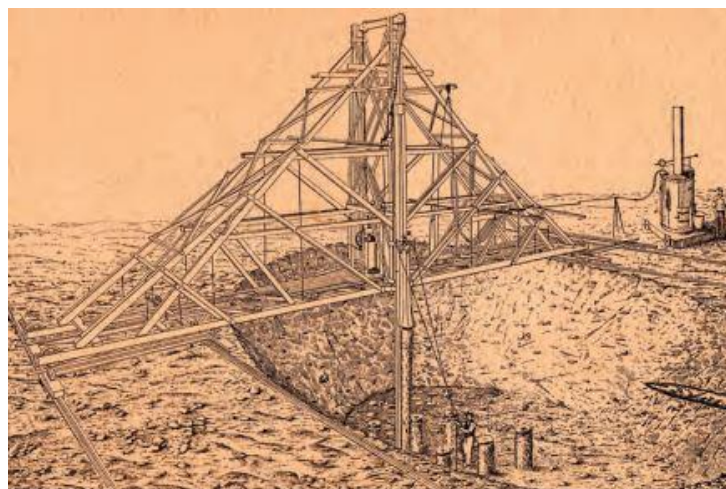


Figura 54: Hincada de pilotes de madera mediante martillo de vapor. (Hénard, 1891)

En este edificio, el empleo de una estructura de arco triarticulado es especialmente adecuado dada la existencia de posibles asientos diferenciales derivados de, en este caso, la combinación de cimentación superficial y cimentación profunda (Figura 55), ya que no provocaría incrementos de tensión demasiado importantes en los arcos, gracias a que las rótulas permiten el reacomodo de sus dos miembros sin producir grandes tensiones.

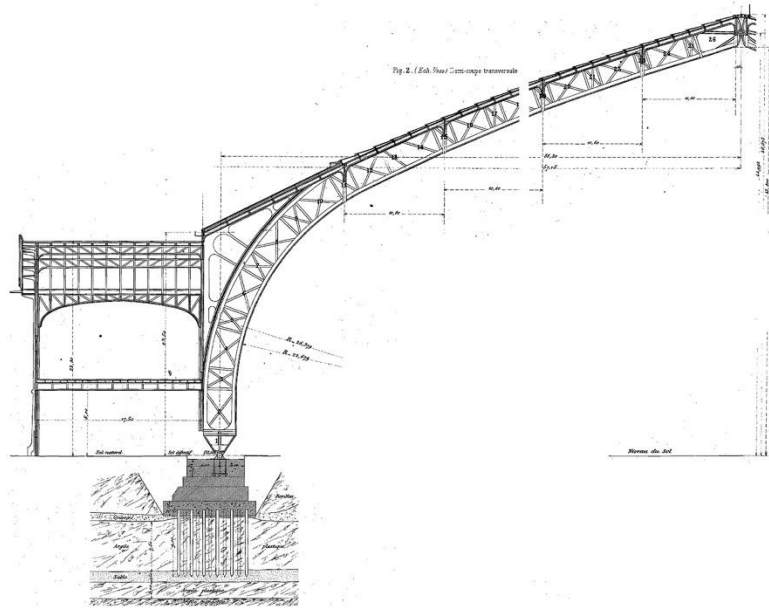


Figura 55: Sección del encuentro entre el arco de la nave principal, la nave lateral y la cimentación profunda. (Hénard, 1888)

4.8. El problema de los movimientos térmicos

Puesto que el edificio alcanzó los 110.60 metro de luz, los movimientos térmicos que se generaban en el plano de los arcos eran relevantes. Sin embargo, y como ya hemos dicho, la tipología de arcos triarticulados tiene la ventaja de la libertad de movimientos, permitiendo así los movimientos de dilatación y contracción térmica, evitando incrementos importantes de tensiones en el arco gracias al giro de las rótulas. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

En cuanto a la dirección longitudinal del edificio, se utilizó un método en el cual se unían, cada tres tramos, es decir cada 64.50 metros aproximadamente, las celosías longitudinales con los arcos mediante pasadores que se ubicaban en agujeros ovales. Este sistema garantizaba, por un lado, la estabilidad horizontal en la dirección longitudinal, y, por otro lado, permitía los movimientos térmicos. Este sistema funcionó por primera vez de forma efectiva en este edificio, ya que esta técnica ya había sido utilizada previamente.

Las Exposiciones Universales anteriores se habían sido un campo de ensayo en el ámbito de los movimientos térmicos; como los desplomes de pilares en el Crystal Palace; o en el Palacio de la Industria de la Exposición Universal de París de 1855, en el que los movimientos térmicos longitudinales del entramado metálico de las bóvedas provocaron la rotura de los vidrios en cubierta, o la abertura de juntas entre hierro y vidrio creando grandes goteras. El autor de este último edificio, Alexix Barrault, publicó un libro tras la construcción del edificio, en el cual exponía las patologías que se habían registrado y abre la puerta al concepto moderno de junta de dilatación:

“Es así como debería construirse una luz de 50 metros. Se establecen los arcos a distancias de 10 a 12 metros [...] Cada 100 metros de longitud estableceríamos un sistema de dos cerchas ligeramente separadas. Las correas se fijarían de tal manera que permitieran el movimiento de dilatación.” (Barrault & Bridel, 1857)

Este sistema del que habla Barrault en su libro, es el que se implementa en la Galería de las Máquinas de 1889, la fijación de correas de forma que permitan el movimiento de dilatación. Y puesto que en ninguna fuente bibliográfica se exponen patologías debidas a los movimientos térmicos, podemos decir que el sistema funcionó correctamente. (López, 2017)

