

- ▲ **Palabras clave/** Arquitectura, física, gravedad, estructura.
- ▲ **Keywords/** Architecture, physics, gravity, structure.
- ▲ **Recepción/** 27 abril 2015
- ▲ **Aceptación/** 26 mayo 2015

## La influencia de la comprensión de la gravedad como hecho físico en la configuración del espacio arquitectónico<sup>1</sup>.

The influence of understanding gravity as a physical fact in the configuration of the architectonic space.

### Oscar Linares de la Torre

Arquitecto, Universidad Politécnica de Catalunya, España.  
Máster en Proyectos Arquitectónicos, Universidad Politécnica de Catalunya, España.  
Doctor Arquitecto, Universidad Politécnica de Catalunya, España.  
Profesor Asociado del Departamento de Proyectos Arquitectónicos, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, España.  
oscar.linares@upc.edu

**RESUMEN/** Es habitual fundamentar la explicación de la evolución de la arquitectura en el desarrollo técnico de los tipos estructurales que han hecho posible, en cada momento de la historia, un planteamiento espacial concreto. Sin embargo, este enfoque parece olvidar que todo logro práctico se fundamenta siempre en una intuición o conceptualización previa derivada de la observación de la realidad. El presente artículo ahonda en la hipótesis -indemostrable más allá de la reunión de una serie de indicios razonables- de que la evolución de la representación científica sobre la gravedad como realidad física ha influido en la configuración de los sistemas estructurales que han definido el espacio arquitectónico a lo largo del tiempo. A tal efecto, se presenta en paralelo la evolución de la estructura espacial en la arquitectura desde la prehistoria hasta la modernidad y el progreso del conocimiento científico sobre la gravedad desde Aristóteles hasta Einstein. **ABSTRACT/** The explanation about the evolution of architecture is often based on the technical development of the structural types which have resulted, in every historical moment, in a specific spatial approach. However, this approach seems to forget that any practical achievement is always based on intuition or in a prior conceptualization emerged from the observation of reality. This article delves in deeper in the hypothesis that the evolution of the scientific representation of gravity as a physical reality has influenced the configuration of structural systems that have defined architectural space throughout time. For such purpose, a simultaneous presentation is made of the evolution of spatial structure in architecture since prehistory to modernity, and of the advance of scientific knowledge about gravity from Aristotle to Einstein.

**INTRODUCCIÓN.** Es habitual fundamentar la explicación de la evolución de la arquitectura en el desarrollo técnico de los tipos estructurales que han hecho posible, en cada momento de la historia, un planteamiento espacial concreto. Según esta idea, el desarrollo técnico se ve motivado por las aspiraciones espaciales de cada época y, al mismo tiempo, éstas serían propiciadas por aquél. Sin embargo, este enfoque parece olvidar que todo logro práctico está invariablemente fundamentado en una intuición o conceptualización previa, derivada de la observación de una realidad física concreta. Desde la Grecia clásica la ciencia se encarga de esta labor.

El presente artículo ahonda en la hipótesis -indemostrable más allá de la reunión de una serie de indicios razonables- de que la evolución de la representación científica sobre la gravedad como realidad física ha podido influir en la configuración de los sistemas estructurales que han caracterizado las diferentes concepciones espaciales<sup>2</sup> que se han ido desarrollando a lo largo de la historia. A tal efecto, se han rastreado, de manera inédita y recurriendo la mayor parte de las veces a las fuentes originales (imagen 1), las ideas científicas que se han elaborado en torno al hecho gravitatorio desde Aristóteles hasta Einstein.

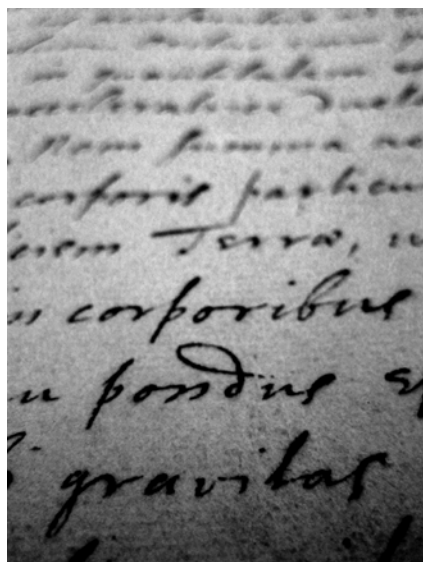
<sup>1</sup> El presente artículo deriva de la investigación desarrollada en la tesis doctoral del autor, "La estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz", dirigida por Carlos Ferrater Lambarri (Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015).

