

La Galería de las Máquinas de 1889. Reflexiones histórico-estructurales

The Palais des Machines of 1889. Historical-structural reflections

Javier Estévez Cimadevila^a, Isaac López César^b

Universidade da Coruña. ^ajavier@udc.es, ^bisaac.lopez@udc.es



Received 2015.02.27
Accepted 2015.09.13

Resumen: La Galería de las Máquinas de 1889 se encuentra presente en la mayoría de manuales de la historia de la arquitectura. Sin embargo, existen aspectos de este edificio que merecen una mayor profundización. Otros han sido objeto de incorrecciones en publicaciones actuales y contemporáneas al edificio. El presente artículo aborda cuál es el lugar que ocupa el edificio dentro del desarrollo histórico de la tipología estructural de arco metálico, cuáles han sido sus antecedentes y cuál ha sido la influencia que ha tenido en edificaciones posteriores resueltas con la misma tipología estructural. Por otra parte, los materiales utilizados en la construcción de su estructura, las razones de su utilización, así como la luz exacta que alcanzó han sido objeto de contradicciones. El artículo determina inequívocamente estos aspectos.

Palabras clave: Galería de las Máquinas, Dutert, Contamin, Exposición Universal, estructura.

Abstract: *The Galerie des Machines of 1889 is present in most books on the history of architecture. There are, however, certain aspects of this building that merit a more in-depth study. Other elements have been incorrectly described in current and contemporary publications about the building. The aim of this article is to examine the place this building occupies in the historical development of metal arch structures, its precedents and the influence it has exerted on later buildings of a similar structure. On the other hand, there have also been contradictions concerning the materials used in the erection of the structure and the reasons behind using them, as well as the exact span achieved. This article will unequivocally resolve these issues.*

Keywords: *Galerie des Machines, Dutert, Contamin, Universal Exposition, structure.*



INTRODUCCIÓN

La primera Exposición Universal, celebrada en Londres en 1851, con la construcción del magnífico Crystal Palace causó un impacto sin precedentes, inaugurando una escalada competitiva en la que en cada exposición se pretendía superar los logros arquitectónicos conseguidos en la anterior. Dichos logros van de la mano del nuevo material estructural surgido de la Revolución Industrial, el hierro industrializado, y se encaminan a la consecución de espacios diáfanos en un incremento continuo de las luces alcanzadas. Es por ello que una buena parte de la historia de la arquitectura del hierro se puede identificar con la historia de las Exposiciones Universales del s. XIX.

La Exposición Universal de 1889 celebrada en París constituirá, en cuanto a desarrollo estructural, la más importante manifestación del s. XIX, marcando la culminación de la arquitectura del hierro. Este será el remate en Europa de un conjunto de Exposiciones directamente ligadas al desarrollo tecnológico de las estructuras metálicas. Habrá que esperar a la segunda mitad del s. XX, concretamente a la Exposición Universal de 1958 celebrada en Bruselas, para volver a presenciar una nueva serie de Exposiciones Universales que alcancen un nivel tecnológico desde el punto de vista estructural similar a estas.

Para la Exposición de 1889 se construyeron en el Campo de Marte dos edificios que se convirtieron en símbolo inequívoco del triunfo de la industrialización: el *Palais des Machines* o Galería de las Máquinas y la Torre proyectada por Gustave Eiffel (Figura 1).

La Galería de las Máquinas fue realizada por el arquitecto Ferdinand Dutert y el ingeniero Víctor Contamin (Figura 2). Contaba con una nave central

INTRODUCTION

The first Universal Exposition, held in London in 1851, caused an unprecedented impact with the erection of the magnificent Crystal Palace, thus marking the beginning of a race in which each exposition tried to outdo the architectural achievements of the previous event. These achievements were closely linked to a new structural material that emerged from the Industrial Revolution, industrialised iron, and were paving the way for diaphanous spaces by progressively increasing spans. This is the reason why a considerable part of the history of iron architecture can be identified with the history of the Universal Expositions in the 19th century.

In terms of structural development, the Universal Exposition of 1889 held in Paris would be the most important manifestation of iron architecture, its zenith. It would mark the end of a series of Expositions in Europe directly linked to the technological development of metallic structures. Not until the second half of the 20th century, specifically in the Universal Expositions of 1958 held in Brussels, would the world once again witness a new series of Universal Expositions of the same technological calibre, from a structural perspective, as these earlier ones.

For the 1889 Exposition, the Champ de Mars was the site used for two constructions which became unequivocal symbols of the triumph of industrialisation: the Palais des Machines or Galerie des Machines and the tower designed by Gustave Eiffel (Figure 1).

The Galerie des Machines was carried out by the architect Ferdinand Dutert and the engineer Victor Contamin (Figure 2). It was made up of a central



Figura 1. Galería de las Máquinas. Exposición Universal de París 1889

Figure 1. Galerie des Machines. *Universal Exposition of Paris 1889.*

cubierta mediante arcos triarticulados de hierro de 110,60 metros de luz medidos a ejes de rótulas de arranques. Constituyó, en su época, el edificio de mayor luz del mundo y uno de los hitos del desarrollo de la tecnología de las estructuras metálicas.

nave covered by three-hinged iron arches with a span of 110.6 metres measured at the axis of the hinged joints at the base of the arch. At that time, it was the building with the largest span in the world, and a milestone in the technological development of metallic structures.

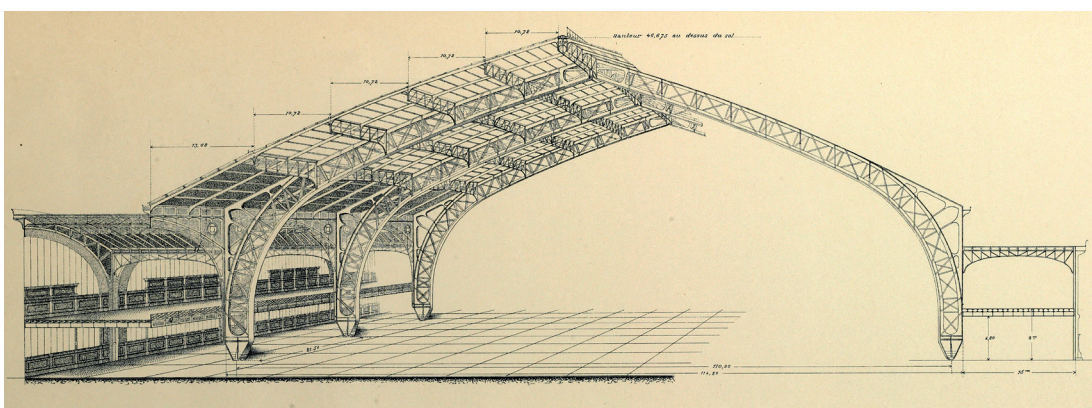


Figura 2. Galería de las Máquinas. Exposición Universal de París 1889. Sección transversal axonométrica.

Figure 2. Galerie des Machines. Universal Exposition in Paris 1889. Axonometric cross-section.

ANTECEDENTES DE LA TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL DE ARCO METÁLICO

Con el desarrollo de la industria siderúrgica en Inglaterra, debido en gran medida a la sustitución del carbón vegetal por el coque, de mayor poder calorífico, la disponibilidad de hierro forjado y de fundición aumenta exponencialmente y, con ello, su utilización como material estructural. El hierro supera su utilización como material de construcción que atendía a funciones secundarias para convertirse en verdadero protagonista estructural. Observamos que son tres sus campos de aplicación fundamentales: los puentes, las grandes cubiertas de hierro y vidrio y los edificios de pisos con estructura metálica.

Precisamente, localizamos en la construcción de puentes las primeras aplicaciones del arco metálico. Así, en 1777 comienza la construcción del primer puente de hierro, cerca de Coalbrookdale, sobre el río Severn. El arquitecto fue T.F. Pritchard. Rematado en 1779 estaba formado por arcos de medio punto de fundición, alcanzando los

PRECEDENTS OF THE METALLIC ARCH STRUCTURE

With the advances in the iron and steelworks industry in England, to a large extent due to the replacement of coal by coke (with a higher calorific value), the availability of wrought iron and smelting increased exponentially, and consequently so did its use as a structural material. Iron went from being a construction material of secondary uses to the actual protagonist of the structure. It had three main fields of application: bridges, large iron and glass decks and multi-storey buildings with metallic structures.

We can pinpoint the first applications of the metallic arch in bridge building. It was in 1777 when erection of the first iron bridge began, near Coalbrookdale over the river Severn. The architect was T.F. Pritchard. Completed in 1779, it was comprised of semicircular cast iron arches reaching a span of 30.5 metres.¹ In 1796 Tom Paine built a



Figura 3. *Palais de l'Industrie*. Exposición Universal de París 1855. M.M. Barrault y G. Bridel.

Figure 3. *Palais de l'Industrie*. *Universal Exposition of Paris 1855*. M.M. Barrault and G. Bridel.

30,5 metros de luz.¹ En 1796 Tom Paine construye un puente de fundición sobre el río Wear en Sunderland, compuesto por un arco rebajado con la considerable luz de 71,9 metros.²

*cast iron bridge over the river Wear in Sunderland, made up of a diminished arch with the considerable span of 71.9 metres.*²

Los logros estructurales alcanzados en la construcción de puentes influirán notablemente en la edificación. Así, para la Exposición Universal de 1855 celebrada en París se construye el *Palais de l'Industrie* de M.M. Barrault y Bridel, con una bóveda central de 48 metros de luz y dos laterales de 24, todas resueltas con arcos en celosía de hierro forjado (Figura 3).³ A este edificio, autores como

*The structural accomplishments gained in bridge building would have a considerable effect on building. Subsequently, the Palais de l'Industrie was built by M.M. Barrault and Bridel for the Universal Exposition of 1855 held in Paris (Figure 3). It had a central vault with a 48-metre span and two side vaults with 24-metre spans, made with cast iron lattice arches.*³ Authors such as Giedion

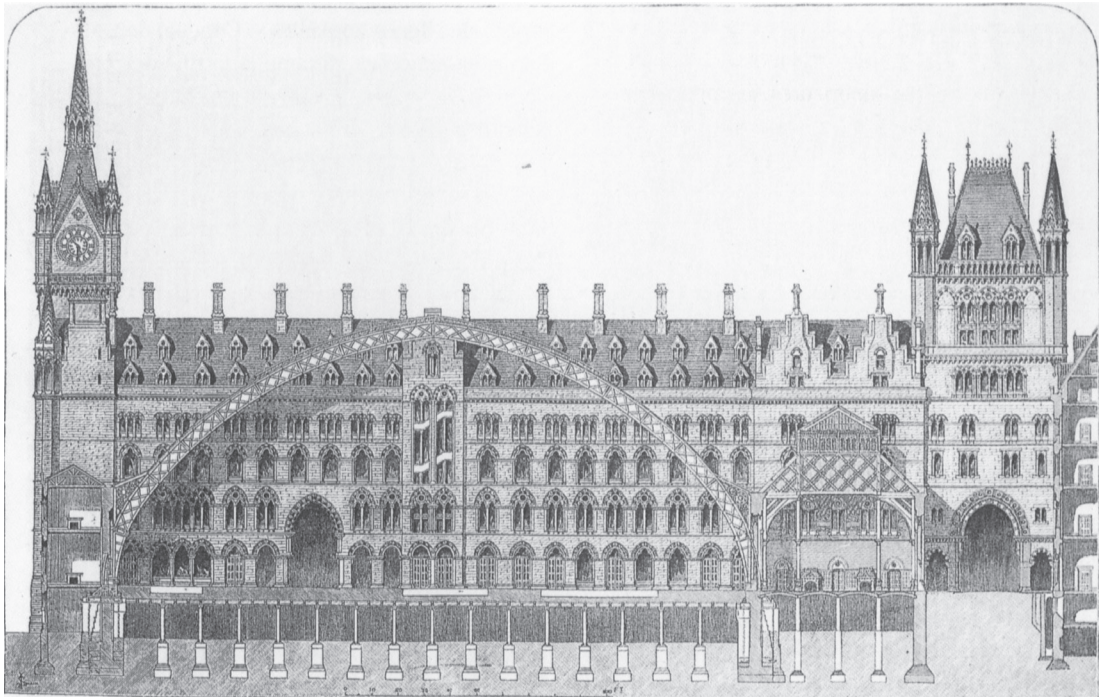


Figura 4. St. Pancras Station. Londres. William H. Barlow. 1868. Sección transversal.

