

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

\*Arquitecto. Presidente de la Fundación Antonio Gaudí

## **Información del artículo:**

Fecha de publicación: 6 de julio de 2020

Código: 20-002

© Fundación Antonio Gaudí. [www.fundacionantoniogaudi.org](http://www.fundacionantoniogaudi.org)

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Palabras clave: Gaudí, Arquitectura, Modernismo, Estructuras, Barcelona, Catalunya

## **RESUMEN**

Los arcos gemelos de la fachada del Palau Güell de Barcelona han sido clasificados en la bibliografía sobre Gaudí como de perfil catenárico o parabólico. Esta asignación se fundamenta en cierto parecido que a simple vista tienen con estas curvas. Recientes estudios demostraron que en realidad se trata de curvas Rankine. El presente escrito indaga sobre las razones funcionales, simbólicas y mecánicas sobre las que se habría basado la elección de esta forma de complicado trazado y analiza los procedimientos gráficos y otros métodos a los que puede haber recurrido Gaudí para el proyecto de estos arcos, con fundamento en los utilizados en otras obras.

El perfil de los arcos de la fachada del Palau Güell de Barcelona fue un tema por lo general contemplado de forma superficial en la profusa bibliografía gaudiniana, en la que su inusual forma fue clasificada casi siempre sin rigor científico. Igual tratamiento recibieron muchas otras formas utilizadas por el arquitecto en sus obras.

Con referencia a los arcos usados por Gaudí, realizamos hace algunos años una investigación buscando claridad en el asunto. Sobre la base de fotografías tomadas frontalmente y mediante la aplicación un procedimiento gráfico indagamos en qué ocasiones los arcos son parábolas o catenarias, y en cuáles no responden a ninguno de los dos perfiles mencionados.<sup>1</sup>

En el caso que nos ocupa en este escrito, los portales del Palau Güell, los arcos encuadran en esta última categoría: no son parabólicos y

tampoco son catenáricos, lo cual no constituye sorpresa ya que la simple inspección ocular da cuenta de que su forma se aparta de aquellas curvas.

La publicación en 2016 y 2017 de dos estudios a cargo de investigadores de la Universitat Rovira i Virgili de Tarragona trajo a consideración la cuestión.<sup>2</sup> Consistieron en el desarrollo de un método para determinar con precisión la forma de un arco, su aplicación a los arcos de acceso al Palau Güell, y su posterior utilización en la clasificación de los 23 tipos de arcos distribuidos en el edificio.

Estos trabajos arrojan luz sobre el asunto, proveyendo herramientas de alta precisión basadas en técnicas de escaneo de puntos, modelos tridimensionales, procedimientos de geometría analítica, métodos numéricos, informática y estadística, que permiten llegar a las conclusiones más rigurosas. Según sus

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

autores el objeto fue crear un protocolo de determinación matemática destinado a encontrar ecuaciones analíticas de arcos con aplicación al estudio del patrimonio arquitectónico.

Tomando como primer caso específico los arcos de la fachada del Palau Güell dedujeron que el perfil que mejor se adapta a ellos es la curva Rankine, con un 99,75% de coincidencia.<sup>3</sup> La segunda curva más ajustada a la forma de los arcos es la elipse con el 97,82%, mucho más que la catenaria y la parábola, las dos curvas que recurrentemente señala la bibliografía.<sup>4</sup> La comprobación es interesante porque la curva Rankine requiere de complejas operaciones matemáticas para su trazado.

## PLANTEAMIENTO DEL TEMA

El Palau Güell es un magnífico palacio urbano que encarnó el paso de Gaudí a la madurez como arquitecto, constituyendo una de sus obras cumbre pese a ser aún muy joven a la hora de proyectarlo y construirlo.

Las recurrentes afirmaciones de que los arcos gemelos de la fachada principal del Palau Güell son de perfil catenárico o parabólico seguramente se basan en el parecido que a simple vista presentan con otros arcos que Gaudí utilizó en esta y otras obras, los que sí responden a los perfiles mencionados, aunque debe decirse que generalmente son clasificados con cierta liviandad.



Los arcos de la fachada del Palau Güell (Foto Fundación Antonio Gaudí)

El objeto del presente escrito es esbozar una hipótesis sobre el procedimiento que pudo haber seguido Gaudí para el uso de esta figura difícil de dibujar en base a los conocimientos y medios de que disponía, e indagar en las motivaciones que le llevaron a su utilización.

Nadie había mencionado hasta ahora las curvas Rankine, seguramente porque no aparecen en los tratados de geometría elemental ya que a diferencia de las antes mencionadas no son trazables con la utilización de métodos gráficos.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

Quien les da nombre es William Rankine (1820-1872), ingeniero y físico escocés que se cuenta entre los pioneros de la termodinámica. Se conoce como “curva Rankine” a la que describe el ciclo de conversión del calor en trabajo, base del proceso de las centrales termoeléctricas. Sus tareas profesionales le llevaron también a desarrollar un método de trazado de curvas aplicable a los tendidos ferroviarios.<sup>5</sup>

Fue además autor de tratados de física aplicada que abarcaron diversas ramas de esta ciencia. Sus numerosos estudios alcanzaron el terreno de la construcción y en especial el de la mecánica aplicada.<sup>6</sup> En un texto que citaremos más adelante Rankine explicó las propiedades de los arcos sujetos a cargas verticales variables bajo ciertas condiciones, a los que denominó “arcos estereostáticos”.

Porqué Gaudí quiso dar a los arcos del Palau Güell una forma bastante parecida a otras curvas de sencillo trazado, como las cónicas o la catenaria, pero que en cambio requiere de complejas operaciones para su delineación es asunto a dilucidar. Igualmente lo es la falta de correspondencia de esa curva con la que dicta el estado de cargas de la fachada, como veremos en el desarrollo de este escrito.

Cabe decir que Gaudí siempre estuvo abierto a incorporar inteligentemente técnicas ajenas a la arquitectura. Así por ejemplo cuando encargó a un taller naval el doblado de los perfiles laminados que soportan la ondulada fachada de la Casa Milà.<sup>7</sup> O al valerse de forma inédita de la fotografía como herramienta de diseño para la iglesia de la Colonia Güell.<sup>8</sup>

Y en cuanto a los recursos económicos puestos a su disposición en la construcción de este palacio, es sabido que fueron cuantiosos

como lo refleja la conocida anécdota que involucró al secretario de Eusebio Güell.

El proyecto y construcción del Palau Güell fue intenso y rico en vicisitudes. Diversos cambios se sucedieron sobre la marcha afectando incluso elementos estructurales a fin de favorecer la funcionalidad.<sup>9</sup> Es ampliamente conocida la trabajosa definición de la fachada, que requirió al parecer de hasta 28 soluciones diferentes.<sup>10</sup> Ello no hace sino dejar claro que la forma de los portales no fue algo que surgió al azar sino como fruto de un proceso en que intervinieron factores diversos: mecánicos, constructivos, funcionales y simbólicos.

Como ávido lector de Viollet-le-Duc Gaudí habrá tomado nota de lo que el maestro recomendaba en su “Dictionnaire” sobre abstenerse de resolver las cuestiones de equilibrio por fórmulas algebraicas que “son casi siempre inútiles para el práctico”.<sup>11</sup>

## ALGUNOS CONCEPTOS GEOMÉTRICOS Y MECÁNICOS SOBRE ARCOS

Para el desarrollo de este estudio es conveniente repasar algunos conceptos sobre el trazado y las propiedades de algunos perfiles de arcos. Geométricamente un arco es una curva continua que une dos puntos. En arquitectura el concepto alcanza otra dimensión dada su condición de elemento estructural. El perfil históricamente más utilizado para el trazado de arcos fue el circular, lo que tiene explicación en la sencillez de su construcción aunque como sabemos y luego ampliaremos no es por lo general la forma que dicta la estática.

El círculo es parte de la familia de las cónicas, figuras que pueden trazarse a partir de secciones planas de un cono. En su caso es una sección perpendicular al eje. La condición geométrica fundamental del círculo es que todos sus puntos son equidistantes de un

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

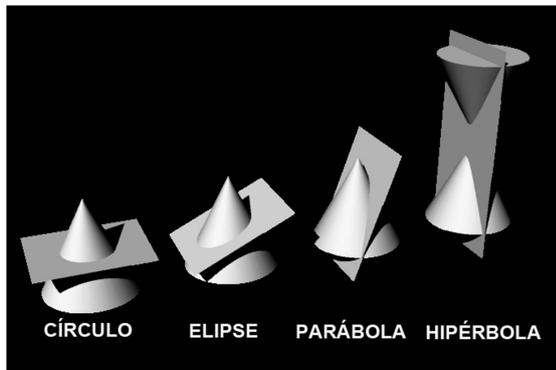
Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

centro o foco. Las elipses, otras curvas cónicas, son secciones planas en los infinitos ángulos que van desde los 90° hasta el ángulo que forma la generatriz del cono con su eje.

Cuentan con dos focos con los que todos los puntos de la curva guardan la siguiente relación: la suma de sus distancias a esos focos es la misma. Puede decirse que un círculo es un caso extremo de elipse en la que los dos focos están conjugados.



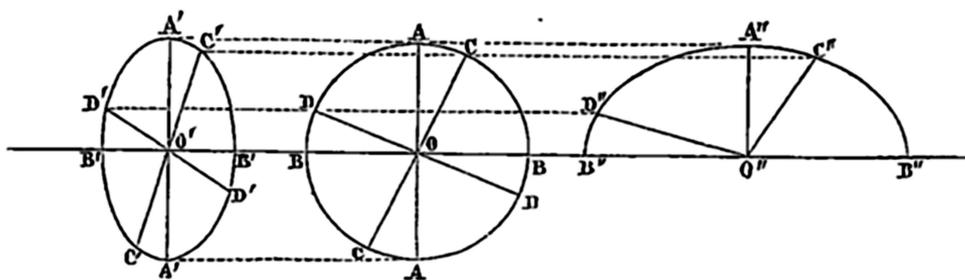
Generación de las curvas cónicas

El arco circular es la curva de equilibrio frente a las presiones producidas por un fluido uniforme. La presión normal en cada punto del arco es equivalente a un par de presiones conjugadas de la misma intensidad en direcciones perpendiculares, y la fuerza tangencial en un punto del arco es el producto de la presión normal multiplicada por el radio en ese punto.<sup>12</sup> Al ser el radio igual en todos los puntos la fuerza a lo largo de la curva es siempre la misma.

Si establecemos un sistema de coordenadas ortogonal y todas las presiones en una de las direcciones son multiplicadas por un valor constante, las dos presiones en cada punto serán diferentes entre ellas, y el arco destinado a soportar ese sistema de presiones será la proyección paralela de un círculo, es decir, una elipse, donde el radio es variable y también lo son entonces las fuerzas tangenciales a lo largo de la curva. El esquema de presiones actuantes no es ya el de un fluido uniforme.

A medida que una de esas presiones se hace infinitamente menor en comparación con la otra arribamos finalmente al otro caso extremo de elipse: la parábola, cónica trazada por un plano en el ángulo que forma la generatriz del cono con su eje. Uno de sus focos está en el espacio finito mientras que el otro está en el infinito. Los puntos de la parábola equidistan del foco y de una recta perpendicular al eje de la curva (una recta impropia) que llamamos directriz.

El esquema de presiones actuantes se asemeja ahora al habitual en arquitectura, dictado esencialmente por la fuerza de gravedad materializada por la presión paralela al eje de la curva, que en la disposición de un arco es la componente vertical. Así entonces, la parábola es la forma equilibrada de un arco sometido a un estado de cargas verticales repartidas de manera uniforme en la proyección horizontal.



Círculo y elipse. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876). P. 201

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*

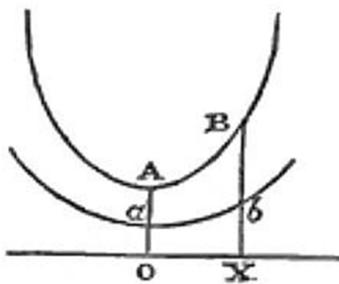


Fundación Antonio Gaudí®

Finalmente entre las cónicas se cuentan las hipérbolas, curvas de dos ramas trazadas por las secciones producidas por planos en los infinitos ángulos entre el eje y la generatriz de un cono doble.

## LA CATENARIA

Otra figura recurrente en la bibliografía gaudiniana, la catenaria, es la inversión de la curva formada por el propio peso una cuerda colgada de dos puntos. Un arco de directriz catenárica responde a un estado de equilibrio de fuerzas verticales crecientes en la proyección horizontal desde la clave hacia los apoyos. Esto sucede por tener que soportar cada punto del arco un peso idéntico. A medida que nos alejamos de la clave cada tramo sucesivo de la proyección horizontal soporta mayor peso porque incluye más puntos de la curva. Este aumento debe responder a unos valores precisos para formar una catenaria, los que pueden ser calculados de manera analítica y gráfica. Un modo sencillo de hacerlo es mediante el trazado de una línea recta horizontal en la clave y midiendo a intervalos regulares unas distancias específicas desde esa línea que determinan cada punto de la curva.



La catenaria y la catenaria transformada.  
De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN.  
(1862). P. 201

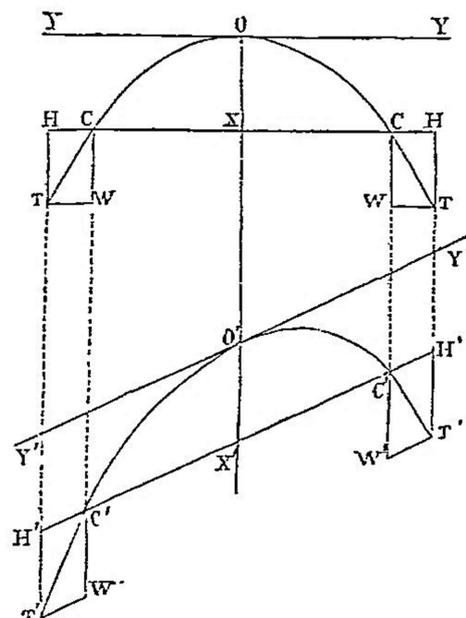
William Rankine, quien da nombre a la curva que adoptan los arcos de la fachada del Palau Güell, menciona en sus tratados la figura que

llama “catenaria transformada”, curva que se dibuja a partir de una catenaria preservando las coordenadas horizontales desde el eje, pero alterando las verticales en un determinado porcentaje. La figura resultante es otra catenaria dibujada en diferente escala donde la carga en cada tramo de arco es proporcional al área comprendida entre esa sección de arco y la horizontal de referencia (veremos que la llamaré “extradós”), y la intensidad en cada punto es proporcional a la ordenada de ese punto, dos propiedades de la catenaria.

