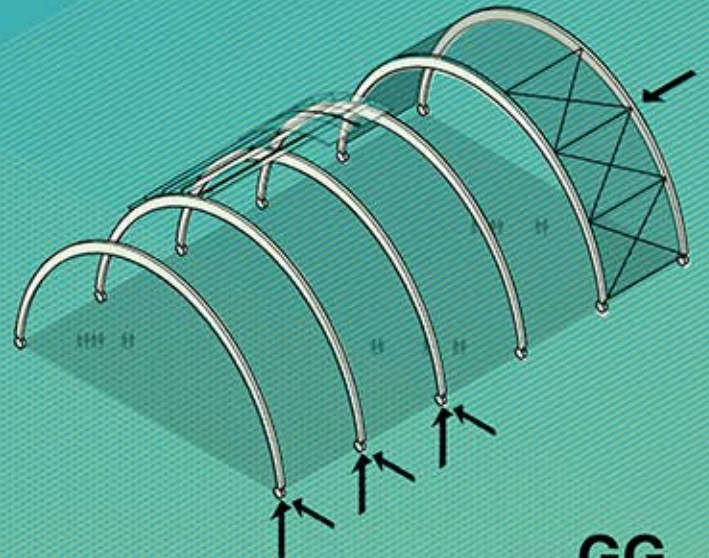
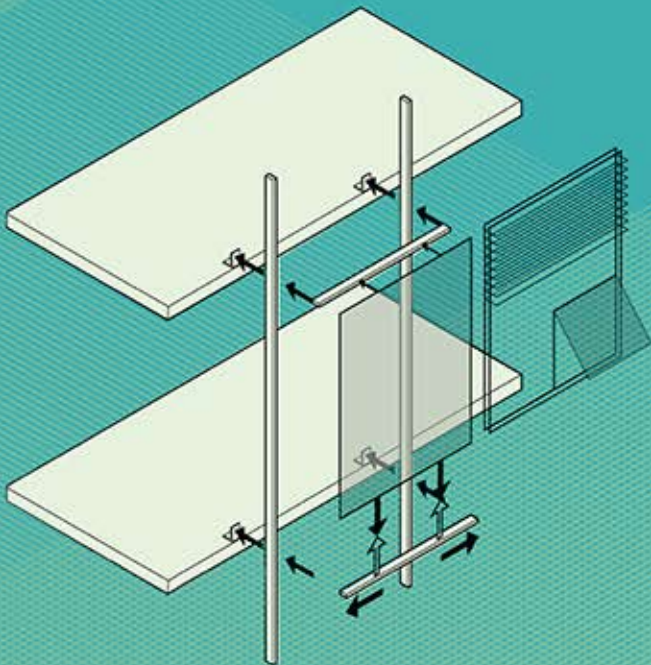


MANUAL DE ESTRUCTURAS ILUSTRADO

FRANCIS D. K. CHING

BARRY S. ONOUE · DOUGLAS ZUBERBUHLER

SEGUNDA EDICIÓN AMPLIADA



GG

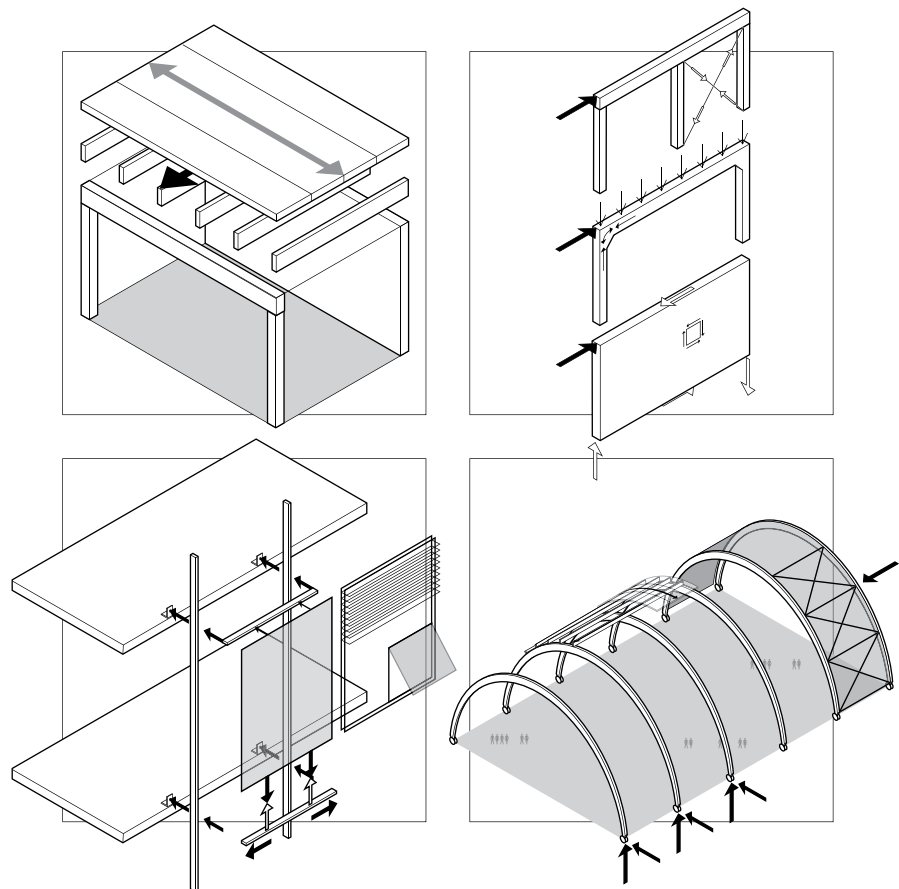
Editorial Gustavo Gili, SL

Via Laietana 47, 2º, 08003 Barcelona, España. Tel. (+34) 93 322 81 61

Valle Bravo, 21, 53050 Naucalpan, México. Tel. (+52) 55 55 60 60 11

Manual de estructuras ilustrado

Segunda edición ampliada



Francis D. K. Ching
Barry Onouye
Douglas Zuberbuhler

GG®

Título original: *Building Structures Illustrated*, segunda edición,
publicada por John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (Nueva Jersey), 2014.

Diseño de la cubierta: RafamateoStudio

2ª edición, 2020

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

La Editorial no se pronuncia ni expresa ni implícitamente respecto a la exactitud de la información contenida en este libro, razón por la cual no puede asumir ningún tipo de responsabilidad en caso de error u omisión.

Todos los derechos reservados. Esta traducción se publica con la autorización del editor original en lengua inglesa John Wiley & Sons Inc.

© de la traducción: Carlos Jiménez Romea

© John Wiley & Sons, Inc., 2009, 2014

y para esta edición

© Editorial Gustavo Gili, SL, Barcelona, 2014, 2020

ISBN: 978-84-252-3273-2 (PDF digital)

www.ggili.com

Este libro se ha impreso sobre papel fabricado a partir de madera procedente de bosques y plantaciones gestionadas con altos estándares ambientales, garantizando una explotación de los recursos sostenible y beneficiosa para las personas. También para generar un menor impacto, hemos dejado de retractilar nuestros libros. Con estas medidas, queremos contribuir al fomento de una forma de vida sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Índice

Prólogo...vii

- 1 Estructuras...1**
- 2 Esquemas estructurales...39**
- 3 Elementos portantes horizontales... 89**
- 4 Elementos portantes verticales...147**
- 5 Estabilidad lateral...197**
- 6 Estructuras de grandes luces... 235**
- 7 Estructuras de edificios en altura... 277**
- 8 Integración de instalaciones... 305**

Bibliografía...335

Índice...337

Prólogo

El ámbito de las estructuras cuenta con numerosos textos y muy destacados. Unos centran su atención en aspectos como la estática y la resistencia de materiales, en el diseño y el análisis de elementos estructurales, como vigas y pilares, o en determinados materiales estructurales. Para los profesionales es fundamental comprender el comportamiento de los distintos elementos estructurales bajo distintos estados de carga, ya que de ahí se deriva la habilidad de elegir los materiales, las formas, las dimensiones y los sistemas constructivos más adecuados en cada caso. Este libro centra sus esfuerzos en presentar las estructuras como sistemas de elementos interrelacionados que sirven para crear y dar soporte a los entornos habitables que denominamos arquitectura.

Una característica esencial de esta publicación es que se aproxima a las estructuras de una forma global. Parte de una revisión concisa de la evolución de los sistemas estructurales a lo largo de la historia, y plantea la idea de que estos esquemas estructurales, patrones de soportes y vigas, no solo sirven para fines estructurales, sino que también refuerzan una determinada idea arquitectónica. El núcleo de este libro consiste en un examen de los sistemas horizontales y verticales que albergan nuestras actividades, y cómo contribuyen a las dimensiones verticales de la forma y el espacio. A continuación revisa los aspectos críticos de la estabilidad y las cargas laterales, las propiedades específicas de las estructuras de grandes luces y las estrategias actuales para edificios de gran altura. El capítulo final contiene una breve e importante revisión de la integración de los sistemas estructurales con otros elementos de la edificación.

Aunque este texto evita deliberadamente una aproximación estrictamente matemática a las estructuras, no deja de lado los principios fundamentales que gobiernan el comportamiento de los elementos, sus conexiones y sistemas estructurales. Con el fin de servir de guía en el proceso preliminar de proyecto, todos los temas están ilustrados con numerosas ilustraciones que informan, instruyen y, tal vez, inspirarán ideas sobre cómo un modelo estructural puede apoyar una idea de proyecto.

Los autores confían en que este trabajo tan pródigo en ilustraciones sirva como recurso de consulta tanto para estudiantes de arquitectura como para jóvenes profesionales, a la hora de comprender los sistemas estructurales como parte esencial e integral del proceso y de la ejecución del proyecto.

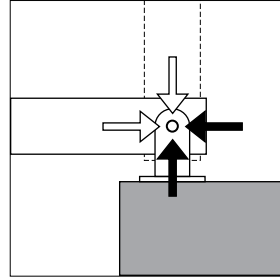
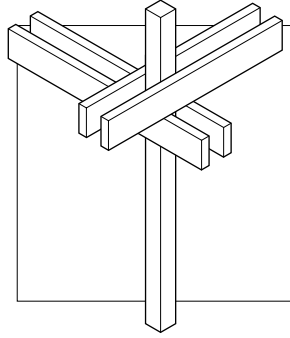
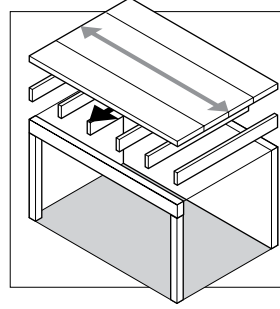
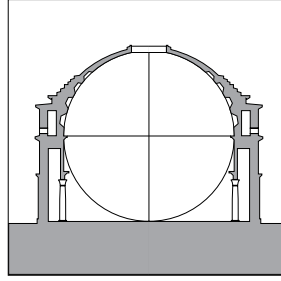
Equivalentes métricos

El Sistema Internacional (SI) de unidades es un sistema de unidades físicas coherentes aceptado en el ámbito internacional. Emplea el metro, el kilogramo, el segundo, el amperio, el grado kelvin y la candela como unidades básicas de longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura e intensidad luminosa respectivamente. Para reforzar la comprensión del SI, a lo largo del libro se proporcionan equivalentes métricos de acuerdo con las siguientes convenciones:

- Todas las cifras se indican en metros (m), centímetros (cm) o milímetros (mm) conforme a las convenciones de los distintos oficios del sector de la construcción.
- Se han incluido entre paréntesis las medidas en pies y en pulgadas en aquellos casos en los cuales se ha considerado relevante o informativo (por ejemplo, por tratarse de productos comerciales que se fabrican siguiendo dicho sistema de unidades).

1

Estructuras

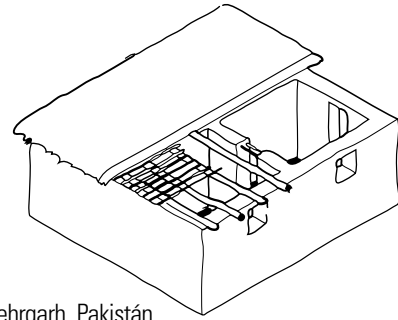


ESTRUCTURAS

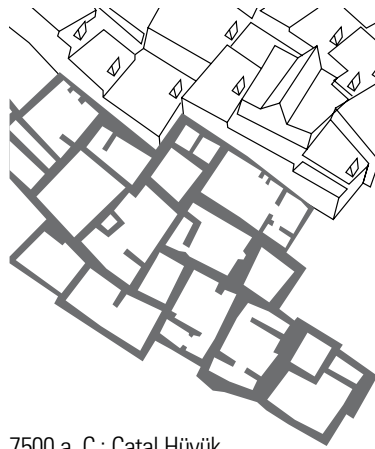
Los edificios —construcciones relativamente permanentes que se levantan sobre un pedazo de terreno para que sean habitables— han evolucionado a lo largo de la historia desde simples refugios contruidos con palos, adobe o piedra, a las construcciones más sofisticadas de hormigón, acero y vidrio de la actualidad. A lo largo de esta evolución de la tecnología de la construcción, lo que ha sido constante es la presencia continua de algunas formas y sistemas estructurales capaces de hacer frente a la gravedad, el viento y en ocasiones los terremotos.

Podemos definir 'sistema estructural' como la unión estable de elementos diseñados para que funcionen como una unidad que soporta y transmite al terreno las cargas correspondientes, de una forma segura y sin exceder la resistencia de cada uno de los elementos. Mientras que las formas y los materiales de los sistemas estructurales han evolucionado debido a los avances tecnológicos y culturales, sin olvidar la experiencia derivada de los numerosos edificios que se han derrumbado, hay cuestiones que siguen siendo esenciales para todo tipo de edificio, con independencia de su escala, contexto o función.

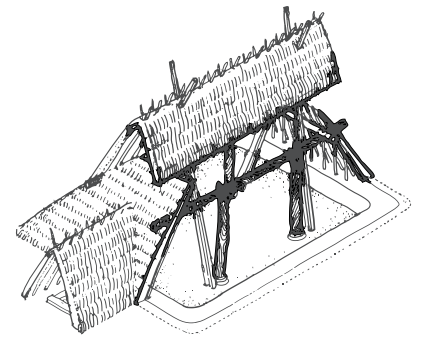
La breve reseña que sigue a continuación ilustra el desarrollo de los sistemas estructurales a lo largo de la historia, desde los primeros intentos para satisfacer las necesidades humanas fundamentales de refugio frente al sol, el viento o la lluvia, a las mayores luces, alturas y complejidad de la arquitectura moderna.



6500 a. C.: Mehrgarh, Pakistán.
Estructuras tabicadas de adobe.



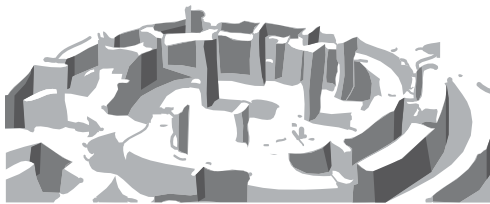
7500 a. C.: Catal Hüyük (Anatolia), Turquía.
Viviendas de adobe con muros interiores revestidos.



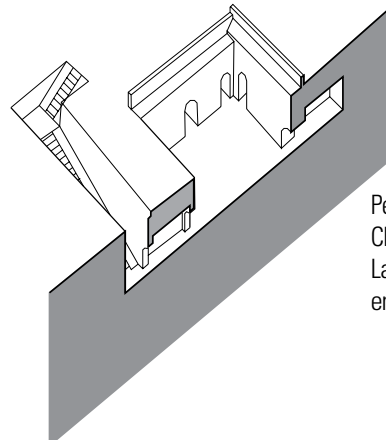
5000 a. C.: Banpo, China.
Vivienda con pilares gruesos para soportar la techumbre.

5000 a. C. Edad del Bronce

El período neolítico comenzó con el advenimiento de la agricultura en torno al 8500 a. C., y dio paso a la primera Edad del Bronce con el desarrollo de las herramientas de metal en torno al 3500 a. C. La práctica de utilizar cuevas como refugio y residencia ya venía produciéndose desde hacía miles de años, y continuó desarrollándose como forma arquitectónica, desde simples extensiones de cuevas naturales hasta templos e iglesias excavados en laderas de montañas.

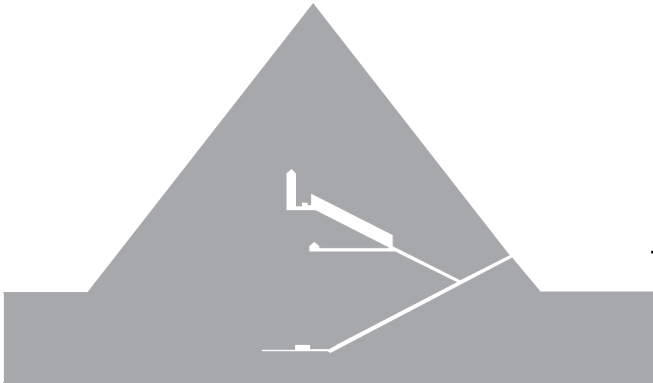


Göbekli Tepe, Turquía.
El templo de piedra más antiguo del mundo que se conoce.

