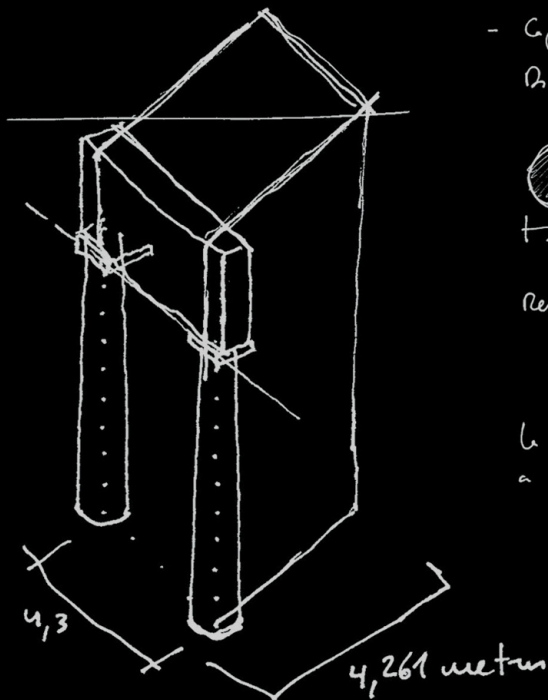


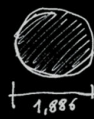
06

El secreto de las estructuras vistas.

El Partenón, la Sainte Chapelle y dos casas de Mies van der Rohe



- Capacidad resistente de la columna en su base
Diámetro = 1,886



$$\text{Área del círculo} = \pi R^2 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,886^2}{4}$$

$$\text{Área círculo} = 2,8 \text{ m}^2$$

Resistencia a compresión del concreto según NTE = 5000 kg/cm²

$$0,5 \text{ T/cm}^2 \cdot \frac{100^2 \text{ cm}^2}{1^2 \text{ m}^2} = 0,5 \cdot 10000 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = 5000 \text{ T/m}^2$$

La columna resiste mucho más de lo que se requiere a la que está solicitada

ESP Cuenta Spiro Kostof, en su *Historia de la Arquitectura*, cómo en el siglo XVIII hubo una corriente teórica que abogaba por la arquitectura de la Grecia clásica como ejemplo de una arquitectura racional en la que la estructura, las columnas, se comportaban como lo que realmente debían ser, es decir, miembros funcionales de la arquitectura y no elementos decorativos. Estos teóricos, entre los que se encontraban Carlo Lodoli o el Abad Laugier, animaban a recuperar este modelo y también los modelos góticos, como ejemplo de una arquitectura honesta y esencial. Pero lo cierto es que cuando analizamos en profundidad arquetipos de la Grecia clásica o del Gótico encontramos algo que va más allá de la mera exposición de la estructura y de su uso racional. Y vemos cómo estas arquitecturas de estructura a la vista pueden ser en realidad modelos para otro tipo de arquitectura en la cual la estructura tiene un carácter más bien ilusorio. El objetivo de este artículo es precisamente descubrir este secreto.

ENG **The secret of the visible structures.**

The Parthenon, the Sainte Chapelle and two houses of Mies van der Rohe

Spiro Kostof tells in his *History of Architecture*, how in the eighteenth century there was a theoretical current that advocated the architecture of classical Greece as an example of a rational architecture in which the structure, the columns, behaved as they really should be, that is, functional members of the Architecture, and not decorative elements. These theorists, among whom were Carlo Lodoli or Abate Laugier, encouraged to recover this model, and also the Gothic models, as an example of an honest and essential architecture. But the truth is that when we analyze in depth archetypes of classical Greece or the Gothic, we find something that goes beyond the mere exposition of the structure and its rational use. And we find how these Architectures of visible structure, can actually be models for another type of architecture in which the structure has a rather illusory character. The objective of this article is precisely to discover this secret.



Autor

Dr. Arq. Alejandro Cervilla García

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Universidad Politécnica de Madrid
España

Palabras claves

Estructuras
Arquitectura griega clásica
Arquitectura gótica
Movimiento moderno
Comunicación visual

Key words

Structures
Architecture of classical greece
Gothic architecture
Modern architecture
Visual communication

Artículo recibido | Artigo recebido:

31 / 03 / 2020

Artículo aceptado | Artigo aceito:

01 / 06 / 2020

EMAIL: alejandro_cervilla@hotmail.com

ARQUISUR REVISTA

AÑO 10 // N° 17 // JUN–NOV 2020 // PÁG. 88–101

ISSN IMPRESO 1853-2365

ISSN DIGITAL 2250-4206

DOI <https://doi.org/10.14409/ar.v10i17.8126>



EL PARTENÓN

Según Viollet le Duc, «la arquitectura griega es como un cuerpo desnudo, cuyas formas visibles están claramente relacionadas con la estructura» (2007:377). Y es verdad. De hecho, en el Neoclasicismo, la arquitectura de la Grecia clásica fue considerada por los racionalistas estructurales el canon de la verdad estructural que había que volver a recuperar (Kostof, 2009:973-992).

Lo más destacado en la arquitectura del templo griego es el peristilo, la hilera de columnas que rodea a la nave, una idea que parte de una libre elección del arquitecto. Es evidente que la forma de la columna tiene que ver con la lógica de la estructura, con su mecánica.¹ Pero que los arquitectos griegos decidieran colocar una hilera de columnas alrededor de sus templos, y que los peristilos se convirtieran en la imagen de su arquitectura, es algo que no pertenece a la lógica de la estructura sino al arte de esta. El arquitecto no puede olvidarse de la estructura. No puede olvidar la relación entre peso y sustentación que se encuentra en la esencia misma de la arquitectura. Pero sí puede decidir cómo esa relación, cómo el diálogo con la gravedad se convierte en forma visual de su arquitectura.

Con el peristilo, el arquitecto griego lleva la estructura a la fachada, decide convertir la columna en imagen visual de su arquitectura y eleva la estructura a la categoría de arte. Un arte expresivo. Tan importante era el peristilo que, según nos dice Spiro Kostoff, incluso se construía este antes que la cella, la nave interior (2009:224). Y es que la pantalla de columnas era lo que más importaba para la expresión del programa religioso. De hecho, el trato diario con la divinidad tenía lugar al aire libre, no en la cella.