<sup>2</sup> Según Sigfried Giedion, a lo largo de la historia se han ido sucediendo distintas maneras de comprender el espacio arquitectónico, a las que denomina "concepciones espaciales". La primera concepción, que discurre desde la prehistoria hasta la época griega, la identifica con la capacidad del volumen de irradiar espacio. La segunda, que nace durante la época imperial romana y se prolonga hasta el siglo XVIII, la asocia con la idea de espacio como interior. La tercera, identificada con la arquitectura moderna a partir del siglo XX, se distingue por la interpenetración que se produce entre el volumen y el espacio interior. Giedion identifica, además, un periodo de transición entre las fases segunda y tercera y que corresponde al siglo XIX. El autor desarrolla esta teoría en diversas publicaciones (v. Giedion 1941, 1964, 1969).

**EL PESO Y LA CAÍDA COMO FENÓMENOS GRAVITATORIOS FUNDAMENTALES EN LA FÍSICA Y LA ARQUITECTURA.**

En sus inicios, la arquitectura se desarrolla desde la pura intuición, pues la física como forma objetiva del conocimiento humano no aparece prácticamente hasta la antigüedad clásica. Son los filósofos griegos quienes conceptualizan esas intuiciones sobre la realidad física del mundo. La física de Aristóteles (386-322 a.C.) fue la más influyente posteriormente. En su física se distinguen dos tipos de movimiento: el de origen natural, que se produce siempre en vertical (la caída libre de los cuerpos graves es un caso concreto) y el de origen artificial, de componente horizontal. Se descubre que, desde el más tosco trilito prehistórico (imagen 2) hasta el más refinado pórtico griego, aún con anterioridad a cualquier formulación física teórica y en línea con la física aristotélica, la arquitectura de este primer periodo expresa la contraposición entre la verticalidad de la gravedad -al mantener erguido el soporte- y la horizontalidad de la cubrición -al desplazar horizontalmente hasta los apoyos el peso de la materia que cubre el espacio-. Igual que sus contemporáneos, Aristóteles no identifica la gravedad como una ley natural, sino que la confunde con los fenómenos de la caída y el peso, dos estados distintos del movimiento natural de la materia grave, la primera en acto y el segundo en potencia. El fenómeno de la caída se explica como el movimiento natural de los cuerpos pesados hacia su lugar propio, el centro de la tierra, siguiendo siempre la línea que une el cuerpo con el centro del mundo, una dirección que identificamos con la noción de verticalidad; el peso aparece cuando esta tendencia natural se ve impedida por algún motivo. La satisfacción de la necesidad estructural

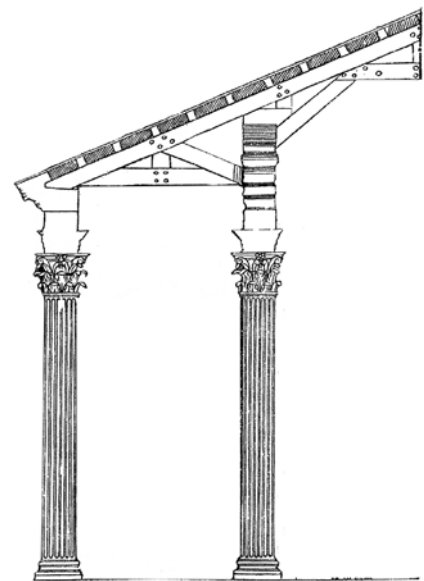
que plantea la cubrición espacial se resuelve por medio de la sección del elemento de cubrición, que debe ser capaz de resistir los esfuerzos de flexión provocados por su propio peso a fin de evitar su caída. Sin embargo, esto deviene particularmente difícil cuando el material empleado tiene un gran peso propio, no posee una adecuada resistencia a flexión y necesita constituirse como un único elemento, como ocurre con el dintel pétreo empleado en la arquitectura monumental de este periodo. Aunque posible, esta operación espacial presenta una enorme dificultad de orden estructural. Quizá la preferencia de esta primera etapa arquitectónica por el espacio exterior, por definición descubierto y definido principalmente por terrazas, pórticos y muros, pueda atribuirse a la dificultad estructural que plantea la cubrición de grandes espacios, incluso cuando se emplean materiales más ligeros y resistentes a flexión dispuestos de manera inclinada (imagen 3).