## EL ARCO ESTEREOSTÁTICO

Es poco frecuente el estado de cargas capaz de definir una curva de presiones ajustada a una figura regular de fácil trazado (círculo, elipse, parábola o catenaria). Por lo general la incidencia de los pesos actuantes la apartan de esos trazados.

Fig. 91.



El arco estereostático. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876). P. 219

Determinados índices de variación de las fuerzas vertical y horizontal sobre un arco

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

generan curvas específicas: Llegamos aquí a un particular tipo de arco que el científico escocés describe en su bibliografía: el arco estereostático.<sup>13</sup>

Se trata de arcos destinados a soportar en un punto cualquiera una presión vertical  $V$ , creciente desde la clave a los apoyos y otra presión horizontal  $H$  (aunque puede ser inclinada), constante, situadas ambas en un mismo plano. Una condición que establece Rankine es que las cargas verticales deben estar distribuidas de forma simétrica respecto del eje que pasa por la clave del arco. Un perfil de este tipo es el que describen los arcos de los portales del Palau Güell.

La determinación matemática de un arco estereostático responde a cosenos hiperbólicos en combinación con funciones exponenciales y requiere de operaciones matemáticas que resultan muy complicadas para las necesidades de los arquitectos. Sin embargo estos arcos pueden ser trazados sobre la base de un modelo colgante situando pesos crecientes desde la clave hacia los apoyos representando las cargas actuantes en cada tramo.

## ARCO LINEAL BAJO CARGA VERTICAL

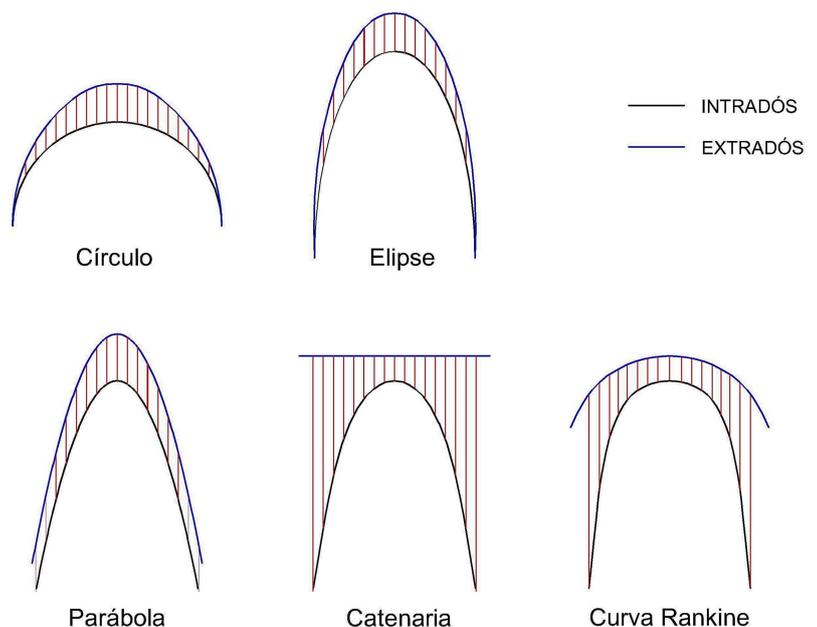
Para estudiar el comportamiento mecánico de los arcos acudimos nuevamente a Rankine, quien definió a los “arcos lineales” como aquellos formados por una cuerda invertida y rigidizada capaz de preservar su forma y resistir una compresión representando así un arco equilibrado bajo las fuerzas que actúan sobre él.<sup>14</sup>

Rankine puntualizó los conceptos de “intradós”, la figura del propio

arco, y “extradós”, la línea que une los extremos superiores de las verticales dibujadas hacia arriba desde puntos del intradós con longitudes que representan las intensidades de las cargas. Las curvas que hemos descrito más arriba poseen ciertas características en relación con estas definiciones.

Así, elipses y círculos, curvas cerradas que equilibran presiones normales iguales en todo su desarrollo, si están sometidas a fuerzas solamente verticales como la gravedad se adaptan a la presión normal vertical en la clave mientras que en los puntos en que las curvas son cortadas por su eje horizontal mantienen el equilibrio si la componente vertical es cero, mientras que la horizontal es máxima, igual a la presión normal. El extradós es así una curva alargada en dirección vertical. Un estado de cargas semejante, decreciente desde la clave hacia los apoyos, es infrecuente.

La parábola, como curva abierta (se cierra en el infinito) es como dijimos la curva que equilibra cargas verticales uniformemente



Intradós y extradós según la definición de Rankine

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

repartidas. Para que el peso de las enjutas no afecte ese esquema debe existir una carga considerable proveniente de la estructura superior. El extradós es otra parábola desplazada verticalmente.

Cuando la distribución de las cargas es tal que sus intensidades son crecientes en forma simétrica desde la clave en proyección horizontal las curvas de equilibrio son las estereostáticas, o “curvas Rankine”.

Un caso particular de este tipo de curvas es la catenaria. Ya hemos dicho que se puede trazar midiendo determinadas distancias desde puntos específicos de una horizontal normal al eje. Por ello el extradós de una catenaria es una línea recta perpendicular al eje.<sup>15</sup> Por lo mismo es el arco que mejor se adapta a un esquema constructivo con enjutas macizas que afectan la carga superior.

## EL ESTADO DE LA CUESTIÓN ACERCA DEL CÁLCULO ESTÁTICO DE ARCOS EN TIEMPOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PALAU GÜELL

En algún momento de la historia el dintel soportado por dos elementos verticales fue reemplazado por dos elementos lineales inclinados apoyados mutuamente ejerciendo fuerzas opuestas.

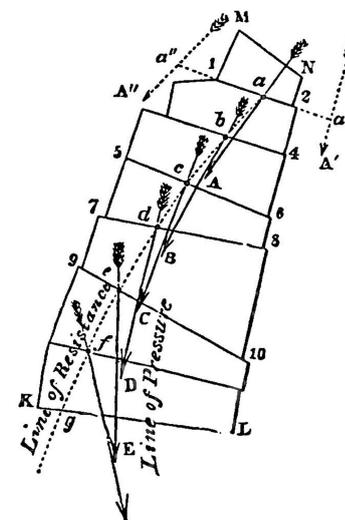
De allí a la idea primordial del arco hubo solo un paso: El agregado un tercer elemento intermedio, la clave. Comenzó así la acción del frotamiento y las fuerzas interactuantes entre ellos como responsables del equilibrio. El arco adovelado es la evolución de esa idea primaria, cuyos fundamentos esenciales siguieron siendo los mismos.

Para que esos esfuerzos generados en la estructura no afecten el equilibrio deben cumplirse ciertas condiciones geométricas de relación entre la flecha y la luz del arco. El uso de un determinado perfil no garantiza por sí

mismo la estabilidad. El problema fue históricamente resuelto con la adición de cargas para verticalizar las resultantes. Cuando no existían empujes significativos bastó con el peso de las enjutas. Las bóvedas fueron dotadas de contrafuertes, cuya evolución fueron los arbotantes. Igual ocurrió con los arcos fajones y las bóvedas de crucería. Todo ello hasta el siglo XIX se hizo con base en la experiencia y la intuición, sin fundamento técnico.

A lo largo de ese siglo evolucionó el concepto de “curva de presiones”. Los métodos de “Estática gráfica” tan populares en tiempos en que Gaudí estudiaba en la Escuela de Arquitectura de Barcelona, permitieron a los arquitectos contar con una herramienta sencilla para diseñar estructuras. Los arcos adovelados, elementos esenciales de la construcción y componentes de gran protagonismo en la arquitectura de ese siglo, requerían por entonces, antes de la irrupción del hormigón armado, que sus piezas resistentes contuvieran a la curva de presiones.

Henry Moseley enunció hacia 1843 que la teoría del equilibrio de una estructura queda



Línea de resistencia y línea de presiones.  
De MOSELEY, HENRY. (1843). P. 380

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

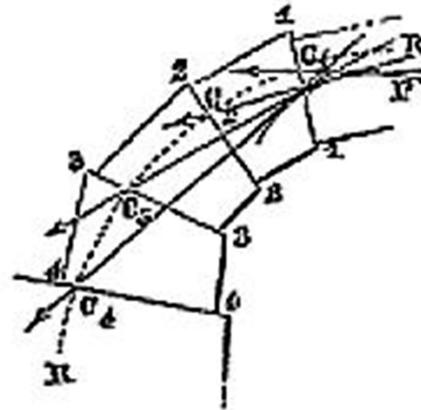
establecida por la línea que determina el punto de aplicación de la resultante de las presiones sobre las superficies de contacto (“línea de resistencia”) y por la línea que define la dirección de esa resultante (“línea de presiones”).<sup>16</sup> Las condiciones de equilibrio del sistema quedan satisfechas cuando esas líneas no exceden los límites del arco y cuando la segunda no incide en las juntas en un ángulo mayor que el ángulo límite de resistencia.<sup>17</sup>

William Rankine explicó la curva de presiones (llamada también “curva de equilibrio”) como la curva inscrita en el polígono formado por las líneas que pasan por todos los centros de resistencia (centros de presión en las juntas), como aplicación de los “arcos lineales”.<sup>18</sup>

La definió además como la sucesión de tangentes a una poligonal cuyas piezas y uniones son tan numerosas que su figura puede ser considerada como una curva continua que constituye la curva de equilibrio requerida.<sup>19</sup> Recogiendo conclusiones de contemporáneos suyos afirmó que la estabilidad de un arco es segura si un arco lineal, balanceado bajo las fuerzas que actúan en el arco real, puede ser dibujado en el tercio central de las juntas.<sup>20</sup> Una condición esencial es que todas las fuerzas que mantienen el equilibrio del arco deben ser presiones actuando de afuera hacia adentro.<sup>21</sup>

Para el trazado de la curva de presiones fueron desarrollados numerosos métodos que en general consistieron en establecer dos puntos de paso de la curva en cada semiarco: en la clave, el punto de aplicación del empuje horizontal, y en el “punto de ruptura”, en el intradós, situado en un ángulo de 60° con respecto al eje del arco, que es el punto en que la curva de presiones se encuentra con el intradós.<sup>22</sup> Por éste último pasa la

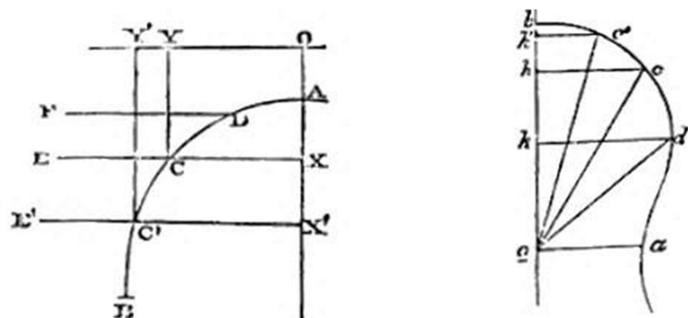
resultante de la porción de arco comprendida, con dirección tangente a la curva.



La Curva de presiones. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876). P. 256

La bibliografía dejó establecido que de entre todas las líneas posibles la que pasa por el límite superior del tercio medio en la clave, y por el borde interno del tercio medio en la junta de ruptura es la que ejerce menor empuje. Los diversos métodos adoptaron esta regla práctica. De esta forma se podía componer el triángulo que serviría de base para trazar el polígono de presiones con su tercer lado formado por la sumatoria de las cargas verticales de cada sección del arco, que representa el peso de toda la porción considerada aplicado en su centro de gravedad.

Rankine explica el fundamento del método: en un esquema de cargas verticales



Método para determinar las presiones que establecen el equilibrio. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862). P. 213

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

distribuidas de cualquier manera es posible determinar un sistema de presiones conjugadas que establezcan el equilibrio. Pueden ser resueltas gráficamente construyendo un polígono auxiliar al que se trasladan la tangente en un punto determinado (C) que representa la compresión a lo largo del arco, y la suma de las cargas soportadas por el arco AC (Oh). Cierra el triángulo el segmento hc que representa la componente horizontal.

En resumen, en tiempos de Gaudí se sabía que la estabilidad del arco estaba garantizada si la curva de presiones quedaba contenida en el propio arco, si su incidencia en cada junta era cercana a la perpendicular, y si los empujes en cada punto del arco y en sus apoyos (la componente horizontal de la resultante) podían ser absorbidos por alguna parte de la construcción, sea el propio arco o algún elemento supletorio.

## LOS ARCOS GAUDINIANOS

El interés de Gaudí por los arcos equilibrados soslayando prejuicios estéticos se manifestó desde sus primeras obras.<sup>23</sup> Ya antes de proyectar el Palau Güell había experimentado con el arco catenárico en la Cooperativa Mataronesa, en la Finca Güell y en la desaparecida cascada-mirador de la Casa Vicens.<sup>24</sup> En las dos últimas construyó arcos monolíticos experimentando con la bóveda tabicada. Esta técnica evolucionará hasta alcanzar el desarrollo de bóvedas con forma de superficies regladas alabeadas en diversas obras. Contemporáneamente al Palau Güell Gaudí utilizó arcos parabólicos de ladrillo en el Colegio Teresiano.

Es sabido su conocimiento de los métodos gráficos de diseño estructural y de los diferentes perfiles de arcos ajustados al estado de cargas. Gaudí se valió de los métodos gráficos tan en uso a finales del siglo

XIX, los que otorgaban confiabilidad. En ese sentido se hallaba inmerso en el espíritu de la época que pretendía conocer un estado posible de equilibrio de una estructura.<sup>25</sup> De ello dejó constancia en sus escritos de juventud.<sup>26</sup> El método gráfico en una versión simplificada por el propio Gaudí fue su herramienta para la determinación de la estabilidad de elementos bidimensionales.<sup>27</sup>



Arcos de las caballerizas de la Finca Güell  
(Foto Fundación Antonio Gaudí)

En numerosos casos los arcos se ajustaban a la curva de presiones así obtenida, priorizando la eficiencia mecánica por sobre los preconceptos estéticos. En esto Gaudí se diferenciaba de la generalidad de sus colegas quienes usaban este método para verificar que la forma previamente establecida cumpliera con las condiciones de equilibrio asegurándose de que la curva estuviera contenida en la figura diseñada.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

Además de los métodos gráficos Gaudí utilizó los modelos colgantes como herramienta de diseño. Aunque no existe documentación sobre la materialización de este tipo de maquetas hasta por lo menos los primeros estudios para una capilla no construida para el Park Güell de alrededor de 1900, es lícito especular con que pudiera haberlas utilizado con anterioridad, seguramente sin la complejidad que desarrolló en ese proyecto tridimensional y mucho menos en el del posterior proyecto de la iglesia de la Colonia Güell, aunque es verosímil que lo haya hecho en estudios en dos dimensiones.