La composición del peristilo es muy sencilla. El arquitebe horizontal, formado por varias vigas de piedra, descansa sobre una hilera de columnas verticales, que a su vez apoyan en el podio, también horizontal. Y este último transmite el peso del templo al terreno. Pero como el arquitecto griego quería hacer evidente la idea de la sustentación en su arquitectura, coloca una serie de elementos de transición que muestran la transmisión de las cargas entre unos elementos constructivos y otros. En la cabeza de las columnas está el capitel, el encargado de llevar el peso del arquitebe a la co-

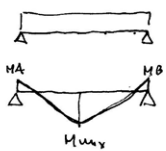
lumna. A continuación viene el cuerpo de la columna, el fuste, con sus acanaladuras verticales como eco de la línea vertical de la gravedad, y con un ligero ensanchamiento de su sección en la zona próxima a la base, que conocemos por éntasis (la expresión de cómo la columna entra en carga y se hincha por el peso). Por último está la basa, el elemento de transición que se encarga de llevar el peso de la columna y sus cargas al podio. Como dice Viollet le Duc: «el arquitecto griego quiere mostrar a los ojos de todo el mundo que las distintas partes de su monumento cumplen una función útil y necesaria. No le basta que su monumento sea sólido, quiere que además lo parezca» (2007:48).

Puede parecer que el arquitecto griego se centró en la construcción, la estructura y su imagen exterior. De hecho, algunas condiciones de diseño del templo griego guardan una relación sorprendente con la ciencia de las estructuras. Por ejemplo, el punto de momento cero de una viga del Partenón coincide aproximadamente con el borde del ábaco. Intuitivamente, el arquitecto griego acompaña con el ábaco del capitel la parte de la viga afectada por los momentos negativos (Fig. 1). Y también el capitel dórico, que no deja de ser una ménsula en voladizo, cumple con la condición geométrica de ménsula corta típica de una estructura de hormigón armado actual. Es decir, que también por intuición, el arquitecto del Partenón cumple la condición geométrica que hoy se exige cuando un pilar de hormigón armado incluye una ménsula corta sobre la que apoya una viga (Fig. 2).

Pero, aparte de estas coincidencias intuitivas, encontramos que en la estructura del Partenón hay algo más. El arquitecto quiere configurar la idea de sustentar, quiere elevar el sustentar a la categoría de arte.² Y cuando la arquitectura se eleva a la categoría de arte, ya no es solo una cuestión de razón, o de lógica constructiva. Hay algo más. Si nos fijamos bien comprobaremos que no toda la configuración del templo griego responde a la pura lógica de la estructura, a la pura razón constructiva. Por ejemplo, cuando calculamos la estructura del templo griego, comprobamos que se trata de una estructura muy sobredimensionada. Su capacidad resistente es muy superior a los esfuerzos a los

1. El esfuerzo al que está sometido un elemento estructural se refleja en la forma de ese elemento. En el caso de la columna, su forma viene condicionada por la mecánica de la compresión. La compresión que afecta a la columna en el sentido vertical de la gravedad, que tiende a apretar la columna, establece la forma vertical de ese elemento por oposición al esfuerzo al que se ve sometido.
2. Hegel también apoya esta idea cuando nos dice que lo peculiar de la arquitectura griega es que configura el sustentar como tal: «En la arquitectura griega lo característico y desarrollado es la columna y el arquitebe que horizontalmente descansa sobre ella. Aquí ha de hablarse de un descansar y sustentar» (2007:499).

Condición de vigas biempotrada.



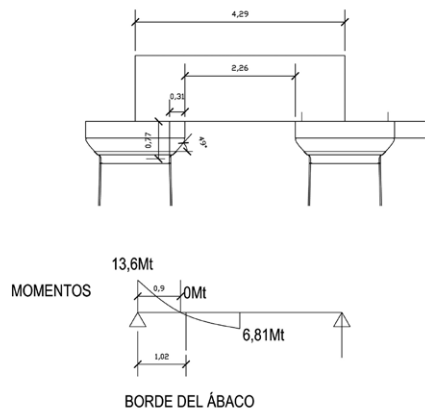
$q = 8,84 \text{ t/m}$

$$M_A = M_B = -\frac{q l^2}{12} = \frac{8,84 \cdot 4,3^2 \text{ m}^2}{12} = 13,6 \text{ mT}$$

$$M_{\text{centro}} = \frac{q l^2}{24} = \frac{8,84 \cdot 4,3^2 \text{ m}^2}{24} = 6,81 \text{ mT}$$

Momento en $x = 0,21L = 0,21 \cdot 4,3 = 0,9$
 que coincide prácticamente con el borde del ábaco.

FIGURA 1 | Ley de momentos de una viga del Partenón con la consideración de viga biempotrada. Las solicitaciones las hemos calculado con las siguientes consideraciones. (1) Hemos considerado los pesos propios sin mayorar. (2) Tal y como muestra Hellmann el arquitrabe se dividía en una doble viga, una hacia el exterior, otra hacia el interior. El peso del arquitrabe descansa entonces en dos vigas, y lo hemos dividido entre dos. De esta manera, la carga continua a la que está sometida la viga es $q=8,84 \text{ t/m}$. El momento en el centro es $q \cdot l^2 / 24$. El momento cero está en $x=0,21 \cdot l$, que coincide prácticamente con el borde del ábaco. El borde del ábaco está a 1,02 metros del eje de la columna. El punto de momento cero está a 0,9 metros del eje de la columna. Intuitivamente, el arquitecto griego acompaña con el ábaco la parte de la viga que está con momentos negativos. Fuente: Elaboración propia.



Condición de ménsula corta:

$$d > 1,7a$$



En capitel dórico: $d = 0,77$ $a = 0,31$ Se cumple.

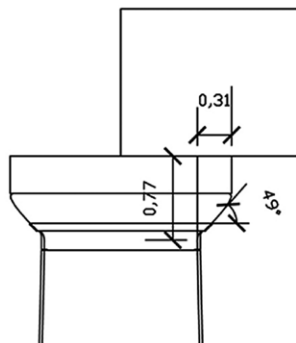


FIGURA 2 | Condición geométrica de ménsula corta de hormigón armado aplicada a las dimensiones geométricas del capitel dórico. La condición de ménsula corta es que el canto «d» debe ser mayor que 1,7 veces el vuelo «a». Fuente: AA. VV. (2006:106). La condición que aquí se establece está basada en la condición geométrica prescrita en la EHE, Instrucción de Hormigón Estructural. En el caso del capitel del Partenón, según el dibujo adjunto, $d=0,77$ y $a=0,31$, por lo que $d=2,48 \cdot a$, y cumple sobradamente este requisito. Choisy y Viollet le Duc nos muestran cómo el perfil del capitel griego fue evolucionando, desde sus configuraciones iniciales, más débiles, hasta la forma final que adquiere, por ejemplo, en el Partenón de Atenas. Con el tiempo, el vuelo del capitel se fue reduciendo. Y el capitel se hizo más resistente (Choisy, 1974:82; Viollet Le Duc, 1863:82).

