



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Evolución Histórica del SOPORTE como Elemento Estructural Fundamental en Arquitectura

Apellidos, nombre	Arianna Guardiola Villora (aguardio@mes.upv.es) Luisa Basset Salom (lbasset@mes.upv.es)
Departamento	Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidad Politécnica de Valencia



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presenta la evolución histórica de uno de los principales elementos estructurales solicitados a compresión: Los soportes, también llamados pilares o columnas.

2 Introducción

Los soportes son elementos estructurales básicamente verticales, aunque en determinadas ocasiones, por condicionantes de proyecto, tienen una ligera inclinación.

El uso del soporte, como elemento solicitado básicamente a compresión, se remonta al inicio de los tiempos, cuando el hombre necesitado de cobijo construye donde guarecerse.

La evolución a lo largo de la historia del soporte como elemento estructural fundamental, se basa en el uso de los materiales disponibles, la utilización de nuevas herramientas, el perfeccionamiento de la técnica constructiva y la compresión de su comportamiento estructural.

3 Objetivos

EL alumno, a lo largo de la lectura de este documento, analizará la evolución histórica del elemento estructural soporte, entendiendo las posibilidades que los distintos materiales han ofrecido a lo largo de la historia y las teorías en las que se ha basado su dimensionado, para concluir en algunas de las realizaciones del siglo XX.

4 Los soportes a lo largo de la historia

4.1 Antiguas civilizaciones:

En los inicios, los primeros soportes serían elementos fáciles de encontrar en la naturaleza, como troncos de madera, agrupaciones de cañas o piedras apiladas. Sirva como ejemplo el tronco de palmera de la *figura 2*.

Las pocas realizaciones que han llegado hasta nuestros días de la época antigua son edificios monumentales, erigidos por grupos de hombres que vivían en sociedad utilizando principalmente piedra, material más duradero y de mejor calidad que el utilizado en la construcción de los refugios.

Ejemplo de estos soportes de piedra encontramos en el conjunto megalítico de Stonehenge (*figura 1*) construido sobre el año 2500 a.C. en la llanura de Wilshire (Inglaterra).

Formados por una única pieza de piedra arenisca de unas 25 a 40 T de peso, la estabilidad de estos soportes queda garantizada al hincar un tercio de la altura total en el terreno.



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4

De las civilizaciones mesopotámicas nacidas a las orillas del Tigris y Éufrates y la egipcia, en las riberas del Nilo, apenas quedan restos arquitectónicos. Es posible ver una pequeña parte de los elementos que han sobrevivido en distintos museos europeos.

Las columnas de esta época, construidas con varios bloques de piedra superpuestos con juntas a hueso, son esculpidas para darles forma. En la *figura 3* se puede admirar la curiosa forma de la columna-papiro de granito (principios de la XVIII Dinastía Egipcia (1500 a.C.) en el British Museum de Londres, o las columnas del altar de Zeus (*figura 4*) monumento religioso de la época helenística construido en la acrópolis de Pérgamo (Asia menor) el museo de Pérgamo en Berlín.

En estos casos se trata de columnas no demasiado esbeltas, que soportan apenas la carga de la techumbre, y trabajan, por tanto, a tensiones muy bajas, bastante alejadas de la tensión de agotamiento del granito o mármol.

En el caso de Grecia, y posteriormente Roma, el dimensionado de las mismas se hacía con criterios estéticos. Vitruvio (S.I a.C) estudioso romano de las obras de la

antigüedad y autor del tratado "Los diez libros de Arquitectura" describe los órdenes griegos en el capítulo I del libro IV.

El texto de la *figura 5*, corresponde a un fragmento del capítulo "De las tres especies de columnas y de su invención" mencionado en el párrafo anterior, traducida del latín por el presbítero Joseph Ortiz y Sanz en el año 1787. Los dibujos son parte de la lámina XXIX realizada por el mismo autor con objeto de facilitar la interpretación del texto, ya que del texto de Vitruvio no se han encontrado grabados.