4.9. El problema de la estabilidad horizontal

Otro de los problemas derivados de las tipologías de estructuras metálicas era una adecuada estabilidad horizontal. A modo de ejemplo, cuando el Crystal Palace fue desmontado y llevado a Sidenham, a pesar de incrementar las diagonales de arriostramiento, gran parte del edificio colapsó debido a la inestabilidad horizontal. (Linares de la Torre, 2018)

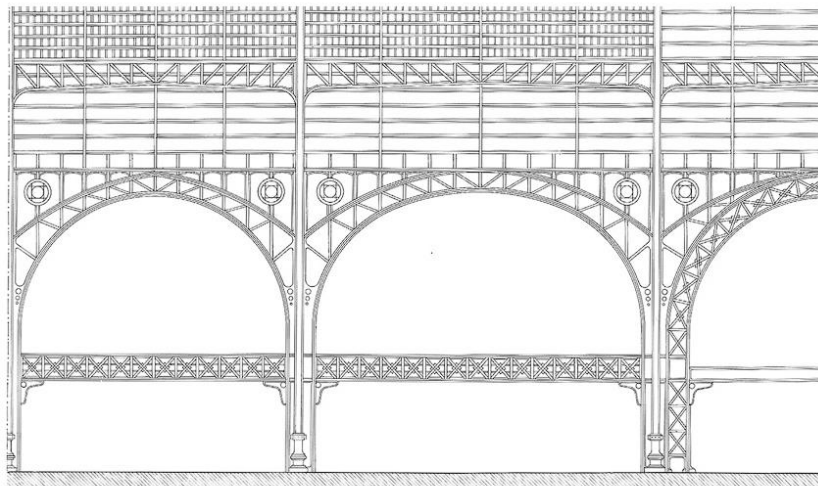
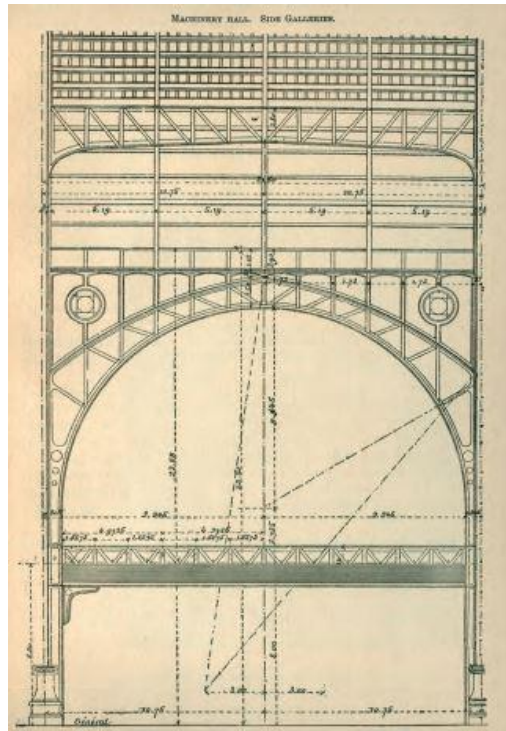


Figura 56: Alzados de la nave lateral vista desde la nave principal donde se observan los arcos y las vigas de celosía del piso de las naves laterales, unidos rígidamente a los arcos triarticulados principales estabilizando la estructura principal en la dirección longitudinal. (Watson, 1892)

En la Galería de las Máquinas, la estabilidad horizontal de la dirección longitudinal se consigue mediante la unión rígida de las vigas de celosía a los arcos, los cuales también se vinculan rígidamente mediante vigas que se sustentan en el piso de las galerías laterales (Figura 56) y mediante los arcos longitudinales de estas. La estabilidad horizontal en la dirección transversal queda garantizada, ya que el propio arco triarticulado es isostático y por lo tanto estable. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

4.10. Materialidad de la estructura

Los autores de la Galería de las Máquinas dejaron a un lado la fundición, y emplearon el hierro forjado para la construcción de la estructura; a pesar de que en muchas fuentes bibliográficas se dice que el edificio se construyó con acero. Es cierto, que, en un principio, Dutert y Contamin pensaron en realizar la estructura en acero, finalmente la llevaron a cabo en hierro forjado (Figura 57) por diversos motivos.

Uno de los motivos fue un artículo que escribieron conjuntamente Contamin y Eiffel, “Congrès International des Procédés de Construction”, en el cual ponían en duda al acero. Afirmaban que el acero había empezado a usarse por ingenieros en la construcción de puentes, pero que en los ensayos que se habían estado realizando en los últimos 10 años sobre vigas, habían obtenido una alta dispersión en los resultados. También surgió la duda de cuál sería la técnica para roblonar adecuadamente el acero sin modificar las capacidades resistentes de los elementos estructurales. (Eiffel & Contamin, 1890)



Figura 57: Detalle del apoyo de los arcos, donde se aprecia la materialidad, y el roblonado. (Linares de la Torre, 2018)

Dada relativa novedad y la limitación del conocimiento sobre este material que tenían los autores, decidieron descartarlo y emplear el hierro forjado que ya conocían. Pero esta decisión fue bastante tardía, por eso, muchas publicaciones de la época sostienen que el edificio se construyó con acero.