Madrid, 3 de marzo de 2013

Mármol blanco del Pentelico (densidad 2800 Kg/m³)

Techos de madera (pino: densidad 680 Kg/m³)

Techos de mármol blanco



- Peso aproximado de la columna, incluyendo capitel.

Diámetro imoscapo = 1,886 metros

Altura, incluyendo capitel = 10,433 metros.

Nota: consideramos la columna un cilindro recto, de base el imoscapo, y compensamos la disminución del diámetro de la columna con el peso del capitel. Siempre estemos del lado de la seguridad.

Volumen de cilindro recto: $\pi R^2 h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h$


$$V = \pi \cdot \frac{1,886^2}{4} \cdot 10,433 \text{ m} = 29,15 \text{ m}^3$$

Densidad del mármol = 2800 Kg/m³

$$\text{Peso} = V \times \text{densidad} = 29,15 \text{ m}^3 \times 2800 \text{ Kg/m}^3 = 81620 \text{ Kg} = 81,62 \text{ tm.}$$

- Peso del Arquitrabe.

Área del arquitrabe según el sereno de Hellmann → 7,25 m²

Vija del arquitrabe: aprox 70 x 155 cm 

Intercolumnio: 4,2795

Volumen de arquitrabe: 7,25 m² x 4,2795 m = 31,13 m³

$$\text{Peso} = 31,13 \text{ m}^3 \times 2,8 \text{ t/m}^3 = 87,17 \text{ toneladas}$$

1

Peso de un viga de madera de 15 x 25 cm.

$$0,15 \times 0,25 \times l = 0,0375 \times l \text{ m}^3$$

Densidad de la madera de pino = 0,68 t/m³

$$\text{Peso} = 0,0375 \times l \text{ m}^3 \times 0,68 \text{ t/m}^3 = 0,0255 \text{ toneladas} \times \text{metros}$$

El peso de la cubierta y del antepecho es despreciable en comparación con el peso de la piedra.

Peso de aproximación para el peso del arquitrabe a 70 toneladas e incluimos aquí el peso de la cubierta

Altura de arquitrabe: 3,297 metros

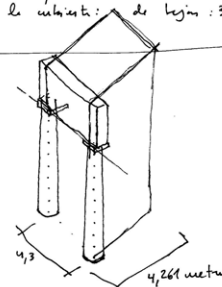
Espejo de arquitrabe: 1,8 metros

235 m³ ≈ 26m³

$$\text{Volumen aprox arquitrabe: } 4 \times 1,8 \times 4,3 \text{ (intercolumnio)} = 32,8 \text{ m}^3$$

$$32,8 \text{ m}^3 \times 2,8 \text{ t/m}^3 = 91,84 \text{ toneladas} \approx 90 \text{ toneladas}$$

Conclusión: → Peso de la columna: 80 toneladas
→ Peso del arquitrabe: 90 toneladas (incluye cubierta)
→ Peso de la cubierta: de begins: 3 t



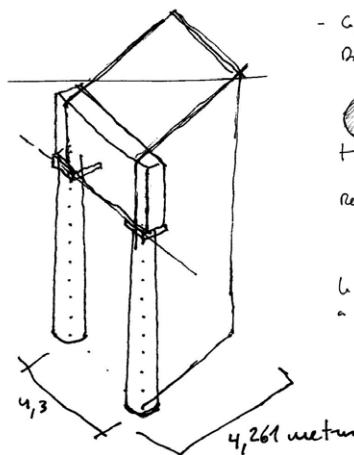
$$\text{Vol de tejón: } 4,3 \times 4,3 \times 0,1 = 0,192 \text{ m}^3 \approx 0,2 \text{ m}^3$$

$$0,2 \text{ m}^3 \times 2,8 \text{ t/m}^3 \approx 0,56 \text{ t}$$

2

FIGURA 3 | Cálculo del peso de la columna del Partenón. Dibujo del autor. Consideramos una densidad del mármol de 2800 kg/m³. El diámetro de columna es 1,886 metros en el imoscapo (la parte inferior del fuste). Y la altura de la columna, incluyendo el capitel, 10,433 metros. El peso de una columna tipo es aprox. 80 toneladas. Fuente: Las dimensiones se han sacado del levantamiento de Luis Moya Blanco (1981:25-156, en esp. 59).

FIGURA 4 | Cálculo del peso del arquitrabe del Partenón. Dibujo del autor. La altura del arquitrabe es de 3,297 metros. El espesor 1,8 metros. El intercolumnio en la zona central del peristilo 4,3 metros. El peso aproximado del arquitrabe es 75 toneladas. A esto hemos añadido el peso correspondiente a la cubierta, aproximadamente 3 toneladas. Fuente: Las dimensiones se han obtenido del levantamiento de Luis Moya Blanco (1981:25-156, en esp. 63) y Hellmann (2002:287).



- Capacidad resistente de la columna en su base

Diámetro = 1,886



$$\text{Área del imoscapo} = \pi R^2 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,886^2}{4}$$

$$\text{Área imoscapo} = 2,8 \text{ m}^2$$

Resistencia a compresión del mármol según NTE = 5000 Kg/cm²

$$0,5 \text{ T/cm}^2 \cdot \frac{100^2 \text{ cm}^2}{1^2 \text{ m}^2} = 0,5 \cdot 10000 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = 5000 \text{ T/m}^2$$

La columna resiste mucho más de lo que recibe

FIGURA 5 | Capacidad resistente de una columna del Partenón. La resistencia del mármol la obtenemos de la NTE Estructuras = 5000 kg/cm² = 5000 t/m². La carga que soporta la columna es 155 toneladas, incluyendo el peso del arquitrabe, la cubierta y el peso propio de la columna. La resistencia de la columna (5000 t/m² * 2,8 m) es muy superior a la carga que recibe. Fuente: Elaboración propia.

3. Propiedades de las rocas de construcción y ornamentación. Universidad de Granada.

<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.html>

4. Emplear una viga de piedra como dintel no es precisamente lo más adecuado, pues la piedra tiene muy poca resistencia a la flexión (Manterola Armisén, 2006:29).

5. William H. Goodyear hace una profusa descripción de estas correcciones en *Greek Refinements: Studies in Temperamental Architecture*.