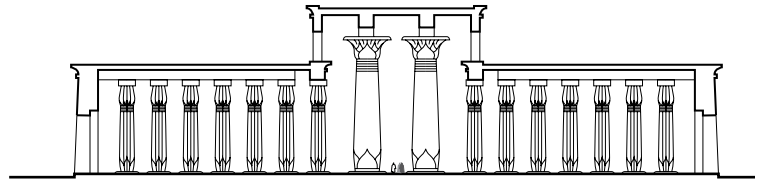


Período neolítico: norte de la provincia de Shaanxi, China.
La ocupación de cuevas como vivienda continúa en la actualidad.

3400 a. C.: los sumerios introdujeron los hornos cerámicos.



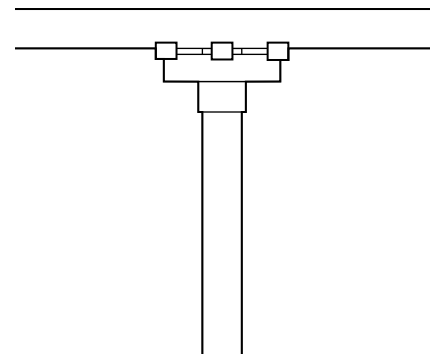
2500 a. C.: Gran Pirámide de Keops, Egipto.
Hasta el siglo XIX esta pirámide de piedra era la estructura más alta del mundo.



1500 a. C.: templo de Amón, Karnak, Egipto.
La sala hipóstila es un ejemplo sobresaliente de la construcción adintelada en piedra.



2600 a. C.: Harappa y Mohenjo-Daro, valle del Indo, Pakistán.
Ladrillos cocidos y falsos arcos.



Siglo XII a. C.: arquitectura de la dinastía Zhou.
Ménsulas (dougong) sobre los capiteles de las columnas que ayudan a apoyar los aleros volados.

2500 a. C.

1000 a. C. Edad del Hierro

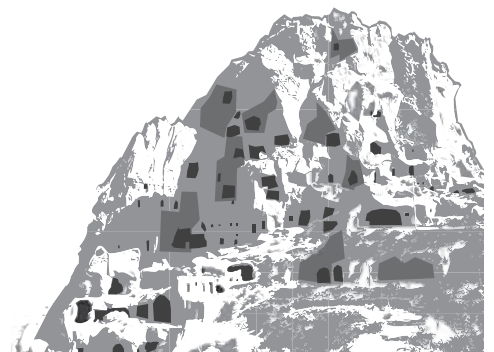
Mientras que el uso de cuevas como vivienda perdura en diversos formatos y en distintas partes del mundo, la mayor parte de la arquitectura se construye con una combinación de materiales que definen unos límites espaciales para dar refugio, albergar la vida doméstica, conmemorar eventos o convertirse en monumentos. Las primeras viviendas consistían en entramados de madera toscos, con muros de adobe y tejado de paja. En ocasiones se excavaba en el terreno para proporcionar calor y protección añadidos; otras veces, la vivienda se elevaba sobre el terreno para mejorar la ventilación en climas cálidos y húmedos, o para protegerse de la crecida de ríos o lagos. La utilización de piezas pesadas de madera para el entramado de los muros o para salvar las luces de la cubierta ha seguido evolucionando a lo largo del tiempo y se ha perfeccionado, especialmente en la arquitectura china, coreana y japonesa.



3000 a. C.: Alvastra, Suecia.
Viviendas elevadas sobre pilotes de madera.

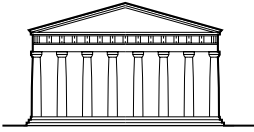
3000 a. C.: Los egipcios mezclaban paja con barro para ligar el adobe.

1500 a. C.: Los egipcios trabajaban el vidrio fundido.

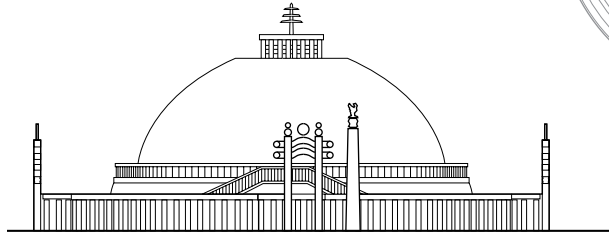
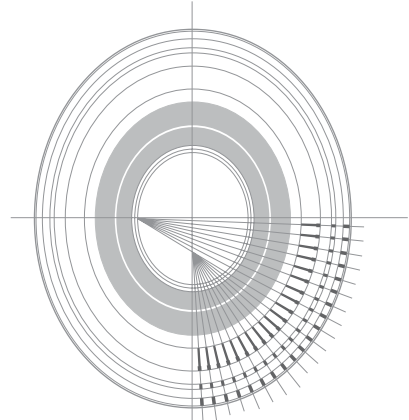


1000 a. C.: Capadocia (Anatolia), Turquía.
Excavaciones extensivas dieron lugar a viviendas, iglesias y monasterios.

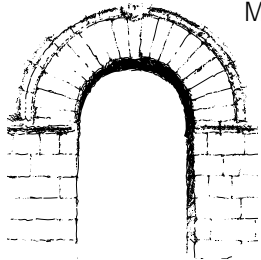
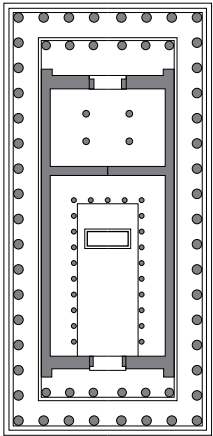
1350 a. C.: La dinastía Shang (China) desarrolló un proceso avanzado de moldeado en bronce.



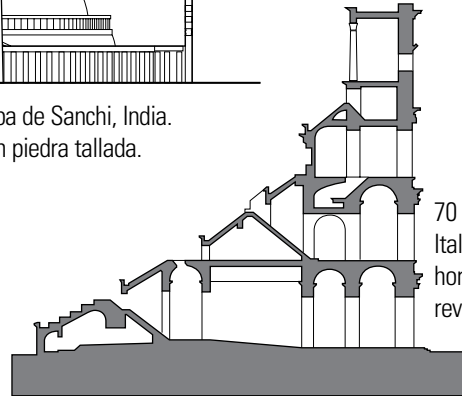
447 a. C.: Partenón, Atenas, Grecia. Este templo dedicado a Atenea es considerado la culminación del orden dórico.



Siglo III a. C.: Gran Stupa de Sanchi, India. Monumento budista en piedra tallada.



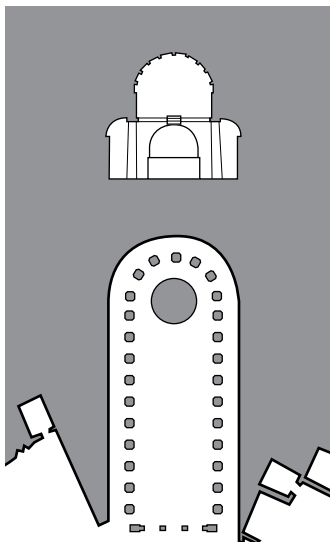
Siglo IV a. C.: Porta Pulchra, Perugia, Italia. Los etruscos desarrollaron el arco y la bóveda de fábrica.



70 d. C.: Coliseo de Roma, Italia. Anfiteatro de hormigón y ladrillo revestido de piedra.

500 a. C.

1 d. C.



200 a. C.: India. Numerosos ejemplos de arquitectura budista, jainista e hindú excavada en la piedra.

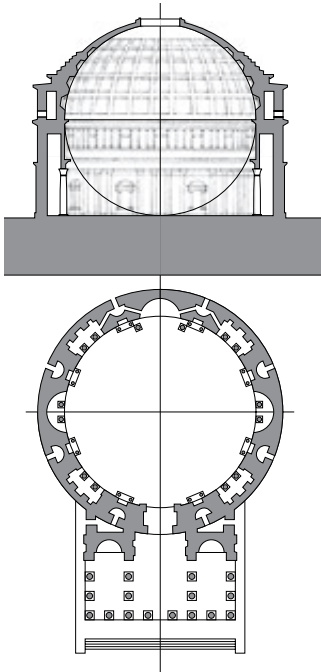


10 a. C.: Petra, Jordania. Tumbas reales medio exentas, medio excavadas en la roca.

Siglo V a. C.: Hierro fundido en China.

Siglo IV a. C.: Los babilonios y los asirios utilizaban betún para ligar ladrillos y piedras.

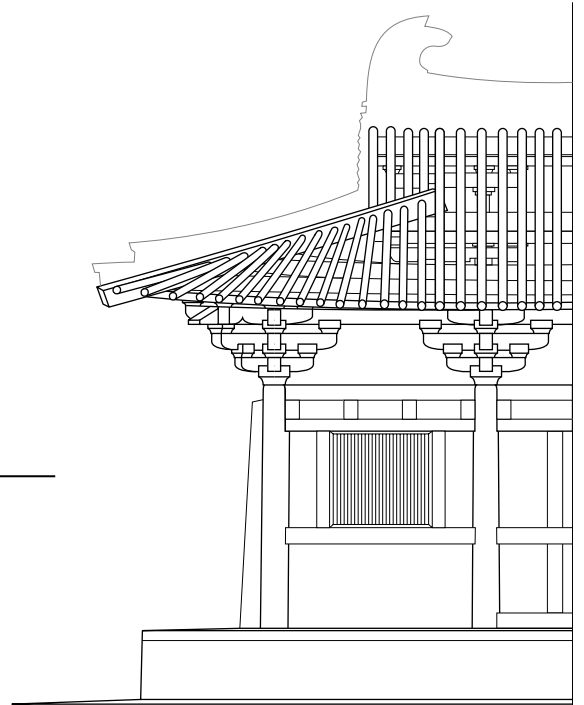
Siglo III a. C.: Los romanos hacían hormigón con cemento puzolánico.



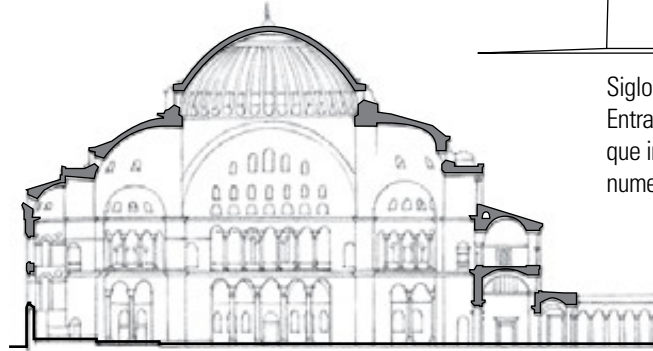
125 d. C.: Panteón de Roma, Italia.
Mayor cúpula nervada del mundo hasta el siglo XVIII.



Siglo III: Tikal, Guatemala.
Ciudad maya de pirámides y palacios de piedra.



Siglo VII: arquitectura de la dinastía Tang.
Entramado de madera resistente a terremotos que incorpora pilares, vigas, correas y numerosas ménsulas voladas.



800

532-537 d. C.: Santa Sofía de Constantinopla (actual Estambul), Turquía. Cúpula central sobre pechinas que permiten la transición de una bóveda circular a una planta cuadrada. Se utiliza hormigón en la construcción de las bóvedas y los arcos de los niveles inferiores.

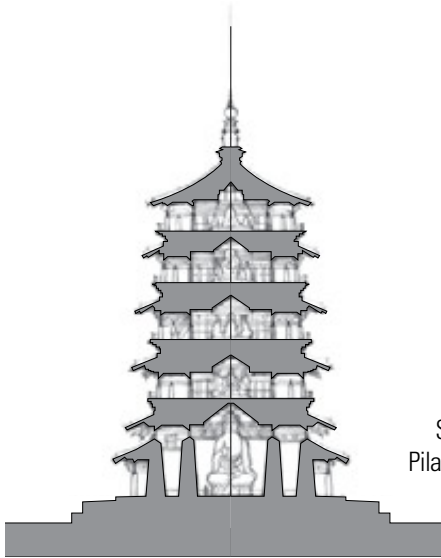


460 d. C.: Grutas de Yungang, China. Templos budistas excavados en colinas de arenisca.

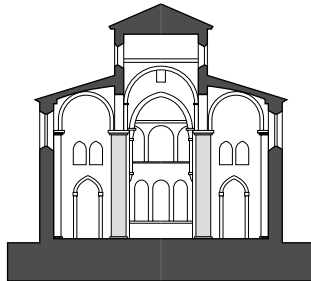


752 d. C.: Todaiji, Nara, Japón. Este templo budista es la mayor construcción en madera del mundo; la actual reconstrucción alcanza dos tercios del tamaño original del templo.

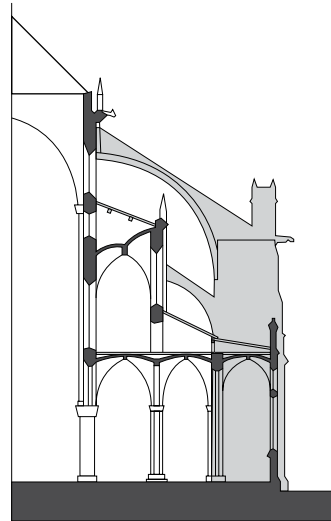
Siglo II: Invención del papel en China.



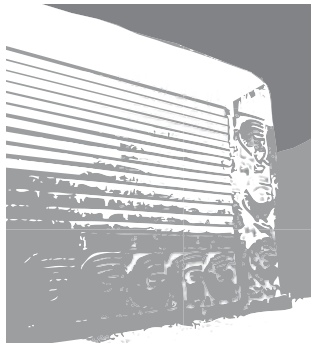
1056: Pagoda Sakyamuni, China. La pagoda más antigua conservada hasta la actualidad y el edificio más alto del mundo construido en madera (67 m).



Siglo xi: Abadía de san Filiberto, Tournus, Francia. Pilares cilíndricos sin decoración con un diámetro de 1,2 m soportan la espaciosa y luminosa nave.



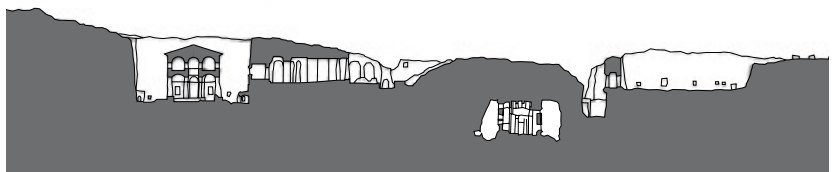
1163-1250: Catedral de Notre Dame, París, Francia. La estructura de piedra natural recurre a arbotantes para transmitir los empujes laterales de las bóvedas a los contrafuertes.



1100: Chan. Ciudadela con muros de tapial revestido.

900

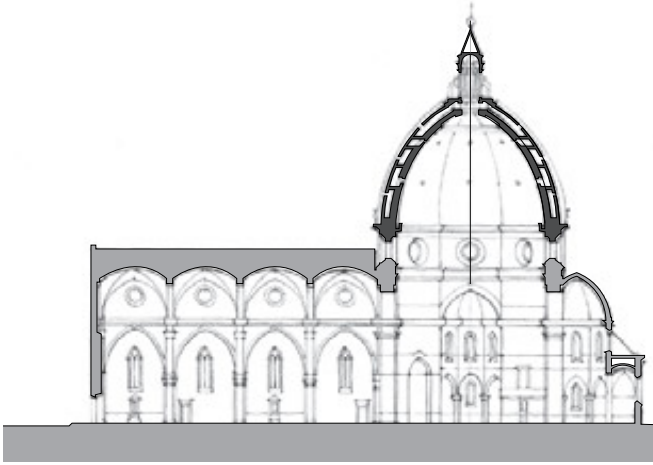
Allí donde había disponibilidad de piedra, este era el material que se utilizaba en primer lugar para establecer barreras defensivas y muros de carga que soportaran vigas de madera en forjados y cubiertas. Las bóvedas y las cúpulas de fábrica permitieron aumentar las alturas y las luces, mientras que el desarrollo de los arcos apuntados, las columnas compuestas y los arbotantes permitieron la creación de estructuras de piedra más ligeras, abiertas y esquemáticas.