En la obra del arquitecto encargado de la supervisión general del edificio Hénard, de 1891, “Exposition Universelle de 1889. Le Palais des Machines. Notice sur l’édifice et sur la marche des travaux”, se expone una tabla con todos los materiales utilizados y su cantidad en kilogramos:

- “- Hierro forjado (incluyendo los roblones que pesan 13.585 Kg): 12.361.595 Kg
- Hierro de fundición (incluyendo los elementos de canalizaciones que pesan 5.623 Kg): 269.869 Kg
- Acero: 154.846 Kg
- Plomo: 18.506 Kg.” (Hénard, 1891)

Si sacamos los porcentajes, vemos que la estructura se llevó a cabo con un 96.5% de hierro forjado, un 2.1% de hierro de fundición, un 1.2% de acero y un 0.1% de plomo. Por lo que podemos decir que la estructura de la Galería de la Máquinas está hecha prácticamente en su totalidad de hierro forjado. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

La estructura fue construida por la Société des Forges de Fives-Lille y por la Cail factory, y la mampostería fue levantada por la M. Manoury company. (Atlas of Places, 2017)

4.11. Sobre la ornamentación

Una de las cuestiones más aplaudidas de la Galería de las Máquinas fue el uso del ornamento, la decisión de los autores por dejar vistas las articulaciones en los apoyos fue una aportación muy grande al desarrollo de la cultura tectónica, la expresión mecánica de la estructura en la arquitectura del siglo XX.

Durante el siglo XIX era habitual que las estructuras metálicas, una vez finalizadas, se cubrieran total o parcialmente, sobre todo en la base, de forma que se generaban encuentros constructivos bastante complejos y poco estéticos a los ojos de un arquitecto moderno. Por lo que el empeño de Dutert y Contamin por dejar vistas las articulaciones fue un acierto muy celebrado.

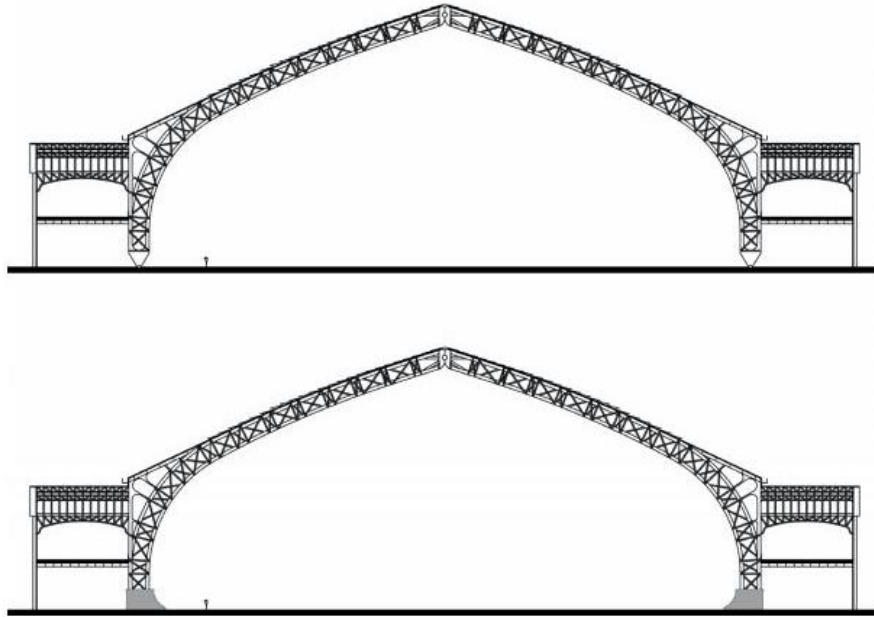


Figura 58: Comparativa de la estructura con los apoyos vistos y con los apoyos ornamentados y escondidos tras unas peanas. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

Esta descarnada expresión de los pórticos de la nave central (Figura 58) fue el resultado de la voluntad de Dutert por huir de la estética de la época, y arriesgándose por una tectónica propia y apropiada para el hierro. Sin embargo, tenemos que matizar algunas cuestiones. (Stamper, 1889)

La ausencia de decoración en los pórticos y la desnudez de los apoyos, contrasta con los recursos habituales de la época, ya que se ocultaban casi en su totalidad; pero además se utilizaban estucos, revestimientos cerámicos, paramentos de vidrios coloreados o con motivos geométricos... Pero esta decisión no solo se llevó a cabo en la estructura, sino que se extendió al conjunto del edificio.

En cuanto a las fachadas cortas de la Galería de las Máquinas, si vemos la planta, solo las escaleras interiores anuncian una notable diferencia ornamental entre ambas fachadas. La fachada de la Avenida de la Bourdonnais (Figura 59.01), el principal acceso del edificio, se encontraba bastante decorada: estaba flanqueada por dos pequeñas torres que le daban una mayor presencia institucional, y sus cristales también eran coloreados, con un gran despiece elaborado que marcaba inequívocamente el acceso principal del edificio. No obstante, la fachada opuesta, la de la Avenida de Suffren (Figura 59.02), estaba resuelta con un diseño notablemente más austero, ya que estaba concebida como un acceso secundario o trasero, muy probablemente de servicio. No contaba con ningún tipo de decoración ni ornamentación añadida, estaba resuelta con una retícula de líneas rectas para el despiece del cerramiento de vidrio de la fachada. (López, 2017)