6. La materialidad es la cualidad de lo material. La desmaterialización es la disolución de lo material. Si una estructura es capaz de resistir la acción de una fuerza sin ser vencida, es debido a la resistencia de sus materiales. A su rigidez, su tenacidad, su solidez, su dureza. Y esa cualidad de la materia puede quedar expresada en la estructura o, por el contrario, silenciada. Así, frente a esas estructuras que nos muestran la cualidad de sus materiales, nos encontramos esas otras estructuras que quieren expresar la disolución de la materia. Lo contrario de la materialidad es la desmaterialización. La búsqueda de la disolución de la materia. El efecto de que la dureza del material se convierte en blandura, o de que su sólida apariencia se desvanezca. El primero es un efecto fundamentalmente de geometría, es decir, de forma. El segundo es un efecto de luz. La desmaterialización no viene a ser otra cosa que un aligeramiento visual en mayor o menor grado de la estructura. Y es que la estructura no solo pesa físicamente sino también visualmente.

que se ve sometida (Figs. 3, 4, 5). Las columnas del Partenón, con una superficie en su base de aproximadamente 2,8m², tienen una resistencia enorme si consideramos la resistencia a compresión del mármol que establece la Norma Tecnológica de la Edificación (AA. VV., 1998:236) (unos 500kg/cm² ó 5000t/m²), o si consideramos la tabla de resistencia de materiales de Winkler,³ que determina para el mármol una resistencia a la compresión entre 700 y 2500t/m².

Teniendo en cuenta que el peso aproximado de una columna del Partenón es 80 toneladas, y que el peso del arquitrabe que sostiene es 75 toneladas, se concluye que el coeficiente de seguridad entre lo que resiste la estructura y las cargas que sustenta es enorme.

La carga en la base de la columna es aproximadamente 155 toneladas, mientras que la resistencia de la columna estaría comprendida entre las 1960 toneladas (para una consideración de resistencia de 700t/m²), y las 14 000 toneladas (para una consideración de resistencia de 5000t/m²). Es decir, entre 12 y 90 veces el esfuerzo al que se ve sometida. Y el mismo sobredimensionado encontramos en las vigas del Partenón, vigas de enorme sección que tienen que compensar la escasa resistencia a flexión de la piedra⁴ (Fig. 6). Esta estructura no quiere llevar al límite la capacidad resistente de la piedra. Quiere tener un margen de seguridad para ensayar con las proporciones de las columnas y las vigas.

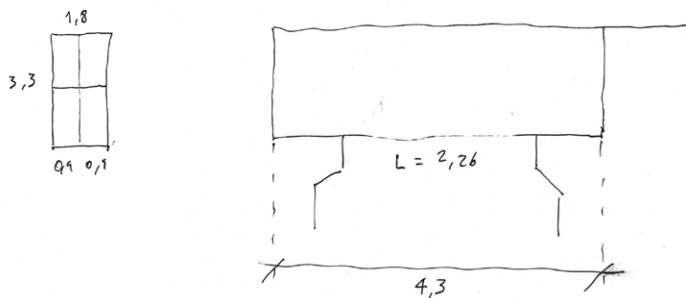
Por otro lado, las correcciones ópticas⁵ que se realizaban en los elementos constructivos del templo griego son un indicio de hasta qué punto la apariencia de la estructura era importante para el arquitecto griego. Incluso en ocasiones, más importante que la propia mecánica de la estructura. El diámetro de la columna, por ejemplo, no es constante a lo largo de todo el fuste. Su sección es menor en el sumoscapo (Vitrubio, 2007:67-68), la parte superior de la columna, lo cual es muy lógico desde el punto de vista estructural, porque es la zona de la columna menos solicitada. Sin embargo, en la mitad inferior del fuste aumenta la sección, el conocido éntasis de la columna, y vuelve a reducirse la sección en la base, precisamente donde la solicitación es mayor. Se trata con esta corrección de rectificar la imagen de la columna con respecto al punto de vista del observador, aunque eso vaya en contra de la lógica de la gravedad.

Y aún hay un dato más. Según un dibujo de Choisy (1974:224), el vuelo del capitel tampoco cumple la función estructural que se le presupone. En teoría, el capitel hace de transición entre la viga del arquitrabe y la columna, sirve para aumentar la superficie de apoyo de la viga, y con su voladizo, reduce la luz estructural de la viga. Ese vuelo es como una pequeña ménsula de piedra, que se adelanta para aliviar el trabajo de la viga. Pero Choisy nos demuestra que en el caso del Partenón el vuelo del capitel no recibe la viga. No trabaja (Fig. 7). ¿Es posible que en esta estructura vista no todo lo que vemos sea realmente estructural ni esté pensado desde el punto de vista de la mecánica estructural? Claro que es posible. Y la respuesta la encontramos, precisamente, en la columna, el elemento sustentante por excelencia, el eje alrededor del cual gira todo el diseño del templo griego.

Las columnas, que representan la idea de la solidez, de la sustentación, están surcadas por unas acanaladuras cuyo efecto es precisamente el contrario, su desmaterialización,⁶ el desdibujado de su apariencia sólida. Este efecto se puede ver con claridad en el pórtico de la Stoa de Atalos en Atenas (Fig. 8). La hilera de columnas de la fachada tiene un doble tratamiento; superficie lisa, cilíndrica en la base, y superficie acanalada en los dos tercios superiores del fuste. La hilera de columnas del interior tiene sus fustes con superficie lisa en toda su altura. Cuando la superficie es lisa, la luz define con solidez la forma cilíndrica. Lo que percibimos es una superficie cilíndrica continua. Sin embargo, en la superficie acanalada, la luz rompe contra la columna construyendo una secuencia de líneas verticales de luz y sombra de espesor variable. Lo que vemos ya no es una superficie cilíndrica continua sino una multiplicación de líneas verticales que aligeran la columna y la desdibujan por efecto de la luz. El efecto lo describe con gran precisión Viollet le Duc:

«las columnas le parecen demasiado planas expuestas a la luz, y demasiado blandas e indecisas en la sombra. Recorta en sentido longitudinal, en toda la altura del fuste, unas estrías rectas, luego ahueca dichas estrías y forma de ese modo unas acanaladuras lo bastante profundas como para concentrar la luz oblicua en las aristas, pero no lo suficiente

CÁLCULO DE LA VIGA DEL PARTENÓN



Momento de cálculo : 6,81 Mt, en el centro del vano

$$\text{Módulo de resistencia } W_x = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,9 \cdot 3,3^2}{6} = 1,64 \text{ m}^3$$

Resistencia a tracción por flexión del mármol según NTE

60 kg/cm²

$$\frac{60 \text{ kg}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{100^2 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \cdot \frac{1 \text{ T}}{1000 \text{ kg}} = 600 \frac{\text{T}}{\text{m}^2}$$

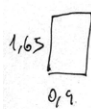
$$W_x \text{ de cálculo} = \frac{M_t}{R_T} = \frac{6,81 \text{ m} \cdot \text{T}}{600 \text{ T/m}^2} = 0,012 \text{ m}^3$$

El módulo de resistencia de la viga del Partenón, 1,64 m³ es muy superior al exigido por el cálculo, 0,012 m³.