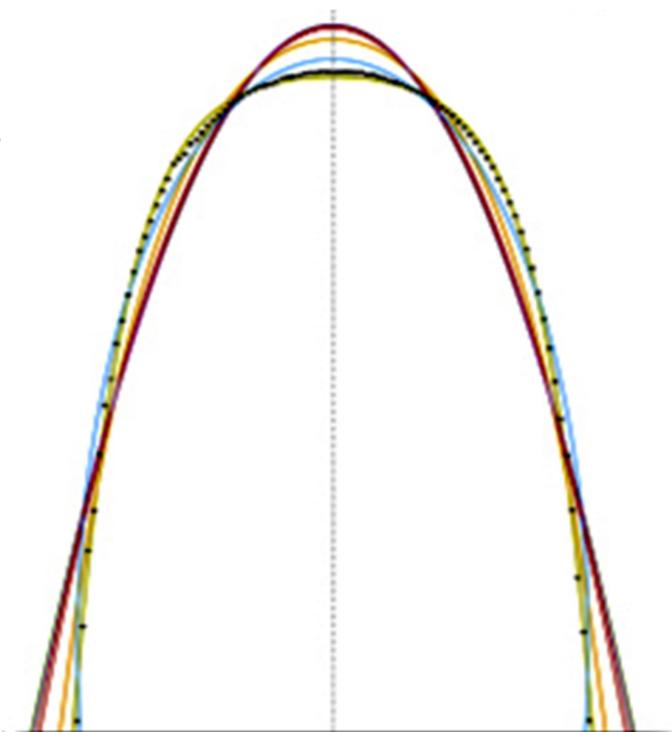
Algo más tarde, aproximadamente en 1908, para la construcción los arcos del ático de la Casa Milà, trazó las curvas partiendo de cuerdas colgadas formando catenarias a las que aplicaba pesos a escala que materializaban la influencia de las enjutas y tableros, como lo manifiestan las fotografías de la obra.<sup>28</sup>

Dados los conocimientos y experiencias que ya atesoraba en su juventud, podría haber utilizado esta técnica en el trazado de los arcos de la fachada del Palau Güell, procedimiento que debía conocer a través de los libros que gracias a sus biógrafos sabemos que asiduamente consultaba, los que reflejaban algunos experimentos en ese campo que se venían desarrollando desde dos siglos atrás. Uno de los textos que Gaudí seguramente consultó en sus lecturas en la biblioteca de la Escuela de Arquitectura fue el tratado de Jean-Baptiste Rondelet.<sup>29</sup>

Gaudí se valió de estos métodos sabedor de que las imprecisiones que pueden conllevar son poco significativas en el ámbito de la construcción. De allí procedía a elaborar las plantillas que eran trasladadas a la piedra o el ladrillo.

## LA DEFINICIÓN DE LA FORMA DE LOS ARCOS DE LA FACHADA DEL PALAU GÜELL

Como ya se dijo los arcos de la fachada del Palau Güell se ajustan a una curva Rankine con un 99,75% de coincidencia y a una elipse con el 97,82%. Sería atractivo sobre la base de esa aparentemente pequeña diferencia entre ambas suponer un intento por parte de Gaudí de trazar una elipse con un sencillo método geométrico en lugar de la compleja curva Rankine. La disimilitud del 1,93% representa sin embargo un valor considerable en la práctica, aun aceptando que toda construcción tiene márgenes de tolerancia: Para los 5,90 m. de altura de los arcos la discrepancia es en promedio de 11,4 cm. y alcanza alrededor de 16 cm. en algunos puntos según lo muestra el dibujo que



Comparación entre curva Rankine, elipse, parábola, catenaria, hipérbola y coseno hiperbólico aplicada a los arcos de la fachada del Palau Güell. De SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS (2016)

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

acompaña el estudio de Samper, González y Herrera. Allí se puede ver como la elipse se aleja hacia arriba en la clave mientras que en resto del arco se entrecruza con la curva Rankine.

Se puede comprobar gráficamente que los arcos que muestra la fachada del proyecto firmado el 30 de junio de 1886 tienen la misma directriz que los finalmente construidos, pese a existir algunos cambios como la ausencia de las dos tribunas de la segunda planta o la forma del remate. Este plano fue dibujado en escala 1:50, lo que supondría errores de más de 3 milímetros para un arco de unos 12 centímetros de altura. Además, de haberse pretendido dibujar una elipse es muy probable que se hubiera utilizado el conocido método del cordel fijado en los dos focos, que no deja margen al error.

Desde nuestra perspectiva son poco probables imprecisiones de esta magnitud en alguien como Gaudí, metódico e involucrado hasta el detalle en cada aspecto de sus obras.

De todo lo expuesto hasta ahora pueden ser remarcados los siguientes datos objetivos:

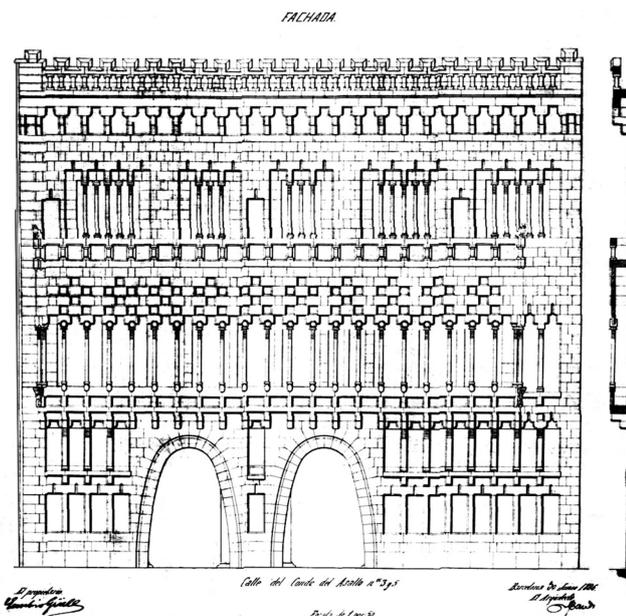
1º) Los arcos de la fachada del Palau Güell tienen una directriz muy ajustada a un arco Rankine, dato que surge de los estudios mencionados al comienzo que dejaron establecida la cuestión con fundamento científico. Las curvas Rankine son figuras de muy complicado trazado que requieren complejos cálculos matemáticos, aunque pueden ser generadas con una maqueta colgante.

2º) Los métodos gráficos eran de uso habitual entre los arquitectos como medio de verificar la estabilidad de una estructura, tal como se explicó más arriba y no repetiremos para no sobreabundar.

3º) En tiempos de Gaudí estaba documentado a través de diversa bibliografía el uso de modelos colgantes como herramienta de proyecto. Sobre la base de estos conocimientos se intentará una hipótesis acerca de la forma en que fueron proyectados los arcos de la fachada del Palau Güell, los factores intervinientes y las motivaciones que influyeron en la definición de su directriz.

El proceso se iniciará con un estudio de la curva de presiones definida por las cargas que actúan en la fachada del edificio según el método que documentalmentemente sabemos que usaba Gaudí.

Con este procedimiento gráfico se verificará su adecuación a la directriz del arco y la estabilidad de este elemento y se estudiará la posibilidad del uso de una maqueta colgante cargada con los mismos pesos. A continuación se cotejará la forma del arco finalmente adoptado con la alternativa de diseño que conocemos gracias a que fue publicada antes de la destrucción del archivo de Gaudí.<sup>30</sup>



Fachada del proyecto firmada el 30 de junio de 1886

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

Finalmente se intentará una determinación geométrica de la forma de los arcos basada en métodos gráficos y se esbozarán deducciones y conclusiones a partir de los análisis desarrollados y los resultados obtenidos a lo largo del estudio.

## TRAZADO DE LA CURVA DE PRESIONES CON EL MÉTODO GRÁFICO

A continuación se efectuará la aplicación a los arcos de la fachada del Palau Güell del método gráfico que utilizaba Gaudí para el trazado de la curva de presiones, consistente en la división del arco en secciones verticales, determinación de la dirección de la resultante en el punto de ruptura, dibujo del triángulo de fuerzas y composición de las fuerzas sobre el propio arco.<sup>31</sup>

En primer lugar se determinarán las cargas que intervienen. Para ello se tomarán como base los planos y los diversos estudios llevados adelante por los profesionales que intervinieron en trabajos de restauración del edificio.

### FACHADA:

Se trata de una fachada portante de piedra caliza de Garraf proveniente de las canteras que Eusebio Güell poseía en esa comarca al sur de Barcelona, de aproximadamente 70 cm. de espesor, aunque variable en su desarrollo vertical debido a la presencia de numerosas aberturas.

Éstas se sitúan en un esquema asimétrico. Contra los cánones académicos los portales de Planta Baja no están situados en el centro, aunque componen con otros elementos distribuidos en las plantas superiores un esquema de simetría axial con los arcos como protagonistas. Las diferencias entre la fachada del proyecto y la construida no tienen incidencia en este análisis ya que las cargas son prácticamente las mismas.

### ANÁLISIS DE CARGAS:

Las cargas provienen de la cubierta, la planta bajo cubierta, la planta segunda y la planta noble a lo largo de los 23,50 metros de ancho de la fachada. En ésta Gaudí situó una gran tribuna donde una sucesión de columnillas en dos hileras desfasadas acaba por regularizar la distribución de las cargas a lo largo de todo el paramento por sobre las claves de los arcos.

Sobre la Planta Baja hay un entresuelo horadado por las calles de acceso y egreso de carruajes (la altura de estas calles alcanza los 6,50 metros), parte del cual apoya sobre jácenas perpendiculares al plano de la fachada que descargan en el muro a 3,80 y 4,30 metros de altura. Cuatro de estas jácenas influyen directamente sobre los arcos de forma que se analizará más adelante.

Los 4 forjados que inciden sobre la fachada principal son, de arriba hacia abajo:

### CUBIERTA:

Según la descripción que efectuaron los restauradores del Palau Güell en base a catas realizadas, el sistema constructivo del forjado de la cubierta es el siguiente:

Envigado metálico y forjado a base de revoltón cerámico, con los senos rellenos de cascote de rasilla y mortero de cal, sobre los que se extiende un tablero formado por cuatro hojas de rasilla común de 29 x 14 x 2 cm., la primera a rompejuntas tomada con yeso, las dos hojas de encima en diagonal tomadas en espiga, y embaldosado aparejado en espiga.<sup>32</sup>

### PLANTA BAJO CUBIERTA

El forjado de la planta bajo cubierta, donde se situaban las habitaciones de servicio, es una estructura de madera formada por vigas de gran canto de 40 x 30 cm. en una dirección, y en la otra de 30 x 30 cm, giradas 45 grados sobre la que apoya una solera de diversas

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

capas de mortero y piezas cerámicas con un espesor de 15 cm.<sup>33</sup> Esta disposición responde a la necesidad de obtener el máximo aislamiento acústico, como lo demostró un estudio realizado al efecto.<sup>34</sup>

## PLANTA SEGUNDA:

El forjado de la planta segunda es una original estructura portante reticulada construida completamente con madera que aúna la función sustentante con la formal ya que queda a la vista como techo de los salones de la planta primera a modo de artesanado con tallas que simulan plafones.<sup>35</sup>

## PLANTA PRIMERA:

El forjado de la planta primera se forma con vigas de perfiles metálicos, como lo describen

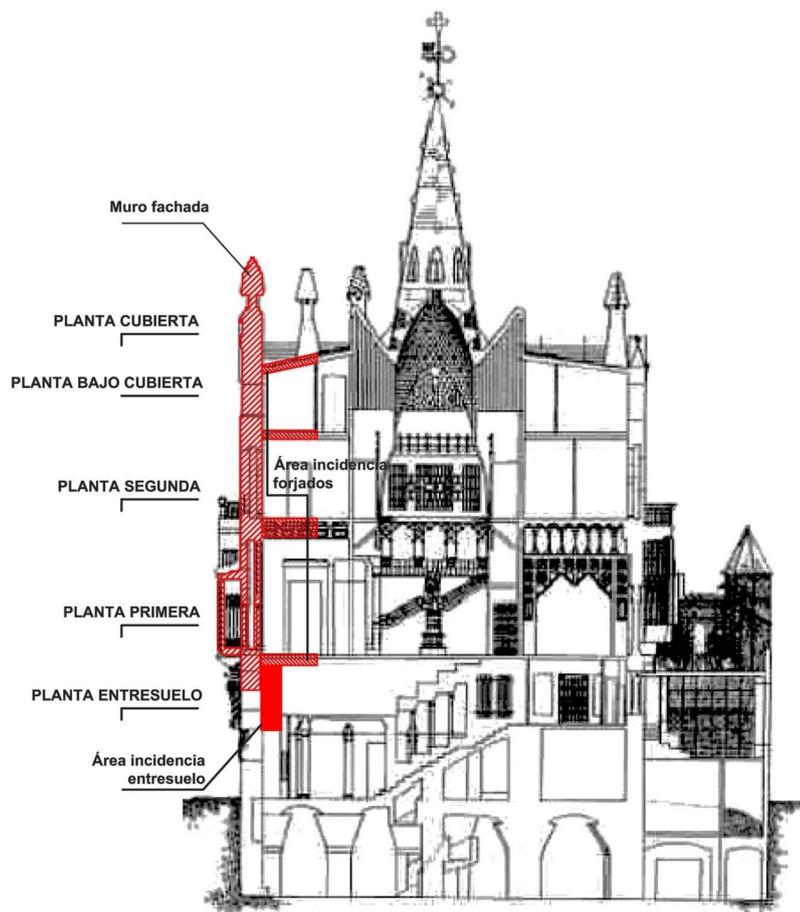
los restauradores.

## ENTRESUELO:

Como se dijo más arriba, 4 jácenas que reciben las cargas del entresuelo apoyan en esta fachada en la zona de los arcos de ingreso. Debido a razones funcionales estas jácenas descargan a diferente altura: 4,30 metros las centrales y 3,80 las laterales, situándose sus ejes a una distancia de 1,65 m. a ambos lados de los ejes de los arcos. Los arcos forman las puertas de acceso y egreso y tienen una conformación que combina la funcionalidad y la estática. Queda inscripto en cada uno de ellos un vano para el paso de carruajes con una altura de 3,60 m. y un ancho de 3,00 m. Su forma debió adaptarse a este requerimiento funcional.