Figure 4. St. Pancras Station. London. William H. Barlow. 1868. Cross-section.

Giedion le atribuyen el mérito de haber sido "la cubierta más amplia intentada en aquella época".⁴ Sin embargo, según los documentos consultados, el 30 de Enero de 1855 la New Street Station de Birmingham con 64,62 metros de luz ya estaba construida,⁵ mientras que la construcción del *Palais de l'Industrie* remató en Mayo de 1855.⁶

Pero, sin duda, la gran estructura de edificación resuelta mediante arcos metálicos antecedente de la Galería de las Máquinas de 1889 sería la Estación de St. Pancras en Londres que, con modificaciones, todavía sigue en uso (Figura 4). Realizada por William H. Barlow en 1868 alcanzaba una luz de

attributed this building with having been "the widest deck attempted at that time".⁴ However, according to the documents consulted, on 30th January 1855 the New Street Station in Birmingham, with a span of 64.62 metres, had already been erected,⁵ while construction of the Palais de l'Industrie did not finish until May 1855.⁶

However, the great building structure to use metallic arches that preceded the Galerie des Machines in 1889 was St. Pancras station in London which is still in use, although it has undergone modifications (Figure 4). Designed by William H. Barlow in 1868, it had a span of 73 metres, making it the building with

73 metros, lo que constituyó el edificio con mayor luz del mundo. Se trata, por tanto, del record de luz anterior a la Galería de las Máquinas de 1889. La estructura de St. Pancras estaba constituida por arcos de hierro en celosía de Cruz de San Andrés con una geometría ligeramente apuntada de inspiración gótica. Los arcos, dispuestos con un intereje de 9 metros, arrancaban sobre pilastras de fábrica. Los empujes horizontales eran absorbidos por barras de hierro de 75 mm de diámetro que vinculaban los arranques de los arcos por debajo de los andenes de la estación.⁷

En todos los casos expuestos anteriormente los arcos se materializan sin articulaciones. Sin embargo, el interés por evitar la transmisión de momentos a los arranques de fábrica, tanto muros como macizos de cimentación, favorece la proliferación del arco biarticulado. En este sentido, sin duda, el primer gran hito lo constituye el Puente de María Pía sobre el Duero en Oporto, construido en 1875 por Gustave Eiffel. Alcanzaba los 160 metros de luz entre rótulas.⁸

El interés por facilitar el montaje de estructuras de luces medias así como otros aspectos derivados del isostatismo tales como la facilidad de cálculo o la reducción de las tensiones derivadas de movimientos térmicos o de asentamientos diferenciales estimulan a algunos ingenieros a experimentar con el arco triarticulado. El propio isostatismo del sistema provoca la imprescindible necesidad de disponer sistemas efectivos de contención de los empujes horizontales en los arranques. En lo que respecta al montaje, el arco triarticulado presentó ciertas ventajas en luces pequeñas o medias, por cuanto permitía su montaje a partir de dos semiarcos prefabricados. En las grandes luces, observamos que, debido fundamentalmente al gran peso de cada semiarco, el montaje se realizaba mediante roblonado en altura de un mayor número de porciones de arco.

the largest span in the world. It therefore held the record for span before the Galerie des Machines in 1889. The structure of St. Pancras was formed by iron arches and a slightly pointed design of Gothic inspiration. Spaced at 9 metres, the arches sprung from masonry pilasters. The horizontal thrusts were absorbed by iron bars with a diameter of 75mm, which linked the arch springers underneath the station platforms.⁷

The arches in all the examples mentioned above were hingeless. However, the aim to avoid transmission of moments to the masonry springers in both the walls and foundations enabled the proliferation of the arch with two hinges. In this way, the first milestone would undoubtedly be the María Pía Bridge over the Duero in Oporto, built by Gustave Eiffel in 1875. It had a span of 160 metres between hinges.⁸

Due to the interest in facilitating the construction of structures of medium-sized spans, as well as other aspects derived from isostatism such as easy calculation or the reduction of strain derived from thermal movements or differential settlement, some engineers were motivated to experiment with the three-hinged arch. The system's own isostatism demands the needs for effective systems to contain the horizontal thrusts in the bases. Regarding construction, the three-hinged arch had certain advantages in short or medium spans, inasmuch as it could be assembled from two prefabricated semi-arches. In large spans we can see that construction was carried out via riveting a greater number of arch portions onsite, basically due to the large weight of each semi-arch.

Tal es el caso de la Galería de las Máquinas de 1889 para la que se utilizaron dos sistemas de montaje, basados ambos en el roblonado en altura de porciones premontadas de arco. Un sistema usaba porciones grandes y otro pequeñas.⁹ En este sentido no existió, en lo primordial, mayor diferencia en el montaje con respecto a edificios soportados por arcos sin articulaciones. Sirva como ejemplo el ya mencionado *Palais de l'Industrie* de la Exposición de París 1855 cuyo arco central de 48 metros de luz sin articulaciones se roblonó en altura a partir de tres porciones (Figura 3).¹⁰

En el campo de la edificación, la primera estructura que hemos registrado resuelta con esta tipología es la *Retortenhause* o Gran Sala de la Imperial Continental Gas Association en Berlín, realizada en 1863 por el ingeniero alemán Johann Wilhelm Schwedler (Figura 5). Se trata de una estructura compuesta por doce arcos apuntados triarticulados en celosía de Cruz de San Andrés que salvan una luz de 32,95 metros. En este caso los empujes de los arcos son absorbidos por contrafuertes de fábrica.¹¹

La Estación del Este de Berlín. Construida por Johann Wilhelm Schwedler en 1866, cuenta con una luz de 36,25 metros (Figura 6). También en este caso se disponen contrafuertes de fábrica para la neutralización de los empujes del arco.¹² El trazado del arco de la Galería de las Máquinas de 1889 tendría una especial similitud con éste. La Estación Alexanderplatz en Berlín, también contaba con un arco triarticulado de 37,10 metros de luz. Fue construida en 1880 por Johann Eduard Jacobsthal.¹³ De J.W. Schwedler es también la Estación de Frankfurt am Main de 1887, con cinco arcos triarticulados; los tres centrales con luces de 55,75 metros cada uno.¹⁴

This is also the case with the Galerie des Machines in 1889 for which two assembly systems were employed, both based on the riveting of pre-assembled arch portions onsite. One system used large portions and the other small ones.⁹ In this sense there were no basic differences with the assembly of buildings supported by unhinged arches. We can take the aforementioned Palais de l'Industrie of the 1855 Exposition in Paris as an example, in which the central unhinged arch with a span of 48 metres was riveted onsite using three portions (Figure 3).¹⁰

In the field of building, the first recorded structure of this type is the Retortenhause or the Great Hall of the Imperial Continental Gas Association in Berlin, carried out in 1863 by the German engineer Johann Wilhelm Schwedler (Figure 5). It is a structure made up of twelve pointed three-hinged arches and has a span of 32.95 metres. In this case, the arch thrusts are absorbed by masonry buttresses.¹¹

The Berlin East railway Station, built by Johann Wilhelm Schwedler in 1866, has a span of 36.25 metres (Figure 6). In this case it also has masonry buttresses to neutralise the arch thrusts.¹² The arch line in the 1889 Galerie des Machines would bear a special resemblance to this. The Alexanderplatz Station in Berlin, built by Johann Eduard Jacobsthal, also had a three-hinged arch with a 37.1 metre span.¹³ The 1887 Frankfurt am Main Station, with five three-hinged arches, is also by J.W. Schwedler; the three central arches have a span of 55.75 metres each.¹⁴

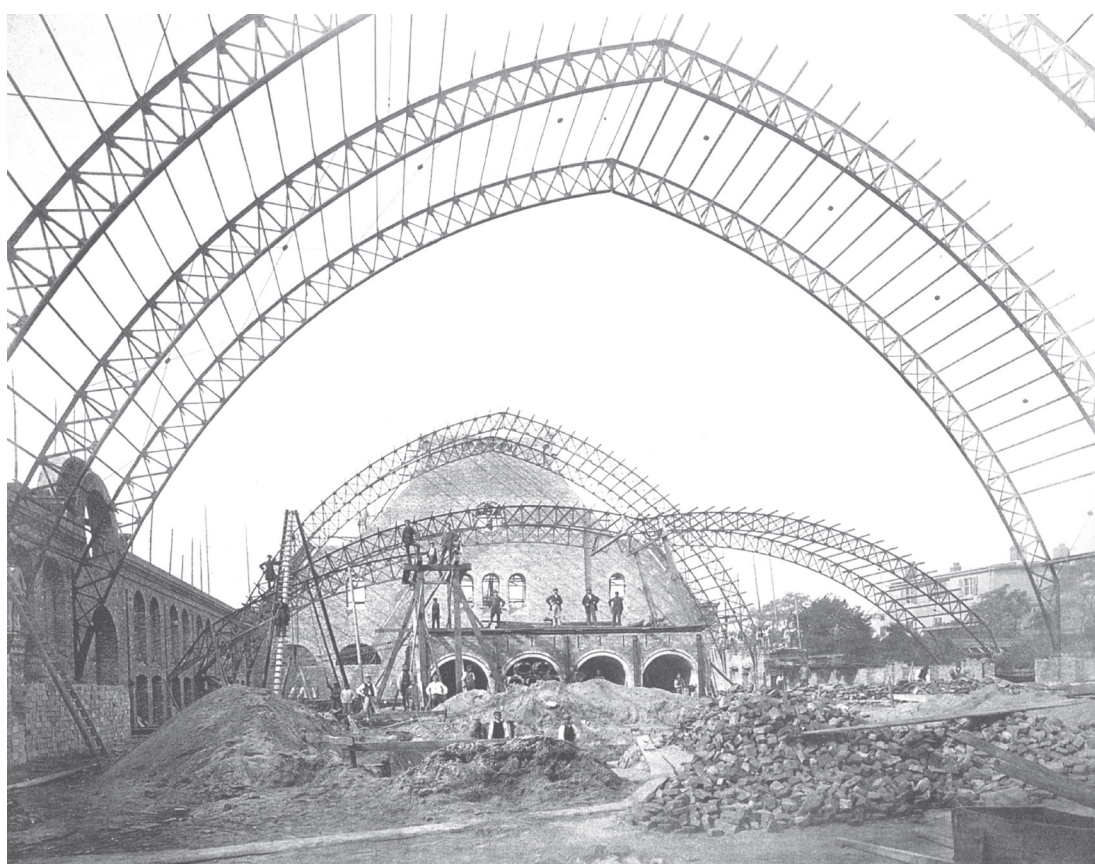


Figura 5. Sala de la Imperial Continental Gas Association. Berlín. Johann Wilhelm Schwedler. 1863.

Figure 5. Hall of the Imperial Continental Gas Association. Berlin. Johann Wilhelm Schwedler. 1863.