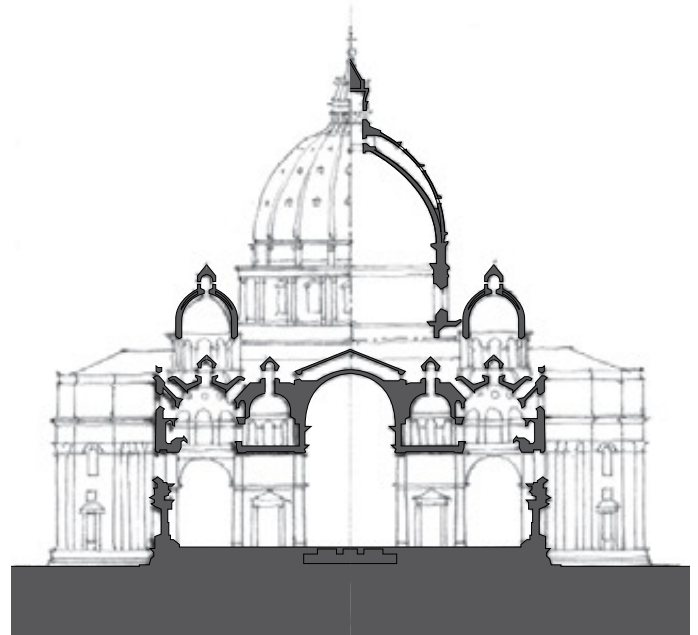
1100: Lalibela, Etiopía. Emplazamiento de una serie de iglesias excavadas en la roca.

1170: Fabricación de hierro fundido en Europa.

Siglo xv: Filippo Brunelleschi desarrolló la teoría de la perspectiva lineal.



Siglo XIII: Catedral de Florencia, Italia.
Filippo Brunelleschi proyectó una cúpula de doble cáscara, apoyada sobre un tambor que permitiera su construcción sin necesidad de armar andamios desde el suelo.



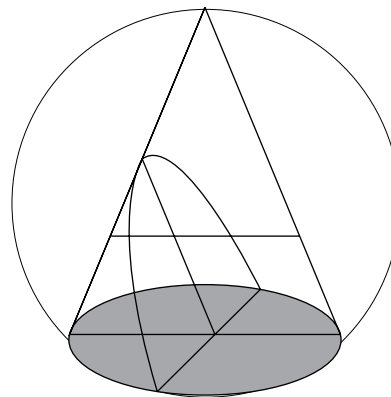
1506-1615: Donato Bramante, Miguel Ángel y Giacomo della Porta, basílica de San Pedro, Roma, Italia.
Hasta hace poco, la iglesia más grande jamás construida, con una superficie de 23.000 m².

1400

En fecha tan temprana como el siglo VI, las arcadas principales de Santa Sofía de Constantinopla incorporaban barras de hierro a modo de tirantes. Durante la Edad Media y el Renacimiento, el hierro se utilizó tanto en elementos decorativos como estructurales, tales como conectores y tirantes, para reforzar las estructuras de fábrica. Sin embargo, no fue hasta el siglo XVIII cuando los nuevos métodos de fabricación permitieron forjar y colar hierro en grandes cantidades para ser utilizado como material para las estructuras de las estaciones de ferrocarril, mercados y otros edificios públicos. La masa de los muros y columnas de piedra sirve de transición a la ligereza de los pórticos de hierro.

Principios del siglo XVI: Los altos hornos pueden producir grandes cantidades de hierro fundido.

1600

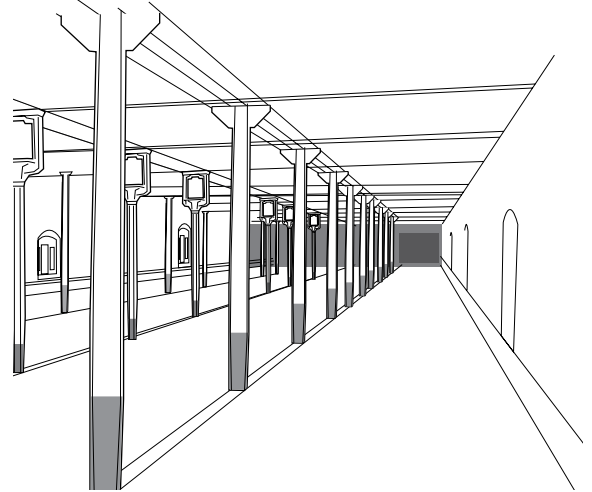


1638: Galileo Galilei publicó su primer libro, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, refiriéndose estas dos ciencias a la resistencia de los materiales y el movimiento de los objetos.

1687: Isaac Newton publicó *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, que describe la gravitación universal y los tres principios de la dinámica, estableciendo los fundamentos de la mecánica clásica.



1653: Ahmad Lahauri, Taj Mahal, Agra, India.
Este famoso mausoleo con cúpula de mármol blanco fue construido en memoria de Mumtaz Mahai, esposa del emperador mogol Shah Jahan.



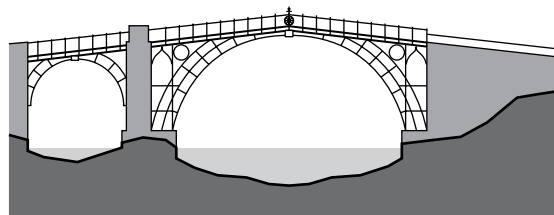
1797: William Strutt, molino de lino Ditherington, Shrewsbury, Reino Unido.
El primer edificio del mundo construido con una estructura de pilares y vigas de fundición.

1700

Finales del siglo XVIII y comienzos del XIX:
La Revolución Industrial introdujo cambios fundamentales en la agricultura, la manufactura y el transporte que alteraron el clima socioeconómico y cultural en Reino Unido y el resto del mundo.

1800

Los sistemas de calefacción central se generalizaron a principios del siglo XIX, cuando la Revolución Industrial provocó un incremento en el tamaño de los edificios dedicados a usos industriales, residenciales y otros servicios.



1777-1779: T. M. Pritchard, puente de hierro, Coalbrookdale, Reino Unido.

1711: Abraham Darby produjo fundición de alta calidad con hornos de coque y moldes recubiertos de arena.

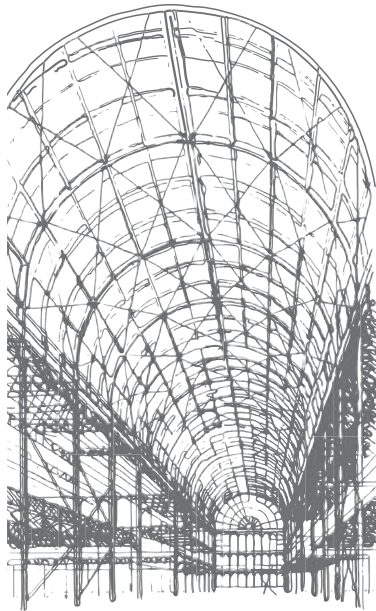
1801: Thomas Young estudió la elasticidad y puso su nombre al módulo elástico.

1735: Charles Maria de la Condamine encontró caucho en América del Sur.

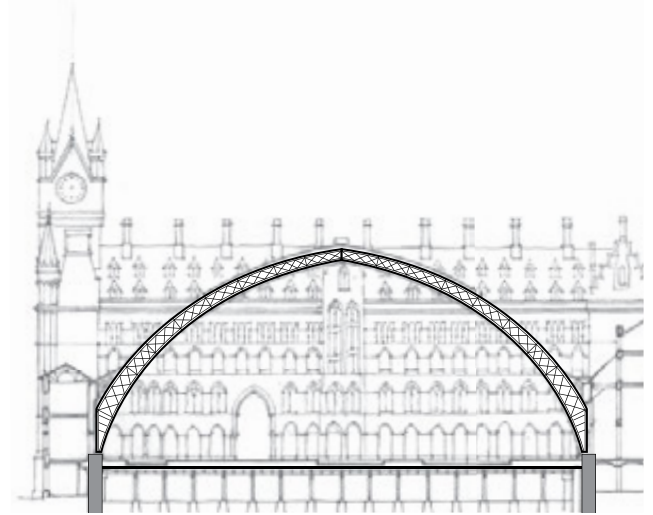
1778: Joseph Bramah patentó un inodoro funcional.

1738: Daniel Bernoulli relacionó la circulación de los fluidos con su presión.

1779: Bry Higgins patentó un cemento hidráulico para revestimientos exteriores.



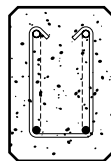
1851: John Paxton, Crystal Palace, Londres, Reino Unido.
Se ensamblaron piezas prefabricadas de hierro forjado y vidrio para crear un espacio expositivo de más de 90.000 m².



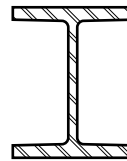
1868: William Barlow, estación de St. Pancras, Londres, Reino Unido.
Estructura de arco triangulado atirantado por debajo del nivel del suelo para resistir los empujes laterales.

1860

Existen evidencias de que los chinos utilizaron una mezcla de cal y cenizas volcánicas para construir las pirámides de Shaanxi hace varios miles de años, pero fueron los romanos quienes desarrollaron un hormigón hidráulico a partir de ceniza puzolánica, muy similar al hormigón moderno producido a partir de cemento pórtland. La fórmula del cemento pórtland, patentada por Joseph Aspdin en 1824, y la invención del hormigón armado, atribuida a Joseph-Louis Lambot en 1848, potenció el uso del hormigón en estructuras.



La era moderna en la fabricación de acero comenzó en 1856, cuando Henry Bessemer describió un proceso para producir acero a gran escala y con un precio relativamente bajo.



1850: Henry Waterman inventó el ascensor.

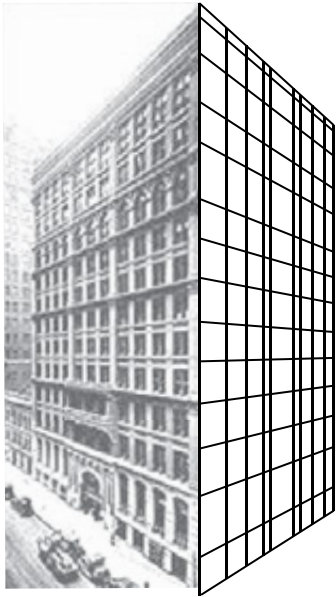
1853: Elisha Otis introdujo el freno de emergencia para evitar la caída de la cabina del ascensor en caso de ruptura del cable. El primer ascensor Otis se instaló en Nueva York en 1857.

1824: Joseph Aspdin patentó la fabricación del cemento pórtland.

1827: George Ohm formuló la ley que relaciona corriente, voltaje y resistencia.

1855: Alexander Parkes patentó el celuloide, el primer material plástico sintético.

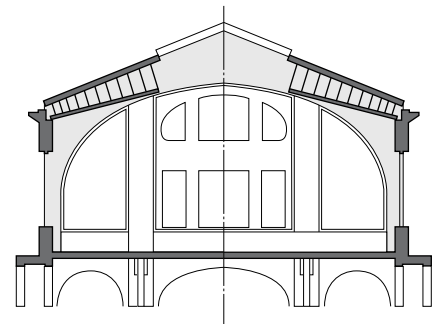
1867: Joseph Monier patentó el hormigón armado.



1884: William Le Baron Jenney, edificio de la Home Insurance, Chicago, Estados Unidos. Este entramado de acero y fundición de diez plantas de altura soporta la mayor parte del peso de los forjados y los muros exteriores.



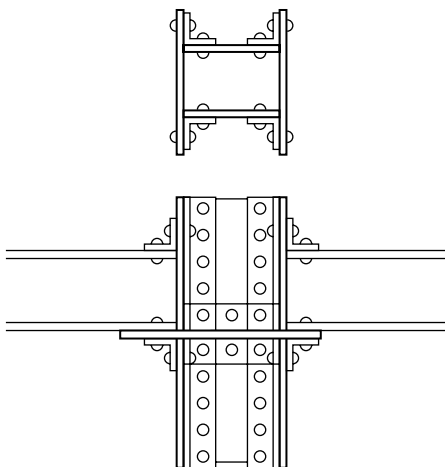
1889: Gustave Eiffel, torre Eiffel, París, Francia. La torre reemplazó al monumento a Washington como estructura más alta del mundo, título que mantuvo hasta la construcción del edificio Chrysler de Nueva York en 1930.



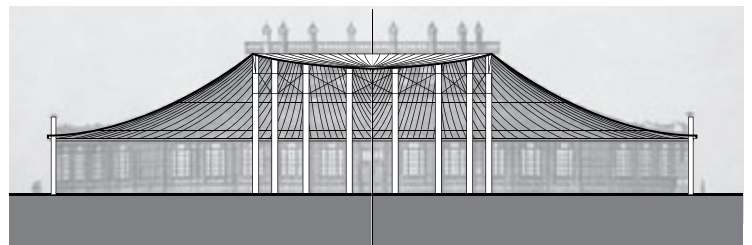
1898: Eduard Züblin, piscina pública en Gebweiler, Francia. La bóveda de hormigón armado de la cubierta consta de cinco arzones rígidos separados por chapas.

1875

1900



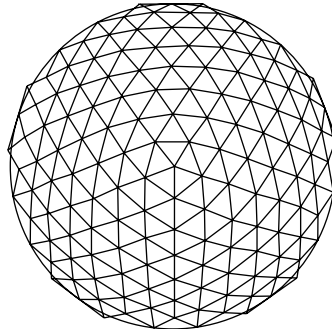
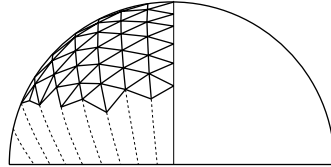
1881: Charles Louis Strobel estandarizó los perfiles de acero forjado y las conexiones roblonadas.



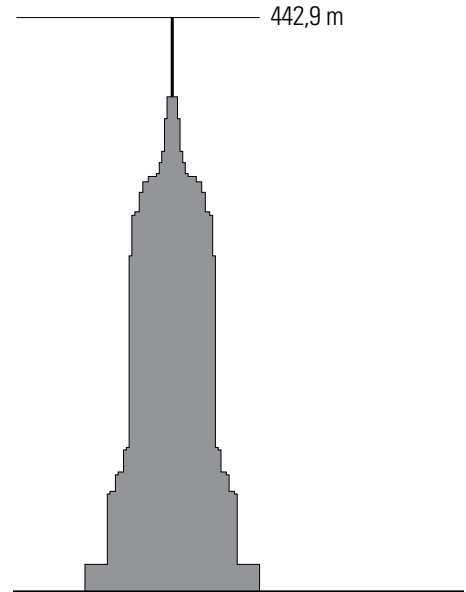
1896: Pabellón Rotonda diseñado por Vladímir Shukhov para la Exposición Rusa de Artes y Actividades Industriales celebrada en Nizhny Novgorod, Rusia. La primera estructura tensada de acero del mundo.



1903: Elzner & Anderson, edificio Ingalls, Cincinnati (Ohio), Estados Unidos.
Primer rascacielos de hormigón armado.

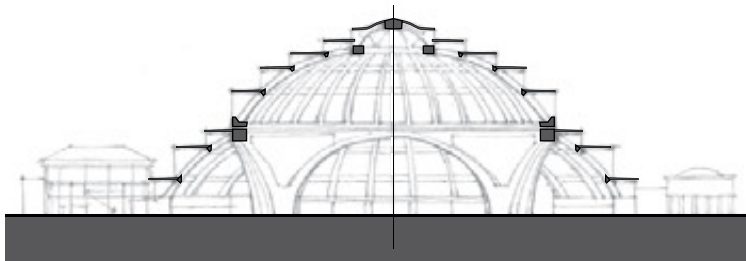


1922: Walter Bauerfeld, planetario, Jena, Alemania.
Primer registro de una cúpula geodésica contemporánea, a partir de un icosaedro.



1931: Shreve, Lamb & Harmon, Empire State, Nueva York, Estados Unidos.
Edificio más alto del mundo hasta 1972.

1940



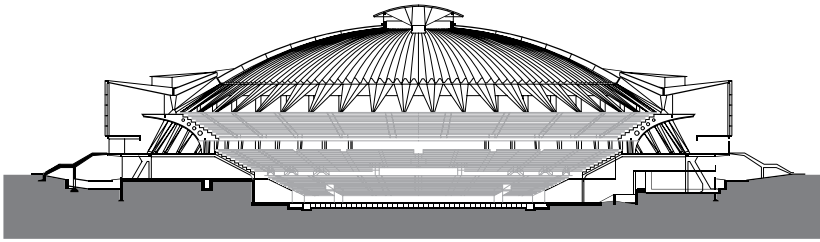
1913: Max Berg, Jahrhunderthalle, Breslau, Alemania. Esta estructura de hormigón armado, con una cúpula de 65 m de diámetro, ha sido muy influyente en la utilización posterior del hormigón para cubrir grandes espacios públicos.

Con la llegada de aceros de alta calidad y de la técnicas informáticas de análisis de estructuras, las estructuras de acero se han vuelto más ligeras y las conexiones más refinadas, permitiendo un amplio abanico de formas estructurales.