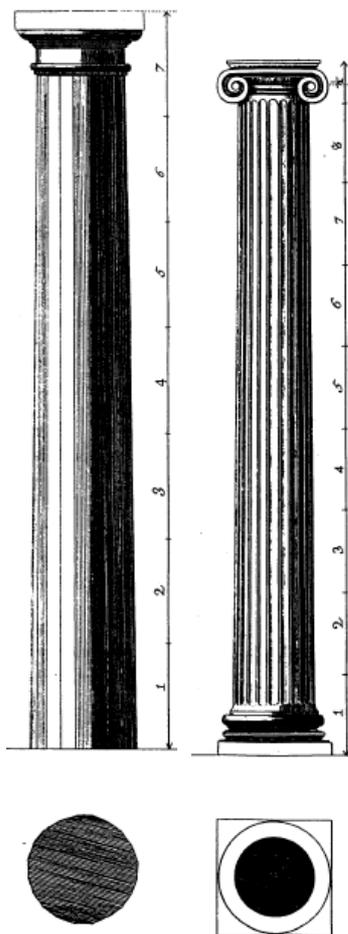


Figura 5

Queriendo, pues, hacer las columnas del Templo a Apolo Panionio, como no tuviesen regla ninguna para sus proporciones, y discurriendo modo de hacerlas aptas para sostener peso y agradables á la vista, tomaron la medida de un vestigio de pie humano, y hallando ser la sexta parte de la altura del hombre, la trasladaron á la columna, dando a esta de altura seis veces el grueso de su imoscapo¹, incluso el capitel. De esta suerte la columna Dórica, proporcionada al cuerpo varonil, comenzó á dar á los edificios firmeza y hermosura.

Así mismo, queriendo después edificar un Templo á Diana de nueva forma y belleza, siguiendo los mismos principios, le regularon á la delicadeza del cuerpo femenil. Hicieron, pues, la columna alta ocho diámetros de su imoscapo, para que fuese mas ayrosa : pusieronla basa debaxo, en significación del calzado: volutas á una y otra parte del capitel, á imitación del cabello rizo y ensortijado, adornando la frente con cimacios y festones, y en toda la caña de la columna excavaron canales, imitando los pliegues delicados de la túnica matronal. De esta forma vinieron á hallar dos especies de columnas, una varonil y sin adornos y otra con primorosos ornatos y proporciones femeniles.

Los Architectos posteriores adelantando sucesivamente en sutileza y elegancia, gustando de lo ayroso y gentil en los miembros, dieron al alzado de la columna Dórica siete gruesos de su imoscapo, y ocho y medio á la Jónica quedándola este nombre por haber sido los Jonios sus inventores.

4.2 La Edad Media

En el siglo V, tras la caída del Imperio Romano, y las invasiones de los bárbaros, las condiciones de la producción feudal redujeron la demanda de una ciencia útil al mínimo, siendo la Iglesia Católica la responsable de la supervivencia de la cultura en Occidente, hasta el nacimiento de las universidades en el siglo XI.

¹ Imoscapo: diámetro inferior de la columna



Durante esta etapa, el manual de Vitruvio, leído y copiado en las escuelas monásticas, debió servir de inspiración a los manuales de las logias de canteros, de los que apenas han llegado fragmentos a nuestros días.

Los soportes evolucionarán desde las pesadas moles de los normandos hasta la esbeltez de las columnas góticas. Ejemplos de columnas románicas encontramos en las *figuras 6 y 7* que corresponden a la iglesia de Santa María del Naranco en Asturias (S.IX) o en el claustro de la Catedral de la Seu d'Urguell (S.XII)



Figura 6



Figura 7

En el Siglo XII nace el Gótico en Francia, estilo en el que las paredes, liberándose de toda misión resistente, se hacen livianas y se diferencian, de forma radical, del esqueleto portante.

Los constructores góticos desarrollaron un conocimiento intuitivo importante de la distribución de las fuerzas y, aprovechando al máximo las propiedades de la piedra, la hicieron trabajar más a compresión y menos a flexión.

La teoría no desempeñó papel alguno en los alardes estructurales del Gótico. Fueron los maestros de las logias los que establecieron una serie de reglas empíricas que, sancionadas por la experiencia, transmitieron con el máximo secreto entre las distintas generaciones. Un ejemplo literario que describe el proceso constructivo de "prueba-error" de las catedrales góticas lo puedes encontrar en el *best seller* "Los pilares de la tierra", del autor británico Ken Follet.