Hemos de referirnos al Palmenhause der Flora de Charlottenburg en Berlín (Figura 7). Era un jardín de invierno resuelto mediante arcos triarticulados de 23,75 metros de luz medidos a ejes de rótulas. Se trata de una estructura muy poco difundida. Fue publicada en 1873 en la revista *Deutsche Bauzeitung*.¹⁵ A pesar de que su luz no resulta relevante, la similitud con la Galería de las Máquinas de 1889 resulta llamativa, tanto en el trazado del arco triarticulado, como en el uso de un arco de

We should also refer to the Charlottenburg Palmenhause der Flora in Berlin (Figure 7). It was a winter garden designed with three-hinged arches with a span of 23.75 metres measured at the hinge axis. This is hardly a widespread structure. It was published in 1873 in the journal Deutsche Bauzeitung.¹⁵ In spite of the lack of relevance of its span, its similarity with the 1889 Galerie des Machines is striking, both in terms of the line of the three-hinged arch and the use of an arch of variable

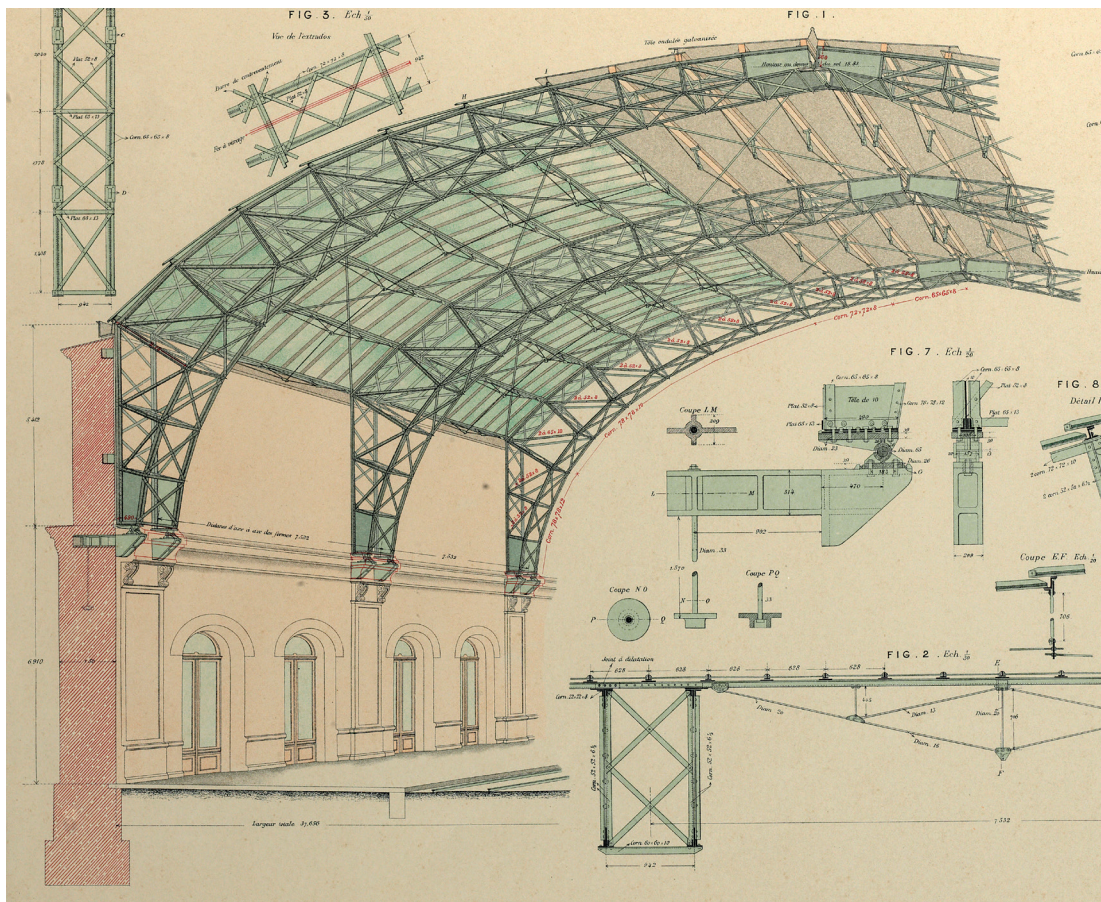


Figura 6. Estación del Este. Berlín. Johann Wilhelm Schwedler. 1866.

Figure 6. East Berlin railway Station. Berlin. Johann Wilhelm Schwedler. 1866.

canto variable. No obstante, el conocimiento de esta obra por parte de los autores de la Galería de las Máquinas de 1889 resulta de difícil determinación.

edge. Nevertheless, it is difficult to ascertain whether or not the creators of the Galerie des Machines were aware of this work.

En todo caso, en lo anteriormente expuesto podemos observar que en 1889 el uso del arco triarticulado para la resolución de cubiertas de grandes luces estaba plenamente extendido.

In any case, we can gather from the cases above that by 1889, the use of the three-hinged arch for building large span decks was ubiquitous.

DEUTSCHE BAUZEITUNG.

EISERNES DACH ÜBER DEM PALMENHAUSE DER FLORA ZU CHARLOTTENBURG.

JAHRGANG VII.

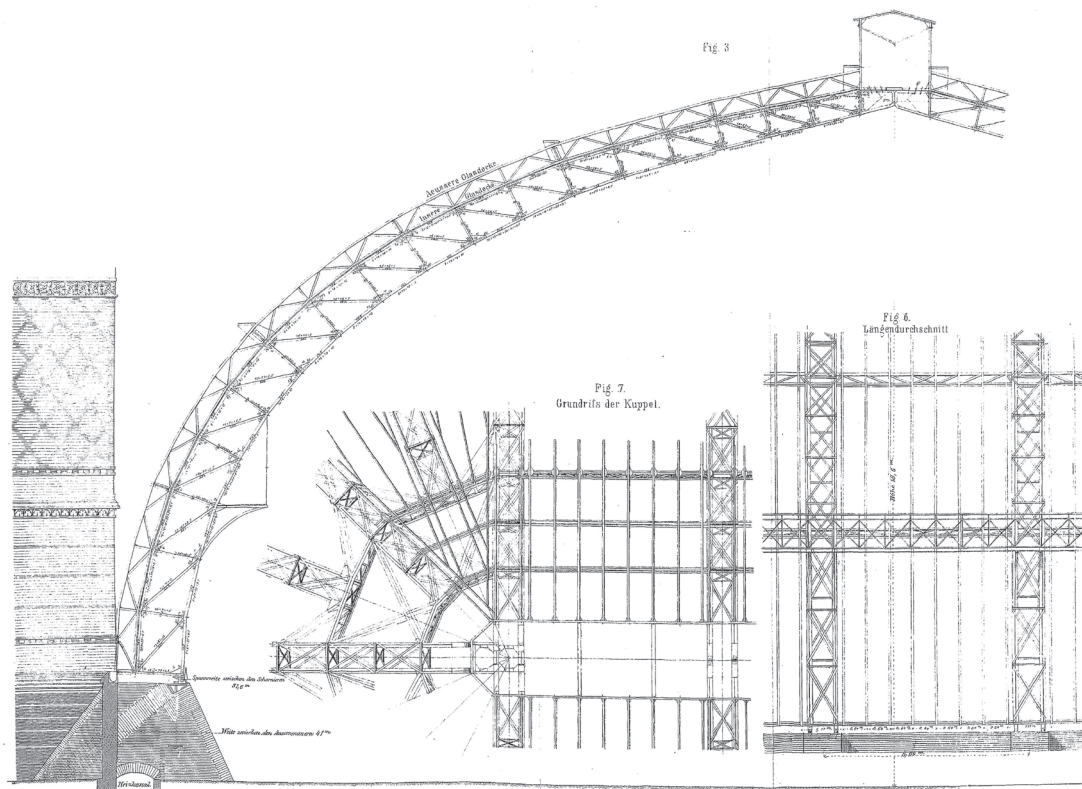


Figura 7. Palmenhause der Flora zu Charlottenburg. Berlín. Publicado en Agosto de 1873.

Figure 7. Palmenhause der Flora zu Charlottenburg. Berlin. Published in August 1873.

ESTRUCTURA DE LA GALERÍA DE LAS MÁQUINAS

CONFIGURACIÓN Y DIMENSIONES

El *Palais des Machines* o Galería de las Máquinas de 1889 se componía de una nave central de 110,60 metros de luz, medida de eje a eje de rótulas, flanqueada por dos naves laterales. La nave central se resolvía mediante veinte arcos de

THE STRUCTURE OF THE GALERIE DES MACHINES

SHAPE AND SIZE

The *Palais des Machines* or *Galerie des Machines* of 1889 was made up of a central vault with a span of 110.6 metres, measured from one hinge axis to another and flanked by two lateral vaults. The central vault was configured by twenty three-hinged

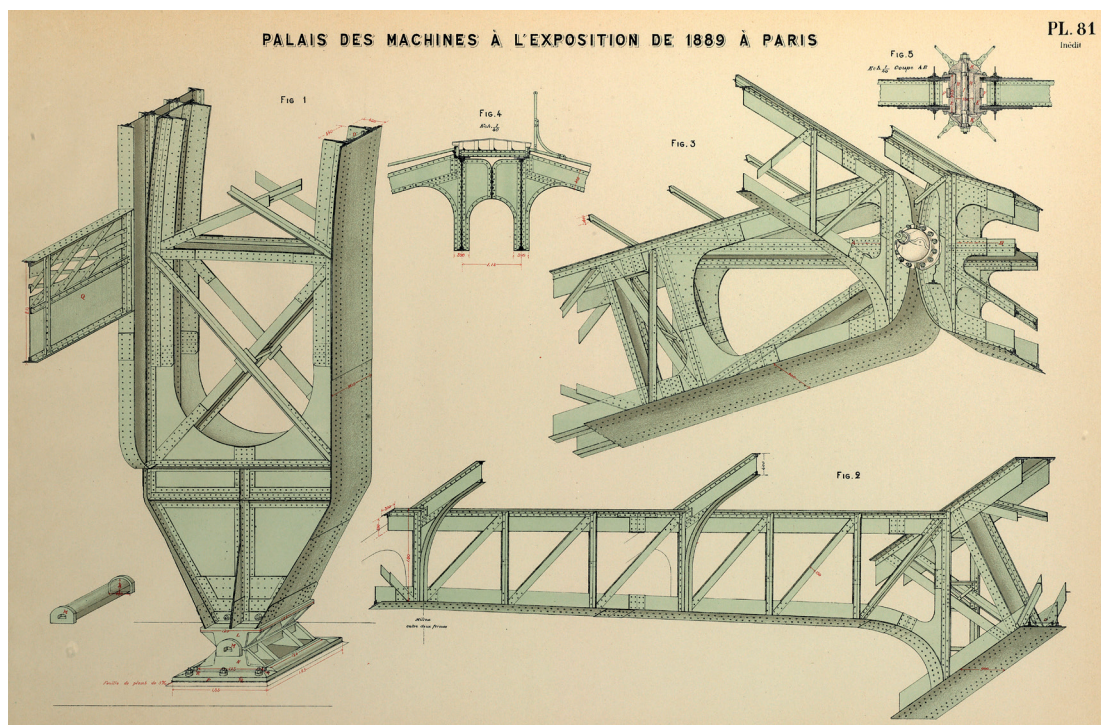


Figura 8. Galería de las Máquinas de 1889. Detalles de estructura.