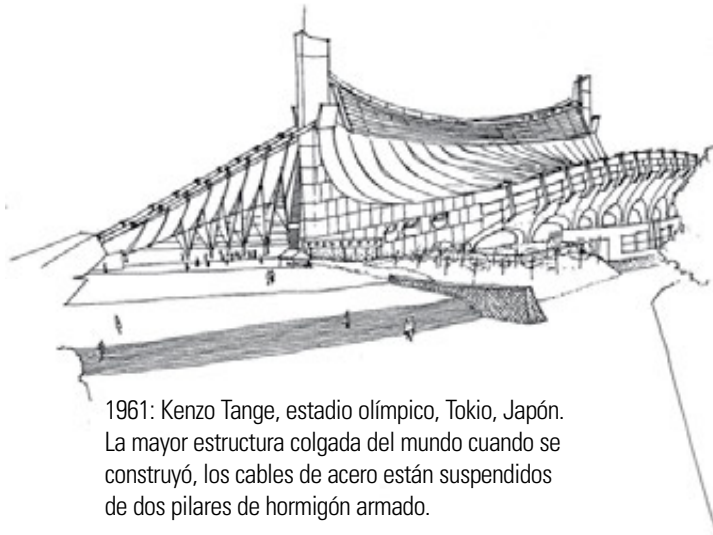
1903: Alexander Graham Bell experimentó con las formas estructurales tridimensionales, que posteriormente dieron lugar a las mallas espaciales de Richard Buckminster Fuller, Max Mengerhausen y Konrad Wachsmann.

1919: Walter Gropius fundó la Bauhaus.

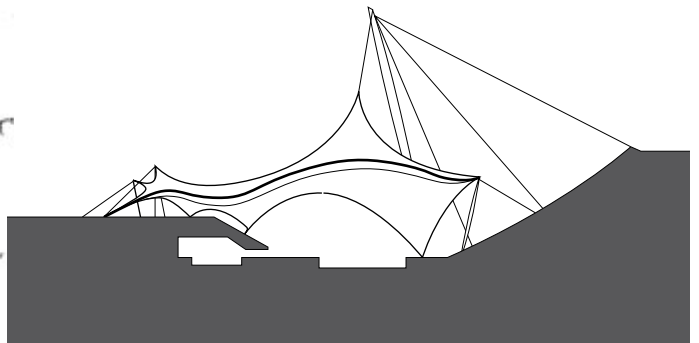
1928: Eugène Freyssinet inventó el hormigón pretensado.



1960: Pier Luigi Nervi, Palacio de los Deportes, Roma, Italia. Cúpula nervada de 100 m de diámetro de hormigón armado, construida para los Juegos Olímpicos de 1960.



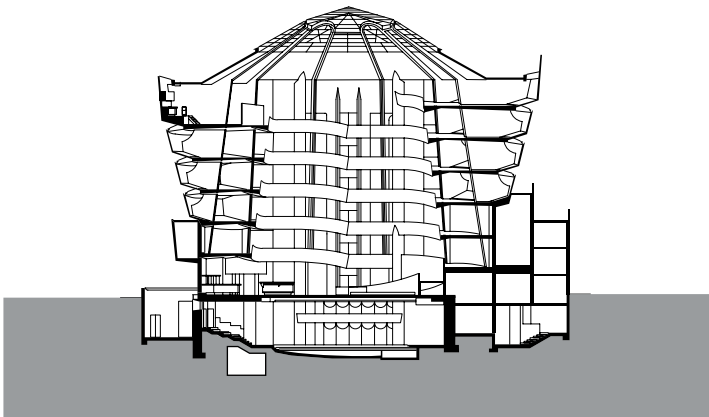
1961: Kenzo Tange, estadio olímpico, Tokio, Japón. La mayor estructura colgada del mundo cuando se construyó, los cables de acero están suspendidos de dos pilares de hormigón armado.



1972: Frei Otto, piscina olímpica, Múnich, Alemania. Los cables de acero se combinan con membranas textiles para crear una estructura extremadamente ligera que cubre grandes luces.

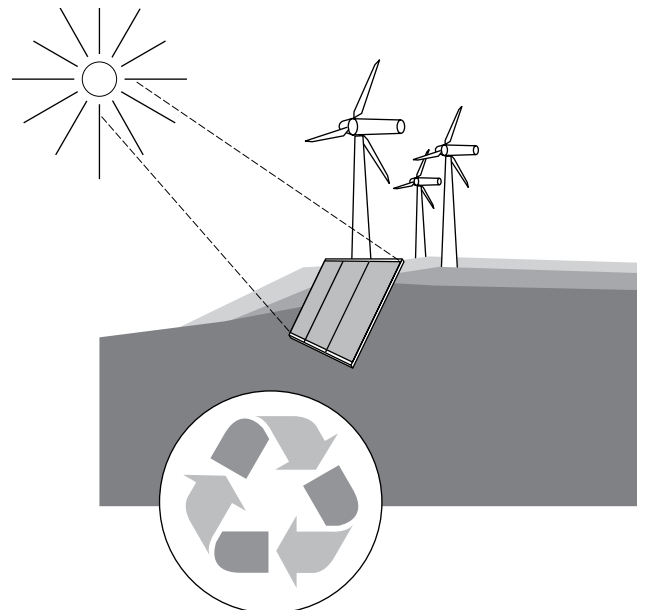
1950

1975

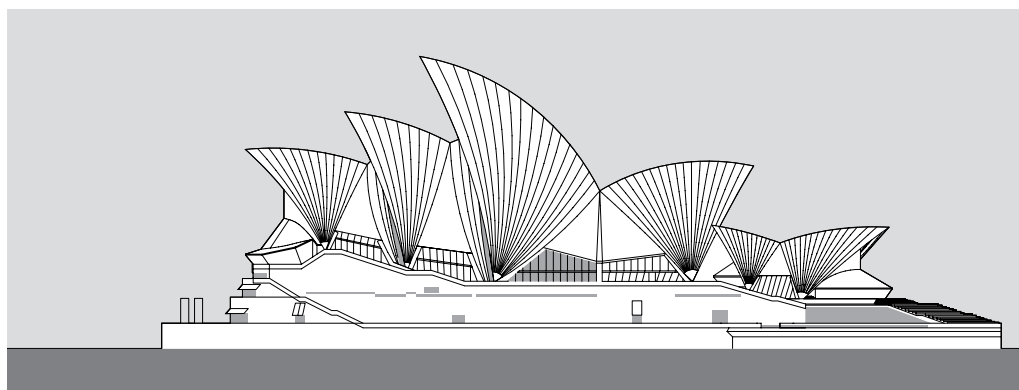
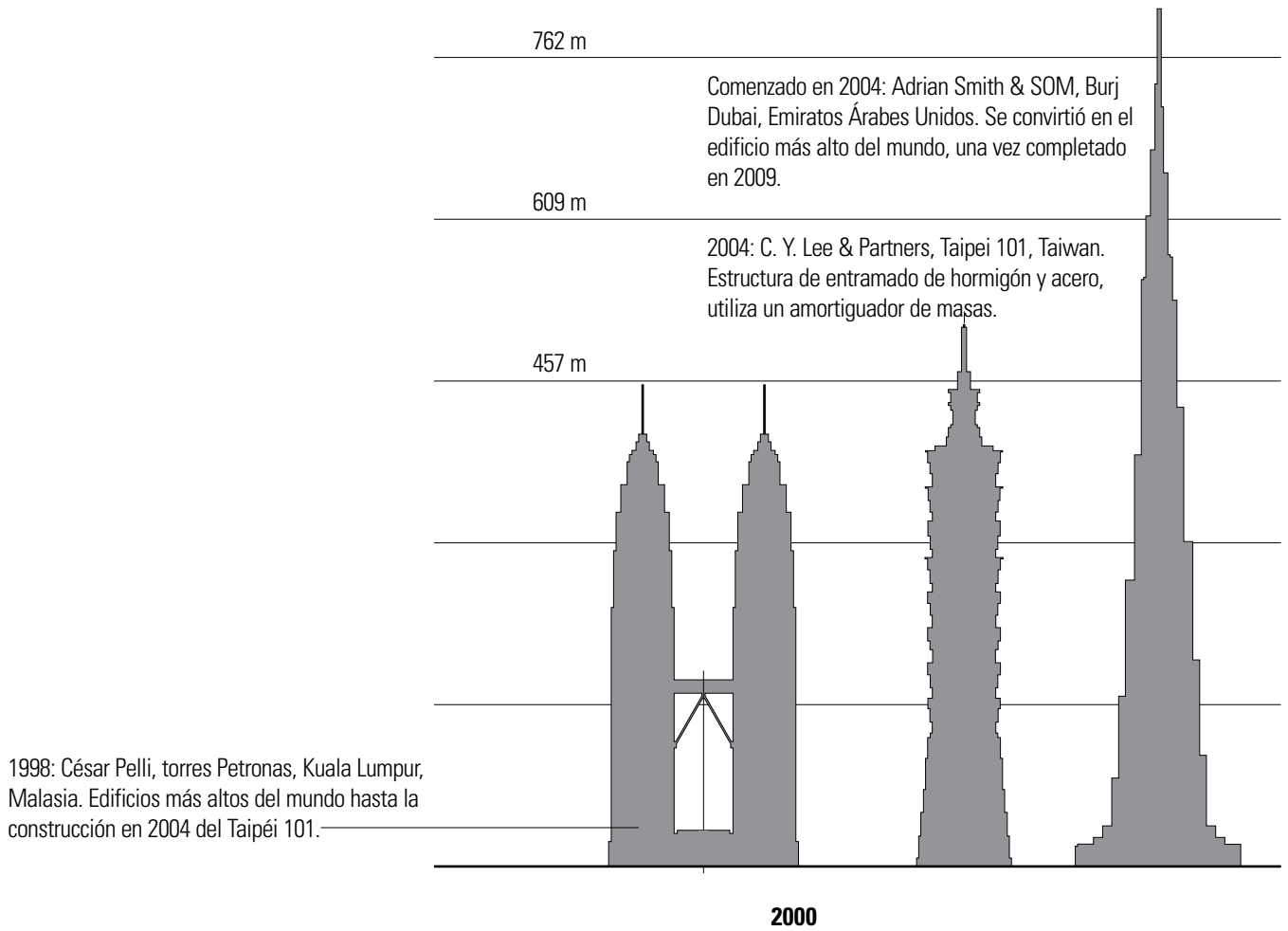


1943-1959: Frank Lloyd Wright, Guggenheim Museum, Nueva York, Estados Unidos.

1955: Se extiende el uso comercial de computadoras.



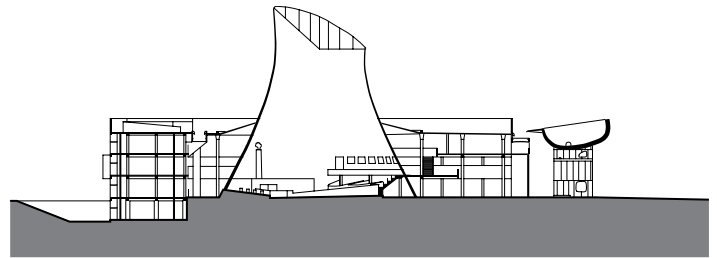
1973: El aumento del precio del petróleo estimuló la investigación en fuentes alternativas de energía, y fomentó que la conservación de la energía se convirtiera en un elemento fundamental del proyecto arquitectónico.



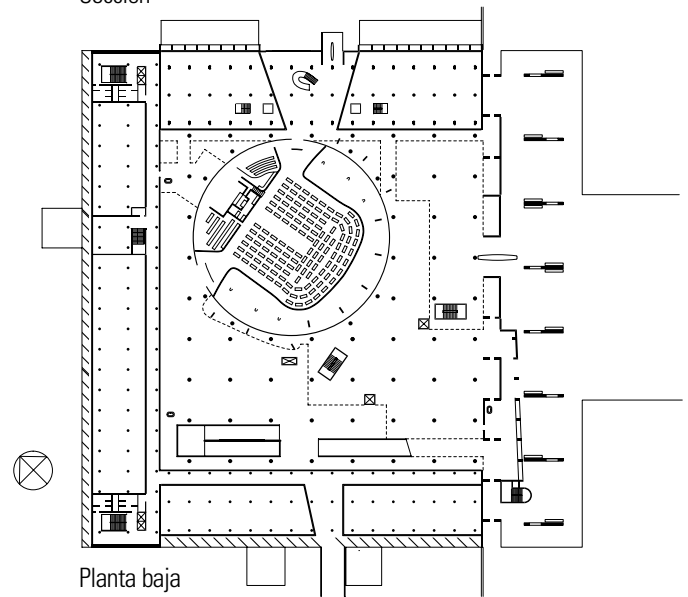
1973: Jørn Utzon, ópera de Sídney, Australia. Las icónicas cáscaras de esta estructura están construidas con nervios de hormigón prefabricado moldeados in situ.

La reseña histórica de las páginas anteriores aporta un sentido no solo de cómo han evolucionado los sistemas estructurales, sino también de cómo han influido y continúan influyendo en el diseño arquitectónico. La arquitectura incorpora una serie de cualidades estéticas inefables que surgen de la conjunción de espacio, forma y estructura. En su función de proporcionar soporte a otras partes del edificio y a las actividades que en él se desarrollan, un sistema estructural hace posible la forma de un edificio y sus espacios, de un modo similar a como nuestro esqueleto da forma a nuestro cuerpo y soporta nuestros órganos y tejidos. Cuando hablamos de estructuras arquitectónicas, nos referimos a aquellas que combinan forma y espacio de una forma coherente.

En consecuencia, diseñar una estructura implica algo más que el dimensionado correcto de los elementos o componentes o el diseño de las uniones estructurales. Tampoco se trata simplemente de resolver y equilibrar un sistema de fuerzas, sino de tomar en consideración que la configuración general y la escala de los elementos y las uniones estructurales incorporan una idea de proyecto, refuerzan la forma arquitectónica y la composición espacial de la propuesta y hacen posible su construcción. Todo ello requiere asumir que la estructura es un sistema de partes interconectadas e interrelacionadas, comprender los tipos genéricos de sistemas estructurales y ser capaces de valorar las posibilidades que ofrecen ciertos tipos de elementos y uniones estructurales.

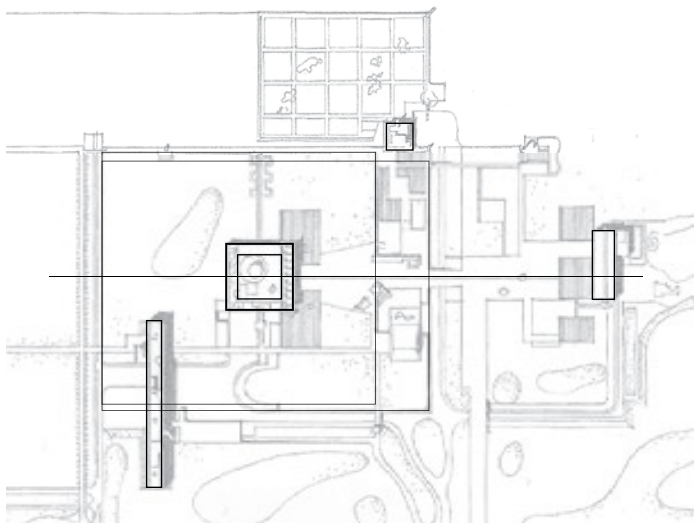


Sección

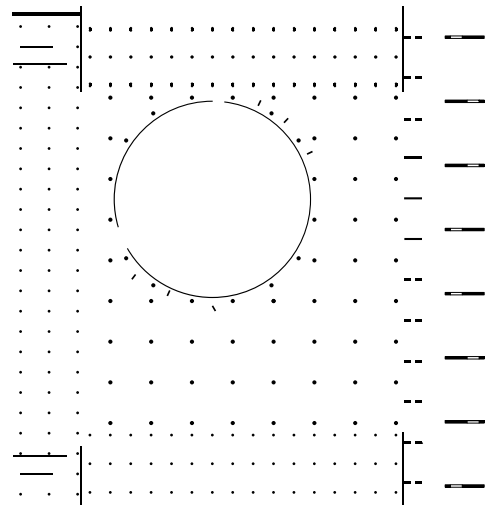


Planta baja

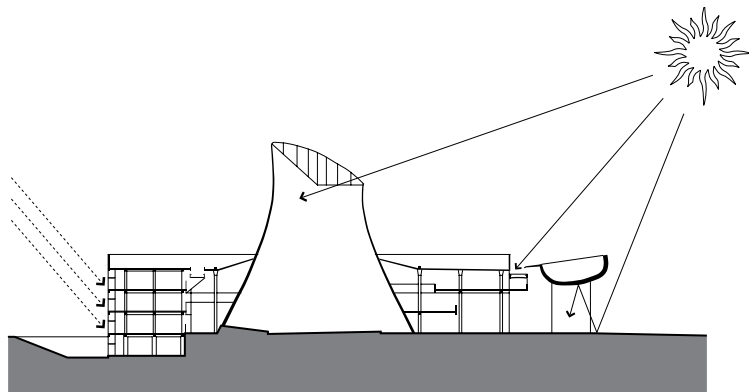
Le Corbusier, Parlamento de Chandigarh, India, 1951-1963