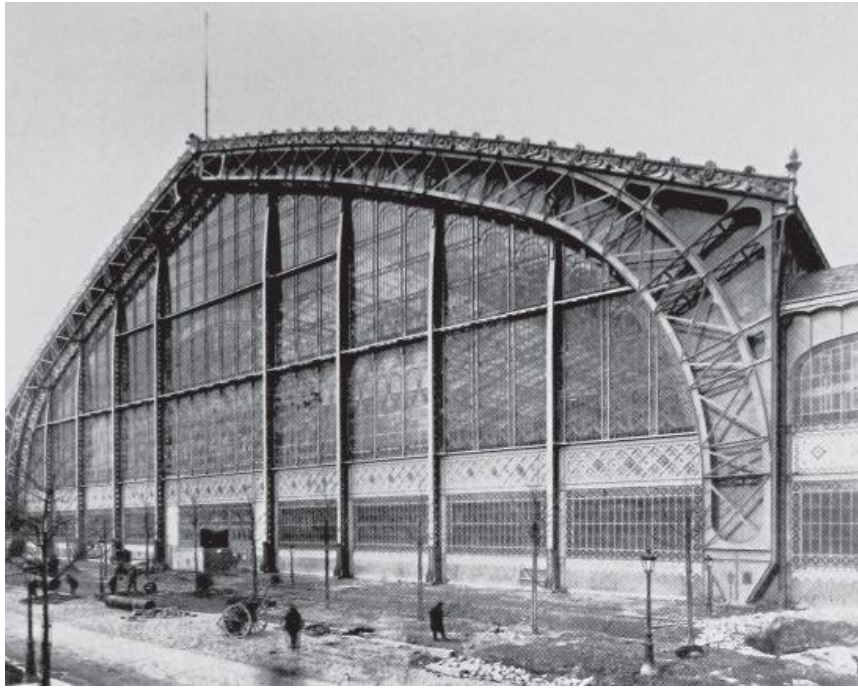


Figura 59 .01: Fachada y acceso principal por la Avenida de la Bourdonnais notablemente ornamentada. 02: Fachada y acceso trasero por la Avenida de Suffren. (Dunlop & Hector, 1999)

Esta gran diferencia en la ornamentación de las fachadas viene por la circulación urbana del visitante de la exposición. Para visitar la exposición de la Galería de las Máquinas, se podía acceder bien desde el conjunto expositivo del Campo de Marte a través del Gran Vestíbulo (espacio también diseñado por Dutert); o bien desde el conjunto expositivo de la Explanada de los Inválidos a través de la Avenida de la Motte-Picquet, que lleva directamente a la fachada principal de la Avenida de la Boudonnais. Por lo que estas dos entradas más concurridas y públicas, son también las más ornamentadas y decoradas. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

Por ello, podemos decir que Dutert no abandonó totalmente la ornamentación en el edificio, sino que el arquitecto optó por centrar los esfuerzos de los ornamentos en aquellas partes del edificio que estaban más expuestas al público. La contención presupuestaria, las grandes dimensiones del edificio y el limitado tiempo de construcción también condujeron, en parte, a la decisión de Dutert.

Gracias a esta decisión, y dado que el edificio se mantuvo en pie más de veinte años, los arquitectos y críticos del siglo XX, gracias a las fotografías, pudieron estudiar y encontrar inspiración para sentar las bases de una nueva arquitectura. (Linares de la Torre, 2018)

4.12. El arco triarticulado tras la construcción de la Galería de las Máquinas

Tras el éxito de la Galería de las Máquinas de 1889 en París, la consecuencia más próxima es la construcción del Manufactures and Liberal Arts Building (Figura 60) para la Exposición Universal de Chicago en 1893, tan solo cuatro años después. Este edificio estaba construido con la tipología estructural de arcos triarticulados alcanzando una luz medida a ejes de rótulas de 112.16 metros, superando a la Galería de las Máquinas en poco más de metro y medio. Con ello consiguió convertirse en el nuevo récord mundial de luz en la edificación. Las diferencias de este edificio con la Galería de las Máquinas, residen en la materialidad de su estructura, ya que este edificio está resuelto en acero, y en el trazado de los arcos, siendo los del edificio de Chicago de un trazado más parabólico.



Figura 60: Manufactures and Liberal Arts Building, Exposición Universal de Chicago de 1893. (López, 2017)

El arco triarticulado se empezó a utilizar con gran profusión a lo largo del tiempo, y en todo el mundo, especialmente para cubrir las estaciones de ferrocarril. También se puede apreciar el notable salto en las dimensiones de las luces que se alcanzaban con los arcos triarticulados antes de 1889. En Philadelphia, F. H Kimball construye la Reading Station (Figura 61.01) entre 1891 y 1893, alcanzando los 78.95 metros de luz, y con un gran parecido en el trazado del arco con la Galería de las Máquinas. También en Philadelphia se construyó un año después la Broad Street Station (Figura 61.02), por Wilson Bros. and Co., alcanzando los 91.65 metros de luz. O el Mercado de Ganado de Lyon, diseñado por Tony Garnier en 1909, y una luz de 80 metros. (López, 2017)