Figure 8. Galerie des Machines of 1889. Details of the structure.

hierro triarticulados, con sendas articulaciones en los arranques y una tercera en la clave. Dichos arcos se disponían con un intereje general de 21,50 metros. La longitud total del edificio era de 421 metros. La altura del extradós del arco era de 46,67 metros. La estructura se completaba con tres niveles estructurales más: vigas de celosía con intereje de 10,72 metros; vigas de sección en H con intereje de 5,37 metros y las barras de hierro de la carpintería de cubierta, con intereje de 1,78 metros (Figura 8).¹⁶ El conjunto se completaba con dos naves laterales, formadas por piso intermedio y cubiertas con bóvedas metálicas perpendiculares a la nave central (Figura 2).

iron arches, with two hinges in the springers and a third in the apex. The distances between the axes of these arches were generally 21.5 metres. The total length of the building was 421 metres. The height of the arch extrados was 46.67 metres. The structure had three more structural levels: lattice joists with a distance between axes of 10.72 metres; H joists with a distance between axes of 5.37 metres and the iron bars that supported the deck glass panes, with a distance between axes of 1.78 metres (Figure 8).¹⁶ The ensemble was completed by two side aisles made up of an intermediate floor and covered with metallic vaults perpendicular to the central vault (Figure 2).

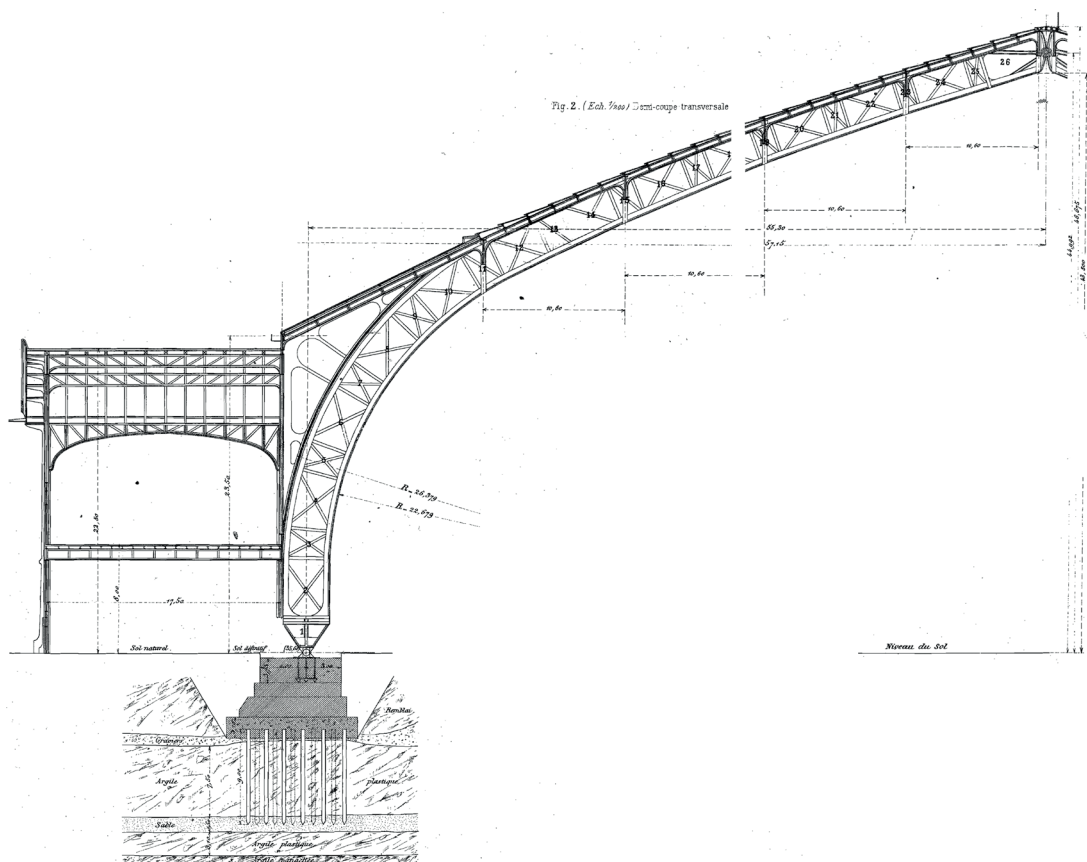


Figura 9. Galería de las Máquinas. Exposición Universal de París 1889. Sección transversal con detalle de pilotaje de madera, encepado y estratificación del terreno.

Figure 9. Galerie des Machines. Universal Exposition of Paris 1889. Cross-section with details of the wooden piling, pile caps and soil stratification.

SOBRE LA GEOMETRÍA DE LOS ARCOS

Paradójicamente, a pesar de constituir un enorme logro tecnológico, la geometría de los arcos no es la más eficiente desde el punto de vista estructural. El trazado de los arcos no sigue la línea antifunicular correspondiente a una carga distribuida, que sería la parábola, lo que garantizaría el trabajo fundamentalmente a compresión (Figura 9). El hierro,

ON THE GEOMETRY OF THE ARCHES

Paradoxically, in spite of constituting an enormous technological achievement, the geometry of the arches is not the most efficient from a structural perspective. The line of the arches does not follow the anti-funicular line corresponding to a distributed load, which would be a parabola; this in turn would guarantee the work that is fundamentally compression (Figure 9). As a

nuevo material que permite soportar flexiones, es explotado al máximo. Por ello, cada uno de los dos miembros que forman el arco se traza prácticamente recto en su mitad superior, reduciendo la desmesurada altura que provocaría el arco parabólico y apuntándose ligeramente en una reminiscencia gótica. Podemos observar que la desviación de la geometría óptima del arco origina ajustes en el diseño estructural. Dicha desviación provoca flexiones en el arco, siendo éstas mayores en los riñones, en la zona en la que la curvatura es mayor. De este hecho deriva el canto variable del mismo, así como un mayor espesor de los cordones superior e inferior en esta zona, obtenido por superposición y roblonado de un mayor número de platabandas. Conviene manifestar que en la época, el espesor de las platabandas de hierro forjado estaba limitado, por fabricación, a un máximo de 10 mm y cuando se necesitaban mayores espesores, éstos se obtenían mediante superposición de las mismas.

Las cruces de San Andrés de los arcos siguen un patrón de separaciones grandes y pequeñas, aumentando la dimensión de las pequeñas desde la clave hasta el arranque del arco, con la finalidad de que siempre existan montantes verticales en los que ensamblar las celosías transversales.

SOBRE LOS EMPUJES

En lo que respecta a la absorción de los empujes generados por los arcos, podemos observar en los ejemplos expuestos anteriormente, que dicha absorción solía realizarse mediante tirantes subterráneos (Estación de St. Pancras); mediante contrafuertes de fábrica (Estación del Este de Berlín) o por contrarresto, mediante la disposición de naves laterales con suficiente rigidez horizontal (*Palais de l'Industrie* de París 1855). En la Galería de las Máquinas no se usó ninguno de estos métodos. La cimentación se dimensionó para resistir la totalidad

new material that can support flexure, iron is used to its full potential. To do this, each of the two pieces that make up the arch are practically straight in their top half, thus reducing the disproportionate height that a parabolic arch would cause, and in addition are slightly pointed in a nod to the Gothic style. We can see that the deviation from the optimal geometry of the arch led to adjustments in the structural design. This deviation caused flexures in the arch, most prominent in the haunches, the area in which the curvature is greatest. This is the root of the variable edge of the arch, as well as the greater thickness of the upper and bottom chords in this area, a result of the overlapping and riveting of a larger number of plates. It is worth noting that during this period, the plate thickness of wrought iron was limited by the manufacturing process to a maximum of 10mm; when greater thicknesses were required, these were achieved by overlapping the plates.

The saltire crosses in the arches followed a pattern of large and small separations, with the smaller ones increasing in size from the apex to the arch springer, with the aim of ensuring the existence of vertical bars to which the transversal lattice joists could be attached.

ON THE THRUSTS

In relation to the absorption of the thrust generated by the arches, based on the examples mentioned previously, we note that said absorption was carried out through underground bars linking the arch springers (St. Pancras Station); masonry buttresses (Berlin East railway Station) or by counteraction, through the arrangement of lateral vaults with sufficient horizontal rigidity (Palais de l'Industrie, Paris 1855). None of these methods was used in the Galerie des Machines. The foundation was designed to withstand the full thrust of the arches.¹⁷

del empuje de los arcos.¹⁷ El empuje, por tanto, se equilibra por rozamiento del macizo de cimentación. No obstante, contaría con la colaboración adicional de las dos galerías laterales. De esta manera, afirma Henard, arquitecto encargado de los trabajos de ejecución:

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.¹⁸

Añadir que las galerías laterales forman una serie de contrafuertes naturales que contribuyen de una manera más eficaz a la estabilidad lateral del edificio.¹⁹

En este sentido, resulta significativo que, tanto en los planos originales de montaje del edificio como en los dibujos y fotografías del montaje de la época podemos observar los arcos junto con celosías y vigas montados, sin las naves laterales, siendo precisamente el peso propio de todo este entramado de cubierta la carga fundamental de la estructura (Figuras 11 y 10).

Con respecto a la cimentación de los arcos, en la mayoría de los casos se dispuso una cimentación superficial pero en doce puntos de cimentación de los arcos principales fue necesaria una cimentación por pilotaje (Figura 9). En este sentido, la utilización del arco triarticulado resultaría especialmente adecuada, al poder producirse asentamientos diferenciales derivados de la combinación de un sistema de cimentación superficial con otro profundo. El arco triarticulado permite el reacomodo de sus dos miembros mediante giro en las rótulas sin producir grandes tensiones.

The thrust was therefore balanced by the friction of the foundation. Nevertheless, it would also count on the additional help of the two side galleries. The architect in charge of overseeing construction, Henard, stated:

The arch has been deemed to be isolated in terms of its resistance and capable of supporting the whole load of the building on its own.¹⁸

I should add that the side galleries make up a series of natural buttresses, which contribute more effectively to the lateral stability of the building.¹⁹

In this sense, it is worth mentioning that in both the original building erection drawings and in the drawings and photographs of the assembly from that period we can see the arches with assembled lattices and joists, and it is precisely the weight of the whole deck framework itself that represents the basic load of the structure (Figures 11 & 10).

Regarding the arch foundations, in most cases a superficial foundation was used, whereas foundation with piles was necessary in twelve foundation points of the main arches (Figure 9). In this sense, the use of the three-hinged arch was particularly suited, since it allowed for differential settlements derived from the combination of a superficial foundation system with another deeper one. The three-hinged arch enables the readjustment of its two parts by pivoting at the hinges without creating any great strain.

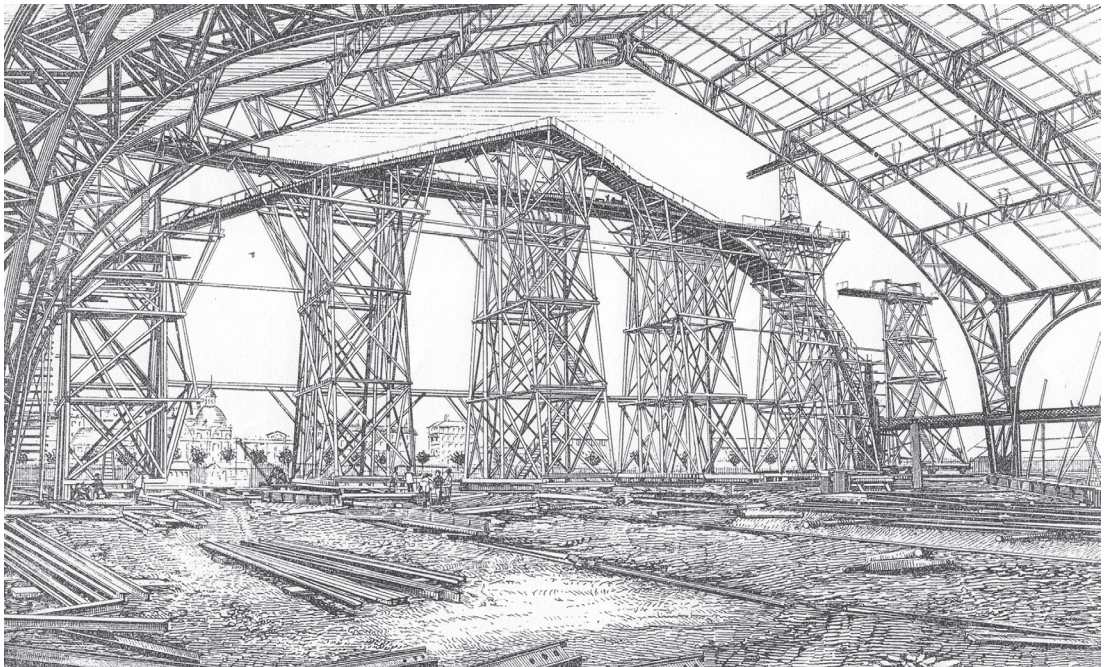


Figura 10. Galería de las Máquinas. Exposición Universal de París 1889. Dibujo de montaje. Obsérvense los arcos de la nave principal montados antes de la construcción de las naves laterales.