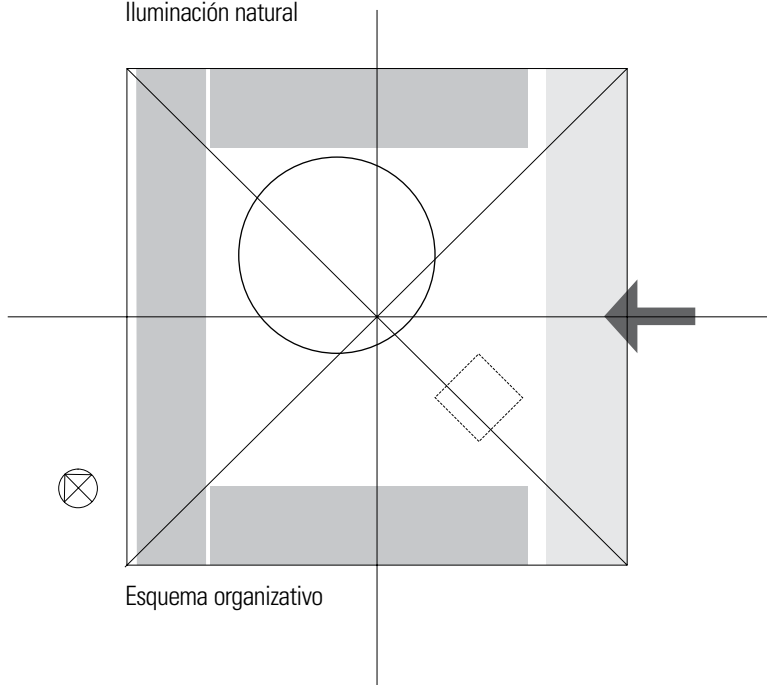
Planta de situación



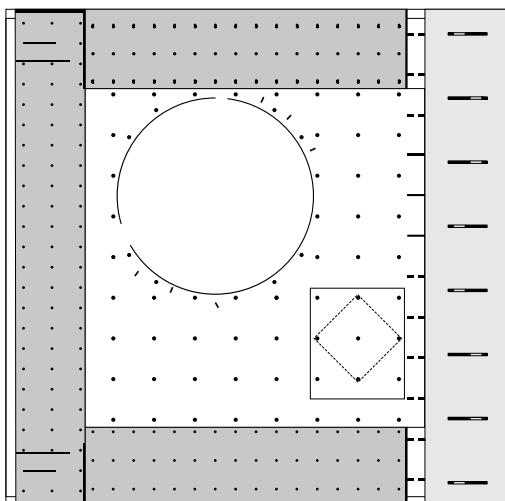
Planta de estructuras



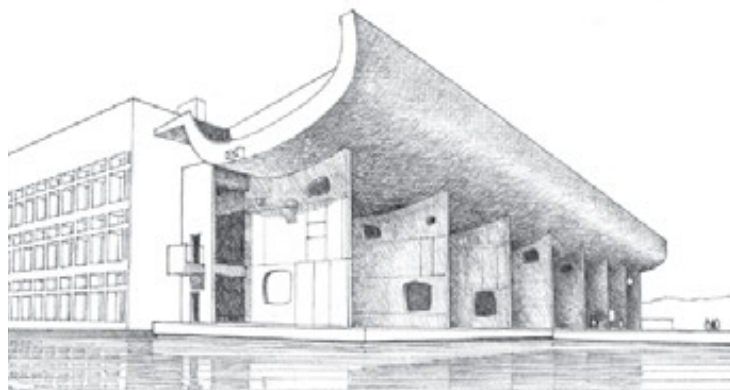
Iluminación natural



Esquema organizativo



Estructura como apoyo del esquema organizativo



Estructura como apoyo de la idea formal

Para comprender el impacto de los sistemas estructurales en el diseño arquitectónico, deberíamos tomar conciencia de cómo se relacionan los órdenes conceptuales, sensoriales y contextuales de la arquitectura.

- Composición formal y espacial.
- Definición, escala y proporción de formas y espacios.
- Cualidades de la forma, el espacio, la luz, el color o la textura.
- Ordenación de las actividades humanas en función de su escala y dimensión.
- Zonificación funcional de los espacios según su propósito y función.
- Acceso a los recorridos horizontales y verticales dentro del edificio.
- Edificios como parte integral del entorno natural y construido.
- Características sensoriales y culturales del lugar.

Las secciones restantes de este capítulo esbozan los aspectos principales de los sistemas estructurales que apoyan, refuerzan y, en última instancia, dan forma a una idea de proyecto.

Intención formal

Existen tres vías fundamentales por las cuales el sistema estructural puede relacionarse con la forma de un proyecto:

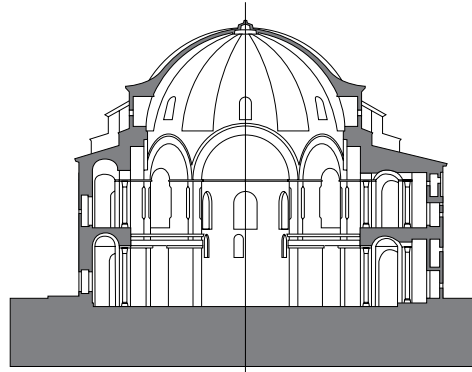
- Exponer el sistema estructural
- Ocultar la estructura
- Enfatizar la estructura

Exponer la estructura

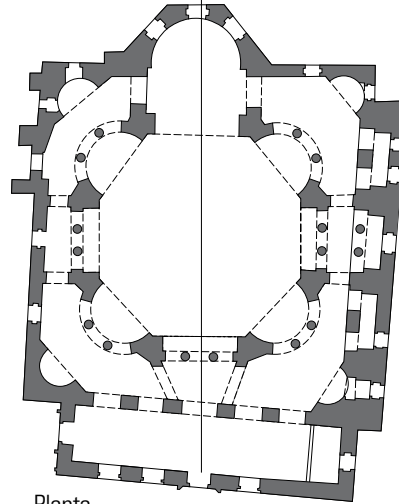
Históricamente, los sistemas de muros de carga de piedra y albañilería dominaron la arquitectura hasta el advenimiento de la construcción de hierro y acero a finales del siglo XVIII. Estos sistemas estructurales también funcionaban como cerramientos y, por tanto, expresaban la forma de la arquitectura, normalmente de un modo honesto y directo.

Con independencia de las modificaciones formales que fueron introduciéndose, solían ser el resultado de moldear o tallar el material estructural como medios para crear elementos adicionales, vacíos por sustracción o relieves dentro del volumen de la estructura.

Incluso en la Edad Moderna existen ejemplos de edificios que muestran sus sistemas estructurales —ya sean de madera, acero u hormigón— y los utilizan como elementos primarios de la forma arquitectónica.



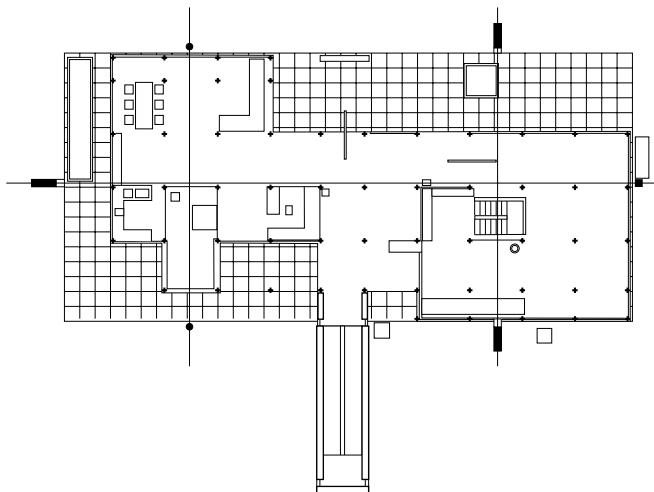
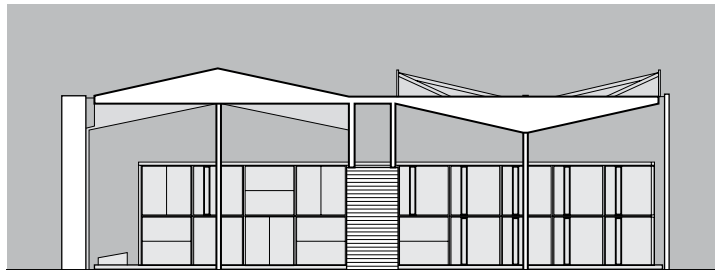
Sección



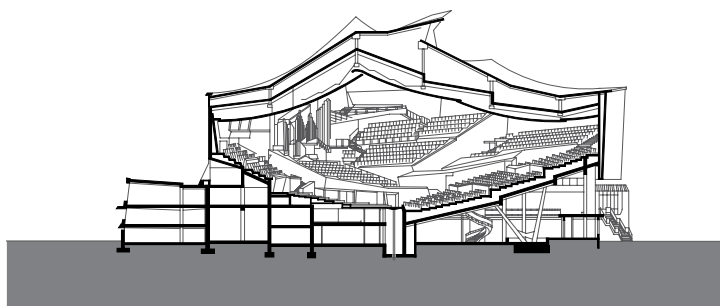
Planta

Iglesia de san Sergio y san Baco, Estambul, Turquía, 527-536 d. C.

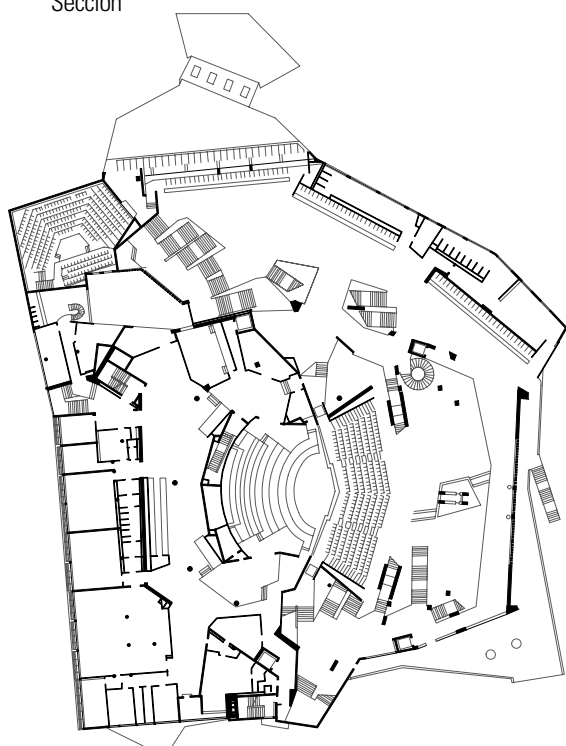
Los otomanos convirtieron esta iglesia ortodoxa en una mezquita. Se cree que su cúpula central sirvió de modelo para Santa Sofía.



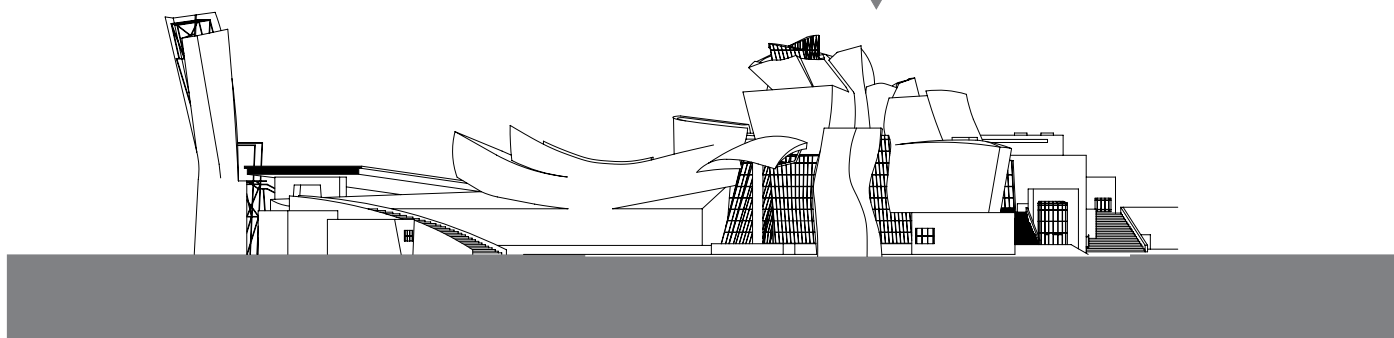
Le Corbusier, pabellón Heidi Weber, Zúrich, Suiza, 1965. Un parasol de acero se apoya sobre un entramado modular con lados formados por paneles de vidrio y acero.



Sección



Planta inferior



Ocultar la estructura

En esta estrategia, el sistema estructural queda oculto por el revestimiento exterior y la cubierta del edificio. Algunas de las razones para ocultar la estructura son de orden práctico, como cuando los elementos estructurales deben contar con un revestimiento para protegerlos del fuego; o contextuales, como cuando la forma exterior que se busca no se corresponde con los requisitos del espacio interior. En este último caso, la estructura puede organizar los espacios interiores, mientras que la forma del cerramiento exterior responde a los condicionantes o restricciones del emplazamiento.

Puede que el deseo del proyectista sea la libertad de expresión de la envolvente sin tomar en consideración cómo el sistema estructural puede ayudar o dificultar las decisiones formales; pero el sistema estructural también puede quedar oculto por negligencia, antes que intencionadamente. En cualquiera de los casos, surgen preguntas legítimas sobre si los resultados son intencionados o accidentales, voluntarios o, por decirlo así, descuidados.

◀ Hans Scharoun, Filarmónica de Berlín, Alemania, 1960-1963. Ejemplo de arquitectura expresionista, esta sala de conciertos tiene una estructura asimétrica, con una cubierta de hormigón en forma de carpa y el escenario en mitad de las gradas. La apariencia exterior está subordinada a los requisitos funcionales y acústicos de la sala de conciertos.

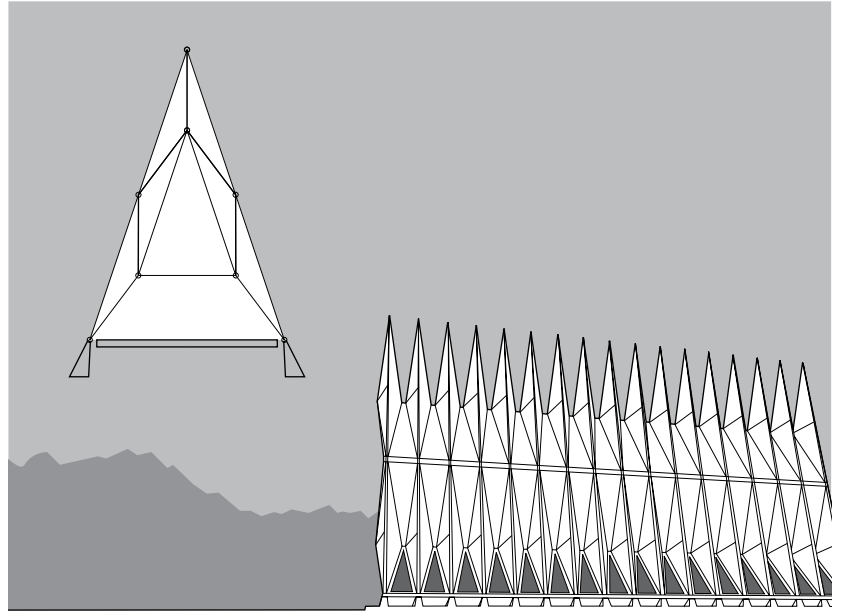
Frank O. Gehry, Museo Guggenheim, Bilbao, España, 1991-1997. Novedoso cuando se inauguró, este museo de arte contemporáneo es conocido por sus formas esculturales revestidas de chapas de titanio. Aunque difícil de entender en términos de la arquitectura tradicional, la definición constructiva de las formas aparentemente aleatorias fue posible gracias a la utilización del *software* CATIA, que incluye programas de diseño, ingeniería y fabricación asistidos por ordenador (CAD/CAM/CAE).

Enfatizar la estructura

Más que estar simplemente expuesto, es posible sacar partido de un sistema estructural como una característica del diseño, enfatizando la forma y la materialidad de la estructura. La naturaleza a menudo exuberante de estructuras basadas en láminas o membranas, las convierte en candidatas perfectas para esta categoría.