Según el profesor Jacques Heyman, los constructores de catedrales medievales cuantificaban la resistencia de la piedra a compresión con un parámetro indirecto: la altura teórica que podría alcanzar una columna prismática antes de que colapsase por su propio peso. Para una arenisca de peso específico 20 kN/m^3 y tensión de rotura de 40 kN/m^2 esta altura sería de 2 km mientras que columna de granito podría alcanzar los 10 km . Si se considera que la catedral gótica más alta mide 50 m , y que los cuatro pilares del crucero soportan, además de su peso, el de las bóvedas, techumbre de madera, y sobrecarga de viento, se concluye que están trabajando a una tensión media inferior a $1/10$ de la resistencia de rotura a compresión.

La verticalidad de algunos de estos soportes de piedra se puede apreciar en la *figura 8* que corresponde a un soporte de La Sainte Chapèle en París (S.XIII), al soporte central de la sala capitular de la Catedral de Wells en Inglaterra (S.XIV) y a uno de los soportes de la Lonja de la Seda de Valencia (S.XV)



Figura 8

4.3 El Renacimiento

El Renacimiento (siglo XV-XVI) supondrá volver a estudiar a los clásicos y traerá consigo las primeras teorías científicas.

Leonardo da Vinci (1452-1519) estudiará el comportamiento de los soportes, analizando en el Códice del *Institut de France* de París, cómo influye la esbeltez o el área en su resistencia o preguntándose en el Códice de Madrid acerca de la flexión de piezas cargadas a compresión, idea que ilustra con los dibujos de la figura 9, concluyendo que

“El soporte del peso forzosamente se dobla o se comprime en aquella parte que se encuentra debajo del peso que lo oprime. Y sea cual sea la posición en que esté colocado el centro del peso sobre el soporte, éste siempre se doblará de modo que la mitad de su altura cerchará hacia adentro”

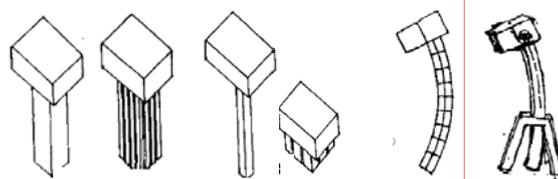


Figura 9

La arquitectura volverá su mirada a los estilos clásicos. Las reglas del Renacimiento, mucho más sencillas de aplicar que las de los maestros medievales, serán fácilmente aceptadas y rápidamente difundidas gracias a la introducción de la imprenta en Europa a mediados del S.XV.

León Battista Alberti publicará el primer tratado sobre Arquitectura de esta época: “de Re Aedificatoria” (1485), seguida de la primera edición de *I quattro libri dell'Architettura* (1570) de Andrea Palladio. Tratados que coexistirán con la reedición de Los diez libros de Arquitectura de Vitruvio.



4.4 El Barroco (S.XVII y XVIII)

En 1638 se considera que nace la Mecánica, con la publicación de la obra de Galileo "*Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze*". En esta época se consolidará el método experimental con objeto de verificar las teorías propuestas.

En 1729 Musschenbroek, concluirá, tras la realización de un número importante de ensayos de barras esbeltas solicitadas a compresión, que la carga de colapso es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de la pieza.

En 1744 Euler obtiene el valor de la carga crítica, (carga que soporta la barra cuando ocurre el pandeo) función de la longitud de la pieza y de una constante C , que denomina coeficiente de elasticidad absoluta de la pieza, (en lugar de la rigidez EI), y para la que da las dimensiones correctas.

La expresión de Euler será cuestionada y discutida durante casi 200 años por no coincidir los resultados experimentales con la teoría. Los ingenieros, encontrando excesivamente teóricas las especulaciones de los matemáticos, optarán por aplicar la teoría de rotura propuesta por Coulomb en 1773, recogida por los manuales de ingeniería de la época y aplicable a macizos de mampostería o ladrillo al haber sido sancionada por la experiencia.

En este periodo, la división de opiniones entre arquitectos, ingenieros y matemáticos acerca del dimensionado de los soportes a compresión propiciará la realización de numerosos ensayos de resistencia, como por ejemplo los realizados por Gauthiey (1732-1807) con motivo de la construcción del Panteón de París sobre distintos materiales pétreos o por Lamblardie (1747-1797) sobre puntales de madera.

El problema de la inestabilidad no quedó resuelto satisfactoriamente hasta finales del XIX cuando el uso del hierro y el acero, materiales de comportamiento más cercano a las hipótesis de partida de Euler extendieron su uso en construcción. (La expresión de Euler es utilizable para grandes esbelteces, lo que exige que materiales muy resistentes estén muy solicitados)

En la *figura 10* se puede observar la esbeltez relativa de las columnas de mármol de la plaza de San Pedro, con un soporte de mampostería, uno de ladrillo, uno de madera y uno de fundición.