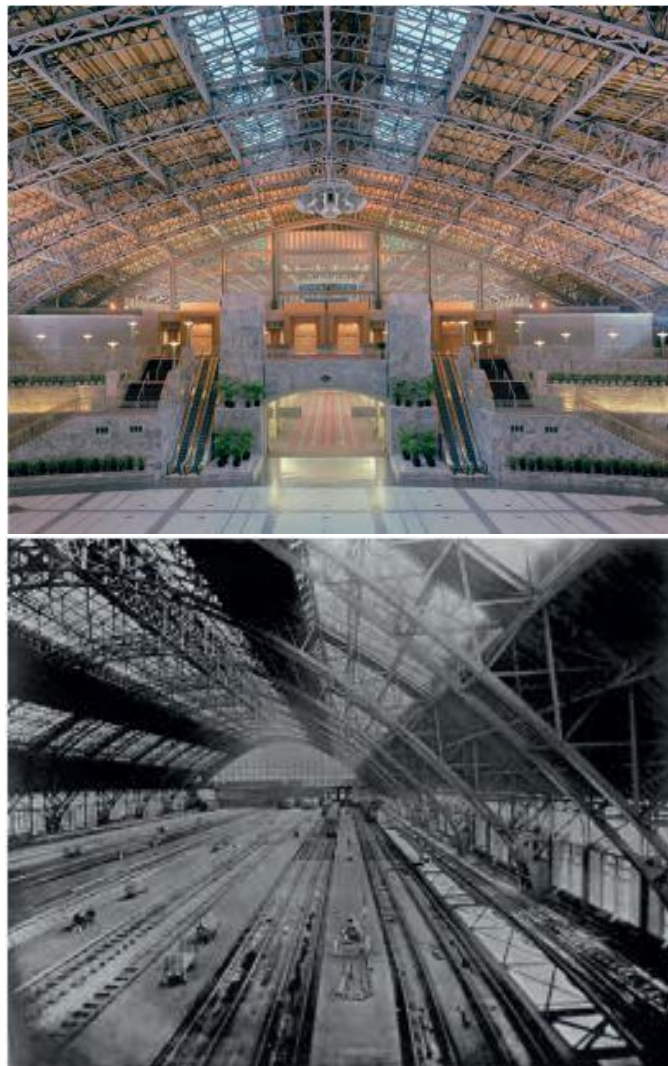


Figura 61.01: Reading Station en Philadelphia en 1893. 02: Broad Street Station en Philadelphia en 1894.(López, 2017)

Con esto podemos concluir que la Galería de las Máquinas de 1889 propició un gran salto en las luces alcanzadas por el arco triarticulado en la edificación de la época, ya que tras su construcción se pasa de luces de menos de 50 metros, a luces que alcanzan o se aproximan a los 100 metros. (Estévez Cimadevila & López César, 2015)

5. Conclusiones

Una vez finalizado el recorrido desde la Revolución Industrial hasta la Galería de las Máquinas de 1889, podemos obtener las siguientes conclusiones:

La Revolución Industrial supuso un gran avance en todos los campos. En cuanto al campo de la edificación y de la ingeniería, el desarrollo de la industria siderúrgica generó un cambio radical en la forma de construir.

Se ha visto que el hierro comenzó a usarse como material estructural, y permitió la construcción de nuevas tipologías de edificio, y grandes luces para los puentes. Hemos visto reflejada esta evolución en el desarrollo de las Exposiciones Universales, desde la primera de ellas, la Exposición Universal de Londres de 1851. Fue en esta exposición donde comenzó la competición por alcanzar las luces más grandes en los edificios y espacios expositivos.

Esta exposición se llevó a cabo en El Crystal Palace de Joseph Paxton, un pabellón de grandes dimensiones, pionero en el empleo de las estructuras metálicas prefabricadas en un edificio de tales magnitudes. A partir de este punto, se ensaya con las diferentes tipologías de estructuras metálicas que los arquitectos e ingenieros iban descubriendo. Desde los pórticos rígidos del Crystal Palace, y sus problemas de estabilidad horizontal y de dilatación térmica; comienza a utilizarse el arco biarticulado, un sistema ya ensayado en la ingeniería. Estos arcos tenían la novedad de albergar rótulas en sus apoyos, evitando así los momentos sobre los cimientos y reduciendo los esfuerzos internos derivados de los efectos térmicos.

Posteriormente, se desarrolla el arco triarticulado, el cual, además de tener rótulas en los apoyos, tenía una tercera rótula en la clave del arco. Este arco triarticulado es más flexible, ya que se adapta mejor a los movimientos producidos por el viento, la dilatación térmica o los asentamientos diferenciales. Esta evolución la hemos visto en los diferentes ejemplos en edificios como la Gran Sala de la Imperial Continental Gass Association en Berlín, o el Puente de María Pía sobre el río Duero.

La Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París de 1889 se convirtió en un hito de la arquitectura del siglo XIX por sus impactantes dimensiones.

En este trabajo se ha descrito con detalle la tipología estructural de hierro forjado utilizada, gracias a la cual, se alcanzaron los 110.60 metros de luz medidos a ejes de rótulas. Estas dimensiones no habían sido posibles en el campo de la edificación hasta ese momento, sin embargo, en el campo de la ingeniería llevaban varios años realizando puentes de luces similares.

También se ha visto que la ornamentación de este pabellón fue un aspecto muy aclamado por los arquitectos y críticos del siglo XX, la descarnada expresión de los pórticos de la nave central. Dejando desnudos los apoyos articulados, algo muy contrario a la estética de la época, permitía admirar la estructura en todo su esplendor.

En definitiva, hemos analizado y explicado, no solo el sistema estructural de la Galería de las Máquinas, sino todos los aspectos que la llevaron a ser considerada uno de los grandes hitos de la arquitectura del siglo XIX.