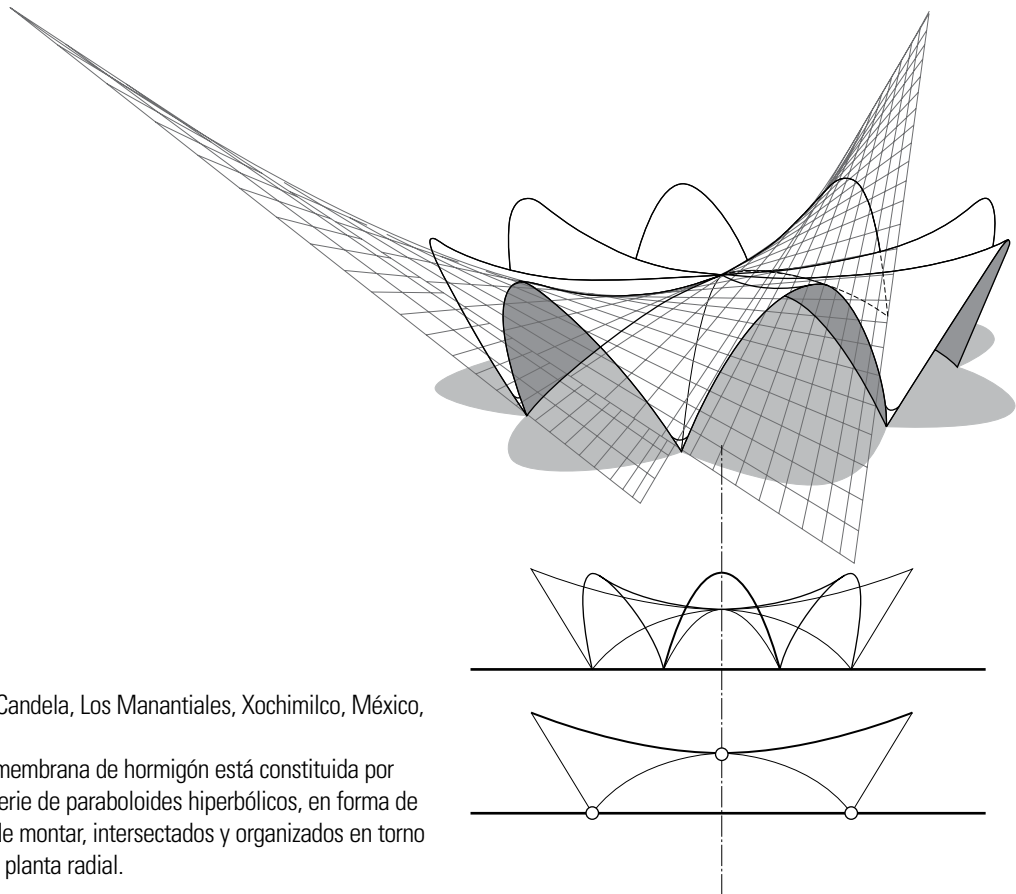
También se encuentran aquellas estructuras que destacan por la contundencia con la cual expresan el modo como transmiten las cargas que actúan sobre ellas. Por su imagen impactante, este tipo de estructuras a menudo se convierten en iconos, como la torre Eiffel o la ópera de Sídney.

Para decidir si enfatizar o no la estructura de un edificio, debemos diferenciar cuidadosamente la expresión estructural de otras formas expresivas que, en realidad, no tienen naturaleza estructural, sino tan solo la apariencia.



Walter Netsch/Skidmore, Owings & Merrill (SOM), capilla de la Academia del Aire, Colorado Springs (Colorado), Estados Unidos, 1956-1962.

Esta estructura consta de cien tetraedros idénticos, y es estable gracias a la triangulación de unidades estructurales individuales, así como a su sección triangular.

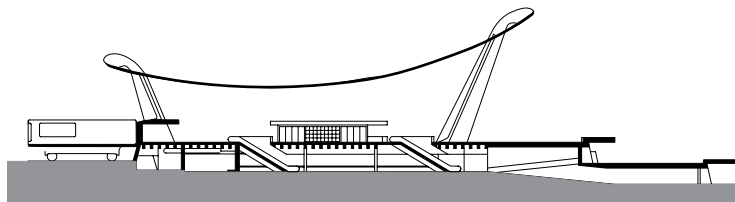


Félix Candela, Los Manantiales, Xochimilco, México, 1958.

Esta membrana de hormigón está constituida por una serie de paraboloides hiperbólicos, en forma de silla de montar, intersectados y organizados en torno a una planta radial.

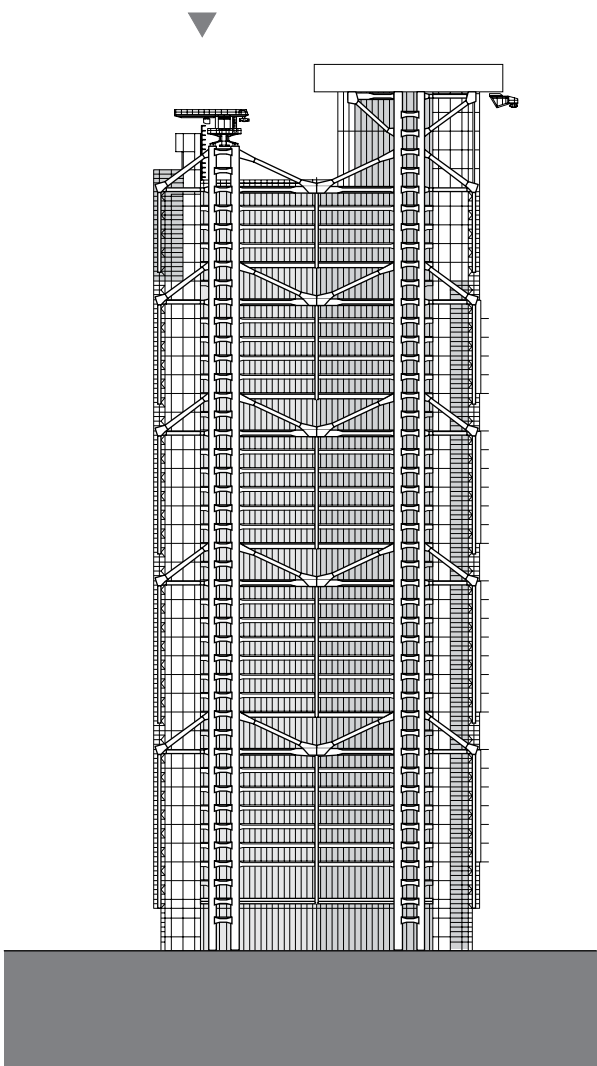
Eero Saarinen, terminal del aeropuerto de Dulles, Chantilly (Virginia), Estados Unidos, 1958-1962.

Las catenarias, suspendidas de dos largas hileras de pilares en forma de ménsulas inclinadas, sostienen una cubierta de hormigón curva que evoca el vuelo de los aviones.

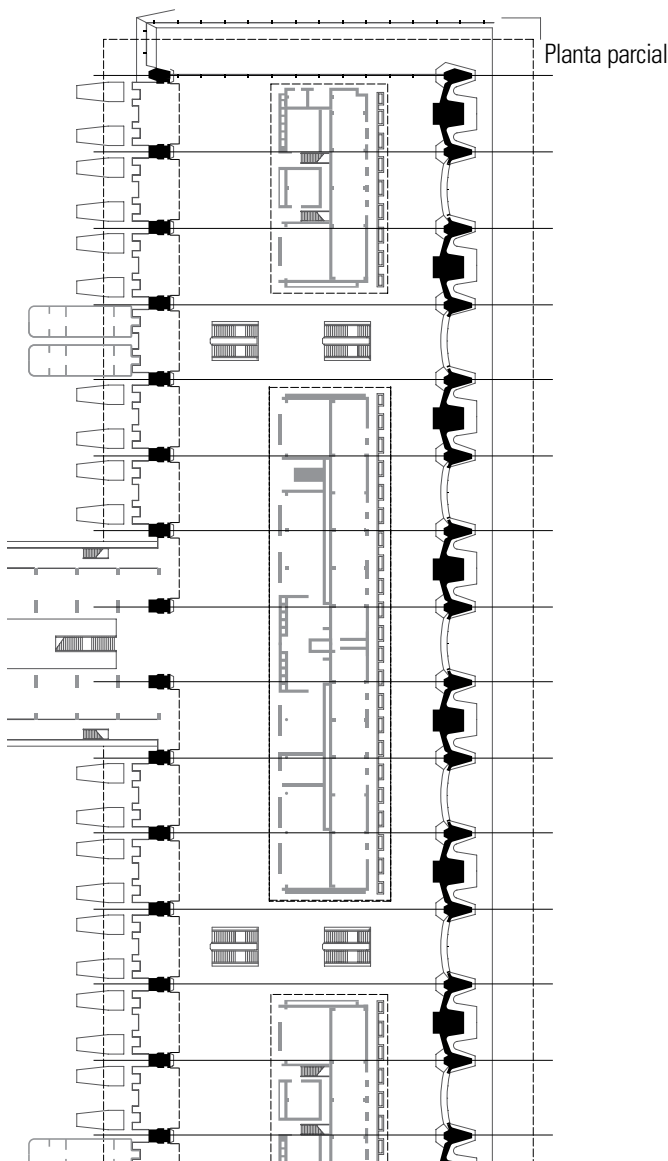
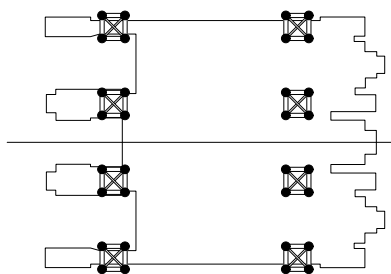


Norman Foster, Banco de Hong Kong y Shanghai, Hong Kong, China, 1979-1985.

Ocho grupos de cuatro pilares de acero revestido de aluminio se elevan desde los cimientos y soportan cinco niveles de un entramado suspendido que sostiene los forjados de las plantas.



Alzado y planta de estructuras



Planta parcial

Composición espacial

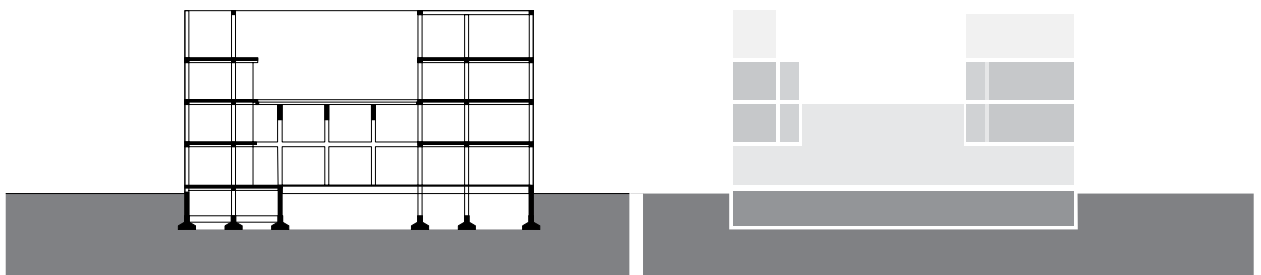
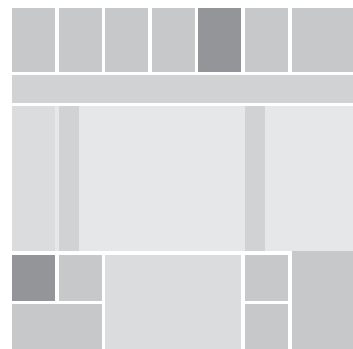
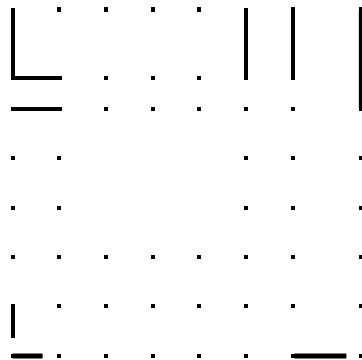
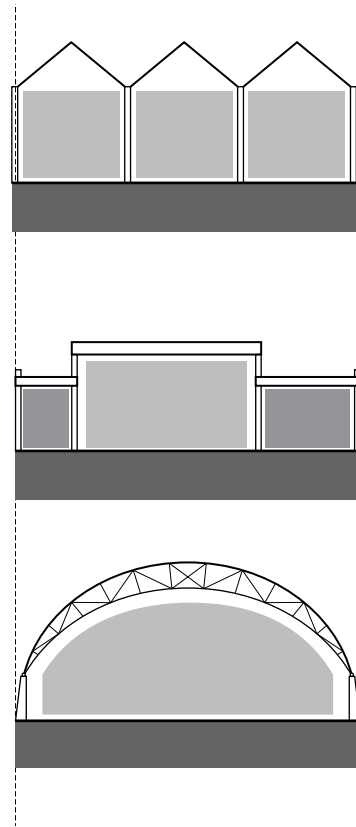
La forma de un sistema estructural y la distribución de sus elementos verticales y horizontales pueden relacionarse con la organización y la composición de un proyecto de dos maneras fundamentales. La primera consiste en hacer corresponder las formas del sistema estructural y de la composición espacial. La segunda opción supone plantear una relación menos rígida, de modo que la forma y el esquema estructural permitan una mayor libertad y flexibilidad a la distribución espacial.

Correspondencia

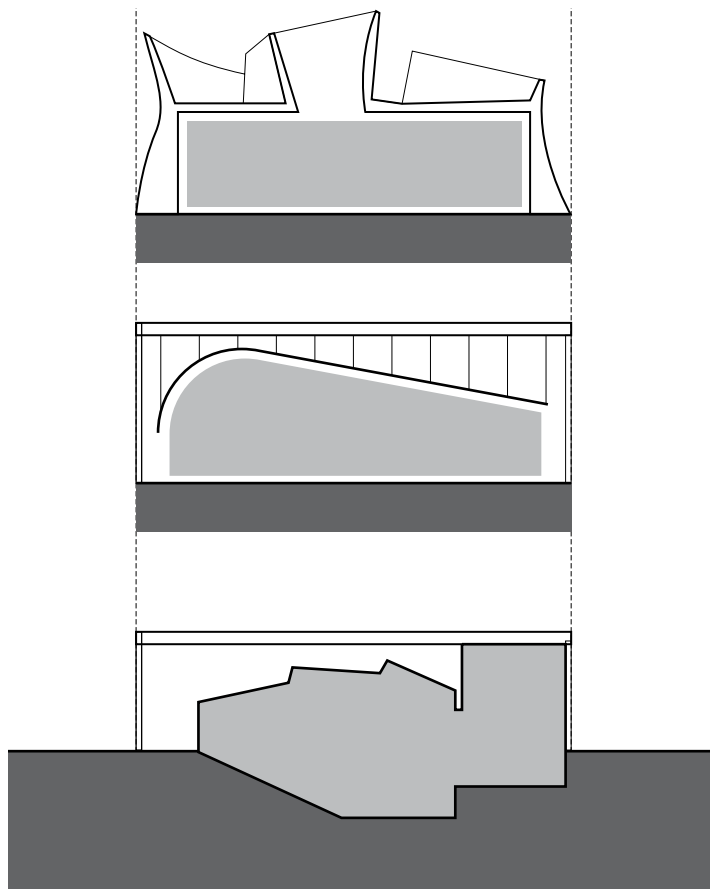
Donde existe una correspondencia entre estructura y composición espacial puede ocurrir que la distribución de pilares y vigas dicte la disposición de los espacios dentro del edificio, o que la distribución espacial sugiera un determinado tipo estructural. ¿Qué viene primero en el proceso de diseño?

En casos ideales, consideramos conjuntamente espacio y estructura como codeterminantes de la forma arquitectónica. Sin embargo, la composición de espacios según las necesidades y deseos a menudo es anterior a la reflexión sobre la estructura. Por otro lado, en ocasiones la estructura puede ser la idea motor que guíe el proceso de diseño.

En cualquier caso, los sistemas estructurales que fijan una distribución de espacios de ciertos tamaños y dimensiones, o incluso un esquema



Diagramas estructurales y espaciales en planta y sección. Giuseppe Terragni, Casa del Fascio, Como, Italia, 1932-1936.



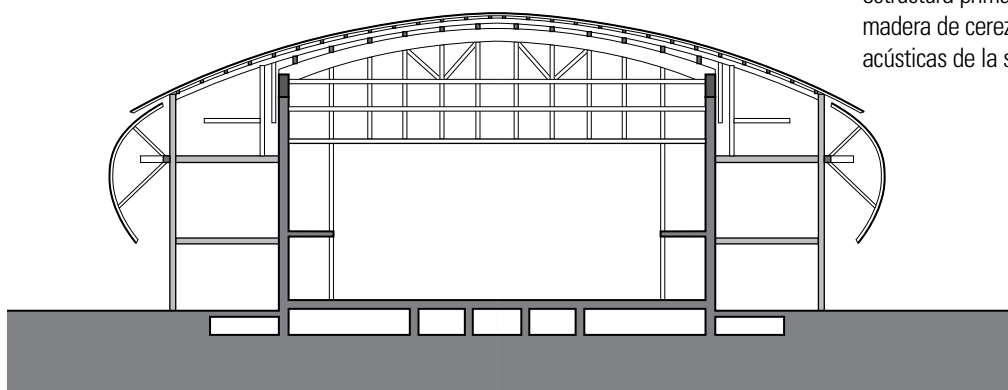
Contraste

Cuando no existe correspondencia entre forma estructural y composición espacial, alguna de ellas puede asumir el protagonismo. La estructura puede ser lo bastante grande como para albergar una serie de espacios dentro de su volumen, o la composición espacial puede dominar sobre una estructura que se oculta. Un sistema estructural irregular o asimétrico puede envolver una composición espacial más regular, mientras que una retícula estructural puede proporcionar una modulación sobre la cual disponer una composición más libre.