**Imagen 1.** "Pondus" (peso); "gravitas" (gravedad). Fuente: Newton, I., 1685. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Manuscrito original. The Royal Society, Ref. No.: MS/69, folio 3 (Definition VIII), London (fuente: el autor).



**Imagen 2.** Vista del trilito 53-54 del Stonehenge (Salisbury, Reino Unido, 3.100-1.100 a.C.) desde el interior del Sarsen Trilithons Horseshoe (fuente: el autor).



**Imagen 3.** Detalle de la estructura de cubrición inclinada del pórtico de acceso del Pantheon (fuente: Montaje del autor a partir de un dibujo de Andrea Palladio publicado en Waddell, G., 2008. *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. "L'Erma" di Bretschneider, Roma, p. 243).

**LA CURVATURA COMO CUALIDAD INHERENTE DE LA GRAVEDAD FÍSICA Y ARQUITECTÓNICA.**

Los romanos son los primeros en distinguir la ley de la gravedad del fenómeno del peso, la *gravitas* del *pondus*. Identifican la primera como la causa del segundo. Aunque durante dos siglos se limitan a reproducir el conocimiento físico elaborado por los filósofos griegos, durante la primera época imperial resurge el interés por los temas propios de la física. Interesa aquí la obra de Mestrio Plutarco (50-120 d.C.) quien, contraviniendo a Aristóteles, propone que la causa de la esfericidad y el movimiento circular de los planetas debe ser la misma que la que impele a los cuerpos pesados a caer hacia el suelo.

El declive de la hegemonía romana frena el desarrollo del conocimiento científico y, durante más de mil años, no se produce apenas ningún avance. Sin embargo, en el siglo XVII, Niccolo Fontana Tartaglia (1500-1557) advierte que la trayectoria rectilínea de los proyectiles terrestres descrita por Aristóteles debe ser curva en todo su desarrollo; Galileo (1564-1642) descubre que esta curvatura es parabólica; Kepler (1571-1630) describe la órbita elíptica de los planetas; y, finalmente, Newton (1642-1727)



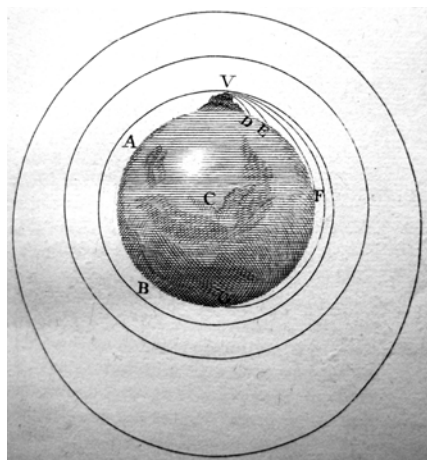
**Imagen 5.** Pantheon De Roma: el espacio arquitectónico como espacio interior (fuente: Belardi, G., 2006. *Il Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Betagamma, Roma).

demuestra, en sus *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* publicado en 1686, que el origen y la causa de todos estos movimientos curvos, tanto terrestres como celestes, así como la esfericidad de los planetas, es la gravedad (imagen 4).

La intuición romana de la curvatura inherente de la gravedad induce a considerar seriamente la conveniencia de introducir una cierta directriz curva en los elementos de cubrición espacial. La gran cúpula del Pantheon de Adriano (Roma, 118-128 d.C.) (imagen 5), sorprendentemente temprana en la historia de la arquitectura abovedada<sup>3</sup> y la mayor jamás construida con hormigón sin armar -de más de 43 metros de diámetro interior-, empieza a construirse en el año 118 d.C., aproximadamente veinte años después de que Plutarco pusiera por escritos sus intuiciones sobre el fenómeno gravitatorio.

Siendo el emperador Adriano una persona cultivada tanto en la filosofía natural como en la arquitectura y la construcción, y dado el supuesto alto grado de implicación que habría tenido en el diseño de la gran cúpula, parece lícito advertir en esta coincidencia temporal una relación causal más que casual.