Figure 10. Galerie des Machines. Universal Exposition of Paris 1889. Assembly drawing. Note the arches of the main vault assembled before construction of the lateral vaults.

LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA TÉRMICO

Debido a la notable luz del edificio, los movimientos térmicos en el plano de los arcos son relevantes. Nuevamente, el arco triarticulado tiene la ventaja de permitir los movimientos de dilatación y contracción térmica sin producir incrementos importantes de tensiones en el mismo, puesto que la nueva longitud de los semiarcos se reacomoda por giro en las rótulas.

En la dirección longitudinal se usó un método consistente en unir, cada tres tramos, es decir

SOLVING THE THERMAL PROBLEM

Given the considerable span of the building, any thermal movements on the arch's plane were significant. Once again, the three-hinged arch has the advantage of allowing for thermal expansion and contraction movements without creating any significant increases in strain of the same, given that the new length of the semi-arches would readjust through pivoting at the hinges.

In the longitudinal direction they use a method consisting in joining the longitudinal lattice joists

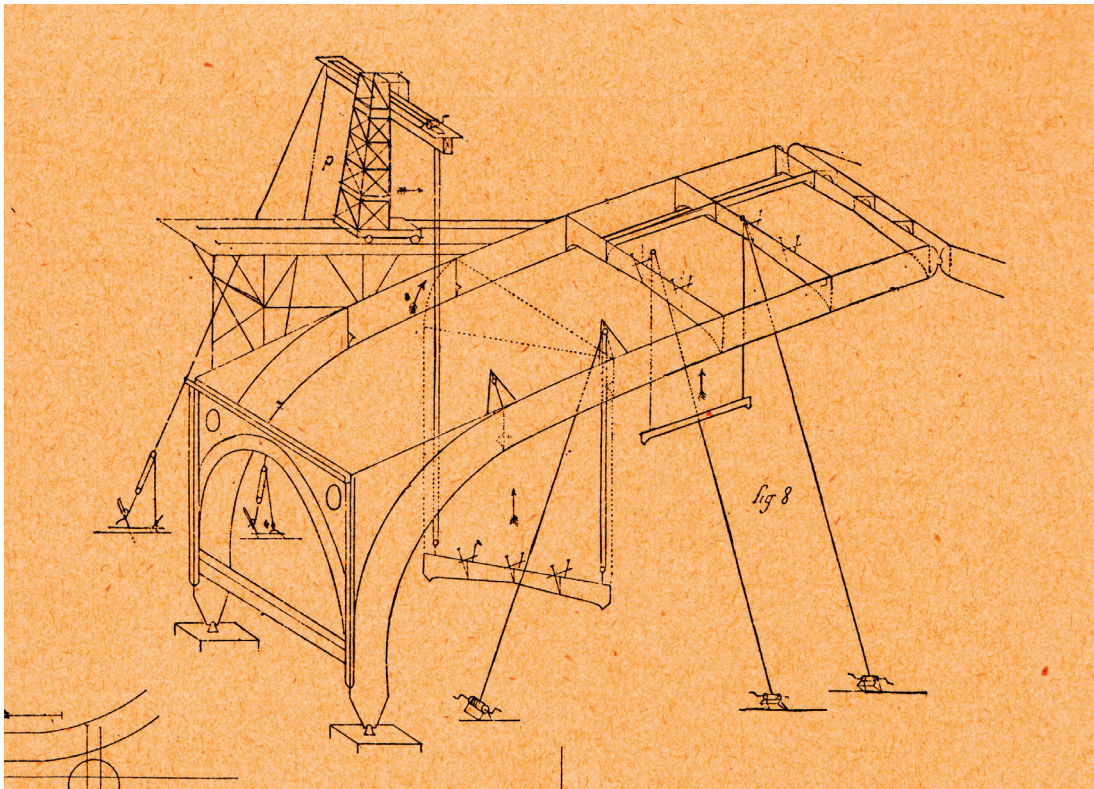


Figura 11. Galería de las Máquinas. Exposición Universal de París 1889. Axonometría incluida en un plano original de montaje del proyecto. Obsérvese el izado del entramado estructural de la nave central antes de la ejecución de las naves laterales.

Figure 11. Galerie des Machines. *Universal Exposition of Paris 1889.* Axonometrics included in an original plan of the project. Note the hoisting of the structural framework of the central vault before construction of the lateral vaults.

cada 64,5 metros, las celosías longitudinales a los arcos mediante pasadores ubicados en agujeros ovales.²⁰ El implementar este sistema cada tres tramos garantiza, por una parte, la estabilidad horizontal en la dirección longitudinal, y por otra, permite los movimientos térmicos. Este sistema se emplea por primera vez de forma efectiva en este edificio. En este sentido, podemos observar como, precisamente, las Exposiciones Universales

every three sections, every 64.5 metres, to the arches by means of dowels placed in oval holes.²⁰ By using this system they could first guarantee horizontal stability in the longitudinal direction, and secondly allow for thermal movements. This system was first used effectively on this construction. In this way we can observe how precisely the previous Universal Expositions, with their enormous metallic constructions, were testing grounds in the field

anteriores, con sus enormes edificios metálicos, habían constituido un campo de prueba y error en el ámbito de los movimientos de origen térmico. De esta manera, son conocidos los significativos desplomes de pilares que por esta causa se produjeron en el Crystal Palace (Joseph Paxton) de la Exposición Universal de Londres 1851.²¹

En el ya citado Palais de L'industrie (Alexis Barrault y G. Bridel) de la Exposición Universal de París 1855 (Figura 3) los movimientos térmicos longitudinales del entramado metálico de las bóvedas provocaron en la cubierta la rotura de vidrios, así como, la abertura de juntas entre hierro y vidrio originando goteras.²² El propio Alexis Barrault, autor del edificio, en el libro que publicó tras la realización del edificio, y consciente de las patologías registradas, realiza una afirmación fundamental que abre la puerta al moderno concepto 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.*²³

Es precisamente un sistema basado en la afirmación de Barrault (la fijación de correas de tal manera que permitan el movimiento de dilatación) el que se implementa en la Galería de las Máquinas de 1889. En este sentido, ninguna fuente documental de las consultadas afirma la existencia de patología alguna en el edificio debida a movimientos térmicos, por lo que entendemos que el sistema habría funcionado correctamente.

*of thermal movements. It is because of thermal movements that there were out-of-plumb pillars in the Crystal Palace (Joseph Paxton) during the Universal Exposition in London 1851.*²¹

In the previously mentioned Palais de L'industrie (Alexis Barrault and G. Bridel) from the Universal Exposition in Paris 1855 (Figure 3), the longitudinal thermal movements of the metallic framework of the domes caused glass breakage in the deck, as well as opening of joints between iron and glass, which in turn led to leaks.²² In the book he published after construction finished, the creator of the construction who was aware of the pathologies recorded, Alexis Barrault himself, made a fundamental statement that would open the door to the modern concept of the expansion joint:

This is how a 50 metre span should be built. The arches are placed at distances of 10 to 12 metres [...] Every 100 metres along we would establish a system consisting of two slightly separated trusses. The joists would be fixed in such a way as to allow expansion movement.²³

It is precisely a system based on Barrault's statement (fixing the joists in such a way as to allow for expansion movement) which would be applied in the Galerie des Machines in 1889. In this sense, none of the documentary sources consulted verifies the existence of any pathology in the construction due to thermal movements, thus leading us to assume that the system must have worked correctly.

LA ESTABILIDAD HORIZONTAL

Otro de los problemas inherentes a las nuevas tipologías metálicas fue la consecución de una adecuada estabilización horizontal.²⁴ Hemos de hacer notar, a modo de ejemplo, que cuando el Crystal Palace de Londres fue desmontado y reconstruido en Sidenham y, a pesar de haber incrementado las diagonales de arriostramiento, parte del edificio colapsó precisamente debido a la inestabilidad horizontal.²⁵ En el caso de la Galería de las Máquinas, en la dirección longitudinal la estabilización horizontal se consigue mediante la unión rígida de las vigas de celosía a los arcos. Además, los arcos también se vinculan rigidamente mediante vigas que sustentan el piso de las galerías laterales y mediante los arcos longitudinales de las mismas (Figuras 2 y 11). En la dirección transversal, el propio arco triarticulado es isostático y, por lo tanto, estable.

LA CONTROVERSI A MATERIAL Y DIMENSIONAL

En la Galería de las Máquinas se hace uso del hierro forjado abandonando prácticamente por completo la fundición. En este sentido, numerosas fuentes bibliográficas sostienen que esta estructura se habría realizado con acero, no con hierro. Tal es el caso de la revista "Engineering": "(...)se decidió emplear acero como el material de esta nueva cubierta; esta es la primera vez que este metal ha sido usado para una obra de este tipo".²⁶

En la publicación titulada "Exposition Universelle de 1889. Le Palais des Machines. Notice sur l'édifice et sur la marche des travaux", publicada en 1891 y de la que es autor Eugène Hénard, arquitecto encargado de la supervisión general del montaje del edificio, en la página 56 se incluye una tabla con los pesos

HORIZONTAL STABILITY

Another of the problems inherent to the new metal typologies was ensuring adequate horizontal stabilisation.²⁴ As an example, it is worth pointing out that when the Crystal Palace in London was taken down and rebuilt in Sidenham, in spite of having increased the diagonal bracing bars, part of the construction collapsed precisely due to horizontal instability.²⁵ In the case of the Galerie des Machines, horizontal stability was achieved in the longitudinal direction through the rigid joining of the lattice joists to the arches. Furthermore, the arches were also joined rigidly through the joists supporting the floor of the side galleries and the longitudinal arches of the same (Figures 2 & 11). In the transversal direction, the three-hinged arch itself is isostatic and therefore stable.

THE CONTROVERSY ABOUT MATERIALS AND SIZE

In the Galerie des Machines cast iron was practically abandoned in favour of wrought iron. With regards to this, numerous bibliographic sources maintain that this structure would have been made in steel, and not iron. This is the case of the journal "Engineering": "(...) it was decided that steel would be used for this new deck; this is the first time that this metal was used for a construction of this type".²⁶

In the publication titled "Exposition Universelle de 1889. Le Palais des Machines. Notice sur l'édifice et sur la marche des travaux", published in 1891 and written by Eugène Hénard, the architect in charge of general supervision of the building assembly, there is a table on page 56 which lists the

de los diversos materiales utilizados en la obra. Para la construcción metálica se asigna:

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.²⁷

Obtenemos, por tanto, los siguientes porcentajes:

Hierro forjado: 96,5%; hierro de fundición: 2,1%; acero: 1,2%; plomo: 0,1%

Aunque no toda esta cantidad de metal habría sido utilizada en elementos estructurales, la diferencia es tan clara que podemos afirmar que la estructura se materializó fundamentalmente en hierro forjado.