Func

dí®



Sección transversal con estudio de las cargas que inciden sobre los arcos

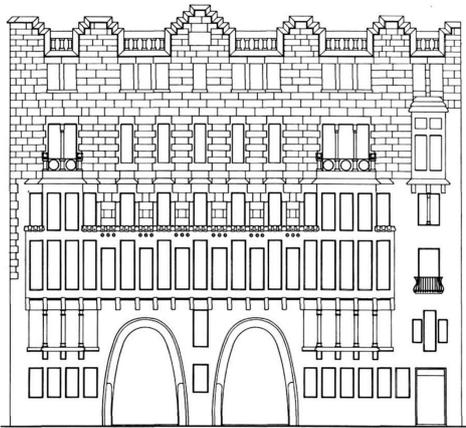
# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



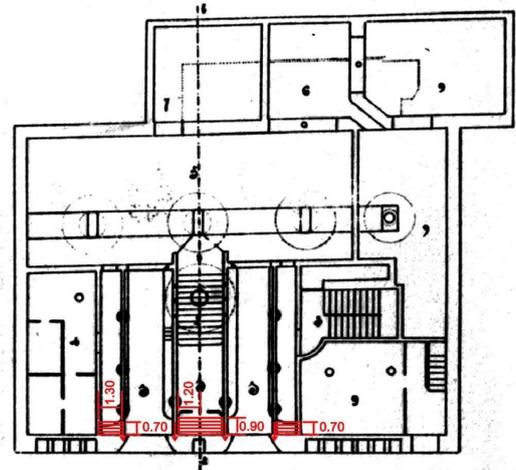
Fundación Antonio Gaudí®

**FACHADA ACTUAL**

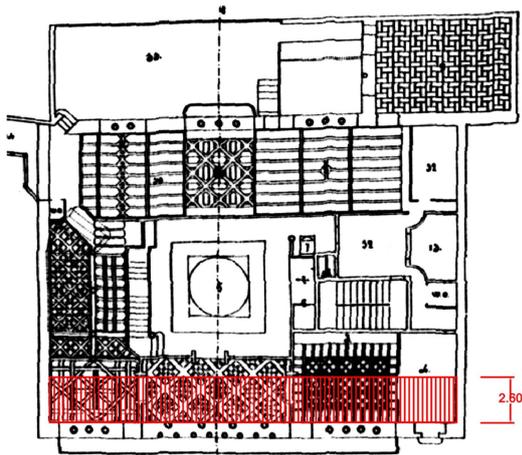


- PLANTA CUBIERTA
- PLANTA BAJO CUBIERTA
- PLANTA SEGUNDA
- PLANTA PRIMERA
- PLANTA ENTRESUELO

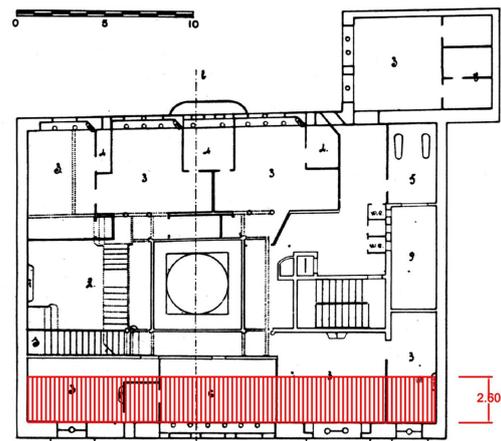
**CARGAS PLANTA ENTRESUELO**



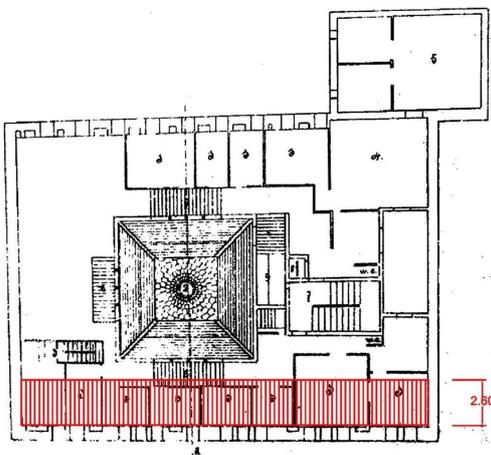
**CARGAS PLANTA PRIMERA**



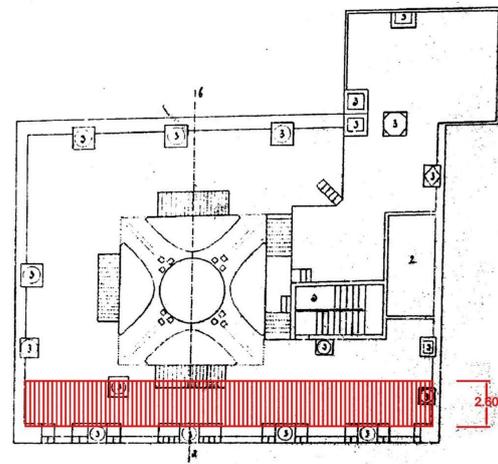
**CARGAS PLANTA SEGUNDA**



**CARGAS PLANTA BAJO CUBIERTA**



**CARGAS PLANTA CUBIERTA**



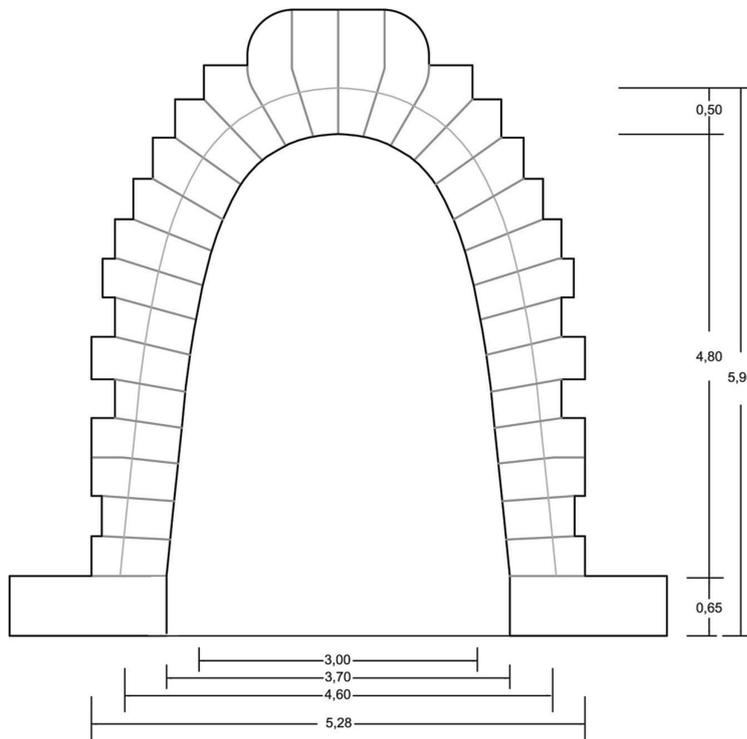
Fachada y Plantas con estudio de las cargas que inciden sobre los arcos

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®



Arco de la fachada del Palau Güell. Dovelado y medidas

ángulo de 60º desde el eje y el empuje horizontal en la clave se situó en el límite exterior del tercio central.

Una vez compuestas las fuerzas los resultados fueron los siguientes:

La curva en principio debía ser en su inicio, cerca de la clave, bastante semejante a una parábola como consecuencia de que las cargas son muy semejantes en esos tramos. Sin embargo su forma resulta modificada por la influencia de las jácenas puntuales de las jácenas del entresuelo que inciden en el tramo 8 alterando la curva que se deforma hacia adentro.

Actúa también en ese sentido el aumento progresivo de la carga en cada tramo como producto de la propia configuración del arco.

A partir de esta información se hizo el análisis de cargas que se adjunta en el Anexo I, del cual surgen los siguientes resultados:

**TOTAL CARGA REPARTIDA DEL MURO AL NIVEL BAJO FORJADO PLANTA BAJA (Forjados + muro fachada):**

22.460 kg/ml.

**CARGAS PUNTUALES ENTRESUELO:**

Jácenas laterales: 1.675 kg.

Jácenas internas: 1.867 kg.

**TRAZADO DE LA CURVA DE PRESIONES**

Para efectuar el trazado de la curva de presiones siguiendo el método que utilizaba Gaudí fueron aplicadas en una mitad del arco las cargas calculadas repartidas en tramos de largo uniforme (12 tramos de 0,20 m.). El punto de ruptura se situó en la junta en el

El equilibrio está asegurado ya que la curva de presiones está contenida en su totalidad dentro del arco entre la clave y el punto de ruptura. En este tramo del arco el recorrido es el recomendado por la bibliografía: por el límite interior del tercio central.

A medida que nos aproximamos a los apoyos la resultante tiende a alejarse del tercio central. Esto no supone peligro para la estabilidad ya que en esa zona el arco se confunde con el muro por medio de la trabazón de las dovelas. La carga vertical y el propio muro contrarrestan los empujes el conjunto resulta equilibrado.

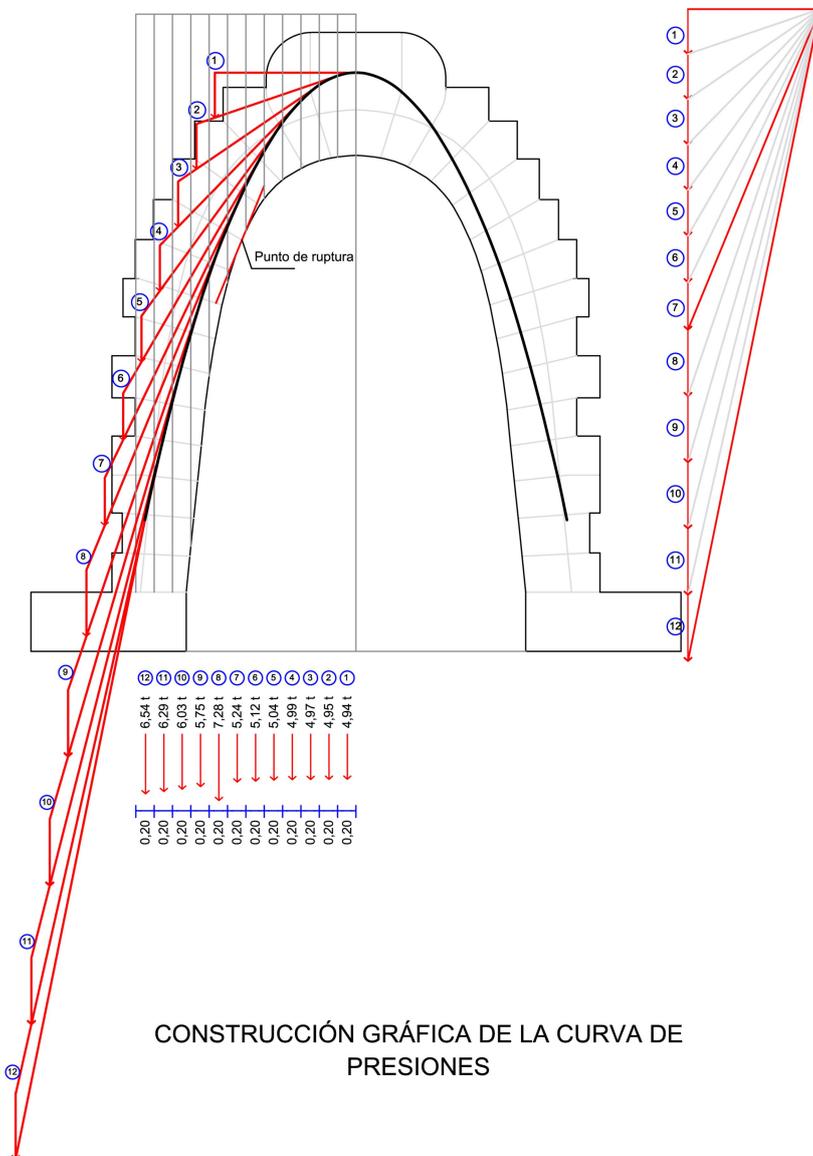
Como conclusión evidente se observa que la curva de presiones no se asemeja a la forma

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®



CONSTRUCCIÓN GRÁFICA DE LA CURVA DE PRESIONES

Construcción gráfica de la curva de presiones con el método usado por Gaudí

del intradós del arco. Esa falta de correspondencia no genera consecuencias para la estabilidad de la estructura aunque resulta llamativa teniendo en cuenta el uso que generalmente Gaudí hacía de los arcos no convencionales en arquitectura, ajustados a los dictados de la estabilidad. En este caso parecen primar otra clase de motivaciones, que pasan más por cuestiones funcionales y

formales-representativas que se analizarán más adelante.

Un tema a destacar es el dovelado diseñado por Gaudí para los arcos. Son llamativas las enormes piezas en la zona de la clave, de 1,35 metros de altura, cuya función es la de elevar el centro de gravedad donde se aplica la carga.

Es interesante también el hecho de que la clave está de manera poco usual dividida en dos piezas haciendo coincidir una junta con el eje del arco. Es también notable la forma de esas dovelas con un perfil redondeado generando una trabazón con los sillares del muro.

Finalmente cabe prestar atención a los tramos verticales que elevan el arranque de los arcos en 0,65 m. sobre el nivel del suelo, cosa no repetida por Gaudí en otras obras donde los arcos arrancan inclinados desde el suelo.

Todas estas observaciones no hacen sino agregar más interés a la formulación de una hipótesis sobre las posibles causas que influyeron en el trazado de estos arcos.

## PROBABILIDAD DE UTILIZACIÓN DE UN MODELO COLGANTE

Fue evaluada la posibilidad de que Gaudí se hubiese valido de una maqueta colgante para el trazado de los arcos de la fachada del Palau Güell mediante un experimento con un modelo que incorporase pesos en escala representando las cargas calculadas para los puntos del arco.