La estructura arquitebada deja paso entonces a las formas estructurales curvas, como el arco de descarga, la bóveda o la cúpula, en las que la traslación horizontal de las cargas hacia los soportes verticales se produce de un modo progresivo. No se trata ya de luchar contra la gravedad ni de oponerse a ella, sino de encauzarla. La tendencia a la caída de la materia que conforma la cubrición comprime la masa y fija su postura. Su estabilidad queda de este modo garantizada por geometría y cohesión interna. La concentración de peso en la parte inferior de la estructura contribuye a contrarrestar el empuje lateral que la cubrición curva transmite al soporte. Antaño considerados como una amenaza para el hecho constructivo, el peso y la caída devienen así en garantía de la estabilidad estática (imagen 6). Es en la posibilidad de cubrir grandes espacios con cierta solvencia y en la necesidad de disponer de masivos soportes a fin de contrarrestar los empujes laterales, donde reside la preferencia de la arquitectura durante casi dos mil años por el espacio interior, por definición cerrado y aislado de su entorno.



**Imagen 4.** Trayectorias de un proyectil terrestre y de un cuerpo celeste bajo la acción de la gravedad terrestre (fuente: NEWTON, I., 1728. *A treatise of the system of the world, translated into English*. F. Fayram, London, p. 6. Fotografía del autor).

<sup>3</sup> El desarrollo de la tecnología no puede explicar por sí solo el auge de las formas abovedadas en general y de la cúpula en particular durante el periodo romano. Antes del Pantheon de Adriano sólo se habían construido cuatro grandes cúpulas en Roma: la cúpula de 21,50 metros de diámetros de la sala "Templo de Mercurio" en las termas de Baia (entre el 27 a.C. y el 69 d.C.), la cúpula de 13,00 metros de diámetro interior de la sala octogonal de la Domus Aurea (hacia el 65 d.C.), la cúpula de 16,10 metros de diámetro del ninfeo del Albanum de Domiciano en Alba (entre el 81 y el 96) y las rotondas de 20,00 metros de diámetro interior de las termas de Trajano (año 109). Además de la cúpula del Pantheon, de 43,50 metros de diámetro interior, Adriano erigió la cúpula de 26,3 metros de diámetro de la sala "Templo de Venus" de las termas de Baia, y la media cúpula de 16,75 metros de diámetro del Serapeum de la Quinta Adriana. Datos extraídos de Adam (1996: 200).

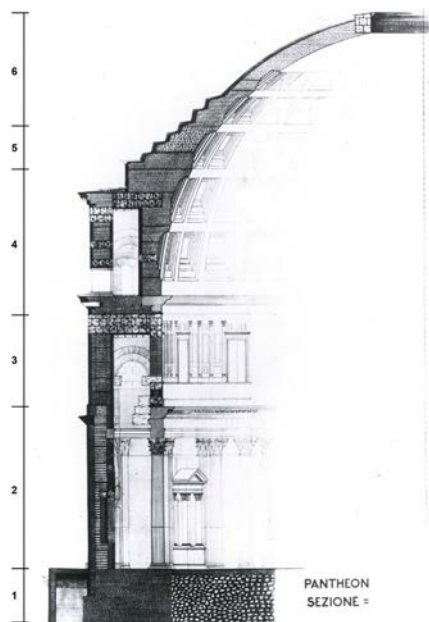
## LA CRISIS DE LOS ATRIBUTOS CLÁSICOS DE LA GRAVEDAD EN LA FÍSICA Y LA ARQUITECTURA.

Distintos hallazgos teóricos, experimentales y observacionales realizados a lo largo del siglo XIX acaban por invalidar los fundamentos de la explicación newtoniana de la gravitación sin que se vislumbre teoría alternativa alguna.<sup>4</sup> Esta crisis teórica se traslada también al ámbito de la arquitectura, que pone en duda los atributos gravitatorios hasta ese entonces característicos de la estructura clásica: la necesidad del peso y la condición del apoyo. El siglo XIX es el siglo del hierro. Aunque era conocido desde antiguo, su industrialización le otorga un nuevo rol en la construcción. Posee la capacidad de concentrar grandes esfuerzos en secciones muy reducidas, logrando una respuesta mecánica máxima con el mínimo de materia. Lejos de su condición abstracta, el cálculo matemático se adentra en el ámbito de la forma al identificar cada uno de los vectores con que se representan las fuerzas que actúan sobre la estructura con una barra metálica. La estructura como conjunto de elementos masivos, pesantes y de una cierta dimensión que soportan a compresión la acción de la gravedad por medio de su sección, da paso a una nueva concepción estructural basada en la acción solidaria de una gran cantidad de barras o elementos cortos, rígidos, rectos y de mínima sección. La masa deja paso a la línea, lo que se traduce en una disminución

real y aparente al mismo tiempo del peso de la estructura: se logra construir más espacio con menos gravedad (imagen 7).