Incluso si consideramos el momento negativo del cálculo, 13,6 Mt, estaríamos por encima.

$$W_x^2 = \frac{13,6 \text{ m} \cdot \text{T}}{600 \text{ T/m}^2} = 0,023 < 1,64$$

Y si consideramos que sólo trabaja la viga inferior del arquitrabe



$$W_x^3 = \frac{0,9 \cdot 1,65^2}{6} = 0,41 \text{ m}^3 > 0,023$$

En el caso más desfavorable tenemos una viga 18 veces más resistente a lo que exige el esfuerzo.

FIGURA 6 | Capacidad resistente de una viga del Partenón. Dibujo del autor. Hemos considerado para el cálculo la sección constructiva de Hellmann en la que se ve cómo el arquitrabe está descompuesto en cuatro vigas. Los momentos flectores más desfavorables los tendríamos en el centro de la sección, 6,81 mT, y en el apoyo de la viga en la columna, 13,6 mT. Podemos considerar que se trata de vigas empotradas pues el peso del arquitrabe sobre la viga inferior impide su movimiento. Si consideráramos la opción de viga apoyada, se reduciría la luz de cálculo a 2,26 metros, y el momento flector del cálculo sería 5,64 mT, por tanto, la consideración de viga empotrada, en este caso, es la más desfavorable. El módulo resistente de la viga del arquitrabe es $b \cdot h^2/6 = 1,64 \text{ m}^3$ (0,41 m³ si consideramos solo a la viga inferior del arquitrabe). El módulo resistente de cálculo se obtiene de dividir el momento de cálculo (6,81 mT) por su capacidad resistente. En el caso del mármol, la resistencia a tracción por flexión es 60 kg/m², según NTE Estructuras (AA.VV., 1998:236). La conclusión es que el módulo de resistencia de la viga del Partenón es muy superior al módulo exigido por el cálculo (0,021 m³ para el momento en el centro del vano; 0,023 m³ para los momentos en los apoyos). Fuente: Bermejo Polo (2006:190).

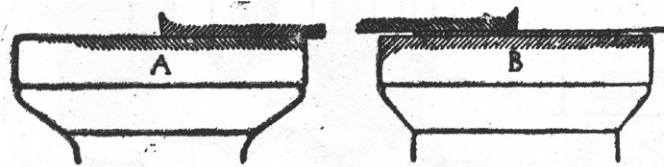


Fig. 224

A, B — Vaciamiento practicado en el Partenón entre la saliente del ábaco y el arquitrabe

FIGURA 7 | Cajeado del apoyo entre viga y columna para que el vuelo del capitel no entre en carga.
Fuente: Dibujo de Choisy (1974:83).

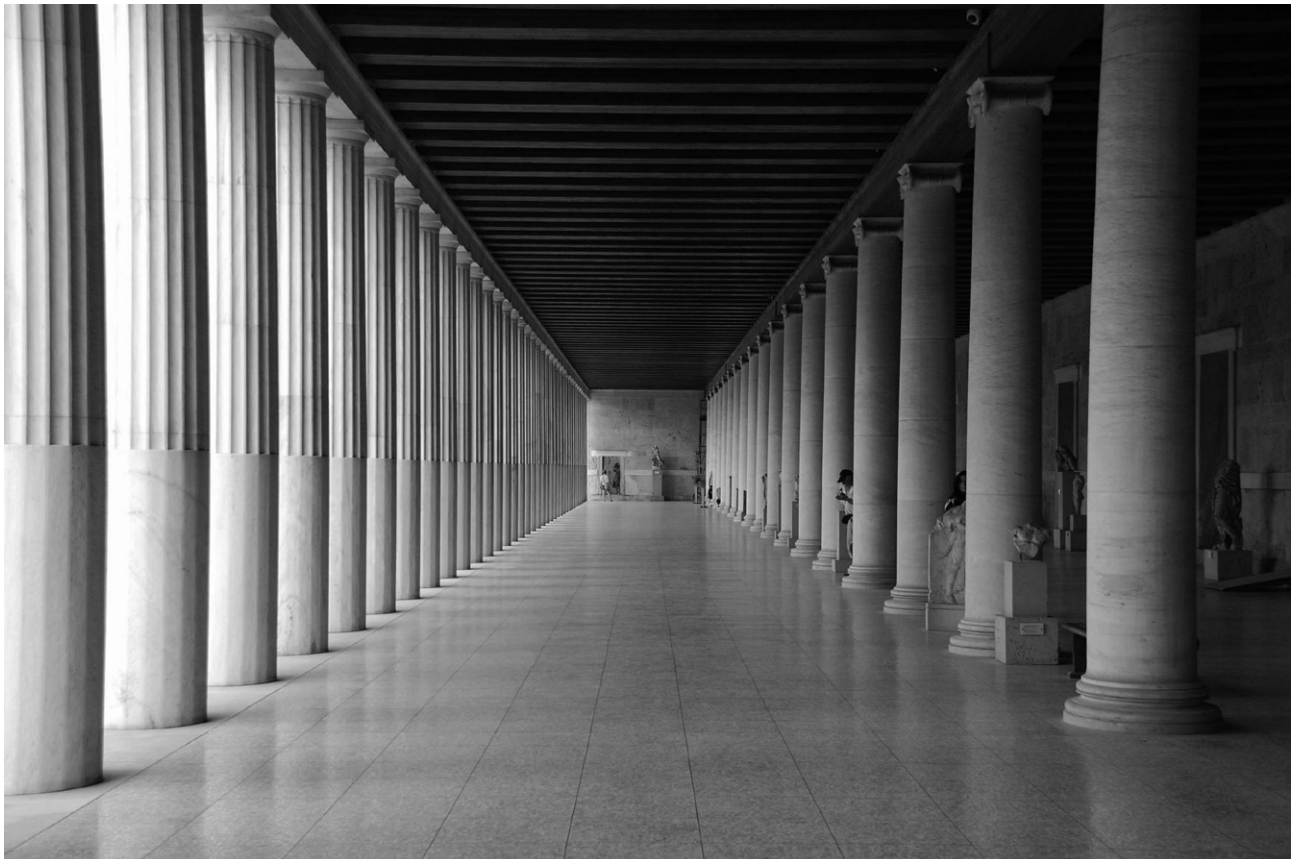


FIGURA 8 | Stoa de Atalos en Atenas. Fuente: Archivo del autor.

como para que dichas aristas puedan ser un obstáculo y herir a las personas que pasan entre las columnas. La luz del sol, al repetir de ese modo, sobre cada fuste, una secuencia de luces y sombras longitudinales, les devuelve la importancia que habían perdido cuando solo eran cónicas». (48)

Es interesante comprobar que una arquitectura que muestra la estructura a la vista de todos lo hace buscando efectos que no tienen relación directa con la estructura o con su mecánica. Y es que hay algo más en el peristilo griego que la sola idea de mostrar la estructura, su construcción, y su mecánica. El arquitecto del Partenón emplea la columna y su lenguaje como medio para alcanzar la belleza, aunque eso conlleve superar los rigores de la mecánica estructural. Y esta manera de pensar la estructura, es una idea universal que podemos encontrar en otros muchos ejemplos de la Historia de la Arquitectura, como el que exponemos a continuación.