6. Bibliografía

- Araujo, R. (1995). Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo. *Tectónica*, 9, 4–17.
- Artequin. (2020). Planos Pabellón París – Artequin. Retrieved October 26, 2020, from <https://www.artequin.cl/visita/pabellon-paris/planos-pabellon-paris/>
- Atlas of Places, B. (2017). Galérie des Machines by Ferdinand Dutert. Retrieved October 26, 2020, from <https://www.atlasofplaces.com/architecture/galerie-des-machines/>
- Baez, L. (2017). Exposición universal de París 1889. Ciencia, historia y biografía de personajes. Retrieved September 29, 2020, from <https://mundosoxidados.wordpress.com/2017/08/14/exposicion-universal-de-paris-1889/>
- Barrault, A. (1856). La charpente en fer du Palais de l'Industrie. In *Nouvelles Annales de la Construction*.
- Barrault, A., & Bridel, G. (1857). *Le Palais de l'Industrie et ses annexes. Description raisonnée du système de construction*. París.
- Barvosa, J. (2018). Clásicos de Arquitectura: Pabellón París—Museo Artequín / Henri Picq | Plataforma Arquitectura. Retrieved October 26, 2020, from <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/895035/clasicos-de-arquitectura-pabellon-paris-museo-artequin-henri-picq>
- Belhoste, J.-F. (2008). *Les centraliens et la construction metallique de 1830 a 1914*.
- Benévolo, L. (1996). *Historia de la arquitectura moderna*. Madrid: Gustavo Gili.
- Biblioteca Nacional de Chile, M. C. (2018). Pabellón chileno en la Exposición Universal de París, 1889. Retrieved October 1, 2020, from <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-58752.html>
- BIE. (2020). 1889 Paris. Retrieved September 29, 2020, from <https://www.bie-paris.org/site/fr/1889-paris>
- Blanc, A., McEvoy, M., & Plank, R. (1993). *Architecture and construction in steel*.
- Britannica, E. de la E. (2020). Sir Joseph Paxton | British architect and botanist | Britannica. Retrieved September 28, 2020, from <https://www.britannica.com/biography/Joseph-Paxton>
- Chaves, J. (2004). Desarrollo tecnológico en la Primera Revolución Industrial. *Norba. Revista de Historia*, 17(17), 93–109.
- Chiesa, P., & Brodaric, A. (2020). Pabellón Argentino. El edificio que vino de París a la Plaza San Martín - LA NACION. Retrieved October 1, 2020, from <https://www.lanacion.com.ar/lifestyle/pabellon-argentino-el-edificio-vino-paris-plaza-nid2236338>
- Dickinson. (1852). *Dickinson's comprehensive pictures of the great exhibition of 1851*. Londres.
- DSIGNO. (2018). Exposiciones universales: inicios del mundo contemporáneo. Retrieved

October 27, 2020, from <https://www.dsigno.es/blog/disenio-de-interiores/exposiciones-universales-inicios-del-mundo-contemporaneo>

Dunlop, B., & Hector, D. (1999). *Architectures 3*. Londres.

Eiffel, G. (2015). *The Eiffel Tower* (Taschen, Ed.).

Eiffel, G., & Contamin, V. (1890). Discours prononcés par M.G. Eiffel et M.V. Contamin. In *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils*. París.

El obrero, B. (2017). El Crystal Palace (1851-1936). Retrieved September 29, 2020, from <https://elobrero.es/cultura/55665-el-crystal-palace-1851-1936.html>

Elías, M. (2016). Las Exposiciones Universales. Retrieved September 28, 2020, from <https://lamismahistoria.es/exposiciones-universales/>

Estévez Cimadevila, J., & López César, I. (2015). La Galería de las Máquinas de 1889. Reflexiones histórico-estructurales / The Palais des Machines of 1889. Historical-structural. *VLC Arquitectura*, 2(2), 1–30.

Fortier, B. (1989). *La metropole imaginaire, un atlas de Paris*. Brussels.

Gössel, P., & Leuthäuser, G. (2005). *Arquitectura del Siglo XX. 1*.

Hénard, E. (1888). Les travaux de l'Exposition. Le montage des grandes fermes du Palais des Machines. In *Le Genie Civil. Revue générale des Industries Françaises & Étrangères*.

Hénard, E. (1891). *Exposition Universelle de 1889: Le Palais des Machines, Notice sur l'edifice et sur la Marche des Travaux*. París.

Kemp, T. (1979). La revolución industrial en la Europa del siglo XIX. *Libros de Confrontación. Historia*, 2, 300.

Kind-Barkauskas, Polony, & Brandt. (2002). *Concrete construction manual*. Munich.

Landes, D. S. (1979). *Progreso tecnológico y revolución industrial* (Tecnos, Ed.). Madrid.

Linares de la Torre, O. (2018). Apuntes sobre el Palais des Machines de París de 1889: espacio, estructura y ornamento. *VLC Arquitectura. Research Journal*, 5(1), 33. <https://doi.org/10.4995/vlc.2018.7713>

López-César, I., & Estévez-Cimadevila, J. (2018). Las Exposiciones Universales. Cinco enfoques estructurales World Expos. Five structural approaches Autores. *Estoa N°13*, 7, 7–22. <https://doi.org/10.18537/est.v007.n013.a01>

López, C. I. (2017). *Exposiciones universales. Una historia de las estructuras*. (M. Berrio Prieto, Ed.). Barcelona: arquitect publications.

Loyer, F. (1983). *Le siècle de l'industrie 1789-1914*. París.

Martin, A., & Barthes, R. (1989). *La Tour Eiffel*. París.

McKean, J. (1994). *Crystal Palace*. Londres.