Se reprodujo el método que el propio Gaudí utilizó en el proyecto de la iglesia de la

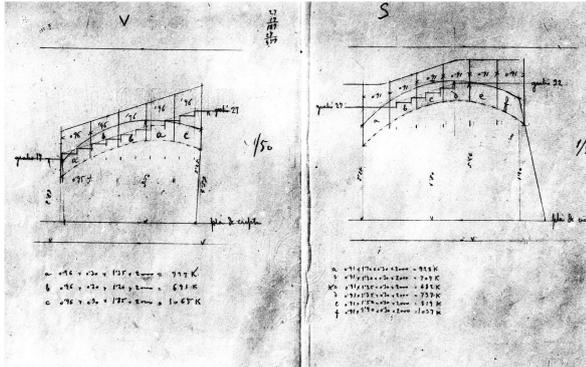
# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



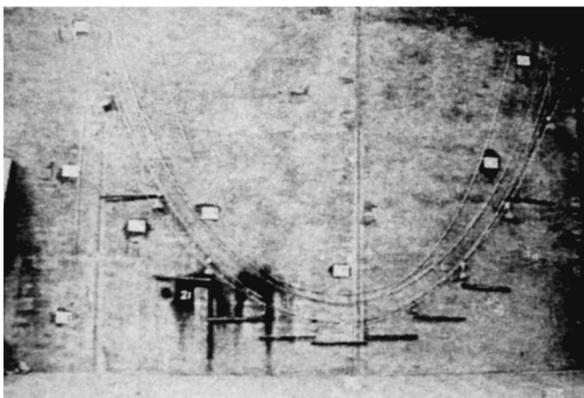
Fundación Antonio Gaudí®

Colonia Güell, según está documentado: estudio de las cargas, traslado a escala de los pesos a la maqueta colgante y verificación de la forma obtenida mediante fotografías. Así lo demuestran los documentos conservados aunque es necesario señalar que aquel caso era un complejo sistema tridimensional.



Hoja de cálculo para la maqueta colgante de la iglesia de la Colonia Güell

Para los arcos del ático de la Casa Milà Gaudí utilizó el mismo método. Aunque el relato del constructor Josep Bayó refiere solamente cadenas colgantes, sin pesos añadidos, la fotografía conservada deja ver lo que parecen ser pequeños sacos que contendrían pesos.



Fotografía tomada por el constructor Josep Bayó de uno de los modelos colgantes para la determinación de la forma de los arcos del ático de la Casa Milà

El resultado de este experimento fue que la maqueta colgante que surge según el esquema de cargas que incide sobre los arcos

MODELO COLGANTE



Fotografía de la maqueta de estudio cargada con los pesos de cada tramo a escala

del Palau Güell no adopta el perfil de éstos sino uno muy semejante al obtenido mediante el método gráfico.

## EL PROYECTO ALTERNATIVO DESECHADO

Ya se ha dicho que a través del libro de su biógrafo Josep F. Ràfols conocemos el dibujo de uno de los 28 estudios de fachada realizados por Gaudí para el Palau Güell. Un análisis de este plano felizmente conservado aporta algunos datos de interés para este estudio.

En primer lugar debe decirse que en líneas generales la fachada reflejada en el dibujo no difiere mucho de la finalmente construida en cuanto a la disposición de aberturas.

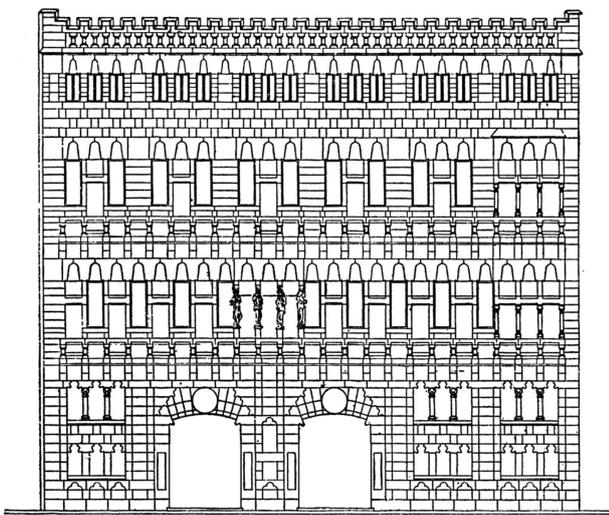
# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

Sólo cabe repetir las diferencias en las tribunas de la segunda planta y en el remate, y resaltar la presencia de cuatro esculturas que representan figuras humanas centradas con los arcos en la tribuna del Piso Principal, inexistentes en la versión finalmente construida. Pero esa es una cuestión decorativa que no hace a la materia aquí tratada.



Proyecto alternativo de fachada desechado publicado en RÀFOLS FONTANALS, JOSEP (1929)

La diferencia fundamental desde la perspectiva geométrica y estática se encuentra en la forma de los arcos del portal que en este caso adoptan un perfil muy rebajado, apoyados a una altura de 4,15 metros sobre jambas verticales que curiosamente no están reflejadas en el dibujo. Eso parece demostrar que esa parte de la fachada estaba en constante proceso de estudio y cambio. Los arcos tienen una luz de 3,20 metros si asumimos que las jambas son verticales, como parece.

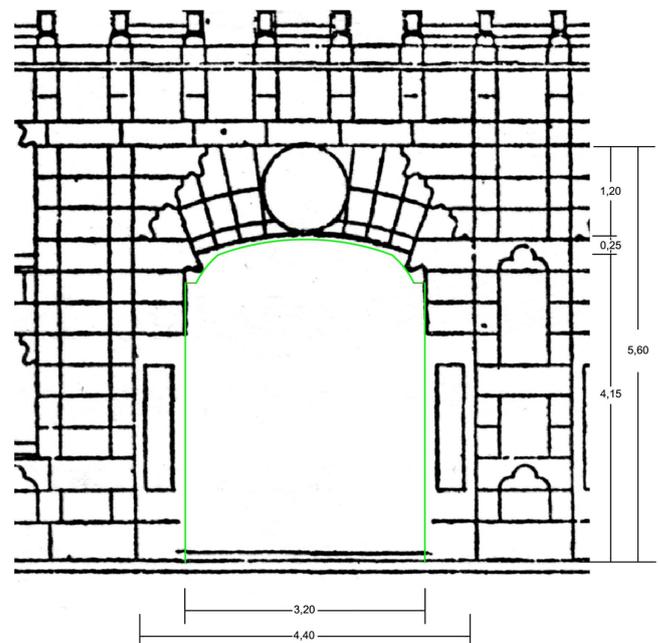
El dovelado está compuesto por piezas de ancho regular. Como en el arco finalmente construido, aunque menos acusadamente, las dovelas van aumentando su altura a medida

que se acercan a la clave, que en este caso parece ser una pieza central de 1,20 metros de altura. Hay allí un gran medallón circular en cada arco que serían las bases para las iniciales de Eusebio Güell que se construyeron dentro de los tímpanos de los arcos definitivos.

Puede verse otro ensayo de trabazón de las dovelas con el muro, en este caso no en forma escalonada sino con elaboradas curvas y contracurvas. Recuérdese que los arcos que se llevaron a la práctica presentan un redondeado solamente de la parte superior en las dovelas de la clave.

Con fines experimentales se procedió a dibujar sobre este arco la curva de presiones con el método gráfico de Gaudí. Como en el caso anterior se dividió el medio arco en tramos de 0,20 m. cada uno, en este caso resultando 11. El cálculo de las cargas de cada tramo se desarrolla en el Anexo II al final de este estudio.

El punto de ruptura quedó situado en el arranque del arco tal como lo formula la



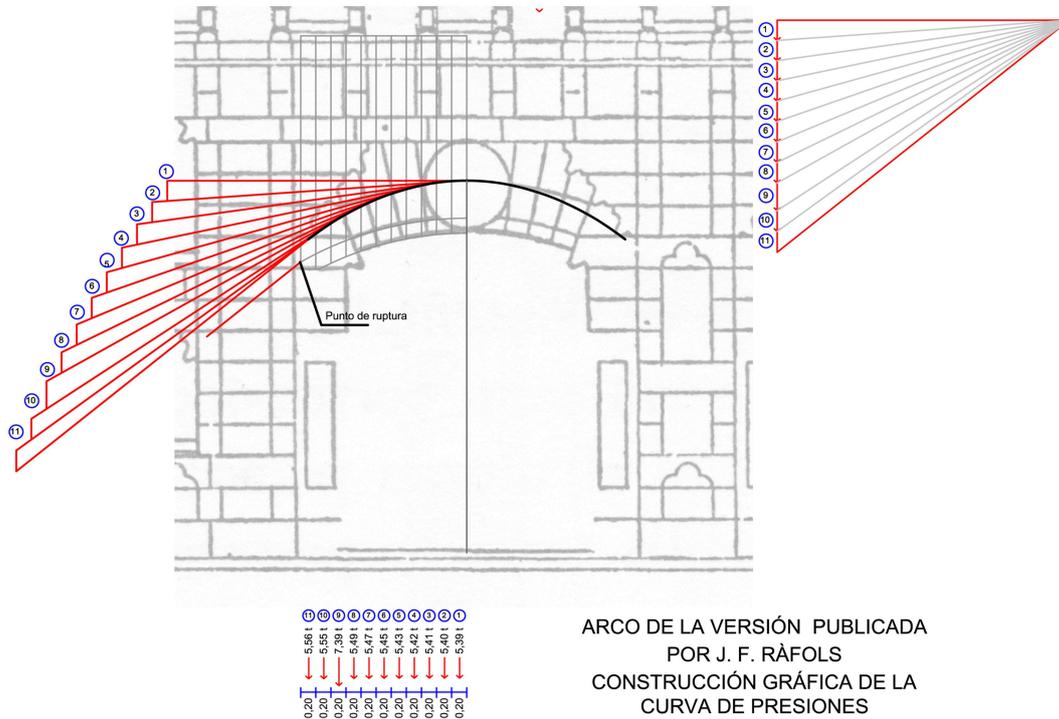
Arco del proyecto alternativo desechado

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®



ARCO DE LA VERSIÓN PUBLICADA  
POR J. F. RÀFOLS  
CONSTRUCCIÓN GRÁFICA DE LA  
CURVA DE PRESIONES

Construcción gráfica con el método que utilizaba Gaudí de la curva de presiones del arco de la versión alternativa desechada

Fundación Antonio Gaudí®

bibliografía de la época cuando el semiarco tiene un desarrollo menor que  $60^\circ$ .<sup>36</sup>

La forma de la curva obtenida se asemeja a una parábola debido a que la carga es muy similar en todos los tramos excepto en aquel que recibe las jácenas del entresuelo, ya sobre el apoyo.

En la última dovela (zona de apoyo) la curva escapa del tercio central hacia afuera, aunque ello no provocaría colapso al contar con la oposición de los muros de la fachada que absorberían ese empuje y equilibrarían el conjunto.

## DEFINICIÓN DE LA FORMA DE LOS ARCOS

En la determinación del perfil de los arcos incidieron condicionantes diversos además de los estrictamente estáticos: Encontramos factores funcionales, factores geométricos y

factores simbólicos y representativos. Analizaremos cada uno de ellos:

## FACTORES FUNCIONALES

Gaudí dimensionó las puertas en base a la necesidad funcional de permitir el ingreso y egreso de grandes carruajes. Definió así un vano de 3,20 m. de ancho y 3,75 m. de altura que se elevaba en el centro hasta los 4,35 metros aproximadamente, dimensiones que encajan con comodidad en el proyecto desechado con los arcos rebajados.

Aparentemente debían ser unas medidas holgadas para las necesidades funcionales porque el perfil definitivamente adoptado en la construcción aloja unas puertas algo menores, de un ancho de 3,00 m. y una altura de 2,95 m. que en la parte central alcanza los 3,65 metros por debajo el tímpano, como se grafica.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*

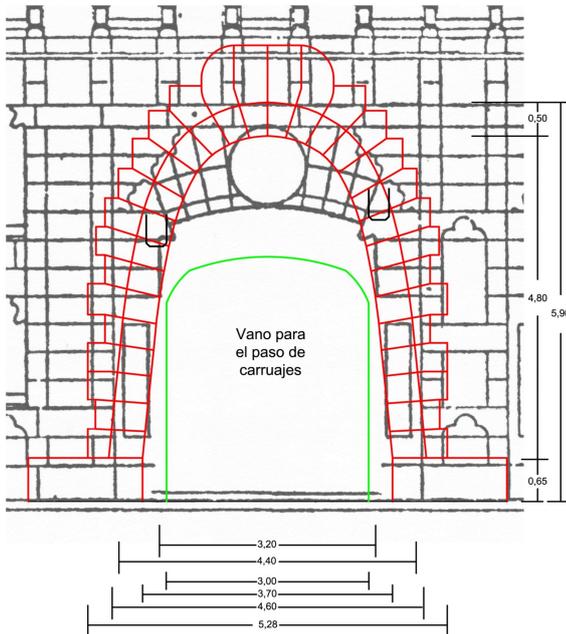


Fundación Antonio Gaudí®

## FACTORES GEOMÉTRICOS

Ya se ha hablado de algunas relaciones entre curvas regulares y determinados estados de cargas. También se llegó a la conclusión de que la directriz más adecuada desde el punto de vista de la estabilidad en el caso que nos ocupa es una curva bastante semejante a una parábola cerca de la clave para luego extenderse hacia afuera a medida que se va acercando a los apoyos.

Si cotejamos esta curva con el intradós de la curva real trazando una parábola que pase por la clave y los apoyos aparece evidente la diferencia: el arco diseñado por Gaudí es mucho más abierto que la parábola, y que la elipse y la catenaria. Es, como lo señalaron Samper, González y Herrera, una curva Rankine, una "curva estereostática" que resulta de la aplicación de fuerzas verticales

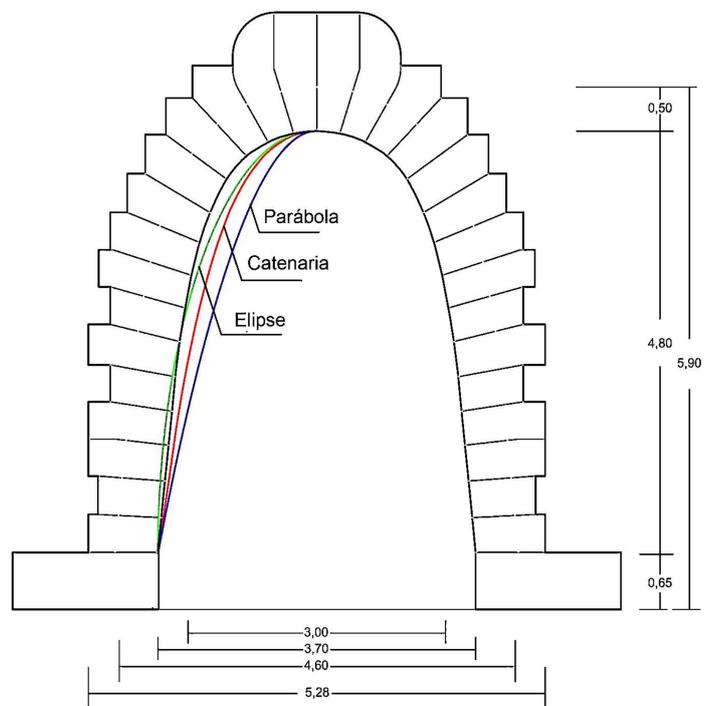


El vano para el paso de carruajes en el arco construido y la versión descartada superpuestas

Fundación Antonio Gaudí®

Para ello debió entrar en juego la habilidad de Gaudí para adaptar los recursos a sus intereses cuando optó por elevar en 65 cm. los puntos de arranque de los arcos mediante la incorporación de unos pequeños tramos verticales. De esta forma quedó solucionado el problema del paso de los carruajes ya que toda la superficie necesaria quedó de esa manera inscrita con comodidad dentro del arco.