La introducción de articulaciones y contactos tangenciales en lugar del simple apoyo horizontal altera la relación clásica entre carga y soporte. Esto permite que estructuras enormes aparenten descansar delicadamente sobre el suelo o incluso simulen mantenerse ingravidamente suspendidas en el aire. Dado que la ponderación visual de la pesantez de cualquier cubrición estructural se establece inconscientemente en relación a la robustez del soporte –presuponiendo su sección proporcional a la carga y considerando la masividad de su parte inferior como una garantía de estabilidad–, la minimización del soporte contribuye al aligeramiento aparente de la estructura en su conjunto (imagen 8).

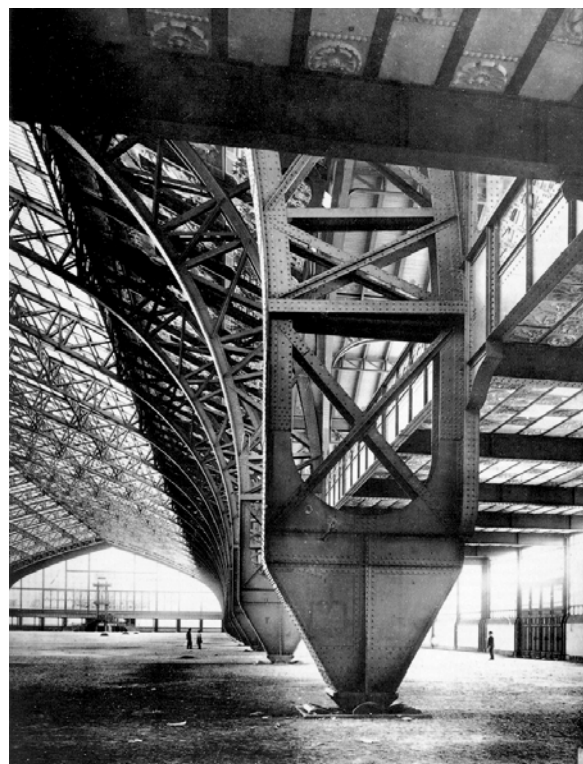
El encauzamiento de la gravedad por medio de líneas de fuerza en celosía hace que la estructura deje de ser un límite infranqueable de contención espacial. El espacio, cada vez de mayor volumen y dimensión, ya no se encuentra encerrado en el interior de la masa sino que, en total transítividad visual y luminica, se abre y se expande más allá de los delgados elementos que lo definen (imagen 9). Es el cerramiento, libre ya de toda función mecánica, el que debe delimitar visualmente y proteger homeostáticamente el espacio.



**Imagen 6.** Sección constructiva del Pantheon, por Alberto Terenzio (fuente: Waddell, G., 2008. *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. "L'Erma" di Bretschneider, Roma, p. 308).



**Imagen 7.** Vacío interior de la gran nave central del Palais des Machines de la Exposición Universal de París de 1889, del arquitecto Charles Louis Ferdinand Dutert (1845-1906) y el ingeniero Victor Contamin (1840-1893) (fuente: Giedion, S., Georgiadis, S., 1995. *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete*. Getty Center for the History of Art and the Humanities, Santa Monica, p. 140).



**Imagen 8.** Visión del apoyo del pórtico sobre la articulación inferior del Palais des Machines (fuente: Thorne, R. (ed.), 2000. *Structural Iron and steel, 1850-1900*. Ashgate Editorial, Aldershot, p. 263).