Figura 10



4.5 La Revolución Industrial

El espectacular aumento de las obras en hierro que se produce en el siglo XIX, propiciado por la Revolución Industrial y el desarrollo del ferrocarril evidencia la necesidad práctica de resolver el problema del pandeo, sobre todo tras una serie de colapsos de puentes de entramados metálicos causados por el pandeo lateral del cordón superior.

El profesor Ludwig von Tetmajer (1850-1905), responsable del laboratorio de materiales en el Zürich Polytechnical Institute propondrá, tras la realización de un gran número de ensayos en barras de hierro y acero, una fórmula lineal para obtener la carga crítica de pandeo de barras con esbelteces inferiores a 110, dando por válida la fórmula de Euler para barras con esbelteces mayores.

Esta formulación, recogida en las primeras normas estructurales será, a partir de este momento, ampliamente utilizada en toda Europa.

La *figura 11* del Palacio de Cristal del Parque del Retiro, en Madrid, del arquitecto Ricardo Velázquez Bosco (1877) es un claro ejemplo de la esbeltez que el nuevo material permite a los soportes.



Figura 11



Figura 12

En 1879, el constructor francés François Hennebique patentó un sistema de empalme entre soportes y vigas de hormigón armado que facilitó el uso extensivo del nuevo material en edificación. Un anuncio de la época se puede ver en la *figura 12*. Habían nacido los dos nuevos materiales, protagonistas indiscutibles de la arquitectura del S.XX.

4.6 El Siglo XX

El perfeccionamiento en la fabricación del acero, así como la mejora en el conocimiento de su comportamiento propició su uso más allá del comportamiento elástico. Siendo necesario revisar las fórmulas de aplicación práctica del pandeo.

Engesser (1848-1931) propuso en 1895 la aplicación de la fórmula de Euler con esbelteces menores utilizando en lugar del módulo de deformación longitudinal del acero, el módulo tangente E_t , fórmula modificada posteriormente por von Karman (1910) utilizando el módulo reducido E_r . La polémica entre la teoría del módulo reducido y el tangente duró medio siglo hasta que Shanley puso de manifiesto en 1947, tras elaborar un modelo que le permitiera describir el comportamiento en régimen plástico, que la teoría del módulo tangente era más realista que la del módulo reducido, lo cual se confirmó experimentalmente.



Los nuevos materiales fueron rápidamente adoptados por el movimiento moderno, cuyas premisas se recogen en “Los cinco puntos para una nueva arquitectura”, enunciados por Le Corbusier en 1926.

1. La casa sobre *pilotis*.
2. La terraza jardín.
3. La planta libre.
4. La ventana longitudinal.
5. La fachada libre

El uso estructural del hormigón y acero facilitó la materialización de los siguientes puntos: el primero construyendo la primera planta sobre soportes exentos dejando la planta baja libre para la circulación de vehículos; el tercero, al ocupar los pilares metálicos o de hormigón mucha menos superficie en planta y por último el quinto, retrasando los soportes respecto del cerramiento, liberándolo de su función estructural.

No obstante los puntos anteriores, los arquitectos del s. XX serán más proclives a dejar exentos los pilares de acero que los del hormigón, los cuales quedan generalmente emboscados en el cerramiento para reducir la superficie de ocupación en planta. Este tipo de pilares de hormigón es el que más se utiliza en edificación, con diferencia, a fecha de hoy. Fijate en las esquinas de las habitaciones de tu casa o en las paredes de los locales comerciales ¿Puedes verlos?

Por otro lado, las disposiciones normativas en materia de protección al fuego de las estructuras de acero dificulta cada vez más el poder dejar los soportes metálicos vistos.

Ejemplos de soportes de acero vistos se muestran en *figura 13* y *figura 14* que corresponden a la National Gallery en Berlín y la Terminal T4 en Madrid respectivamente.

Por otro lado, cuando los soportes de hormigón quedan exentos, suelen ejecutarse con sección circular como el de la *figura 15*. (Edificio Nexus UPV). Un ejemplo a destacar de soportes de hormigón con sección circular es el edificio de la Caja de Ahorros de Granada del arquitecto Alberto Campo Baeza. ¿Sabes qué diámetro tienen y cuál es la justificación del mismo?