Puede resultar deseable distinguir entre espacio y estructura para proporcionar flexibilidad a la distribución, permitir el crecimiento y la expansión, hacer visible la identidad de los distintos sistemas del edificio o expresar las diferencias entre las necesidades, deseos y relaciones interiores y exteriores.

Renzo Piano, sala Sinopoli, auditorio Parco della Musica, Roma, Italia, 1994-2002.

Una estructura secundaria soporta una cubierta revestida de plomo que amortigua el ruido exterior, mientras que la estructura primaria soporta las superficies interiores de madera de cerezo, ajustables para adaptar las propiedades acústicas de la sala.



Un sistema puede definirse como la unión de partes interrelacionadas o interdependientes que forman un conjunto más complejo y unificado al servicio de un propósito común. Un edificio puede ser entendido como la conjunción física de una serie de sistemas y subsistemas que deben estar necesariamente relacionados, coordinados e integrados entre sí, y con la forma tridimensional y la organización espacial del edificio en su conjunto.

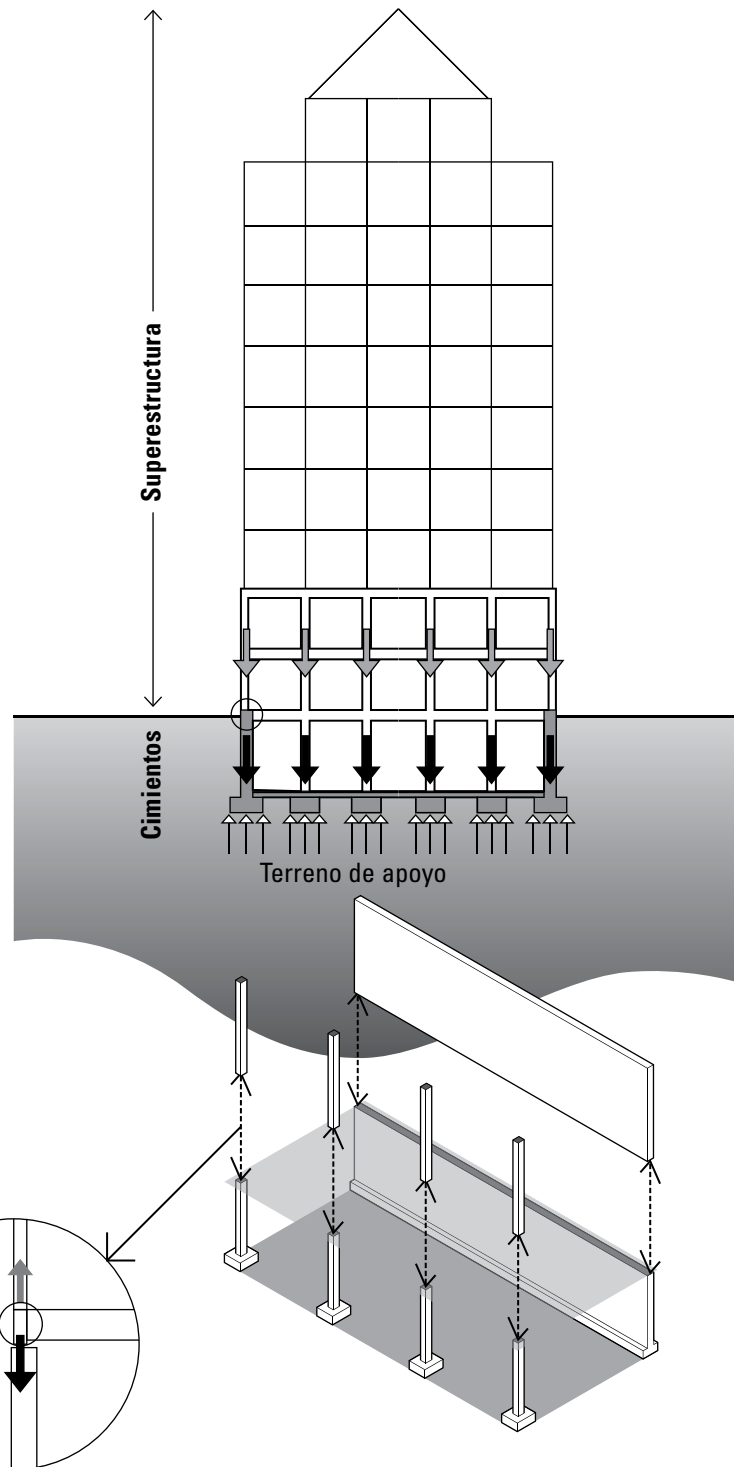
Concretamente, el sistema estructural de un edificio consiste en la unión estable de una serie de elementos estructurales, diseñados y construidos para soportar y transmitir las cargas aplicadas al terreno de una forma segura, sin exceder las tensiones admisibles de cada uno de los componentes. Cada uno de los elementos constituyentes de la estructura tiene un carácter unitario y muestra un comportamiento único bajo una determinada carga. Pero antes de que los distintos elementos puedan ser aislados para su estudio y cálculo, es importante que el proyectista comprenda cómo se acomoda el sistema estructural y soporta de forma global las formas, los espacios y las relaciones derivadas del programa o de la integración en el lugar de un proyecto arquitectónico.

Con independencia del tamaño y la escala de un edificio, este comprende sistemas físicos de estructura y cerramiento que definen y organizan las formas y los espacios. Estos elementos pueden clasificarse también en subestructura y superestructura.

Cimientos

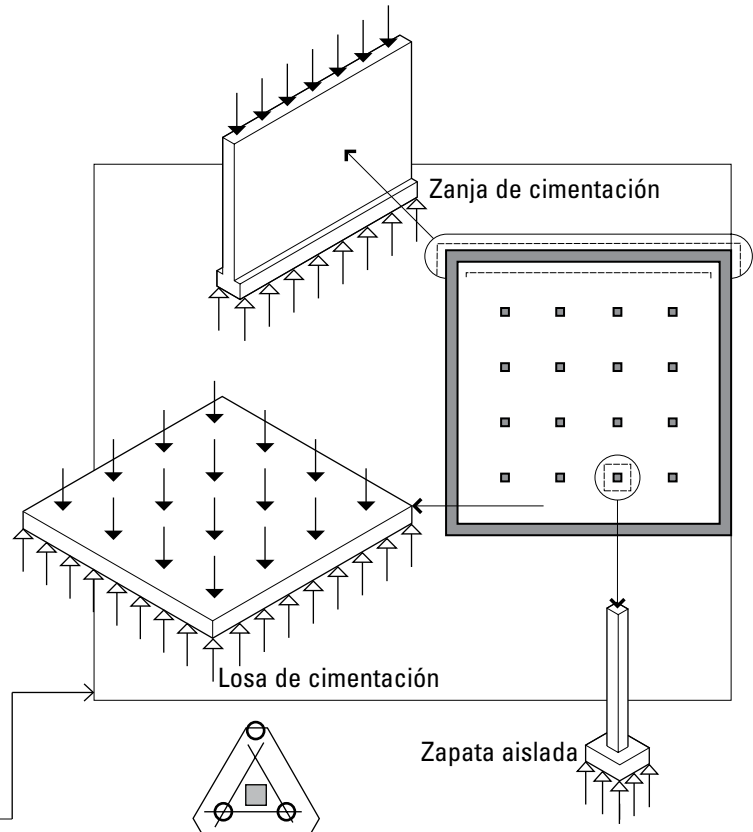
Los cimientos son la parte inferior de un edificio, y están construidos parcial o totalmente bajo la superficie del terreno. Su función primaria consiste en soportar y anclar la superestructura superior y transmitir las cargas al terreno de una forma segura. Por su función como elemento crítico en la distribución y acomodo de las cargas del edificio, los cimientos, aunque suelen estar ocultos, deben diseñarse tanto para acomodar la forma y la distribución de la estructura que se sitúa por encima como para responder a las condiciones variables del suelo, la roca o el agua que están por debajo.

Las cargas principales sobre una cimentación son la suma del peso propio y las sobrecargas verticales sobre la estructura. Además, los cimientos deben anclar la superestructura para evitar el deslizamiento, el vuelco o la elevación debidos a la acción del viento, soportar los movimientos bruscos del terreno en caso de terremoto, y resistir la presión que ejercen el terreno y las aguas subterráneas sobre los muros de contención. En algunos casos, los cimientos también deben soportar los empujes laterales de arcos o estructuras tensadas.



Un factor importante a la hora de seleccionar el tipo de cimentaciones, y en consecuencia del diseño estructural en su conjunto, es el lugar y el entorno donde se va a levantar un edificio.

- Relación con la superestructura: el tipo y la distribución de los elementos de la cimentación tienen una gran influencia en la distribución de los soportes de la superestructura. En la medida de lo posible, debe mantenerse la continuidad vertical en la transmisión de las cargas, para optimizar la eficiencia estructural.
- Tipo de suelo: la integridad de la estructura de un edificio depende en última instancia de la estabilidad y la resistencia a la presión del suelo que hay bajo los cimientos. La capacidad de carga del suelo puede limitar el tamaño del edificio o requerir cimentaciones profundas.
- Relación con la topografía: los aspectos topográficos del emplazamiento de un edificio tienen implicaciones y consecuencias tanto ecológicas como estructurales, y requieren que cualquier construcción muestre sensibilidad hacia las formas naturales de drenaje, los riesgos de inundación, erosión o deslizamiento, así como prever la protección de los ecosistemas presentes.



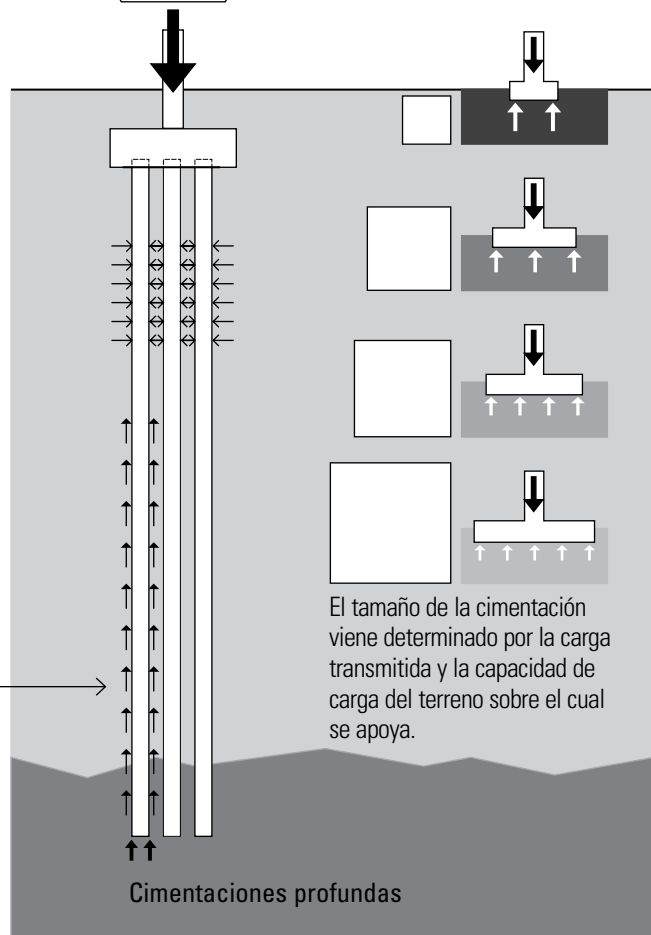
Cimentaciones superficiales

Las cimentaciones superficiales se emplean cuando a poca profundidad hay un suelo estable y con suficiente capacidad de carga. Se sitúan directamente debajo de la parte inferior de los cimientos, y transfieren las cargas del edificio directamente al suelo mediante esfuerzos verticales de compresión. Las cimentaciones superficiales pueden asumir cualquiera de las siguientes formas geométricas:

- Puntuales: zapatas aisladas
- Lineales: muros y zanjas de cimentación
- Planas: losas de cimentación (losas gruesas de hormigón fuertemente armado que sirven como soporte único y monolítico de una serie de pilares o incluso de todo un edificio). Se utilizan cuando la capacidad de carga del terreno es baja en relación con las cargas del edificio, y las zapatas aisladas tendrían que ser tan grandes que es más económico fusionarlas en una única losa. Estas losas de cimentación pueden arriostrarse mediante una malla de nervaduras, vigas o muros.

Cimentaciones profundas

Las cimentaciones profundas consisten en pilotes que atraviesan el terreno no resistente y transmiten las cargas hasta un estrato de roca o gravas y arenas densas con la suficiente resistencia.



Superestructura

La superestructura, o extensión vertical de un edificio por encima de la cimentación, consta de un cerramiento y una estructura interior que definen la forma de un edificio y su distribución y composición espacial.

Cerramiento

El cerramiento o envoltura de un edificio, incluyendo la cubierta, los muros exteriores, las ventanas y las puertas, proporciona protección y refugio a los espacios interiores del edificio.

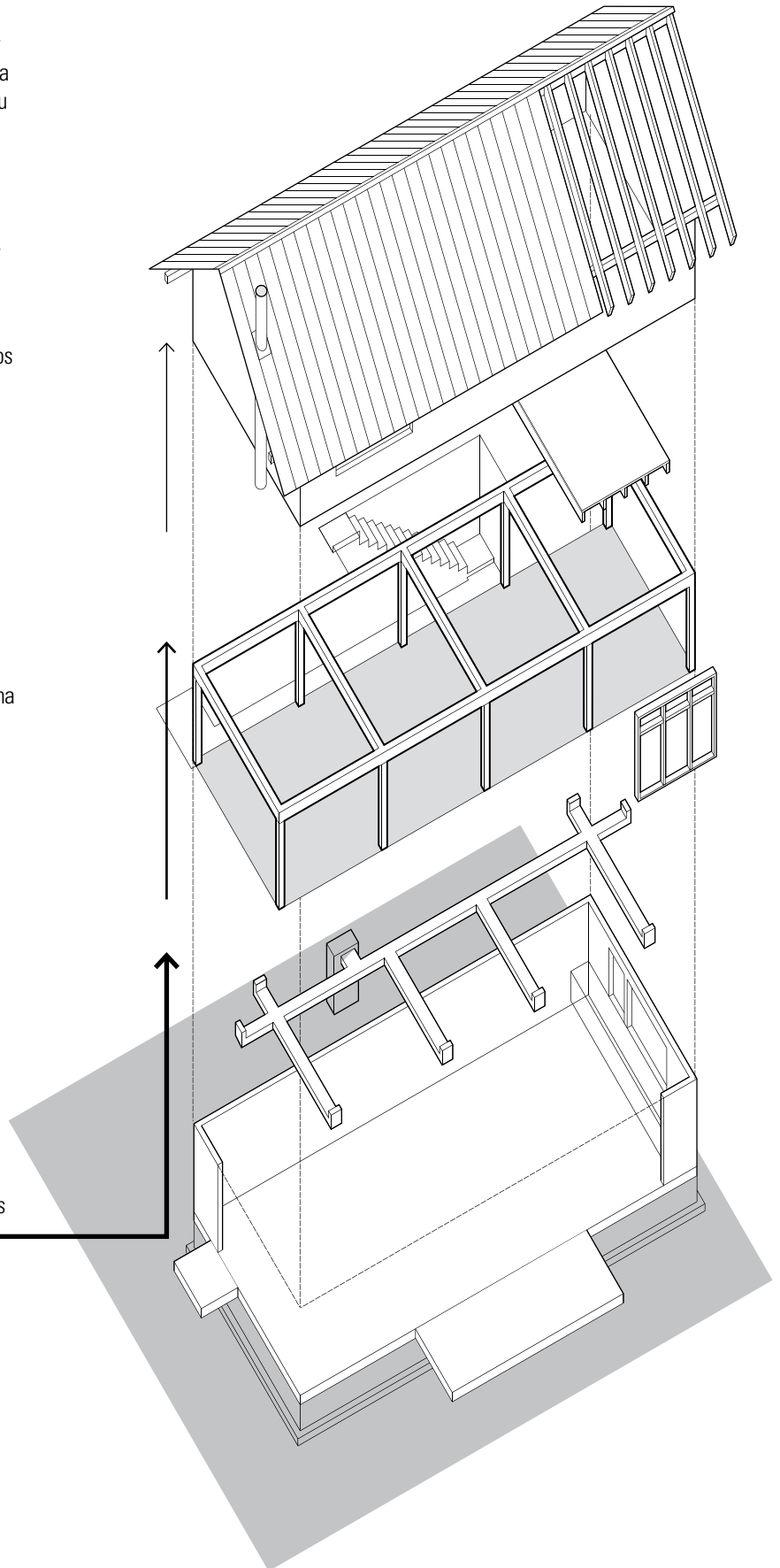
- La cubierta y los muros exteriores protegen los espacios interiores de las inclemencias climáticas y controlan la humedad, la temperatura y el flujo de aire a través de las distintas capas constructivas.
- Los muros exteriores y la cubierta también amortiguan el ruido y proporcionan seguridad y privacidad a los ocupantes del edificio.
- Las puertas proporcionan acceso físico.
- Las ventanas proporcionan luz, aire y vistas.