<sup>4</sup> En 1831, Faraday describe el fenómeno electromagnético sin necesidad de recurrir a la noción de fuerza a distancia de Newton, hecho que evidencia la artificialidad de un concepto que ya había sido puesto en duda a finales del siglo XVII. De hecho, el propio Newton reconoció en las revisiones posteriores a su primera edición de los Principia la necesidad de fundamentar su teoría sobre la gravitación en algo más sólido que unas misteriosas fuerzas a distancia y elaboró una explicación complementaria en la que fundamentaba el origen de dichas fuerzas en la existencia del éter. En 1887, sin embargo, Michelson y Morley publicaron los resultados de unos experimentos sobre la luz en los que se concluyó, con meridiana claridad, que el éter no existía. La gravitación universal de Newton quedó así invalidada de raíz, sin que se vislumbres teoría alternativa alguna.

## LA ABSTRACCIÓN CONCEPTUAL Y FORMAL DEL FENÓMENO GRAVITATORIO.

Tras un siglo de incertidumbre en la representación científica de la gravedad, a principios del siglo XX Albert Einstein propone un nuevo y revolucionario modo de conceptualizar el espacio y el fenómeno gravitatorio. Gracias a las vanguardias artísticas europeas de principios de siglo, por vez primera en la historia el trasvase del nuevo conocimiento científico al ámbito de la arquitectura se produce de un modo consciente y coincidente en el tiempo.

La revolucionaria noción física de espacio-tiempo desarrollada por Hermann Minkowski (1864-1909) y Albert Einstein (1879-1955) influye sobremanera en el desarrollo de la espacialidad arquitectónica moderna: el espacio se abre al exterior sin perder su carácter interior, combinando la transitividad y la apertura propias del siglo XIX con la dicotomía espacial entre interior y exterior que caracteriza a las etapas anteriores. El interior y el exterior ni se segregan ni se funden sino que, manteniendo su propia entidad, se vinculan entre sí de un modo continuo.

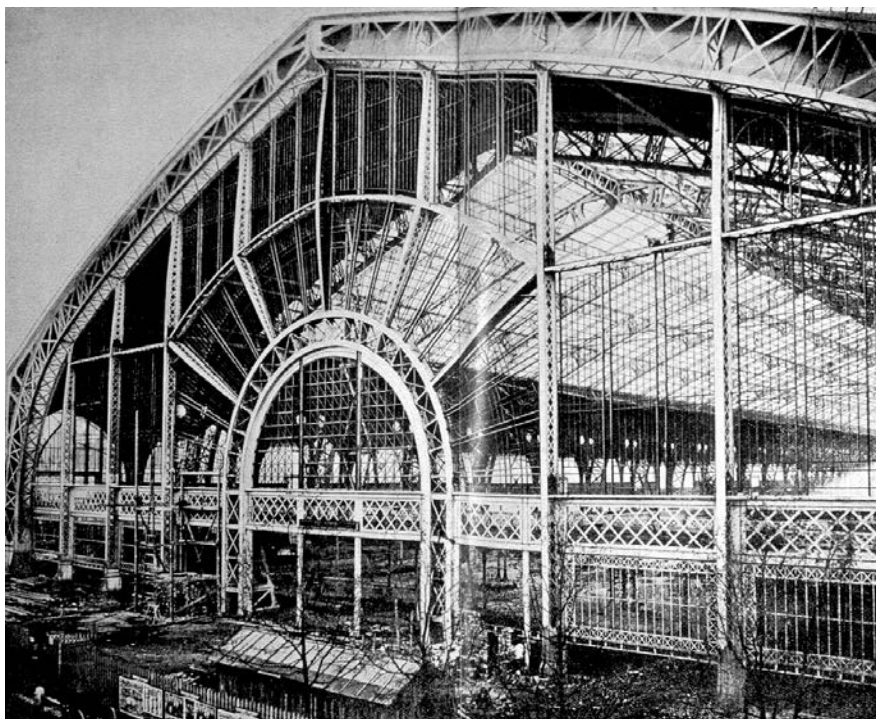
La estructura reticular en esqueleto se convierte en el sistema estructural que

hace posible esta continuidad espacial horizontal. No en vano, Le Corbusier patenta su estructura Dom-Inó en 1915 (imagen 10), sólo un año antes de que, tras una década de intensa investigación, Einstein publique su famosa teoría de la relatividad general. La estructura reticular se caracteriza por definir el espacio moderno -continuo, homogéneo e isótropo- únicamente por medio de dos planos horizontales: el de suelo y el de techo. A fin de garantizar esta continuidad, la presencia de los elementos verticales de soporte y compartimentación se minimiza al máximo en número y sección. El límite entre interior y exterior deja de ser algo definido para convertirse en un espacio intermedio que, sin pertenecer propiamente al interior o al exterior, participa de ambos al mismo tiempo a fin de cerrar sin confinar, de delimitar sin limitar (imagen 11).