Figura 13



Figura 14



Figura 15



5 Resumen

A lo largo de este artículo hemos visto la evolución histórica del soporte como elemento estructural, que se puede resumir en el siguiente cuadro:

Edad Antigua (hasta S. V dC)	Soportes poco esbeltos de piedra Tratado de Arquitectura de Vitruvio
Edad Media (S. V al XV)	Alta edad media (hasta S.XII) Románico (soportes de piedra poco esbeltos) Baja edad media (hasta S. XV) Gótico, la conquista de la verticalidad. Criterios de dimensionado intuitivos: Tratados secretos de las logias
Renacimiento (S. XV –XVI)	Primeras teorías científicas: Leonardo Da Vinci ensaya elementos a compresión Primeros tratados: los 5 órdenes de Arquitectura para las columnas
Barroco (S. XVII-XVIII)	Nacimiento de la Mecánica: diálogos de Galileo Nacimiento del método experimental: ensayos de barras a compresión Euler obtiene la expresión matemática de la carga crítica en compresión Criterios de dimensionado: Los manuales de ingeniería.
Revolución Industrial (S. XIX)	Primeros soportes de fundición y el hierro forjado Primeras patentes de soportes de hormigón armado
Siglo XX	Movimiento moderno en Arquitectura: Soportes exentos Uso intensivo y extensivo de los soportes de acero y hormigón armado

Tabla 1. Resumen histórico

El soporte, que lo largo de la historia ha cambiado de forma, se ha estirado, intentando alcanzar el cielo, y se ha construido con diferentes técnicas y materiales, es indiscutiblemente uno de los protagonistas de la Arquitectura del siglo XX. ¿Con qué nuevos materiales se podrá construir en el futuro?

6 Bibliografía

6.1 Libros:

[1] Frampton, Kenneth: "Historia crítica de la arquitectura moderna", Ed. GG. 2ª edición ampliada 1987

[2] Timoshenko, Stephen P.: "History of strength of materials", Dover publications, INC, New York, 1983.

[3] Heyman, Jacques.: "La ciencia de las estructuras", Ed. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001

[4] Ortiz y Sanz, Joseph.: "Los diez libros de Arquitectura de Vitruvio", Edición facsímil impreso por la imprenta Real en 1787 en Madrid. Difundida libremente por la biblioteca de la Sociedad Española de Historia de la Construcción en su versión digitalizada.

[5] Cervera Bravo, Jaime.: "Cálculo de estructuras y resistencia de materiales. Origen y desarrollo de los conceptos utilizados" Tesis doctoral defendida en Madrid, noviembre 1982



6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

- (1) www.wikipedia.org
- (2) <http://www.aq.upm.es/biblioteca/fondoantiguo/historiaconstruccion.html>

6.3 Figuras e imágenes

Figura 1. Stonhenge, Salisbury (UK). Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Figura 2. Soporte Papiro en el British Museum (Londres) Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Figura 3. Tronco de palmera. Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Figura 4. El altar de Zeus en el Museo de Pérgamo (Berlín). Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Figura 5. Texto e imagen del libro de Vitrubio en la traducción de Joseph Ortiz y Sanz en el año 1787. *Esta imagen forma parte del dominio público en razón de la fecha de muerte de su autor.* <http://www.aq.upm.es/biblioteca/fondoantiguo/Vitruvio.htm>

Figura 6. Claustro de la catedral de la Seu d'Urguell. (Autora de las fotografías Arianna Guardiola)

Figura 7. Santa María del Naranco en Asturias. Autora de la fotografía Luisa Basset

Figura 8. Soportes góticos. Autora de la fotografía Arianna Guardiola

Figura 9. Dibujos de Leonardo Da Vinci sobre soportes. Del código del *Institut de France* de París. *Esta imagen forma parte del dominio público en razón de la fecha de muerte de su autor.*

Figura 10. Soportes de materiales diversos. Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Figura 11. Palacio de cristal del parque del Retiro (Madrid). Autora de las fotografías Luisa Basset.

Figura 12. Anuncio patente François Hennebique. *Esta imagen forma parte del dominio público en razón de la fecha de la misma.*

Figura 13. *National Gallery* (Berlín) Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Figura 14. *Terminal T4* (Madrid) Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Figura 15. *Edificio Nexus en la U.P.V.* (Valencia)) Autora de las fotografías Arianna Guardiola