A pesar de que la producción del acero industrializado se había inaugurado con la invención del convertidor Bessemer en 1855 y del sistema Martin Siemens en 1857 como perfeccionamiento del anterior, no será hasta finales del s. XIX cuando comience a extenderse su uso en la construcción. De esta forma Contamin e Eiffel en un artículo escrito conjuntamente en 1889 abordan el acero con tono de duda. Afirman que ha comenzado a ser empleado por los ingenieros en la construcción de puentes, al tiempo que aluden a diversos ensayos sobre vigas realizados en los últimos diez años con una alta dispersión de resultados. También muestran sus dudas sobre cuáles son las técnicas más adecuadas para roblonar el acero sin modificar las capacidades resistentes de los elementos estructurales.²⁸ Esto nos conduce a pensar que fueron la relativa novedad del material y su limitado conocimiento estructural las razones que hicieron que no se empleara en la construcción tanto de la Galería de las Máquinas como de la Torre Eiffel.

weights of the various materials used on the project. The following is allocated to metallic construction:

Wrought iron (including the rivets that weigh 13,585 Kg): 12,361,595 Kg. Cast iron (including the channelling elements that weigh 5,623 Kg): 269,869 Kg. Steel: 154,846 Kg. Lead: 18,506 Kg.²⁷

We therefore get the following percentages:

Wrought iron: 96.5%; cast iron: 2.1%; steel: 1.2%; lead: 0.1%

Although not all this quantity of metal would have been used in structural elements, the difference is so evident that we can state that the structure was principally made of wrought iron.

In spite of the production of industrialised steel having started with the invention of the Bessemer converter in 1855 and the Martin Siemens system in 1857 which perfected the previous machine, it was not until the end of the 19th century when its use in construction becomes more common. For this reason Contamin and Eiffel cast doubts on the topic of steel in a co-written article in 1889. They state that it had begun to be used by engineers in the construction of bridges, while referring to various essays on joists from the previous ten years, which include highly variable results. They also reveal their doubts regarding the most suitable techniques for riveting steel without modifying the capacity for resistance of the structural elements.²⁸ This leads us to believe that the underlying reasons for not using steel in the construction of both the Galerie des Machines and the Eiffel Tower were its relative novelty and the limited knowledge of its structural application.

La determinación de la luz exacta de la Galería de las Máquinas de 1889 también ha sido objeto de controversia y resulta habitual que autores distintos adjudiquen distintas luces a este edificio. Dicha disparidad de datos resulta sorprendente tratándose de un edificio que constituye un hito de la Historia de la Arquitectura. De esta manera, se detectan discrepancias en fuentes bibliográficas cercanas cronológicamente a la construcción del edificio. Así:

- "La Construction Moderne" incluye una sección de montaje del edificio. En dicha sección se acota la distancia de eje a eje de las rótulas de arranque de los arcos, fijándola en 110,60 metros.²⁹

- "Engineering" presenta media sección de la Galería de las Máquinas en la que se acota la media luz del edificio en 55,50, lo que daría una luz de 111 metros.³⁰

- "Nouvelles Annales de la Construction" incluye una media sección del edificio en la que se puede leer la cota 55,30 metros, lo que haría una luz de 110,60 metros.³¹

- En la publicación "Paris Universal Exposition 1889. Civil Engineering, Public Works and Architecture" se repasan con gran detalle gráfico las estructuras metálicas de la Exposición. Incluye una media sección del edificio con una cota de 55,30, lo que da una luz medida a ejes de rótulas de arranque de 110,60 metros.³²

Publicaciones modernas, dentro de las cuales se encuentran algunos manuales clásicos de la historiografía arquitectónica moderna, asignan diversas luces al edificio que se mueven en el entorno de los 109 hasta los 115 metros:

There has also been controversy surrounding the specification of the exact span of the 1889 Galerie des Machines, and it seems common ground for different authors to ascribe differing spans to this construction. Such disparity of data would seem surprising given that this building is a milestone in the History of Architecture. In the same vein, several discrepancies in bibliographic sources chronologically close to the building's construction have also been detected. Examples of this are as follows:

- "La Construction Moderne" includes a section of the building assembly in which the distance between the axes of the arch springer hinges is specified at 110.6 metres.²⁹

- "Engineering" presents a half-section of the Galerie des Machines in which the half span of the building is specified at 55.5 metres, which would give a span of 111 metres.³⁰

- "Nouvelles Annales de la Construction" includes a half-section of the building, which specifies a length of 55.3 metres, making the span 110.6 metres.³¹

- In the publication "Paris Universal Exposition 1889. Civil Engineering, Public Works and Architecture" the metallic structures of the Exposition are graphically reviewed in great detail. It includes a half-section of the building with a length of 55.3 metres, making the span measured at the axes of the springer hinges to be 110.6 metres.³²

Modern publications, among which we can find some of the classic handbooks of modern architectonic historiography, ascribe the building with spans that range from 109 to 115 metres:

-Carroll L.V. Meeks. *"The Railroad Station: an Architectural History"*. Asigna a la Galería de las Máquinas una luz de 362 pies (110,33 metros).³³

-Donald Hoffmann da por válida una luz de 111 metros.³⁴

-Nikolaus Pevsner afirma que la luz de este edificio fue de 109 metros.³⁵

-Sigfried Giedion asigna una luz de 115 metros.³⁶

Ante esta diversidad de datos, hemos consultado la que consideramos la fuente primaria y, por tanto, la de mayor fiabilidad. Se trata de la publicación titulada *Exposition Universelle de 1889. Le Palais des Machines. Notice sur l'édifice et sur la marche des travaux*, publicada en 1891 y de la que es autor Eugène Hénard. En la portada de la citada publicación se afirma: "Edición acompañada de 41 figuras a partir de los documentos originales".³⁷

En el prólogo de dicha publicación el editor afirma:

*El autor, señor Eugène Hénard, fue el encargado de los trabajos de supervisión general de la obra por mandato de M. Dutert, arquitecto del edificio. El autor ha resumido sus observaciones recogidas en la obra y la documentación usada por él durante este tiempo. Los hechos relatados en las páginas que siguen y los detalles constructivos aquí contenidos presentan garantía de una completa autenticidad.*³⁸

Pues bien, en dicha publicación podemos observar un plano de montaje en el que se acota en planta la distancia entre rótulas de arranque de arco. La cota que figura es 110,60 metros, que resulta coincidente con la mayoría de fuentes consultadas contemporáneas al edificio.

-Carroll L.V. Meeks. *"The Railroad Station: an Architectural History"*. Here the Galerie des Machines is said to have a span of 362 feet (110.33 metres).³³

-Donald Hoffmann states that the span is 111 metres.³⁴

-Nikolaus Pevsner states that the building span was 109 metres.³⁵

-Sigfried Giedion specifies the span to be 115 metres.³⁶

*Faced with such diversity in data, we have consulted what we consider to be the primary, and therefore most reliable, source. It is the publication called Exposition Universelle de 1889. Le Palais des Machines. Notice sur l'édifice et sur la marche des travaux, published in 1891 and written by Eugène Hénard. On the front cover of this work it states: "Edition accompanied by 41 figures based on original documents".*³⁷

The editor states in the prologue of this publication that:

*The author, Mr. Eugène Hénard, was in charge of general supervision of the work on the orders of M. Dutert, the architect of the building. The author has summarised his observations made during construction and the documentation used by him during this period. The facts that appear in the following pages and the construction details presented here have a guarantee of total authenticity.*³⁸

Bearing this in mind, said publication includes an assembly plan in which the distance between the arch springer hinges is specified. The figured length is 110.6 metres, coinciding with most of the sources consulted that are contemporary to the building.

Por tanto, podemos concluir que, ante la imposibilidad de una medición física de la luz, y en base a la documentación consultada, la luz de la Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de 1889 medida a ejes de rótulas fue de 110,60 metros.

LAS SECUELAS

Sin duda, la consecuencia más próxima de la Galería de las Máquinas de 1889 será la construcción del Manufactures and Liberal Arts Building con motivo de la Exposición Universal celebrada en Chicago en 1893 (Figura 12). Dicho edificio estaba formado por arcos triarticulados con una luz medida a ejes de rótulas de 112,16 metros, superando ligeramente la luz de la Galería de las Máquinas de 1889, edificio con el que pretendía competir, y convirtiéndose en el siguiente record mundial de luz en edificación.³⁹

La estructura de este edificio, a diferencia de la Galería de las Máquinas se realizó en acero, aproximándose el trazado de sus arcos al parabólico.⁴⁰

Tras la construcción de la Galería de las Máquinas, el arco triarticulado se usó con enorme profusión y de forma dilatada cronológica y geográficamente para dar cobertura a estaciones de ferrocarril. Este hecho se debió, sin duda, a la morfología arquitectónica del edificio de 1889 especialmente propicia para su adaptación a la tipología ferroviaria. Observamos, además, como el edificio de la Exposición propiciaría un notable salto en las luces alcanzadas con respecto a las edificaciones constituidas por arcos triarticulados construidas antes de 1889. Así, entre 1891 y 1893 se construye la Reading Station en Philadelphia del arquitecto F.H Kimball. Alcanzaba los 78,95 metros de luz, con un significativo parecido con la Galería de las

Faced with the impossibility of physically measuring the span and based on the documentation consulted, we can therefore conclude that the span of the Galerie des Machines in the Universal Exposition of 1889, measured at the axes of the hinges, was 110.6 metres.

THE CONSEQUENCES

The closest repercussion after the Galerie des Machines was undoubtedly the construction of the Manufactures and Liberal Arts Building on the occasion of the Universal Exposition held in Chicago in 1893 (Figure 12). Said building was made up of three-hinged arches with a span of 112.16 metres, measured at the axes of the hinges, slightly bigger than the span of the Galerie des Machines in 1889, a building with which it was trying to compete. It thus became the next world record holder for span in construction.³⁹

As opposed to the Galerie des Machines, the structure of this building was made of steel, with the line of its arches almost forming a parabola.⁴⁰

After the construction of the Galerie des Machines, the three-hinged arch went on to be used extensively, and its use progressively grew both chronologically and geographically to serve railway stations. This was undoubtedly due to the fact that the 1889 building's architectural morphology was particularly favourable for its adaptation to the railway context. We should also highlight how the Exposition building would mark a considerable jump in attainable spans with respect to the constructions with three-hinged arches built before 1889. Subsequently, between 1891 and 1893 the Reading Station in Philadelphia was built by the architect F.H Kimball. Its span was of 78.95 metres, with a significant similarity in the line



Figura 12. Manufactures and Liberal Arts Building. Exposición Universal Chicago. 1893.

Figure 12. Manufactures and Liberal Arts Building. Universal Exposition of Chicago. 1893.

Máquinas de 1889 en el trazado del arco.⁴¹ Otro ejemplo es la Broad Street Station también en Philadelphia. Construida en 1894 por Wilson Bros. and Co. Alcanzaba una luz de 91,65 metros.⁴² Otra aplicación paradigmática del arco triarticulado en la edificación con clara influencia de la Galería de las Máquinas de 1889 es el Mercado de Ganado de la ciudad de Lyon. Diseñado en 1909 por Tony Garnier contaba con una luz de 80 metros.⁴³

De los ejemplos expuestos podemos concluir como la construcción de la Galería de las Máquinas

*of its arch to the Galerie des Machines of 1889.*⁴¹ Another example is the Broad Street Station also in Philadelphia. It was built in 1894 by Wilson Bros. and Co. and had a span of 91.65 metres.⁴² Another paradigmatic application of the three-hinged arch in construction with a clear influence of the 1889 Galerie des Machines is the Cattle Market in Lyon. Designed by Tony Garnier in 1909, it had a span of 80 metres.⁴³

Based on the examples presented here, we can conclude that the construction of the Galerie

propició un enorme salto en las luces alcanzadas por el arco triarticulado en edificación. Tras la construcción del edificio, se pasa de luces que apenas sobrepasan los 50 metros a otras que se aproximan o incluso superan los 100 metros de luz.