Monfort Lleonart, J. (2006). *Estructuras metálicas para edificación : adaptado al CTE*. Retrieved from <http://fama.us.es/record>

Nansouty, M. de. (1889). *Le Palais des Machines*.

- Otaegui, J. (2015). *El Pabellón Argentino de la Exposición Universal de París de 1889 en la medalla*. 28(721), 11516–11517.
- Patricia. (2007). Revolución Industrial: Industria del Hierro. Retrieved October 27, 2020, from <http://industrial-revol.blogspot.com/2007/12/industria-del-hierro.html>
- Peters, T. F. (1996). *Building the Nineteenth Century*. Londres.
- Plasencia, P. (2011). Puente de María Pía | Puentemania. Retrieved October 7, 2020, from <http://www.puentemania.com/533>
- Scarano, M. (2008). *Prensa y modernización: crónicas sobre las exposiciones de París (1889-1900) en La Nación de Buenos Aires*. 8.
- Société d'Exploitation de la Tour Eiffel, S. (2020). La Torre Eiffel: toda la información sobre el monumento. Retrieved September 29, 2020, from <https://www.tou Eiffel.paris/es/el-monumento>
- Stamper, J. W. (1889). *The Galerie des Machines of the 1889 Paris World's Fair*. <https://doi.org/10.2307/3105107>
- Vierendeel, A. (1902). *La Construction Architecturale en Fonte, Fer et Acier*. Brussels.
- Watson, W. (1892). *Paris Universal Exposition 1889. Civil engineering, public works and architecture*. Washington.

7. Índice de imágenes

Figura 1.01: Exposición Universal de Londres de 1851. 02: Exposición Universal de París de 1889.(Elías Viana, 2016)	6
Figura 2 .01: Galería de las Maquinas, durante la exposición. (Dunlop, Beth; Hector, Denis. 1889) 02: Primer corquis de Koechlin de La Torre de los Trescientos metros, comparado con otros monumentos (Fortier Ifa, 1887)	7
Figura 3: Mercado de Breslau, Plüdemann y Küster, 1908. (Kind-Barkaukas, 2002).....	8
Figura 4: Palacio del Centenario en Breslau, Max Berg, 1913. (Kind-Barkauskas, Polony, & Brandt, 2002)	9
Figura 5: Hangares de Orly, Eugène Freyssinet, 1923. (Kind-Barkauskas et al., 2002).....	9
Figura 6. 01: Máquina de vapor de James Watt. 02: Proceso de fabricación del hierro fundido. (“HISTORIA DE LA TECNOLOGÍA (Primera revolución industrial 1760 a 1860) – Título del sitio,” n.d.).....	11
Figura 7: Estructura de hierro de la cubierta abovedada del Teatro Francés de Victor Luis, 1786. (Blanc, McEvoy, & Plank, 1993).....	11
Figura 8: Puente sobre el río Severn. T.F. Pitchard, 1779. (Benévolo, 1996).....	12
Figura 9: Entramado de hierro de la Cúpula del Halle au Blé. Belanger y Brunet, 1811. (Vierendeel, 1902).....	12
Figura 10. 01: Galerie d’Orleans del Palais Royal. Percier y Fontaine. 1829. 02: Jardín des Plantes de París. Rouhault. 1833. (Loyer, 1983)	13
Figura 11: Joseph Paxton. (Britannica, 2020).....	14
Figura 12: Primeros bocetos de la sección y el alzado del Crystal Palace. (Dunlop & Hector, 1999)	15
Figura 13: Planta baja y planta superior del Crystal Palace. (Dunlop; Hector,1999).	15
Figura 14:El Crystal Palace en Hyde Park. Joseph Paxton. 1851. Ilustración de la época. (McKean, 1994)	16
Figura 15: Esquemas axonométricos de un módulo estructural. (Peters, 1996) (Araujo, 1995)	16
Figura 16:Ilustración del transepto y la bóveda de cañón del Crystal Palace. (Dickinson, 1852)	17
Figura 17. 01: Cartel del Exposición Universal de París de 1889. 02: Cartel conmemorando el centenario de la Revolución Francesa a de 1789. (“Las exposiciones universales arthistoria.com,” n.d.).....	19
Figura 18: Plano de la Exposición Universal de París de 1889.(Baez, 2017)	20
Figura 19: Ilustraciones del zoológico humano de la Exposición Universal de París de 1889.(Baez, 2017)	21
Figura 20: Alzado de la Torre de Trescientos metos de Gustave Eiffel.(Alacero, n.d.-a).....	21
Figura 21: Construcción de la Torre Eiffel. (Société d’Exploitation de la Tour Eiffel, 2020) 22	
Figura 22: Alzado de uno de los cuadriláteros triangulados que constituyen la unidad básica de la torre. (Eiffel, 1889)	23
Figura 23: Perspectiva seccionada de los trabajos de excavación, mediante el sistema Trigger, de la Torre de Trescientos metros. (Watson, 1892)	23
Figura 24: Cimentación de uno de los pilares en fábrica de piedra, con las esperas de los montantes y los muros de fábrica de conexión. (Martin & Barthes, 1989).....	24