Estos parecen ser los únicos condicionantes funcionales que intervinieron en el trazado del perfil de los arcos.



Comparación entre el arco construido, la elipse, la catenaria y la parábola

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



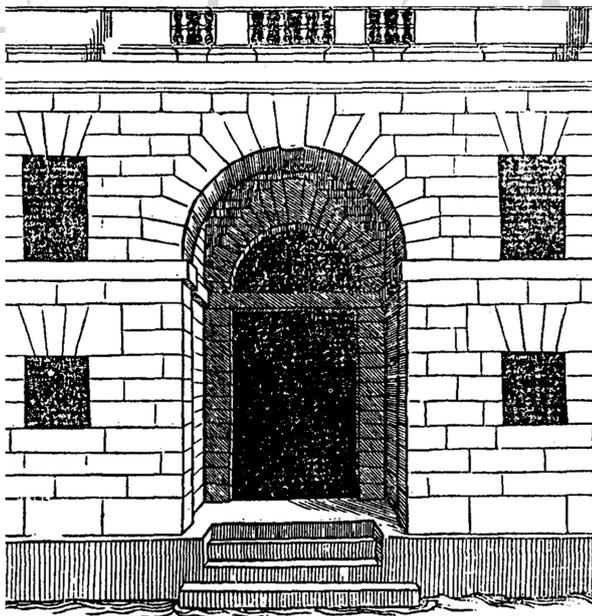
Fundación Antonio Gaudí®

variables y fuerzas horizontales constantes sobre la curva.

Esto nos conduce directamente a analizar los factores de tipo simbólico-representativo, que nos permitirán formular una hipótesis sobre la inusual forma de los arcos.

## FACTORES SIMBÓLICO-REPRESENTATIVOS

Eusebio Güell estaba decidido a que su Palacio fuese un paradigma de modernidad. La coincidencia de su construcción con el acontecimiento internacional más importante vivido por Barcelona hasta entonces, la Exposición Universal de 1888, no fue casual. Güell deseaba asombrar al mundo con una obra excepcional, y lo logró. Se preocupó de publicitarlo en revistas nacionales e internacionales,<sup>37</sup> y el edificio fue visitado por reyes y presidentes.



Sección del dibujo de un palacio. El texto reza: "Delantera" (fachada) hecha a la manera que se acostumbra en Venecia. Del Libro IV de Serlio

Es difícil pensar que semejante dedicación proveniente una persona tan activa y emprendedora no estuviese ligada a una implicación personal en el diseño del edificio y en especial de su imagen pública, la fachada principal de su gran palacio, que debía ser deslumbrante.

Son también muchas las referencias a una relación entre Güell y Gaudí que fue mucho más lejos que una simple interacción entre cliente y arquitecto. Eran amigos y coincidían en su visión del arte -y la arquitectura en especial- como vehículo para comunicar ideas. La Finca Güell acabada poco tiempo antes con su simbolismo fundado en la mitología griega revisada a través del poema L'Atlàntida es un muy claro ejemplo.

Todo ello sugiere que de común acuerdo Gaudí y Güell habrían optado por la solución más osada formalmente para los arcos del palacio: recurrir a trazados no tradicionales. La catenaria había sido utilizada en las caballerizas y el mirador construidos en Pedralbes, pero en ese caso se trataba de un edificio de servicios y una construcción secundaria. Ahora debían ser la cara visible de un gran palacio.

No ajena a la forma de los arcos debe haber sido el interés por dotar al ingreso al edificio de unas enormes iniciales de su propietario. Las elaboradísimas iniciales "E" y "G" de hierro forjado que se sitúan en los tímpanos de los arcos seguramente eran muy importantes para su dueño para permanecer encerradas en unos círculos sobre los arcos de ingreso, como se muestra en la alternativa desechada. Debían componer junto con el espectacular escudo situado al centro un conjunto impresionante.

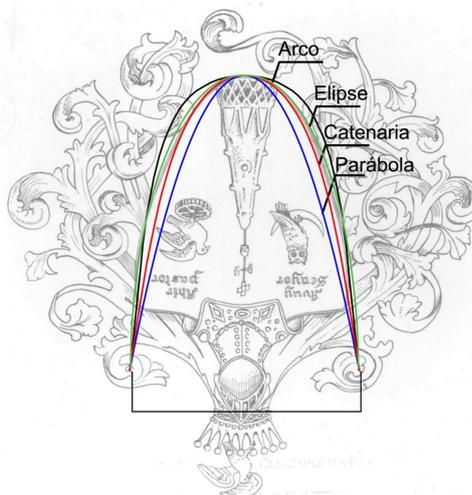
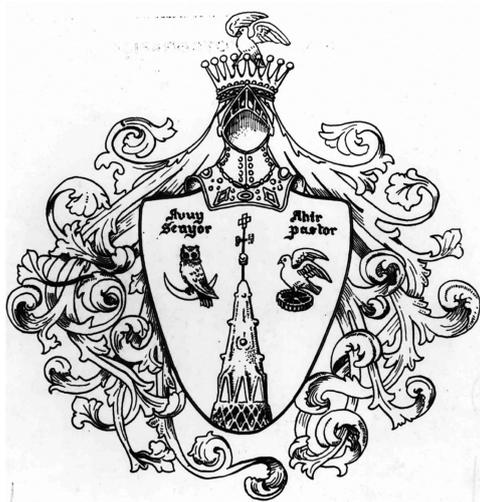
# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

EL ESCUDO NOBILIARIO DE EUSEBI GÜELL  
PUBLICADO POR JOAN BERGÓS  
COMPARACIÓN CON EL ARCO DEL PALAU  
GÜELL, LA ELIPSE, LA CATENARIA Y LA  
PARÁBOLA



El escudo nobiliario de Eusebio Güell publicado por Joan Bergós y comparación con el perfil del arco del Palau Güell, la elipse, la catenaria y la parábola.

Los arcos finalmente adoptados con su gran desarrollo en anchura en la parte superior abren el espacio necesario para la situación de las iniciales de Eusebio Güell dentro de los tímpanos.

Se ha analizado antes el papel del dovelado en la estabilidad de los arcos. Tiene éste también una función representativa. No parece casual que se haya adoptado una forma palaciega con clara inspiración en Serlio. En ese contexto debe señalarse que no fueron pocos los paralelismos que han sido trazados entre Eusebio Güell y los señores renacentistas.

Esa vocación nobiliaria se refleja en el lema inscripto en el escudo que se afirma diseñó Gaudí para Güell: “Avuy Senyor, Ahir pastor” (“Hoy Señor, Ayer pastor”) que publicó Bergós.<sup>38</sup>

No deja de llamar la atención la forma del emblema: Está envuelto por una curva que contiene entre otras imágenes la cúpula del Palau Güell. Bergós la define como catenaria,

pero la curva en cuestión no es ni catenaria ni parábola, ni coincide con la forma del arco, sino que es muy semejante a una elipse como lo demuestra la superposición de esas curvas sobre el dibujo.

## UNA HIPÓTESIS SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA FORMA DE LOS ARCOS

Gaudí no dejaba detalles al azar. Todo en sus proyectos era meticulosamente estudiado y reelaborado muchas veces en el transcurso de la construcción. Numerosos testimonios dan cuenta de esto que es claramente observable cuando se profundiza en el estudio de sus obras.

Ello nos induce a pensar que un tema de diseño tan importante como la forma de los arcos de los portales de la fachada del Palau Güell debe atenerse a algún criterio. Hemos repetido a lo largo de este texto que no es catenaria ni parábola ni elipse y lo hemos verificado gráficamente. Hemos demostrado gráficamente y con un modelo que no

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

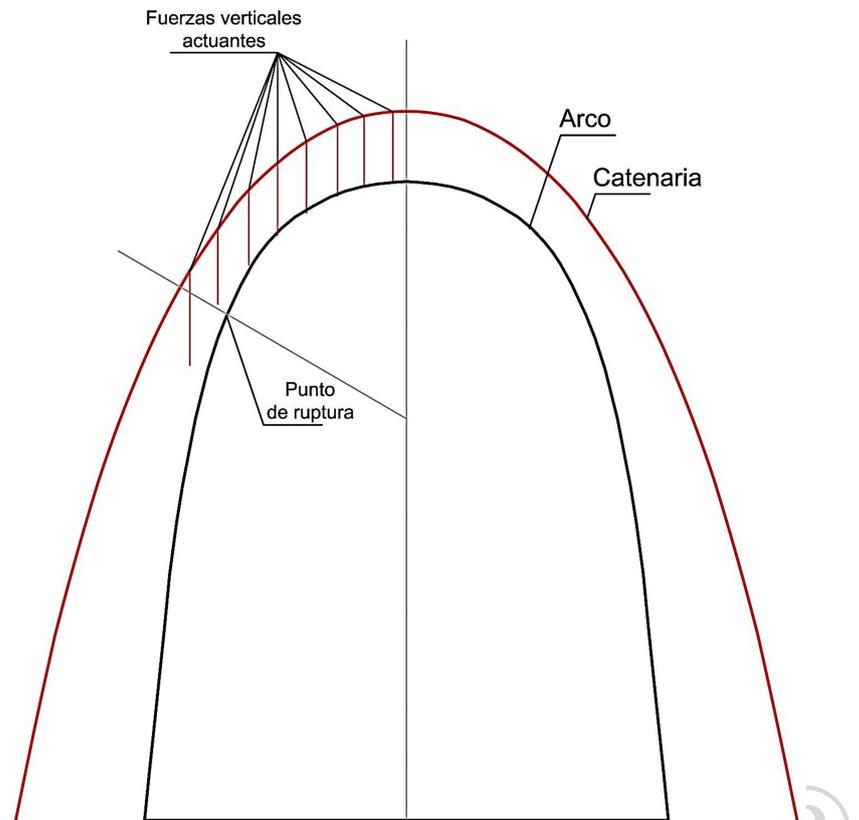
responde a la curva de presiones dictada por el estado de cargas.

Pero la forma no podía ser cualquiera. Debía responder a alguna razón, a alguna ley. Finalmente se adoptó el “arco estereostático” o “curva Rankine” para los portales, como quedó demostrado gracias a las investigaciones citadas.

Hemos analizado también los factores que influyeron en la determinación de esta inusual forma. No es menor la importancia del carácter simbólico de estos elementos. Su trazado debía estar ligado de alguna manera a una imagen de modernidad. Debía sintetizar arte y ciencia representando el espíritu de su época.

En esa línea de pensamiento y como hipótesis se incorpora a continuación un estudio geométrico que parece dar una explicación de cómo pudo haber llegado Gaudí al perfil definitivo de los arcos, o al menos a una sección de ellos. Debe aclararse que se trata de una conjetura que por cierto es imposible de demostrar.

Ya se habló de las relaciones estudiadas por W. Rankine entre la forma de un arco —el *intradós*— y la línea que él denominó *extradós* que surge de dibujar desde cada punto del arco líneas verticales que representan las intensidades de las cargas en cada uno de ellos, y unir los extremos de esas líneas.



Construcción del arco como intradós de un extradós de perfil catenárico mediante la aplicación de las fuerzas actuantes representadas por líneas verticales

Siguiendo a Rankine, si se aplica este procedimiento a los arcos del Palau Güell la curva obtenida dibuja una catenaria entre la clave y el punto de ruptura. Más allá de este punto la línea de extradós así obtenida se aparta de la curva.

Lo que aquí se propone es que la curva del arco surgiría aplicando inversamente el procedimiento: partiendo de una catenaria ejerciendo de extradós pueden ser trazadas hacia abajo las verticales representando las cargas en cada punto. Los nuevos puntos así obtenidos dibujan una curva que sería el arco definitivo.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell.

## Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

Se trata de un procedimiento en el cual únicamente intervienen medios gráficos. Una catenaria es fácilmente dibujable con métodos que Gaudí debía conocer al haber sido publicados por ejemplo por Rondelet, como se dijo antes. Desde esa curva obtenida por métodos gráficos considerada como extradós se pueden aplicar de la forma indicada las fuerzas actuantes ya calculadas y trazar la curva del arco, que sería el intradós.

El método no es asimilable a la catenaria transformada, curva que se dibuja partiendo de una catenaria preservando las coordenadas horizontales desde el eje pero alterando las verticales en un determinado valor constante de forma que se mantiene la condición de que la intensidad en cada punto es proporcional a la ordenada trazada desde ese punto, tal como fue explicado antes.

El concepto en cambio se ajusta a la definición de arcos estereostáticos, resultado de distribuir cargas verticales variables de forma simétrica respecto del eje que pasa por la clave del arco.

En cualquier caso es necesario repetir que esta forma de dibujar el arco explicaría la forma de la curva entre la clave y el punto de ruptura, pero no su continuidad hasta los apoyos.

Lo dicho no pasa de ser una especulación, la constatación de algo que podría ser nada más que una coincidencia. Como también puede serlo en definitiva la gran semejanza del perfil del arco con la curva Rankine.

Las razones que condujeron a Gaudí a dotar de esa forma a los arcos y el método usado para trazarlos quedarán como incógnitas a dilucidar. Quizás el lamentable incendio del taller de la Sagrada Familia en 1936 se llevó también la respuesta a estos interrogantes.

### CONCLUSIONES

De todo lo arriba analizado llega ahora el momento de extraer unas conclusiones y comentarios.

La forma de los arcos de los portales del Palau Güell parece ser una decisión estética y simbólica asociada a las aspiraciones representativas del propietario, Eusebio Güell, subordinando la correspondencia con una directriz que estuviera dictada por las condiciones estáticas.

Los arcos adoptados cumplen con las condiciones de equilibrio, como se demostró gráficamente, pero no siguen la curva de presiones. Cómo se trazó y se trasladó su directriz a la piedra es algo que queda en conjeturas.

La forma de construir arcos por parte de Gaudí fue proyectarlos en numerosos casos siguiendo el perfil resultante de las condiciones de carga. Eso le garantizaba la estabilidad, como pudo aprender de la bibliografía de que disponía. En ello marcaba diferencia con la mayoría de arquitectos quienes usaban los métodos gráficos para verificar la estabilidad de las formas proyectadas. En este caso se apartó de su regla, seguramente de acuerdo con su cliente y amigo.