CONCLUSIONES

De lo expuesto anteriormente podemos obtener las siguientes conclusiones:

En 1889 el uso del arco metálico triarticulado estaba plenamente extendido para la resolución de cubiertas de gran luz. Sin embargo, la construcción de la Galería de las Máquinas contribuyó a una dilatada extensión tanto geográfica como temporal en el uso de esta tipología, dejando importantes secuelas con un notable incremento en las luces alcanzadas. Este aspecto constituye una de las grandes aportaciones de este edificio, ya que tras su construcción las luces de los arcos triarticulados que se usaron en edificación para dar cobertura fundamentalmente a las grandes estaciones ferroviarias se duplican, pasando del entorno de los cincuenta a los cien metros.

A diferencia de la Torre Eiffel, cuya geometría deriva fundamentalmente de la consecución de una forma estructural óptima,⁴⁴ la sección transversal de la Galería de las Máquinas ostenta, en nuestra opinión, el mérito de constituir un notable acuerdo entre las necesidades estructurales y los aspectos estilísticos. Debemos señalar que el arco se aleja de la forma óptima estructural, que sería la antifunicular de una carga distribuida. En este sentido, podemos afirmar que no solamente se crea el mayor espacio diáfano cubierto, sino que las cesiones estéticas provocan que este hecho se materialice con una admirable osadía.

des Machines marked a milestone in the spans achieved through the three-hinged arch in building. After construction of the building, spans went from scarcely exceeding 50 metres to approximating or even exceeding 100 metres.

CONCLUSIONS

We can extrapolate the following conclusions from the information presented above:

In 1889 the use of the three-hinged arch for making decks of a large span was widespread. However, the building of the Galerie des Machines contributed to this typology being used far more extensively in both temporal and geographical terms, and had important consequences such as a considerable increase in spans. This point constitutes one of this building's greatest contributions; after its construction, the spans of the three-hinged arches used in building, principally serving large railway stations, doubled in length by growing from 50 to 100 metres.

Unlike the Eiffel Tower, whose geometric design were principally informed by the objective of achieving an optimal structural shape,⁴⁴ we believe that the cross-section of the Galerie des Machines has the merit of reaching a significant agreement between structural needs and stylistic elements. We should point out that the arch is far from the optimal structural shape, which would be anti-funicular with distributed loads. In this sense, we can state that not only did it create the largest diaphanous space, but that the aesthetic concessions meant that it was created with admirable daring.

En la Galería de las Máquinas no se usaron los métodos de contención de empujes desarrollados en los antecedentes edificatorios aquí expuestos. La cimentación se dimensionó para resistir la totalidad del empuje de los arcos, y el arco se dimensionó para resistir por sí solo toda la carga del edificio.

La luz de los arcos triarticulados de la Galería de las Máquinas medida a ejes de rótulas de arranque fue de 110,60 metros. Este extremo clarifica la disparidad de datos existentes al respecto en las diversas fuentes documentales consultadas.

La cantidad de hierro forjado utilizado en el edificio fue del 96,5 %. Por ello se puede afirmar que se trató de una estructura materializada fundamentalmente en hierro forjado. Este hecho contradice a diversas publicaciones consultadas, algunas de ellas contemporáneas al propio edificio. Hemos concluido como la causa de la no utilización del acero habría sido la relativa novedad del material y su limitado conocimiento estructural.

El Manufactures and Liberal Arts Building de la Exposición Universal de Chicago 1893 alcanzó una luz de 368 pies (112,16 metros) medidos de eje a eje de rótulas de arranque, superando, por tanto, ligeramente a la Galería de las Máquinas. No obstante, este edificio, a diferencia del anterior, fue diseñado con una geometría de arco más próxima a la parabólica y, por tanto, más eficaz desde el punto de vista estructural. El hecho de que su envergadura no supusiera un notable salto y que la totalidad de los problemas inherentes a las cubiertas metálicas de grandes dimensiones habían ya sido resueltas en París ha dejado, en nuestra opinión, relegado a este edificio a un segundo plano histórico.

The methods of absorbing thrust that had been developed in the building precedents mentioned above were not used in the Galerie des Machines. The foundations were designed to withstand the whole thrust of the arches, and the arch was designed to support the whole building load on its own.

Measured at the axes of the arch springer hinges, the span of the three-hinged arches in the Galerie des Machines was of 110.6 metres. This point should clarify the disparity of the existing data on this matter in the various documentary sources that were consulted.

The quantity of wrought iron used in the building was 96.5%. For this reason we can state that it was a structure principally made of wrought iron. This fact contradicts several of the publications consulted, some of which were contemporary to the building itself. We have come to the conclusion that steel was not used due its relative novelty as a material and the limited knowledge about its structural application.

The Manufactures and Liberal Arts Building from the Universal Exposition in Chicago in 1893 reached a span of 368 feet (112.16 metres) measured from one axis of the springer hinges to the other, and thus slightly exceeding that of the Galerie des Machines. This later building, however, was designed with an arch geometry that approximated a parabola, thus making it more effective from a structural perspective. The fact that its span did not represent a significant step forward and also that all of the problems inherent in large metallic decks had already been resolved in Paris, leads us to believe that this building occupies a back seat historically.

Notas y Referencias

- ¹ BENÉVOLO, L. *Historia de la Arquitectura Moderna*. Barcelona: Gustavo Gili, 1996.
- ² *Ibid.*
- ³ BARRAULT, M.M. La charpente en fer du Palais de l'Industrie. En: *Nouvelles Annales de la Construcción*. Febrero 1856, pp. 89-107, planchas 9-10.
- ⁴ GLEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.
- ⁵ PHILLIPS, J. Description of the iron roof, in one span, over the joint Railway Station, New Street Birmingham. En: *Minutes of the proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 30 de Enero de 1855, vol. 14, pp. 251-62.
- ⁶ BARRAULT, op. cit.
- ⁷ VIERENDEEL, A. *La Construction Architecturale en Fonte, Fer et Acier*. 2 Tomos. Brussels: Dunod, 1902.
- ⁸ LEMOINE, B. *Eiffel*. Barcelona: Stylos, 1986.
- ⁹ Exposition Universelle de 1889: Palais des Machines. Montage des fermes. En: *Nouvelles Annales de la Construcción*. Septiembre 1889, pp. 129-140, planchas 31-33. Exposition Universelle de 1889: Palais des Machines. Montage des fermes (2). En: *Nouvelles Annales de la Construcción*. Octubre 1889, pp. 155-159, planchas 40-41.
- ¹⁰ BARRAULT, op. cit.
- ¹¹ VIERENDEEL, op. cit.
- ¹² *Ibid.*
- ¹³ MEEKS, C.L.V. *The Railroad Station: an Architectural History*. 2ª reimpresión, London: Yale University Press, 1956.
- ¹⁴ *Ibid.*
- ¹⁵ Die flora zu Charlottenburg bei Berlin. En: *Deutsche Bauzeitung* [en línea]. 23 Agosto 1873, no. 68, pp. 259-260 [consulta: 28-1-2015]. Disponible en Cottbus University website: <http://www-docs.tu-cottbus.de/bibliothek/public/katalog/380605.PDF>
- ¹⁶ HÉNARD, E. *Exposition Universelle de 1889: Le Palais des Machines, Notice sur l'édifice et sur la Marche des Travaux*. Paris: Librairies Imprimeries Réunies, 1891.
- ¹⁷ EIFFEL, M.M., CONTAMIN, FOUQUET. Note sur les constructions métalliques. En: *Exposition Universelle de 1889. Congrès international des Procédés de Construction*. Paris: Imprimerie et Librairie Centrales des Chemins de Fer, 1889.
- ¹⁸ HÉNARD, Op. cit.
- ¹⁹ *Ibid.*
- ²⁰ *Ibid.*
- ²¹ MALLETT, R. *Record of the International Exhibition London 1851*. Glasgow: William Mackenzie, 1862.
- ²² BARRAULT, A, BRIDEL, G. *Le Palais de l'Industrie et ses anexes. Description raisonnée du système de construction*. Paris, 1857.
- ²³ *Ibid.*
- ²⁴ LÓPEZ, I. La aportación estructural del Crystal Palace de la Exposición Universal de Londres 1851. Una ampliación del enfoque histórico tradicional. En: *Rita*. Octubre 2014, no. 2, pp. 76-83. [consulta: 28-1-2015]. Disponible en: <http://ojs.redfundamentos.com/index.php/rita/article/view/47>
- ²⁵ MALLETT, op. cit.
- ²⁶ ANON. The Paris Exhibition. En: *Engineering*. 3 de Mayo de 1889, no. 47, pp. 415-66.
- ²⁷ HÉNARD, op. cit.
- ²⁸ EIFFEL, M.M., CONTAMIN, FOUQUET., op. cit.
- ²⁹ Exposition Universelle: Cronique des Travaux, Montage des Fermes de 115 Mètres. En: *La Construction Moderne*. Julio 1888, pp. 501-04.

Notes and References

- ¹ BENÉVOLO, L. *Historia de la Arquitectura Moderna*. Barcelona: Gustavo Gili, 1996.
- ² *Ibid.*
- ³ BARRAULT, M.M. *La charpente en fer du Palais de l'Industrie*. In: *Nouvelles Annales de la Construcción*. February 1856, pp. 89-107, sheets 9-10.
- ⁴ GLEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009.
- ⁵ PHILLIPS, J. *Description of the iron roof, in one span, over the joint Railway Station, New Street Birmingham*. In: *Minutes of the proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 30th January 1855, vol. 14, pp. 251-62.
- ⁶ BARRAULT, op. cit.
- ⁷ VIERENDEEL, A. *La Construction Architecturale en Fonte, Fer et Acier*. 2 Volumes. Brussels: Dunod, 1902.
- ⁸ LEMOINE, B. *Eiffel*. Barcelona: Stylos, 1986.
- ⁹ *Exposition Universelle de 1889: Palais des Machines. Montage des fermes*. In: *Nouvelles Annales de la Construcción*. September 1889, pp. 129-40, sheets 31-33. *Exposition Universelle de 1889: Palais des Machines. Montage des fermes (2)*. In: *Nouvelles Annales de la Construcción*. October 1889, pp. 155-59, sheets 40-41.
- ¹⁰ BARRAULT, op. cit.
- ¹¹ VIERENDEEL, op. cit.
- ¹² *Ibid.*
- ¹³ MEEKS, C.L.V. *The Railroad Station: an Architectural History*. 2nd Reprinting, London: Yale University Press, 1956.
- ¹⁴ *Ibid.*
- ¹⁵ *Die flora zu Charlottenburg bei Berlin*. En: *Deutsche Bauzeitung* [en línea]. 23rd August 1873, no. 68, pp. 259-60 [consult: 28-1-2015]. Available on Cottbus University website: <http://www-docs.tu-cottbus.de/bibliothek/public/katalog/380605.PDF>
- ¹⁶ HÉNARD, E. *Exposition Universelle de 1889: Le Palais des Machines, Notice sur l'édifice et sur la Marche des Travaux*. Paris: Librairies Imprimeries Réunies, 1891.
- ¹⁷ EIFFEL, M.M., CONTAMIN, FOUQUET. *Note sur les constructions métalliques*. In: *Exposition Universelle de 1889. Congrès international des Procédés de Construction*. Paris: Imprimerie et Librairie Centrales des Chemins de Fer, 1889.
- ¹⁸ HÉNARD, op. cit.
- ¹⁹ *Ibid.*
- ²⁰ *Ibid.*
- ²¹ MALLETT, R. *Record of the International Exhibition London 1851*. Glasgow: William Mackenzie, 1862.
- ²² BARRAULT, A, BRIDEL, G. *Le Palais de l'Industrie et ses anexes. Description raisonnée du système de construction*. Paris, 1857.
- ²³ *Ibid.*
- ²⁴ LÓPEZ, I. *La aportación estructural del Crystal Palace de la Exposición Universal de Londres 1851. Una ampliación del enfoque histórico tradicional*. In: *Rita* [online]. October 2014, n. 2, pp. 76-83. [consult: 28-1-2015]. Available on: <http://ojs.redfundamentos.com/index.php/rita/article/view/47>
- ²⁵ MALLETT, op. cit.
- ²⁶ ANON. *The Paris Exhibition*. In: *Engineering*. 3rd May 1889, n. 47, pp. 415-66.
- ²⁷ HÉNARD, op. cit.
- ²⁸ EIFFEL, M.M., CONTAMIN, FOUQUET., op. cit.
- ²⁹ *Exposition Universelle: Cronique des Travaux, Montage des Fermes de 115 Mètres*. In: *La Construction Moderne*. July 1888, pp. 501-04.