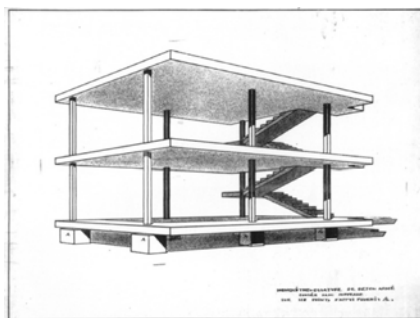
En su teoría de la relatividad general, Einstein presenta la gravedad como la ley fundamental que rige la relación de la masa con la estructura del espacio. Abstraída de la idea de gravedad como una fuerza de atracción mutua entre masas, la gravitación einsteiniana descansa sobre dos ideas fundamentales: la curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa y la flotación libre de la masa en el espacio-tiempo. En un

ejercicio de abstracción de la experiencia cotidiana sin precedentes, Einstein asocia la caída de los cuerpos graves con la flotación libre y despoja con ello al peso de su ancestral origen gravitatorio, relacionándolo exclusivamente con la física del estado sólido. La gravitación einsteiniana sustituye la pesantez por la levedad y la caída por la flotación.

La arquitectura incorpora esta gravedad leve a una forma estructural que, por medio de la abstracción, se despoja de cualquier elemento tectónico que pueda hacer referencia a la gravedad clásica. Ya no se trata de oponerse a la pesantez por medio del aligeramiento real, sino de negarla por medio de una aparente levedad formal.<sup>5</sup> La planeidad de la cubierta moderna responde a esta voluntad. Durante un milenio y medio, la arquitectura había encontrado en la inherente curvatura de la gravedad la solución al problema de la cubierta espacial. La ausencia de signos que revelen su naturaleza estructural, la ambigüedad -cuando no ocultación- de su verdadera constitución material y la aparente facilidad con que la tecnología moderna resuelve la cubierta de grandes áreas, permite abstraer formalmente a la estructura de su propio peso (imagen 12).



**Imagen 9.** Fachada de la Avenue de la Bourdonnais del Palais des Machines, durante la demolición (fuente: Imagen disponible en <http://www.studyblue.com/notes/note/n/midterm/deck/10942417>. Consultado el 1 febrero 2015).



**Imagen 10.** Le Corbusier, estructura Dom-Inó (1914-1915): en este dibujo consiguió resumir y expresar los principales atributos espaciales y gravitatorios de la estructura reticular moderna (fuente: Giedion, S., 1975. *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición*. Editorial Dossat, Madrid, p. 540).



**Imagen 11.** El espacio arquitectónico como espacio interior en continuidad con el exterior definido por dos planos horizontales. Vista de la Neue Nationalgalerie de Berlín de Mies van der Rohe (1962) desde la Potsdamer Straße (fuente: Jäger, J., 2001. *Neue Nationalgalerie Berlin*: Mies van der Rohe. Hatje Cantz, Ostfildern, pp. 1-2).

<sup>5</sup> La ligereza se vincula aquí con la escasez de peso, mientras que la levedad se relaciona con la ausencia de peso. La diferencia conceptual entre ambas consideraciones es importante: la ligereza disminuye cuantitativamente el peso pero sigue enmarcándose cualitativamente en él; la levedad, en cambio, niega la pesantez como atributo consustancial a la materia.

## LA GRAVEDAD EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO.

En el presente artículo se han apuntado, de modo muy resumido, aquellos indicios que señalan la correspondencia, no siempre lineal en el tiempo ni inmediata en lo conceptual, entre el modo de comprender la naturaleza física de la gravedad y la manera de manipular estructuralmente sus efectos sobre la materia que delimita el espacio arquitectónico.

El conocimiento científico del hecho gravitatorio no ha evolucionado de manera continua, sino sincopada. A lo largo de la historia han alternado momentos de hegemonía de grandes formulaciones teóricas y etapas de casi total vacío conceptual. Una tras otra, las teorías físicas que han intentado dilucidar la gravedad en su naturaleza y fenómenos, se han visto sistemáticamente invalidadas por la observación de nuevos fenómenos o por la formulación de nuevas concepciones

teóricas que pocos puntos en común han tenido con las teorías anteriores.