LA SAINTE CHAPELLE

La catedral gótica es un referente del racionalismo estructural (Frampton, 1980:64), una corriente que aboga por una arquitectura de construcción vista y explícita. Como es bien sabido, el arco y la bóveda transforman la verticalidad de la gravedad en un esfuerzo oblicuo. Cuando un arco o una bóveda apoyan sobre una columna, o sobre un muro, esos esfuerzos oblicuos se transmiten a las cabezas de esas columnas y de esos muros. Les empujan. Y para evitar el vuelco, es necesario un contrarresto al empuje.

Los maestros constructores del gótico, al igual que hicieron los griegos siglos antes, decidieron convertir la estructura en imagen exterior de su arquitectura. Elevaron el contrarresto de los empujes a la categoría de arte. Bill Addis (2007:93) nos explica los cuatro elementos que componen la estructura gótica: la bóveda de arista, el arbotante, el contrafuerte y el pináculo. Frente a la bóveda de cañón romana, que ejerce un empuje a lo largo de toda la coronación del muro en que apoya, la bóveda de arista concentra los empujes en las nervaduras, y de ahí son llevados a las cabezas de las columnas. La componente vertical de las cargas es soportada por las columnas. Y la componen-

te horizontal de las cargas, el empuje, es llevado a la cimentación a través de los contrafuertes exteriores. Los muros de fachada no tienen función estructural. Son plementerías que pueden abrirse y hacerse de vidrio. Y las columnas, al no soportar esfuerzos horizontales, pueden ser muy esbeltas. El contrafuerte gótico es una materialización del camino que siguen las cargas después de haber pasado por los nervios de las bóvedas. En su forma más simple está constituido por un murete adosado al lugar de la reacción que se trata de evitar, pero cuando hay tres naves, y la central tiene más elevación que las laterales, sus empujes se transmiten a través del espacio con arcos aislados que se lanzan sobre las naves laterales. Son los arbotantes, y su función es conducir los empujes, desde las altas bóvedas, hasta los contrafuertes. Al descargar los empujes en muros perpendiculares, la fachada propiamente dicha queda descargada, y puede aligerarse y ahuecarse sin perder estabilidad la estructura. Por último los pináculos, con su peso propio, dan estabilidad a los contrafuertes, evitando su vuelco, y ayudan también a que el arbotante no empuje en exceso la parte superior de los contrafuertes. Los altos pináculos son sencillos pesos muertos que verticalizan el vector final de la línea de las presiones. Imaginemos que apilamos treinta libros, uno sobre otro, haciendo una columna. Es muy fácil desmoronarlo todo con un leve golpe. Pero si aplicamos una carga vertical sobre los libros, si los apretamos, ya no será tan fácil. Esa función de apretar la lleva a cabo el pináculo. Vemos pues que la catedral gótica construye con mucha claridad el camino de las cargas. Y lo hace en dos direcciones, en horizontal, desde la bóveda hasta el contrafuerte, y en vertical, desde la clave de las bóvedas hasta la base de las columnas.

Un hermoso ejemplo de este tipo estructural es la Sainte Chapelle de París, diseñada por Pierre de Montreuil como un joyero y capilla real para albergar las reliquias del martirio de Jesucristo que había adquirido el rey Luis IX, San Luis de Francia. La Sainte Chapelle se divide en dos capillas, la menor en planta baja, y en la planta primera la capilla mayor, un espacio diáfano de una nave, de diez metros de anchura y veinte metros de altura, con enormes vitrales (Fig. 9). Como se trata de una capilla de una sola nave, la estructura que soporta los empujes es muy sencilla. No son necesarios