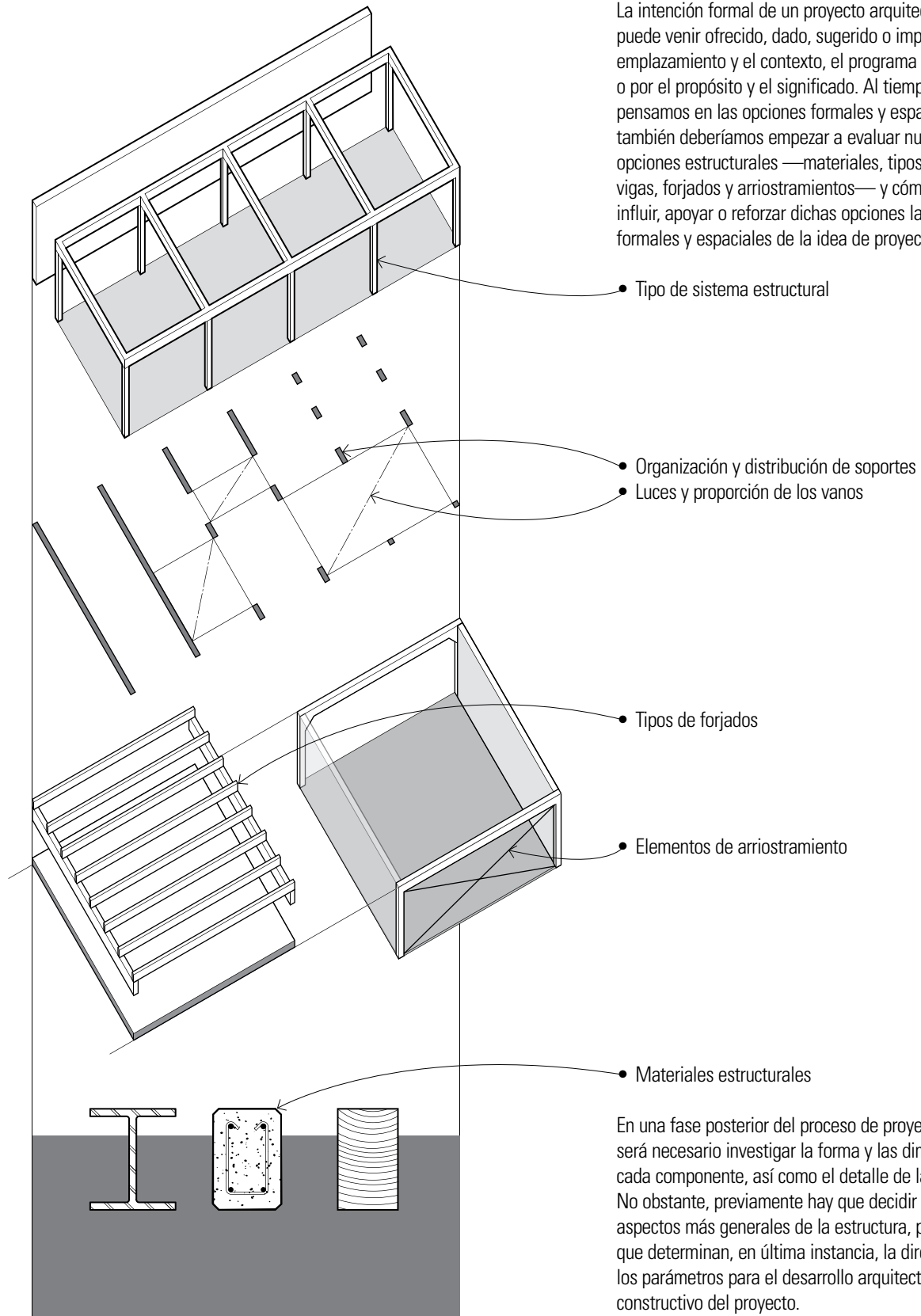
Estructura

Para soportar el cerramiento de un edificio, así como de los forjados y particiones interiores, se requiere un sistema estructural que transfiera las cargas aplicadas a los cimientos.

- Pilares, vigas y muros de carga soportan los forjados y la cubierta.
- Los forjados son planos horizontales que forman el suelo de los espacios interiores y soportan las actividades y el mobiliario del interior.
- Los muros y tabiques interiores subdividen el interior de un edificio en unidades espaciales.
- Los elementos de arriostramiento se encargan de proporcionar estabilidad lateral frente a cargas horizontales.

En el proceso de construcción, la superestructura se eleva a partir de los cimientos, siguiendo las mismas trayectorias por las cuales la primera transmite las cargas hasta los segundos.

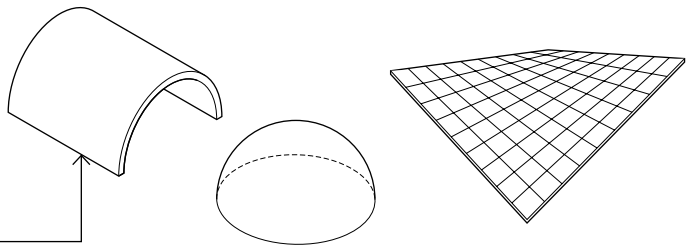
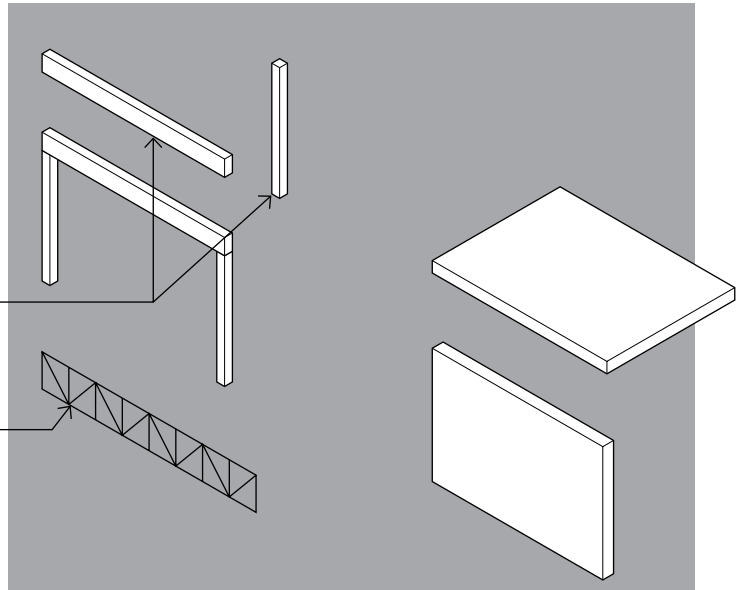




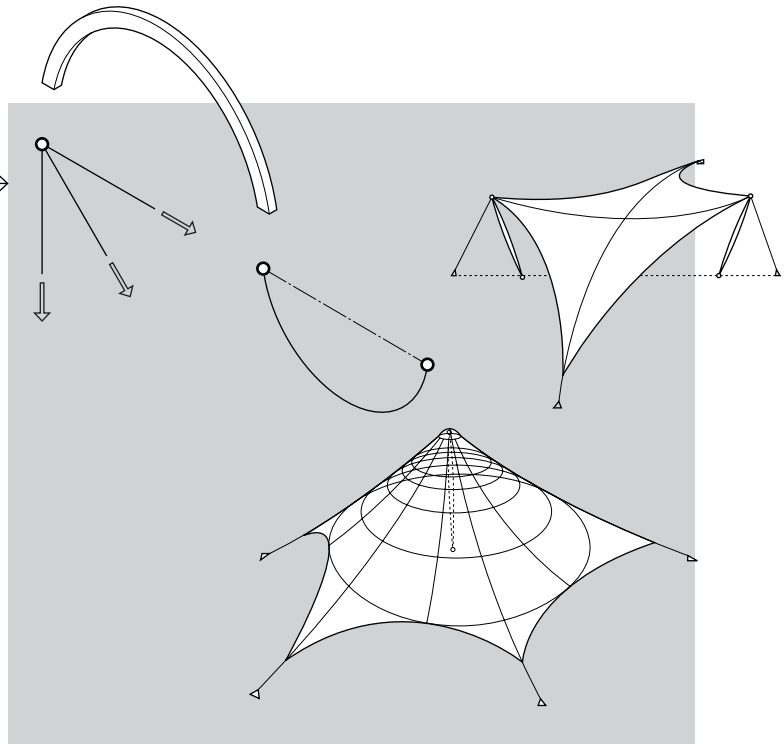
Tipos de sistemas estructurales

Partiendo de una actitud determinada respecto al papel expresivo del sistema estructural y de la composición espacial deseada, puede elegirse un sistema estructural adecuado siempre que se comprendan los atributos formales de los distintos sistemas frente a las cargas aplicadas y su transmisión a las cimentaciones.

- Las estructuras a flexión redirigen las cargas exteriores recurriendo principalmente a la masa y la continuidad de sus componentes, como vigas y pilares.
- Las estructuras de vector activo redirigen las cargas exteriores principalmente a través de la tracción y la compresión de sus componentes, como es el caso de las cerchas.
- Las proporciones de los elementos estructurales, como los muros de carga, las losas de forjados y cubiertas, bóvedas o cúpulas dan pistas visuales sobre su papel en un sistema estructural y la naturaleza de sus materiales. Un muro de fábrica, resistente a compresión pero relativamente débil a flexión, será más grueso que un muro de hormigón armado que realice la misma función. Un pilar de acero será más delgado que un poste de madera que deba soportar la misma carga. Una losa de 10 cm de hormigón armado cubrirá luces mayores que un forjado de madera del mismo grosor.
- Las estructuras de superficie activa redirigen las cargas exteriores principalmente a lo largo de una superficie, como puede ser una estructura de membrana.



- Las estructuras de forma activa redirigen las cargas exteriores principalmente a través de la forma de sus materiales, como es el caso de un arco o una catenaria.
- En la medida en la cual una estructura dependa menos del peso y la rigidez de un material y más de su geometría para lograr la estabilidad, como es el caso de las estructuras de membranas y de mallas espaciales, sus componentes podrán ser más y más delgados, hasta el punto de que pierdan su capacidad para definir la escala y la dimensión espacial.



Análisis y diseño estructural

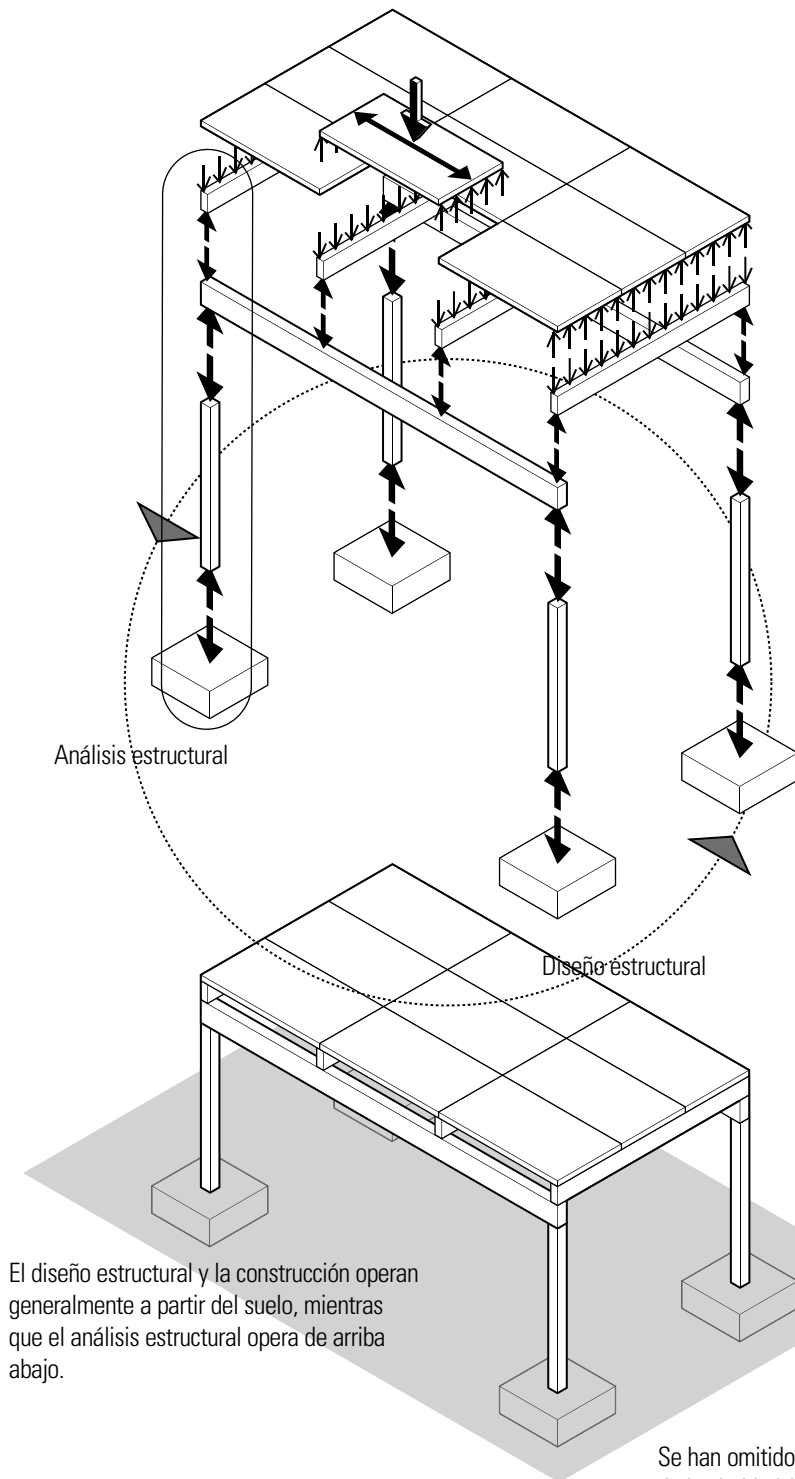
Antes de internarnos en una discusión sobre el diseño estructural, puede ser útil dejar clara la distinción entre diseño y análisis estructural. El análisis estructural es el procedimiento por el cual se determina la capacidad de una estructura, o de sus componentes, ya sea existente o en proyecto, para transmitir de forma segura una serie de cargas sin que los materiales sufran o se deformen en exceso, una vez conocidas la disposición, la forma y las dimensiones de todos los componentes, los tipos de unión y soporte utilizados, y las resistencias tolerables para los materiales empleados. En otras palabras, el análisis estructural solo puede producirse una vez definidas una estructura y unas condiciones de carga concretas.

Por otro lado, el diseño estructural se refiere al proceso de organizar, interconectar, dimensionar y proporcionar los componentes de un sistema estructural cuya función consiste en transferir una serie dada de cargas sin exceder la resistencia de los materiales empleados. Al igual que otras facetas del proyecto, el diseño estructural debe operar en un entorno de incertidumbre, ambigüedad y aproximación. Supone la búsqueda de un sistema estructural que no solo asuma los requisitos impuestos por las cargas, sino que también dé respuesta al resto de aspectos arquitectónicos, urbanísticos y funcionales del proyecto.

El primer paso del proceso de diseño estructural puede tener su origen en la naturaleza del diseño arquitectónico, su emplazamiento y su contexto, o por la disponibilidad de ciertos materiales.

- La idea de proyecto puede obtener un tipo específico de configuración o distribución.
- El emplazamiento y el contexto pueden sugerir un determinado tipo de respuesta estructural.
- Los materiales de la estructura pueden venir impuestos por los requisitos de la normativa técnica, la facilidad de suministro, la disponibilidad de mano de obra o bien por los costes.

Una vez seleccionado el tipo de sistema estructural, su configuración o distribución, y los distintos materiales estructurales a emplear, puede procederse a dimensionar y dar forma a los componentes individuales y a detallar las uniones de los mismos.



El diseño estructural y la construcción operan generalmente a partir del suelo, mientras que el análisis estructural opera de arriba abajo.

Se han omitido los elementos de arriostramiento en aras de la claridad. Véase el capítulo quinto sobre sistemas y estrategias de arriostramiento.

COMPRA EL LIBRO EN TU **LIBRERÍA HABITUAL**
O DIRECTAMENTE EN LA **TIENDA ONLINE** DE LA
EDITORIAL GUSTAVO GILI:

GG

<https://ggili.com/manual-de-estructuras-ilustrado-ching-libro.html>

GG México

<https://ggili.com.mx/manual-de-estructuras-ilustrado-ching-libro.html>