La arquitectura ha manifestado siempre esta circunstancia en el desarrollo de las tipologías estructurales que han hecho posible la construcción del espacio. Es en el elemento de cubrición espacial donde se plantea el mayor reto gravitatorio de la arquitectura. Es también allí donde puede advertirse con mayor claridad la influencia de la comprensión física de la gravedad en las consecuencias espaciales de la disposición de la materia.

Evidentemente, la física aplicada que da lugar a la innovación tecnológica tiene como punto de partida una indagación teórica previa. Este artículo pretende apuntar algo más profundo: tal como afirmó Le Corbusier<sup>6</sup>, la arquitectura no sólo debe cumplir con las leyes naturales que rigen el cosmos, sino que también debe representarlas, expresarlas, hacerlas manifiestas. Y, de entre las leyes fundamentales, la gravedad es al mismo tiempo ineludible y omnipresente.

En un momento en el que la física intenta progresar hacia una teoría unificada de la mecánica cuántica y la relatividad general, los arquitectos deberían permanecer especialmente atentos a cualquier avance. Quizá allí resida el germen de una nueva concepción espacial. ▲▢



**Imagen 12.** Exposición en el vestíbulo de la Neue Nationalgalerie de Berlín (fuente: Jäger, J., 2001. *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Hatje Cantz, Ostfildern, p. 78*).

## REFERENCIAS

- Adam, J. 1996. *La construcción romana: Materiales y técnicas*. León: Editorial de los Oficios.
- Aristóteles. 1995. *Física*, trad. G. Echandía. Madrid: Gredos.
- Einstein, A. 1950. *La relatividad: memorias originales*. Buenos Aires: Emecé.
- Einstein, A. 1984. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza.
- Einstein, A. y L. Infeld. 1986. *La evolución de la física*. Barcelona: Salvat.
- Einstein, A. 2004. *Cien años de relatividad: Los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906*, trad. A. Ruiz de Elvira. Madrid: Nivola.
- Einstein, A. 2006. *Mi visión del mundo*. Barcelona: Tusquets.
- Galilei, G. 1988. *La nueva ciencia del movimiento: Selección de los Discorsi*, ed. C. Azcárate. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- Giedion, S. 1941. *Space, time and architecture: The growth of a new tradition*. Cambridge: Harvard University Press.
- Giedion, S. 1964. *The eternal present: A contribution on constancy and change*. Londres: Oxford University Press.
- Giedion, S. 1969. *Architektur und das Phänomen des Wandels: Die 3 Raumkonzeptionen in d. Architektur*. Tubinga: Wasmuth.
- Kepler, J. 2010. *Paralipómens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*, ed. A. Malet. Barcelona: Eumo.
- Koestler, A. 1985. *Kepler*. Barcelona: Salvat.
- Kuhn, T. S. 2004. *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Le Corbusier. 1962. *La ciudad del futuro*. Buenos Aires: Editorial Infinito.
- Linares, O. 2015. *La estructuración del espacio por la gravedad y la luz*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Lucchini, F. 1996. *Pantheon*. Roma: NIS.
- MacDonald, W. L. 1976. *The Pantheon: Design, meaning and progeny*. Cambridge: Harvard University Press.
- Newton, I. 1685. "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica." [Manuscript from which the First Edition was printed. Written out by Humphrey Newton, Isaac Newton's assistant and amanuensis, and annotated by Newton and Halley]. Royal Society Centre for History of Science. [MS/69].
- Sambursky, S. 1999. *El mundo físico de los griegos*. Madrid: Alianza.
- Strathern, P. 1999. *Einstein y la relatividad*. Madrid: Siglo XXI.
- Udías Vallina, A. 2004. *Historia de la física: De Arquímedes a Einstein*. Madrid: Síntesis.
- Wheeler, J. A. 1994. *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza.

<sup>6</sup> "El hombre, producto del universo, integra, desde su punto de vista, el universo, procede de sus leyes y ha creído leerlas; las ha formulado y erigido en un sistema coherente, estado de conocimiento racional sobre el que puede actuar, inventar y producir. Este conocimiento no lo pone en contradicción con el universo, sino que lo pone en armonía; de modo que tiene razón de actuar así: no podría hacerlo de otro modo" (Le Corbusier, 1962: 20)