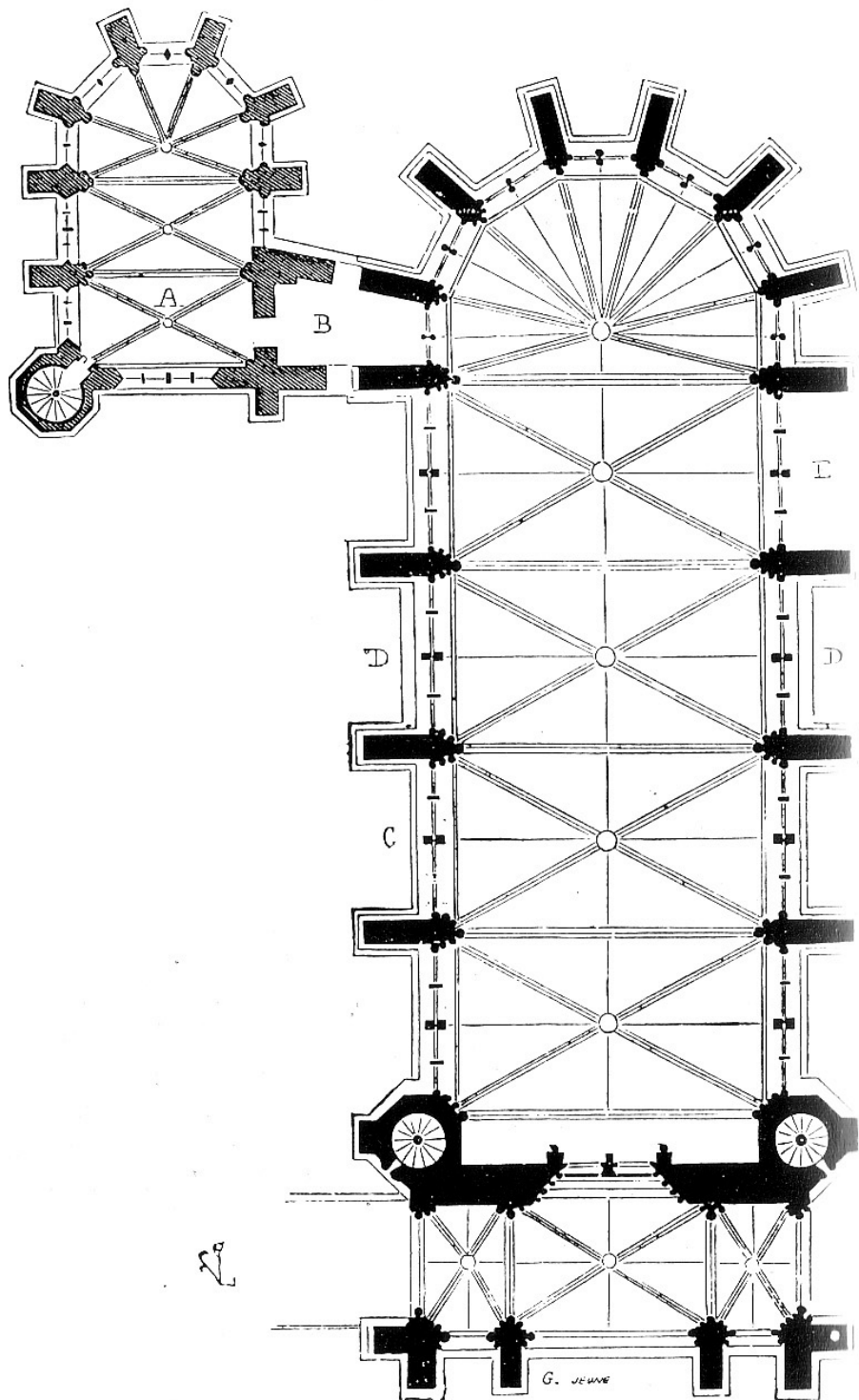


FIGURA 9 | Sainte Chapelle. Capilla Alta. Fuente: Heyman (1995:228).



FIGURA 10 | Contrafuertes exteriores. Fuente: Archivo del autor.



FIGURA 11 | Interior de la Sainte Chapelle. Fuente: Archivo del autor.

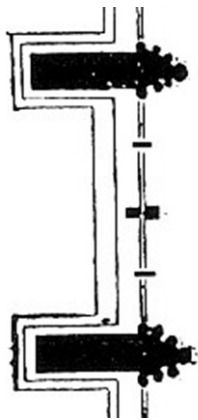


FIGURA 12 | Columnilla polilobulada en el testero interior del contrafuerte. Fuente: Archivo del autor.

7. Estos dos autores nos hablan de la capacidad de la luz gótica de conferir a los objetos y elementos arquitectónicos una dimensión irreal, no natural, trascendida.

los arbotantes, y los contrafuertes se adosan directamente a las bóvedas de crucería. Pero la ausencia de arbotantes no le resta fuerza a la imagen exterior de la estructura. La fachada muestra una arquitectura de piedra, sobria y sólida, con el esqueleto a la vista (Fig. 10). Sin embargo, el espacio interior es ligero, y está atravesado por una luz coloreada casi mágica (Campo Baeza, 2012:27-33; Nieto Alcaide, 2006:13-55)⁷ (Fig. 11).

Desde el punto de vista de la estructura, apenas vemos en el interior unos delicados pilarillos que arrancan del suelo hasta llegar a las claves de las bóvedas de crucería. Pareciera que esas bóvedas de piedra no pesaran nada, cuando pueden estar sostenidas por pilares tan esbeltos. Y es que las cristaleras de colores no dejan ver los potentes contrafuertes que, desde fuera, están realmente sosteniendo el peso de las bóvedas y sus empujes. Esos pilarillos polilobulados en realidad son los testers de los contrafuertes, suavemente labrados por dentro, y cortados a escuadra por fuera. Un detalle muy sutil, pero rotundo (Fig. 12).

La Sainte Chapelle nos está ofreciendo dos caras bien diferentes en su interior y en su exterior. Delicadeza e ilusión espacial y gravitatoria por dentro y robustez mecánica y solidez por fuera. Es algo más que un ejemplo del racionalismo estructural. Es un ejemplo de ambivalencia estructural. Muchos autores han considerado la estructura del gótico un poema de piedra a la vista. Y así es en gran parte, por su manera de convertir el camino de las cargas en arquitectura, y por la precisión del ajuste de sus partes. Pero esta estructura tan sencilla y tan radical también ha sido elevada a la categoría de arte. Es algo más que solo estructura. Una estructura con dos caras.

Después de este análisis, las palabras de Hegel resuenan muy certeras:

«la forma fundamental de la catedral gótica no está basada en la sustentación, sino que esta idea se supera por el hecho de que los recintos suben y se reúnen en una punta sin la expresa diferencia entre gravitación y sustentación». (504)

¿Cómo es posible que uno de los más claros ejemplos del racionalismo estructural no esté basado en la sustentación? Es posible. La Sainte Chapelle nos presenta unas bóvedas que parecen no pesar, unas columnas que

en vez de sustentar parecen alzarse hacia los cielos, y unas paredes que son atravesadas por la luz. Y a la vez es una de las estructuras más racionales hechas con piedra, que solo trabaja a compresión, y que saca el mayor partido posible al material. Es una especie de contradicción. El interior de la Sainte Chapelle, en contraste con la sobriedad y desnudez de su imagen exterior, es un espacio que arrebató al espíritu. Volvemos a tener aquí un ejemplo de estructura a la vista que busca algo más.

CONCLUSIÓN

Situar la estructura a la vista es una idea universal de la Arquitectura. Como dice Schopenhauer:

«El tema propiamente estético de la bella arquitectura es la lucha entre el peso y la rigidez. De hecho, este es el único tema estético que la caracteriza exclusivamente, puesto que, en cualquiera de sus manifestaciones, su misión es precisamente poner de manifiesto con toda claridad y de múltiples maneras la lucha mencionada». (2004:187)

¿Qué tienen en común las arquitecturas de estructura vista?

1. La estructura se hace visible tanto en fachada como en el espacio interior
2. Se reducen los cerramientos y los elementos sin función estructural y se aíslan los elementos estructurales.
3. Se construye de manera explícita el recorrido de las cargas y las transiciones entre elementos estructurales.
4. Se acentúa la expresión de los elementos estructurales y de sus uniones más allá de su razón mecánica.
5. Hay una relación directa entre la estructura y la forma. La estructura, por repetición de una unidad básica, da coherencia a la forma.

¿Y qué conceptos que intuitivamente relacionáramos con arquitecturas de estructura vista deberíamos, a partir de ahora, cuestionar cuando hablamos de este tipo de arquitecturas?

1. La eficacia de la forma.
2. La eliminación del ornamento.
3. La ausencia de toda carga emotiva.



FIGURA 13 | Casa Mosler, Potsdam, Berlín, 1926. Autor: Hans-Christian Schink. Fuente: 2G (agosto de 2009). (48-49), 65.



FIGURA 14 | Casa Wolf, Guben, 1925-1927. Vista desde la terraza. Fuente: Johnson (1978:38).