En el supuesto de que hubiera utilizado aquí un modelo colgante con pesos representando las cargas a que está sometido el arco con el objeto de lograr la forma mejor adaptada al equilibrio, por algún motivo Gaudí no adoptó finalmente ese perfil. Posteriormente se valdrá del método de la maqueta para los arcos del ático de La Pedrera y luego desarrollará un sistema tridimensional para el diseño de un edificio entero: la iglesia de la Colonia Güell.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell.

## Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

Sin embargo las cuestiones de estabilidad no fueron ajenas al diseño de los arcos del Palau Güell: su perfil considera la incidencia de las cargas de las jácenas del entresuelo. Por otra parte la gran altura de las dovelas de la clave eleva la curva de presiones y permite su conducción dentro de la zona segura en el punto de ruptura.

Desde el punto de vista de la funcionalidad la elevación desde el plano de suelo de los puntos de arranque de los arcos en 65 cm. permitió incluir en el vano del arco el espacio necesario para el paso de los grandes carruajes de la época.

Además el trazado de los arcos con la parte alta ensanchada permitió abrir el espacio necesario para alojar las escultóricas iniciales de hierro forjado del propietario en los tímpanos para satisfacer sus necesidades de representación.

No fue posible encontrar una razón geométrica o estática para la definición del perfil de los arcos. Solamente se ensayó como conjetura la existencia de algunas relaciones formales entre una catenaria y la sección del arco cercana a la clave a partir de interpretar a la primera como el extradós de la curva del arco.

Algunos datos importantes surgen del estudio de la configuración constructiva del Palau Güell. Es interesante señalar que esta parece ser la primera ocasión en que Gaudí se valió de perfiles metálicos para la construcción de los forjados en lugar de las vigas de madera que había usado en todas sus obras anteriores.

Se trataba por entonces de un material extremadamente novedoso en arquitectura residencial pese a tener ya un recorrido en obras de ingeniería o monumentales. Se

habían construido ya iglesias con estructura metálica a la vista, como Saint-Augustin de París, obra de Víctor Baltard de 1860-1871.

El primer uso arquitectónico estructural del acero en un edificio de oficinas data de 1884-1885, en la sede de la Home Insurance Company de Chicago proyectada por William Le Baron Jenney, donde la estructura metálica era parcialmente de este metal, solo en las plantas superiores.<sup>39</sup>

En 1889, cuando el Palau Güell estaba ya construido, el mismo Le Baron Jenney usará por vez primera una estructura sustentante completamente de acero en el segundo edificio Leiter, también en Chicago. Ese mismo año se construirían dos grandes obras destinadas a la propaganda de las posibilidades de las estructuras metálicas en la Exposición Universal de París: La Galerie des Machines y la Torre Eiffel.

Estos datos no hacen sino demostrar la enorme vocación de modernidad que infundieron Güell y Gaudí a este palacio, a modo de manifiesto constructivo, lo que explica su desapego por algunas formas tradicionales en favor de otras que fuesen capaces de transmitir los valores que deseaba representar. Por ejemplo lo evidencian los elementos estructurales metálicos que quedaron a la vista en la sala principal del edificio, cosa completamente inhabitual por entonces y casi un anticipo del expresionismo constructivo que se pregonaría décadas más tarde. Así podría ser explicada también la inusual directriz de los arcos del acceso principal, aunque en este caso hemos visto que su forma no surge del dictado de la mecánica.

Hasta tanto pueda demostrarse otra cosa, no existen elementos para negar ni afirmar que sea fruto de la casualidad el hecho de que su

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

perfil se asemeje notablemente a una curva Rankine. En cualquier caso, como se dijo, puede proponerse una hipótesis arriesgada como la aquí planteada sobre la forma en que se trazó este perfil, aunque sin responder a razones de estabilidad.

Gaudí era un arquitecto que aunaba como pocos todos los componentes de la arquitectura. Se le atribuye la expresión “es la estética y no la estática la que determina las formas”, al parecer en discrepancia con un artículo de su colaborador Joan Rubió.<sup>40</sup> El estudio de sus obras demuestra que todo en ellas tiene un porqué y todo responde a un principio general de unidad que, si se quiere expresar de un modo ya incorporado a la terminología gaudiniana, es producto de un concepto orgánico de la arquitectura.

Parece primar como idea general de la concepción de este palacio la vocación de homenajear a la modernidad encarnada en su propietario, Eusebio Güell. Es en ese marco que se expone esta hipótesis sobre las motivaciones de la forma de los arcos de la fachada del Palau Güell.

## NOTAS

<sup>1</sup> Parcialmente publicado en SCIORTINO, BIBIANA y ANDRUET, MARIO. Gaudí y la geometría. Revista Gaudí Club. Barcelona. Nº 14, Julio de 1995; Nº 15, Diciembre de 1995; Nº 16, Abril de 1996; Nº 17, Edición especial, Septiembre de 1996; y Nº 18, Marzo de 1997.

<sup>2</sup> Blas Herrera, del grupo Applied Geometry del Departament d'Enginyeria Informàtica i Matemàtiques (DEIM); Albert Samper, de la Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, y Genaro González, del Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Rovira i Virgili de Tarragona.

<sup>3</sup> SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS (2017).

<sup>4</sup> SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS (2016).

<sup>5</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. “Description of a method of laying down railway curves on the ground”. Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 2. 1843. Pp. 108-111.

<sup>6</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. A manual of applied mechanics. Griffin. London. 1858. Traducción al francés de la 7ª ed. por A. Vialay: Manuel de mécanique appliquée. Dunod. París. 1876.

RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. A manual of civil engineering. Griffin, Bohn and Company. London. 1862.

<sup>7</sup> BASSEGODA NONELL, JOAN. El Gran Gaudí. AUSA. Sabadell. 1989. P.514.

<sup>8</sup> Ibid. P.288.

<sup>9</sup> GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, JOSÉ LUIS Y CASALS BALAGUÉ, ALBERT (2005).

<sup>10</sup> RÀFOLS FONTANALS, JOSEP (1929).

<sup>11</sup> VIOLLET-LE-DUC, EUGÈNE EMMANUEL. Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle. Libraires-Imprimeries Réunies. Paris 1854-68. Tomo IV. P. 56.

<sup>12</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876) P. 203.

<sup>13</sup> Ibid. Pp.219-221.

<sup>14</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862) Pp. 202-203. (1876). Pp.190-191 y 200-201.

<sup>15</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862) P.203.

<sup>16</sup> MOSELEY, HENRY. (1843). P. 380.

<sup>17</sup> Ibid. P. 432.

<sup>18</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862) Pp. 202-203. (1876). Pp.190-191 y 200-201.

<sup>19</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862). Pp.186-188.

<sup>20</sup> Esta cuestión fue tratada a lo largo del siglo XIX por diversos estudiosos como Henry Moseley, Edouard Mery o Karl Culmann.

<sup>21</sup> RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862). Pp. 416-417. (1876). Pp.256-257.

<sup>22</sup> Ibid. P. 437.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

- <sup>23</sup> RUBIÓ BELLVER, JOAN (1913).
- <sup>24</sup> Existe una reconstrucción en el Museu de Les Aigües de Cornellà de Llobregat.
- <sup>25</sup> SCIORTINO, BIBIANA (2004). P. 113.
- <sup>26</sup> GAUDÍ, ANTONIO. Manuscrito de Reus. 1876-1879.
- <sup>27</sup> BERGÓS MASSÓ, JOAN. (1953) P.258.
- <sup>28</sup> BASSEGODA NONELL, JOAN (2003).
- <sup>29</sup> RONDELET, JEAN BAPTISTE. (1802). Pp. 70-74. Explica cómo se valió de un modelo para diseñar el arco catenárico que sostiene la columnata de la cúpula y la linterna de la iglesia de Sainte Génévieve, de París. Se refiere a la catenaria como la directriz adecuada para formar arcos y bóvedas y expone el método gráfico que permite obtener los puntos de la curva.
- <sup>30</sup> RÀFOLS FONTANALS, JOSEP (1929).
- <sup>31</sup> Es una simplificación desarrollada por el propio Gaudí del método que aprendió de su profesor en la Escuela de Arquitectura, Joan Torras Guardiola, quien a su vez lo tomó de Méry. SCIORTINO, BIBIANA. (2004).
- <sup>32</sup> GONZÁLEZ, ANTONI Y CARBÓ, PABLO (1990). P. 33.
- <sup>33</sup> Ibid. P. 66.
- <sup>34</sup> AUDIOSCAN ENGINYERIA DEL SO. Estudi d' allament acústic del Palau Güell. 1997.
- <sup>35</sup> GONZÁLEZ, JOSEP-LLUÍS Y CASALS, ALBERT. (2002). Pp. 58-66.
- <sup>36</sup> DUPUIT, J. Traité de l'équilibre des voutes et de la construction de voutes des ponts en maçonnerie, Dunod. Paris. 1870. P. 88.
- <sup>37</sup> Entre otras: Diari de Barcelona (17-12-1889); La Vanguardia (28-12-1889. suplemento. p. 8); Decorator and Furnisher (Enero 1892. pp. 145, 146, 217 y 219); American Architect and Building News. Boston (9-7-1892. p. 27); Academy Architecture and Architectural Review (VII. Vol. 9. London. 1er semestre 1896. p. 21); Ilustración Hispanoamericana (11-1-1891); Arquitectura Moderna de Barcelona (1900. Lám. XCII. Pp. 158-160); Arquitectura y Construcción (año X. Nº 163. Febrero 1906; Nº 169. Agosto 1906; año XI. Nº 178. Mayo 1907).
- <sup>38</sup> BERGÓS MASSÓ, JOAN. (1974). P.54.
- <sup>39</sup> GIEDION, SIGFRIED Space, Time and Architecture. The Growth of a New Tradition. Harvard University Press.

Cambridge (Massachussets). 1941. Ed. en español: Espacio, Tiempo y Arquitectura (2009). Ed. Reverté. Barcelona. P. 385.

<sup>40</sup> RUBIÓ BELLVER, JOAN (1913).

## BIBLIOGRAFÍA

- BASSEGODA NONELL, JOAN,  
-El arco de festón, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes, 3ª época, nº847, Vol. XLVI, nº20. Barcelona. 1985.
- Tradición e innovaciones técnicas en la arquitectura de Gaudí. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU, 2000.Pp. 97-102.
- Josep Bayó Font, contractista de Gaudí. Edicions UPC. Barcelona. 2003.  
ISBN: 8483016753  
ISBN-13: 9788483016756
- BERGÓS MASSÓ, JOAN.  
-Materiales y elementos de construcción. Estudio experimental. Barcelona. Bosch. 1953.
- Gaudí, el hombre y la obra. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona 1974.
- CHANDÍAS, MARIO E. Cómputos y Presupuestos. Ed. Alsina. Buenos Aires. 1983. ISBN 9505530099.
- GAUDÍ, ANTONIO. Manuscrito de Reus. 1876-1879. Original en Museo Comarcal de Reus.
- GONZÁLEZ, ANTONI y CARBÓ, PABLO. La azotea fantástica (la cubierta del Palau Güell). Informes de la Construcción, Vol. 42 n.º 408, julio/agosto, 1990.
- GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, JOSÉ LUIS. Understanding historical structures: Gaudí and the Palau Güell. CIMNE, Barcelona. 1998.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, JOSÉ LUIS y CASALS BALAGUÉ, ALBERT.

-Gaudí y la construcción. Catálogo de la Exposición Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción. Lunweg Editores. Barcelona. 2002. ISBN: 84-7782-724-9 (cartoné). ISBN: 84-7782-727-3 (rústica).  
-La insondable organización constructiva del Palacio Güell de Barcelona, obra de Antoni Gaudí. Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 27-29 enero 2005, SEdHC, Arquitectos de Cádiz, COAT Cádiz, 2005.

MOSELEY, HENRY. The mechanical principles of engineering and architecture. Longman, Brown, Green and Longmans. London. 1843.

RÀFOLS FONTANALS, Josep. Gaudí (1852 1926). Canosa, Barcelona 1929.

RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN.

-A manual of applied mechanics. Griffin. London. 1858. Traducción al francés de la 7ª ed. por A. Vialay: Manuel de mécanique appliquée. Dunod. París. 1876.

-A manual of civil engineering. Griffin, Bohn and Company. London. 1862.

RONDELET, JEAN BAPTISTE. Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir. M. A. Rondelet Fils. París. 1802.

RUBIÓ BELLVER, JOAN. Dificultats per a arribar la síntesis arquitectònica. Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña. 1913. Pp. 63-79. Trad. Castellana en Tarragó, Salvador et al. Antoni Gaudí. Ed. Del Serbal. Barcelona 1991.

SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS.

-Determination of the geometric shape which best fits an architectural arch within each of the conical curve types and hyperbolic-cosine curve types: The case of Palau Güell by Antoni Gaudí. Journal of Cultural Heritage. 2016, Pages 56-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2016.11.015>

-Classification by Type of the Arches in Gaudí's Palau Güell. Nexus Network Journal. September 2017  
DOI: 10.1007/s00004-017-0355-7

SCIORTINO, BIBIANA. Los conceptos estructurales de Gaudí. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2004.

## ANEXO I ANÁLISIS DE LAS CARGAS QUE INCIDEN SOBRE LOS ARCOS

Los arcos de los portales del Palau Güell reciben la carga repartida de la fachada y forjados hasta el nivel inferior del forjado sobre Planta Baja más la carga del tramo de muro entre el forjado sobre Planta Baja y el intradós del arco (las enjutas). Además en el tramo correspondiente soportan la carga de las jácenas del entresuelo.

### DATOS PARA EL CÁLCULO

Extraídos de los informes de los restauradores del edificio.

Forjados:

IPN 16: 17,90kg/ml

Para separación entre ejes 0,65: 1,52 ml = 27,1 kg/m<sup>2</sup>.

Relleno mortero: 1.600 kg/m<sup>3</sup>

Mampostería de ladrillo y mortero de cal: 1.700 kg/m<sup>3</sup>

Suelo de baldosas c/mortero: 20 kg/cm. de espesor

Cielorraso madera incluida estructura: 25 kg/m<sup>2</sup>

Sobrecargas: Se adopta una sobrecarga de 100 kg/m<sup>2</sup> como sobrecargas estáticas (muebles y objetos). No se consideran las sobrecargas dinámicas (personas).