Figura 25: Fotografía de uno de los restaurantes de la Torre de Trescientos metros en 1889. (Société d'Exploitation de la Tour Eiffel, 2020).....	25
Figura 26: Grabado de la apertura del Pabellón Argentino en Buenos Aires. (Chiesa & Brodaric, 2020).....	26
Figura 27: Construcción de la estructura del primer piso del Pabellón Argentino. (Chiesa & Brodaric, 2020).....	26
Figura 28: El Pabellón Argentino ubicado en la plaza San Martín. (Archivo General de la Nación, 1911)	27
Figura 29: Dibujo del Pabellón Chileno en la Exposición Universal de París de 1889. (Biblioteca Nacional de Chile, 2018)	28
Figura 30: Alzado Norte y sección del Pabellón París. (Artequin, n.d.).....	28
Figura 31:Fotografía del Pabellón Chileno en su ubicación actual. (Biblioteca Nacional de Chile, 2018)	29
Figura 32.01: Charles Louis Ferdinand Dutert, arquitecto de la Galería de las Máquinas. 02: Victor Contamin, ingeniero estructural de la Galería de las Máquinas. (Belhoste, 2008) (Nansouty, 1889).....	30
Figura 33: Ubicación de la Galería de las Máquinas en el conjunto expositivo de la Exposición Universal de París de 1889.(Linares de la Torre, 2018)	31
Figura 34: Vista frontal del conjunto expositivo desde la Torre Eiffel. Al fondo la Galería de las Máquinas cerrando el conjunto.(Linares de la Torre, 2018)	32
Figura 35: Puente sobre el río Severn. T.F. Pitchard, finalizado en 1779.(Alacero, n.d.-b) ..	32
Figura 36: Sección transversal de la Estación St. Pancras en Londres. William H. Barlow. 1868. (Picon, 1997)	33
Figura 37: Puente María Pía sobre el río Duero en Oporto, diseñado por Gustave Eiffel en 1875. (Plasencia, 2011)	34
Figura 38: Construcción de la Gran Sala de la Imperial Continental Gass Association en Berlín. Johann Wilhelm Schwedler. 1863. (Gössel & Leuthäuser, 2005).....	34
Figura 39: Despiece de la estructura de la Gran Sala de la Imperial Continental Gass Association en Berlín. (Schwedler, 1863).....	35
Figura 40: Estructura de la Estación del Este en Berlín. J. W. Schwedler. 1866. (Vierendeel, 1902)	36
Figura 41: Planta y sección del pabellón de la Galería de las Máquinas de 1889.(Linares de la Torre, 2018)	37
Figura 42: Comparación de la superficie entre el pabellón de la Galería de las Máquinas y las manzanas del ensanche de Barcelona de Cerdà.(Linares de la Torre, 2018)	38
Figura 43: Comparación de la altura en sección entre la Galería de las Máquinas y el Pantheon de Roma de 128, y la Catedral de Amiens de 1220.(Linares de la Torre, 2018)...	38
Figura 44: Nave central de la Galería de las Máquinas antes de montar la exposición. (Dunlop & Hector, 1999)	39
Figura 45: Nave central de la Galería de las Máquinas con la exposición ya montada. (Dunlop & Hector, 1999)	40
Figura 46: Planta general de la Galería de las Máquinas acotando sus medidas principales. (Hénard, 1891)	41
Figura 47: Perspectiva seccionada y acotada de la Galería de las Máquinas de 1889. (Vierendeel, 1902).....	42
Figura 48.01: Detalle de las rótulas de arranque de los arcos triarticulados de la nave principal. 02: Detalle de la rótula de la clave de los arcos triarticulados de la nave principal. (Hénard, 1888)	43

Figura 49: Despiece estructural de la nave central de la Galería de las Máquinas, con los cuatro niveles estructurales: arcos triarticulados, vigas de celosía de canto variable, vigas de sección H y barras de carpintería de cubierta. (Vierendeel, 1902).....	44
Figura 50: Nave lateral de la Galería de las Máquinas. (Dunlop, B. Héctor, D. 1889)	45
Figura 51: Detalle de la articulación de los apoyos de los arcos triarticulados de la nave principal.(Hénard, 1888)	45
Figura 52: Proceso de construcción de los arcos triarticulados de la nave principal de la Galería de las Máquinas	47
Figura 53:Planta de cimentación de la Galería de las Máquinas indicando los puntos de cimentación de los arcos triarticulados. La zona rayada corresponde a los doce puntos de cimentación de los arcos principales con cimentación por pilotaje. (Watson, 1892)	48
Figura 54: Hinca de pilotes de madera mediante martillo de vapor. (Hénard, 1891)	48
Figura 55: Sección del encuentro entre el arco de la nave principal, la nave lateral y la cimentación profunda.(Hénard, 1888)	49
Figura 56: Alzados de la nave lateral vista desde la nave principal donde se observan los arcos y las vigas de celosía del piso de las naves laterales, unidos rígidamente a los arcos triarticulados principales estabilizando la estructura principal en la dirección longitudinal. (Watson, 1892).....	51
Figura 57: Detalle del apoyo de los arcos, donde se aprecia la materialidad, y el roblonado. (Linares de la Torre, 2018)	52
Figura 58: Comparativa de la estructura con los apoyos vistos y con los apoyos ornamentados y escondidos tras unas peanas.(Estévez Cimadevila & López César, 2015) .	54
Figura 59 .01: Fachada y acceso principal por la Avenida de la Bourdonnais notablemente ornamentada. 02: Fachada y acceso trasero por la Avenida de Suffren. (Dunlop & Hector, 1999)	55
Figura 60: Manufactures and Liberal Arts Building, Exposición Universal de Chicago de 1893. (López, 2017).....	56
Figura 61.01: Reading Station en Philadelphia en 1893. 02: Broad Street Station en Philadelphia en 1894.(López, 2017)	57