- ³⁰ ANON, op. cit.
- ³¹ Exposition Universelle de 1889: Palais des Machines. En: *Nouvelles Annales de la Construction*. Julio 1889, pp. 97-108, planchas 31-33.
- ³² WATSON, W. *Paris Universal Exposition 1889: Civil Engineering, Public Works and Architecture*. Washington: Washington Government Printing Office, 1892.
- ³³ MEEKS, op. cit.
- ³⁴ HOFFMANN, D. Clear Span Rivalry: the World's Fairs of 1889-1893. En: *The Journal of the Society of Architectural Historians* [en línea]. Marzo 1970, vol. 29, n. 1, pp. 48-50 [consulta: 28-1-2015]. Disponible en: Jstor Digital Library website <http://www.jstor.org/stable/988575>
- ³⁵ PEVSNER, N. *Los orígenes de la arquitectura moderna y del diseño*. Barcelona: Gustavo Gili, 1973.
- ³⁶ GIEDION, op. cit.
- ³⁷ HÉNARD, op. cit.
- ³⁸ *Ibid.*
- ³⁹ BURNHAM, op. cit. WERNER, E. A. *Allgemeine bauzeitung* [en línea]. 1893, planchas 9-11 [consulta: 28-1-2015]. Disponible en Austrian Newspapers Online website <http://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno-plus?apm=0&aid=abz&datum>
- ⁴⁰ BURNHAM, op. cit.
- ⁴¹ MEEKS, op. cit.
- ⁴² *Ibid.*
- ⁴³ GIEDION, S. *Building in France, Building in Iron, Building in Ferroconcrete*. Santa Mónica: The Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995.
- ⁴⁴ EIFFEL, M., CONTAMIN, M. V. Discours prononcés par M.G. Eiffel et M.V. Contamin. En: *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils*. Paris, 1890.
- ³⁰ ANON, op. cit.
- ³¹ Exposition Universelle de 1889: Palais des Machines. In: *Nouvelles Annales de la Construction*. July 1889, pp. 97-108, sheets 31-33.
- ³² WATSON, W. Paris Universal Exposition 1889: Civil Engineering, Public Works and Architecture. Washington: Washington Government Printing Office, 1892.
- ³³ MEEKS, op. cit.
- ³⁴ HOFFMANN, D. Clear Span Rivalry: the World's Fairs of 1889-1893. In: *The Journal of the Society of Architectural Historians* [online]. March 1970, vol. 29, no. 1, pp. 48-50 [consult: 28-1-2015]. Available on: Jstor Digital Library website <http://www.jstor.org/stable/988575>
- ³⁵ PEVSNER, N. Los orígenes de la arquitectura moderna y del diseño. Barcelona: Gustavo Gili, 1973.
- ³⁶ GIEDION, op. cit.
- ³⁷ HÉNARD, op. cit.
- ³⁸ *Ibid.*
- ³⁹ BURNHAM, op. cit. WERNER, E. A. *Allgemeine bauzeitung* [online]. 1893, sheets 9-11 [consult: 28-1-2015]. Available on Austrian Newspapers Online website <http://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno-plus?apm=0&aid=abz&datum>
- ⁴⁰ BURNHAM, op. cit.
- ⁴¹ MEEKS, op. cit.
- ⁴² *Ibid.*
- ⁴³ GIEDION, S. Building in France, Building in Iron, Building in Ferroconcrete. Santa Mónica: The Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995.
- ⁴⁴ EIFFEL, M., CONTAMIN, M. V. Discours prononcés par M.G. Eiffel et M.V. Contamin. In: *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils*. Paris, 1890.

BIBLIOGRAPHY

- ANON. The Paris Exhibition. In: *Engineering*. 3rd May 1889, n. 47
- BANHAM, R. *Theory and design in the First Machine Age*. London: The Architectural Press, 1960.
- BARRAULT, A. La charpente en fer du Palais de l'Industrie. In: *Nouvelles Annales de la Construction*. February 1856.
- BARRAULT, A., BRIDEL, G. *Le Palais de l'Industrie et ses annexes. Description raisonnée du système de construction*. Paris, 1857.
- BENÉVOLO, L. *Historia de la Arquitectura Moderna*. Barcelona: Gustavo Gili, 1996.
- BURNHAM, D. H. *The final official report of the director of works of the World's Columbian Exposition*. Reprinted, 8 volumes, New York: Garland Publishing, Inc., 1989.
- Die flora zu Charlottenburg bei Berlin. In: *Deutsche Bauzeitung* [online]. 23rd August 1873, n. 68 [consult: 28-1-2015]. Available on Cottbus University website: <http://www-docs.tu-cottbus.de/bibliothek/public/katalog/380605.PDF>
- EIFFEL, M.M., CONTAMIN, M. V. Discours prononcés par M.G. Eiffel et M.V. Contamin. In: *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils*. Paris, 1890.

- EIFFEL, CONTAMIN, FOUQUET. Note sur les constructions métalliques. In: *Exposition Universelle de 1889. Congrès international des Procédés de Construction*. Paris: Imprimerie et Librairie Centrales des Chemins de Fer, 1889.
- Exposition Universelle: Cronique des Travaux, Montage des Fermes de 115 Mètres. In: *La Construction Moderne*. July 1888.
- Exposition Universelle de 1889: *Palais des Machines*. In: *Nouvelles Annales de la Construcción*. July 1889.
- Exposition Universelle de 1889: *Palais des Machines*. Montage des fermes. In: *Nouvelles Annales de la Construcción*. September.
- Exposition Universelle de 1889: *Palais des Machines*. Montage des fermes (2). In: *Nouvelles Annales de la Construcción*. October 1889.
- FERNÁNDEZ TROYANO, L. *Tierra sobre el agua: visión histórica universal de los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puentes, 1999.
- FRAMPTON, K. *Studies in tectonic culture: the poetics of construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. Chicago: Graham Foundation for Advanced Studies in the Fine Arts, 1995.
- GIEDION, S. *Building in France, Building in Iron, Building in Ferroconcrete*. Santa Monica: The Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995.
- GIEDION, S. *Espacio, Tiempo y Arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2009
- GÖSSEL, P. *Arquitectura del Siglo XX*. Volume 1. Köln: Taschen, 2005.
- HÉNARD, E. *Exposition Universelle de 1889: Le Palais des Machines, Notice sur l'édifice et sur la Marche des Travaux*. Paris: Librairies Imprimeries Réunies, 1891.
- HÉNARD, E. Les travaux de l'Exposition. Le montage des grandes fermes du *Palais des Machines*. In: *Le Genie Civil. Revue générale des Industries Françaises & Étrangères*. September 1888.
- HOFFMANN, D. Clear Span Rivalry: the World's Fairs of 1889-1893. In: *The Journal of the Society of Architectural Historians* [online]. March 1970, vol. 29, n.1. [consult: 28-1-2015]. Available on: Jstor Digital Library website <http://www.jstor.org/stable/988575>
- LEMOINE, B. *Eiffel*. Barcelona: Stylos, 1986.
- LÓPEZ, I. La aportación estructural del Crystal Palace de la Exposición Universal de Londres 1851. Una ampliación del enfoque histórico tradicional. In: *Rita* [online]. October 2014, n. 2. [consult: 28-1-2015]. Available on: <http://ojs.redfundamentos.com/index.php/rita/article/view/47>
- LOYER, F. *Le siècle de l'industrie: 1789-1914*. Paris: Skira, 1983.
- MALLETT, R. *Record of the International Exhibition London 1851*. Glasgow: William Mackenzie, 1862.
- PEVSNER, N. *Los orígenes de la arquitectura moderna y del diseño*. Barcelona: Gustavo Gili, 1973.
- PHILIPS, J. Description of the iron roof, in one span, over the joint Railway Station, New Street Birmingham. In: *Minutes of the proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 30th January 1855, vol. 14.
- PICON, A. *L'art de l'ingénieur*. Paris: Éditions du Centre Pompidou, 1997.
- VIERENDEEL, A. *La Construction Architecturale en Fonte, Fer et Acier*. 2 Volumes. Brussels: Dunod, 1902.
- WATSON, W. *Paris Universal Exposition 1889: Civil Engineering, Public Works and Architecture*. Washington: Washington Government Printing Office, 1892.
- WERNER, E. A. *Allgemeine bauzeitung* [online]. 1893, sheets 9-11 [consult: 28-1-2015]. Available on Austrian Newspapers Online website <http://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno-plus?apm=0&aid=abz&datum>

IMAGES SOURCES

1: DUNLOP, B., HECTOR, D. *3 Architectures. Lost masterpieces*. London: Phaidon Press Limited, 1999. Copyright expired. **2, 6, 8:** VIERENDEEL, A. *La Construction Architecturale en Fonte, Fer et Acier*. Brussels: Dunod, 1902. Copyright expired. **3:** LOYER, F. *Le siècle de l'industrie: 1789-1914*. Paris: Skira, 1983. Copyright expired. **4:** PICON, A. *L'art de l'ingénieur*. Paris: Éditions du Centre Pompidou, 1997. Copyright expired. **5:** GÖSSEL, P. *Arquitectura del Siglo XX*. Volume 1. Köln: Taschen, 2005. Copyright expired. **7:** Die flora zu Charlottenburg bei Berlin. In: *Deutsche Bauzeitung* [online]. 23rd August 1873, n. 68, [consult: 28-1-2015]. Available on Cottbus University website: <http://www-docs.tu-cottbus.de/bibliothek/public/katalog/380605.PDF> Copyright expired. **9:** Exposition Universelle de 1889: *Palais des Machines*. In: *Nouvelles Annales de la Construcción*. July 1889, sheets 31-32. Copyright expired. **10:** HÉNARD, E. Les travaux de l'Exposition. Le montage des grandes fermes du *Palais des Machines*. In: *Le Genie Civil. Revue générale des Industries Françaises & Étrangères*. September 1888, sheets 321-324. Copyright expired. **11:** HÉNARD, E. *Exposition Universelle de 1889: Le Palais des Machines, Notice sur l'édifice et sur la Marche des Travaux*. Paris: Librairies Imprimeries Réunies, 1891. Copyright expired. **12:** BURNHAM, D. H. *The final official report of the director of works of the World's Columbian Exposition*. Reprinted, 8 volumes, New York: Garland Publishing, Inc., 1989. Copyright expired.