Muros: Muro de piedra caliza: 2450 kg/m<sup>3</sup>

### 1. CARGAS DE LOS FORJADOS

#### Cubierta

Perfiles de acero.....27,10 kg/m<sup>2</sup>

Relleno mortero: 1.600 kg/m<sup>3</sup>

x 0,20 x 0,30/2 x 3.....144,00 "

Bovedilla: 20 x 2,5.....50,00 "

Tablero: 20 x 4 x 3.....240,00 "

Embaldosado: 20 x 2,5.....50,00 "

Cielorraso madera.....30,00 "

Total.....541,10 kg/m<sup>2</sup>

Superficie de incidencia por ml. de fachada: 2,60 m<sup>2</sup>

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

541,10 kg/m<sup>2</sup> x 2,60 m<sup>2</sup> .....1.406,86 kg

## Planta bajo cubierta

Estructura de madera.....245,00 kg/m<sup>2</sup>  
Embaldosado: 20 x 15.....300,00 “  
Sobrecarga:.....100,00 “  
Total.....645,00 kg/m<sup>2</sup>  
Superficie de incidencia por ml. de fachada: 2,60 m<sup>2</sup>  
645,00 kg/m<sup>2</sup> x 2,60 m<sup>2</sup> .....1.651,00 kg

## Planta segunda

Estructura de madera.....315,00 kg/m<sup>2</sup>  
Sobrecarga:.....100,00 “  
Total.....415,00 kg/m<sup>2</sup>  
Superficie de incidencia por ml. de fachada: 2,60 m<sup>2</sup>  
415,00 kg/m<sup>2</sup> x 2,60 m<sup>2</sup> .....1.079,00 kg

## Planta primera

Perfiles de acero.....27,10 kg/m<sup>2</sup>  
Relleno mortero: 1.600 kg/m<sup>3</sup>  
x 0,20 x 0,30/2 x 3.....144,00 “  
Bovedilla: 20 x 2,5.....50,00 “  
Tablero: 20 x 4 x 3.....240,00 “  
Embaldosado: 20 x 2,5.....50,00 “  
Cielorraso madera.....100,00 “  
Sobrecarga:.....100,00 “  
Total.....711,10 kg/m<sup>2</sup>  
Superficie de incidencia por ml. de fachada: 2,60 m<sup>2</sup>  
711,10 kg/m<sup>2</sup> x 2,60 m<sup>2</sup> .....1.848,60 kg

## Total carga forjados y cubierta:

1.406,86 + 1.651,00 + 1.079,00  
+ 1.848,6.....5.985,46 kg/ml.

## 2. MURO FACHADA

Muro piedra caliza 0,70 m. espesor  
Peso: 2.450 kg/m<sup>3</sup>  
Altura desde nivel inferior forjado Planta baja: 14,00 m.  
Debido a las numerosas aberturas se aplicará un coeficiente de reducción:  
Superficie muro: 23,50 x 14,00= 329,00 m<sup>2</sup>  
Superficie aberturas: 3,60 x 14 + 3,25 x 6 + 5,15 + 2,75 x 14 + 3,70 + 7,85 + 2,40 x 5 + 12,80 + 4,70 x 2 + 0,70 x 2 + 4,40 x 2 + 7,10 x 3= 196,80 m<sup>2</sup>  
Superficie efectiva muro: 329,00 – 196,80= = 132,20 m<sup>2</sup>  
Superficie voladizos piedra: (2,10 + 3,20 + 19,50) x 1,00= 24,80 m<sup>2</sup>  
Peso voladizos: 24,80 x 0,25 x 2.450 kg/m<sup>3</sup>= 15.376 kg  
Peso muro por encima clave arcos:  
132,20 m<sup>2</sup> x 2.450 kg/m<sup>3</sup>= 323.890 kg + 15.376 kg (voladizos)= 339.266 kg  
Incidencia por ml. de fachada: 339.266 / 23,50 m= 14.436,85 kg  
Incidencia coronamiento:

(2.450 kg/m<sup>3</sup> x 0,50 x 1,50 m.\*) + 200 kg.(chimeneas)=.....2.037,50 kg/ml.

\*Promedio de altura del paramento

## Total carga muro fachada

14.436,85 + 2.037,50= 16.474,35 kg/ml.  
TOTAL CARGA REPARTIDA A NIVEL INFERIOR FORJADO DE PLANTA BAJA:  
5.985,46 + 16.474,35 .....22.459,81 kg/ml.

## 3. CARGAS PUNTUALES ENTRESUELO

(aplicadas a 1,65 m. de la clave)

### Planta Entresuelo

Perfiles de acero.....27,10 kg/m<sup>2</sup>  
Relleno mortero: 1.600 kg/m<sup>3</sup>  
x 0,20 x 0,30/2 x 3.....144,00 “  
Bovedilla: 20 x 2,5.....50,00 “  
Tablero: 20 x 4 x 3.....240,00 “  
Embaldosado: 20 x 2,5.....50,00 “  
Sobrecarga:.....100,00 “  
Total.....611,10 kg/m<sup>2</sup>

### Jácena lateral

Carga forjado:1,30 x 0,70  
x 611,10 kg/m<sup>2</sup>.....556,10 kg.  
Peso tabique: 0,15 x 3,00  
x 1.800 kg/m<sup>3</sup>.....810 kg.  
Peso propio: 0,30 x 0,60 x 0,70  
x 2.450 kg/m<sup>3</sup>.....308,70 kg.  
Total carga jácena exterior= 1.674,80 kg.

### Jácena central

Carga forjado:1,20 x 0,90  
x 611,10 kg/m<sup>2</sup>.....659,88 kg.  
Peso tabique: 0,15 x 3,00  
x 1.800 kg/m<sup>3</sup>.....810 kg.  
Peso propio: 0,30 x 0,60 x 0,90  
x 2.450 kg/m<sup>3</sup>.....396,90 kg.  
Total carga jácena interior= 1.866,78 kg.

## 4. ENJUTAS Y PESO PROPIO DEL ARCO

Se mide esta sección desde el borde inferior del forjado de Planta Baja hasta el intradós del arco. Como método para descontar el rebaje del intradós del arco se considera un promedio entre la cara exterior y la cara interior en cada tramo.

Se analizará la carga sobre un semiarco entre la clave y el punto de ruptura. Éste se sitúa en la junta a 60º del eje del arco. El semiarco se dividirá en 12 tramos de 0,20 m. cada uno.

Material: Muro piedra caliza (2450 kg/m<sup>3</sup>).  
Espesor: 0,70 m.

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

## Tramo 1

Cara exterior:  $0,20 \times (1,05 + 1,07) / 2 = 0,212 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (1,55 + 1,57) / 2 = 0,312 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,212 + 0,312) / 2 \times 0,70 = 0,183 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,183 \text{ m}^3 = 449 \text{ kg}$

## Tramo 2

Cara exterior:  $0,20 \times (1,07 + 1,10) / 2 = 0,217 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (1,57 + 1,62) / 2 = 0,319 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,217 + 0,319) / 2 \times 0,70 = 0,188 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,188 \text{ m}^3 = 460 \text{ kg}$

## Tramo 3

Cara exterior:  $0,20 \times (1,10 + 1,15) / 2 = 0,225 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (1,62 + 1,70) / 2 = 0,332 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,225 + 0,332) / 2 \times 0,70 = 0,195 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,195 \text{ m}^3 = 478 \text{ kg}$

## Tramo 4

Cara exterior:  $0,20 \times (1,15 + 1,23) / 2 = 0,238 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (1,70 + 1,80) / 2 = 0,350 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,238 + 0,350) / 2 \times 0,70 = 0,206 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,206 \text{ m}^3 = 504 \text{ kg}$

## Tramo 5

Cara exterior:  $0,20 \times (1,23 + 1,33) / 2 = 0,256 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (1,80 + 2,01) / 2 = 0,381 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,256 + 0,381) / 2 \times 0,70 = 0,223 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,223 \text{ m}^3 = 546 \text{ kg}$

## Tramo 6

Cara exterior:  $0,20 \times (1,33 + 1,60) / 2 = 0,293 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (2,01 + 2,41) / 2 = 0,442 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,293 + 0,442) / 2 \times 0,70 = 0,257 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,257 \text{ m}^3 = 630 \text{ kg}$

## Tramo 7

Cara exterior:  $0,20 \times (1,60 + 1,75) / 2 = 0,335 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (2,41 + 2,99) / 2 = 0,540 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,335 + 0,540) / 2 \times 0,70 = 0,306 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,306 \text{ m}^3 = 750 \text{ kg}$

## Tramo 8

Cara exterior:  $0,20 \times (1,75 + 2,08) / 2 = 0,383 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (2,99 + 3,98) / 2 = 0,697 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,383 + 0,697) / 2 \times 0,70 = 0,378 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,378 \text{ m}^3 = 926 \text{ kg}$

## Tramo 9

Cara exterior:  $0,20 \times (2,08 + 2,55) / 2 = 0,463 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (3,98 + 5,69) / 2 = 0,967 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,463 + 0,967) / 2 \times 0,70 = 0,501 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,501 \text{ m}^3 = 1.226 \text{ kg}$

## Tramo 10

Cara exterior:  $0,20 \times (2,55 + 3,35) / 2 = 0,590 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times (5,69 + 6,35) / 2 = 1,204 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,590 + 1,204) / 2 \times 0,70 = 0,628 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,628 \text{ m}^3 = 1.538 \text{ kg}$

## Tramo 11

Cara exterior:  $0,20 \times (3,35 + 4,87) / 2 = 0,822 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times 6,35 = 1,270 \text{ m}^2$

Volumen:  $(0,822 + 1,270) / 2 \times 0,70 = 0,732 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,732 \text{ m}^3 = 1.794 \text{ kg}$

## Tramo 12

Cara exterior:  $0,20 \times (4,87 + 6,35) / 2 = 1,122 \text{ m}^2$

Cara interior:  $0,20 \times 6,35 = 1,270 \text{ m}^2$

Volumen:  $(1,122 + 1,270) / 2 \times 0,70 = 0,837 \text{ m}^3$

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,837 \text{ m}^3 = 2.051 \text{ kg}$

## 5. CARGAS QUE INCIDEN SOBRE LOS ARCOS

### Tramo 1

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....449 kg

Total: .....4.941 kg

### Tramo 2

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....460 kg

Total: .....4.952 kg

### Tramo 3

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....478 kg

Total: .....4.970 kg

### Tramo 4

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....504 kg

Total: .....4.996 kg

### Tramo 5

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....546 kg

Total: .....5.038 kg

### Tramo 6

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....630 kg

Total: .....5.122 kg

### Tramo 7

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....750 kg

Total: .....5.242 kg

### Tramo 8

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....926 kg

Carga jácena entresuelo: 1.675 (lateral)/  
1.867 kg.(central)

Total: 7.093 (ext.) / 7.285 kg

### Tramo 9

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Carga enjuta: .....1.226 kg

Total: .....5.718 kg

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí®

## Tramo 10

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....1.538 kg

Total: .....6.030 kg

## Tramo 11

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....1.794 kg

Total: .....6.286 kg

## Tramo 12

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....2.051 kg

Total: .....6.543 kg

## **ANEXO II**

### **ANÁLISIS DE LAS CARGAS QUE INCIDEN SOBRE LOS ARCOS SEGÚN EL PROYECTO CON ARCOS REBAJADOS**

Como en el caso anterior reciben la carga repartida de fachada y forjados hasta el nivel inferior del forjado sobre Planta Baja + la carga del tramo de muro entre ese forjado y el intradós del arco. Igualmente en el tramo correspondiente soportan la carga de las jácenas del entresuelo.

La carga repartida a nivel inferior del forjado sobre Planta Baja y las cargas puntuales del entresuelo son iguales que en el caso anterior. Calcularemos las cargas correspondientes al tramo entre el forjado de la Planta Baja y el intradós del arco. El dibujo muestra unas dovelas más regulares, con intradós sin rebaje. El semiarco fue dividido en 11 tramos de 0,20 m. cada uno.

## Tramo 1

$0,20 \times (2,63 + 2,64) / 2 \times 0,70 = 0,369$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,369 \text{ m}^3 = 904$  kg

## Tramo 2

$0,20 \times (2,64 + 2,66) / 2 \times 0,70 = 0,371$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,371 \text{ m}^3 = 909$  kg

## Tramo 3

$0,20 \times (2,66 + 2,68) / 2 \times 0,70 = 0,378$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,378 \text{ m}^3 = 915$  kg

## Tramo 4

$0,20 \times (2,68 + 2,71) / 2 \times 0,70 = 0,377$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,377 \text{ m}^3 = 924$  kg

## Tramo 5

$0,20 \times (2,71 + 2,76) / 2 \times 0,70 = 0,383$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,383 \text{ m}^3 = 938$  kg

## Tramo 6

$0,20 \times (2,76 + 2,81) / 2 \times 0,70 = 0,390$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,390 \text{ m}^3 = 956$  kg

## Tramo 7

$0,20 \times (2,81 + 2,87) / 2 \times 0,70 = 0,398$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,398 \text{ m}^3 = 974$  kg

## Tramo 8

$0,20 \times (2,87 + 2,95) / 2 \times 0,70 = 0,407$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,407 \text{ m}^3 = 998$  kg

## Tramo 9

$0,20 \times (2,95 + 3,04) / 2 \times 0,70 = 0,419$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,419 \text{ m}^3 = 1.027$  kg

## Tramo 10

$0,20 \times (3,04 + 3,11) / 2 \times 0,70 = 0,431$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,431 \text{ m}^3 = 1.054$  kg

## Tramo 11

$0,20 \times 3,11 \times 0,70 = 0,435$  m<sup>3</sup>

Peso:  $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,435 \text{ m}^3 = 1.067$  kg

### **CARGAS QUE INCIDEN SOBRE LOS ARCOS**

## Tramo 1

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg.

Carga enjuta: .....904 kg

Total: .....5.396 kg

## Tramo 2

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg.

Carga enjuta: .....909 kg

Total: .....5.401 kg

## Tramo 3

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg.

Carga enjuta: .....915 kg

Total: .....5.407 kg

## Tramo 4

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....924 kg

Total: .....5.416 kg

## Tramo 5

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....938 kg

Total: .....5.430 kg

## Tramo 6

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....956 kg

Total: .....5.448 kg

## Tramo 7

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....974 kg

Total: .....5.466 kg

## Tramo 8

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....998 kg

Total: .....5.490 kg

# Los arcos de la fachada del Palau Güell. Hipótesis sobre su conformación

Autor: Mario Andruet \*



Fundación Antonio Gaudí ®

---

## Tramo 9

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....1.027 kg

Carga jácena entresuelo: 1.675 (lateral)/  
1.867 kg.(central)

Total: 7.194 (ext.) / 7.386 kg

## Tramo 10

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....1.054 kg

Total: .....5.546 kg

## Tramo 11

Carga muros:  $22.460 \times 0,20 = 4.492$  kg

Carga enjuta: .....1.067 kg

Total: .....5.559 kg

Fundación Antonio Gaudí ®