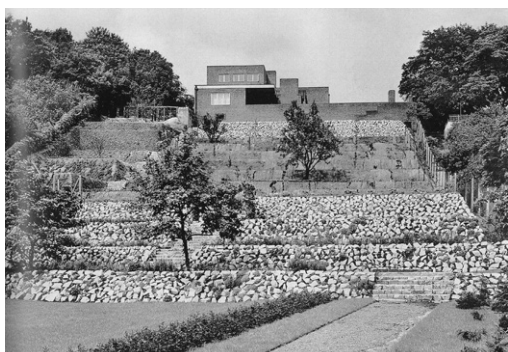


FIGURA 15 | Casa Wolf. Vista desde el jardín. Fuente: Johnson (1947:39).

De hecho, es precisamente esa carga emotiva la clave del misterio que ocultan las arquitecturas de estructura vista que aquí presentamos. Y es que mostrar la estructura no es sinónimo de una arquitectura objetiva y racional. Dos proyectos de Mies, prácticamente coetáneos, nos muestran dos actitudes muy diferentes con respecto a la estructura, a pesar de que en ambos casos la estructura está a la vista; la Casa Mosler (Fig. 13), construida en Potsdam entre 1924 y 1926, y la casa Wolf (Fig. 14), construida en Guben entre 1925 y 1927.

En la Casa Mosler los muros de carga de ladrillo están a la vista, sin revestir, y con los dinteles de piedra o de ladrillo a sardinel enfatizando la singularidad constructiva de los huecos. Es la primera casa que Mies construye con el aparejo de ladrillo visto.⁸ En la Casa Wolf, también el aparejo de ladrillo está a la vista, pero no hay el énfasis en los dinteles⁹ que sí vemos en la

Mosler, ni tampoco la compacidad formal que da rotundidad a la masividad del ladrillo. En la losa volada que cubre parte del porche, vemos también la formación de la viga de canto que resuelve la estructura del voladizo. Pero esta viga, que se hace evidente cuando miramos la losa desde la terraza, queda en un plano de sombra cuando miramos a la casa desde el río. En este alzado, Mies no quería mostrar el canto de la viga, sino la presencia abstracta de un forjado blanco que parece suspendido en el aire, como por arte de magia, sin columna ni viga que lo sustente (Fig. 15).

La Casa Mosler deja la estructura a la vista de manera objetiva, sin matices. La Casa Wolf deja la estructura a la vista, pero modifica su percepción en función de la ubicación del espectador. La Casa Mosler no deja lugar a la duda. La Casa Wolf abre la puerta al misterio. A la ilusión gravitatoria. Aquí está el secreto. ♣

8. Esta idea del aparejo visto, que Mies intentó por primera vez en el proyecto no construido de la casa Kempner (Berlín, 1919), es consecuencia de su admiración por la claridad y honestidad constructiva del maestro holandés H.P. Berlage. Mies tuvo ocasión de conocer la obra de Berlage gracias a su estancia en Holanda mientras colaboraba en una obra de Peter Behrens, e incluso llegó a competir con él en el concurso para la casa de la familia Kröllner Müller. Fuentes: Schulze (1985:32 y 60) y Frampton (1980:71-73).

9. Aunque la casa Wolf fue destruida tras un bombardeo en la Segunda Guerra Mundial, podemos hacernos una idea de la solución de sus dinteles visitando las casas que Mies construyó en Krefeld apenas un par de años después de construir la Wolf. La subestructura de acero que forma los dinteles, aunque muy sutil, se puede ver cuando nos acercamos a sus ventanas. El ala inferior del perfil metálico que sustenta al ladrillo sí queda a la vista.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2G** (agosto de 2009). (48–49). Gustavo Gili.
- AA. VV.** (1998). *Norma Tecnológica de la Edificación. Estructuras*. Ministerio de Fomento.
- AA. VV.** (2006). *Números gordos en el proyecto de estructuras*. 8va. Edición. Cinter divulgación técnica.
- ADDIS, B.** (2007). *3000 years of design, engineering and construction*. Phaidon.
- BERMEJO POLO, J.** (2006). *Formulario práctico de la construcción*. CIE Dossat.
- CAMPO BAEZA, A.** (2012). Perforando las nubes. En *Principia Architectonica* (pp. 33–39). Mairea–UPM.
- CHOISY, A.** (1974). *Historia de la Arquitectura*. Víctor Lerú.
- FRAMPTON, K.** (1980). *Historia crítica de la Arquitectura Moderna*. Gustavo Gili.
- GOODYEAR, W.H.** (1912). *Greek Refinements: Studies in Temperamental Architecture*. Yale University Press.
- HEGEL, G. W. F.** (2007). *Lecciones sobre Estética*. Akal.
- HELLMANN, M.C.** (2002). *L'architecture grecque*. Picard.
- HEYMAN, J.** (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera, ETSAM.
- (1995). *Teoría, historia y restauración de Estructuras de Fábrica*. Instituto Juan de Herrera, ETSAM.
- JOHNSON, P.** (1978). *Mies van der Rohe*. MoMA.
- KOSTOF, S.** (2009). *Historia de la Arquitectura*. Volumen 1 y 3. Alianza Editorial.
- LAUGIER, M.–A.** (1999). *Ensayo sobre la Arquitectura*. Akal.
- MANTEROLA ARMISÉN, J.** (2006). *Relación entre la Estructura resistente y la Forma. Discurso de ingreso en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando*. Biblioteca Nueva.
- MOYA BLANCO, L.** (1981). Relación de diversas hipótesis sobre las proporciones del Partenón. *Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando*, (52), 25–156. RABASF.
- NIETO ALCAIDE, V.** (2006). *La luz, símbolo y sistema visual. El espacio y la luz en el arte gótico y del Renacimiento*. 7ma. edición. Cuadernos de Arte Cátedra.
- UNIVERSIDAD DE GRANADA (S/F)**. *Propiedades de las rocas de construcción y ornamentación*. <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.html>
- SCHOPENHAUER, A.** (2004), *Lecciones sobre metafísica de lo bello: Sobre la Arquitectura y el arte de canalizar las aguas*. Colección Estética y Crítica, Universidad de Valencia.
- SCHULZE, F.** (1985). *Mies van der Rohe. A critical biography*. The University of Chicago Press.
- SUMMERSON, J.** (2006). *El lenguaje clásico de la arquitectura; De L.B. Alberti a Le Corbusier*. 2da. edición, 10ma. tirada. Gustavo Gili.
- VIOLLET LE DUC, E.** (2007). *Conversaciones sobre la Arquitectura. Volumen I*. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España.
- VITRUVIO** (2007). *Los diez libros de Arquitectura*. 10ma. edición. Iberia.