

# entender la arquitectura

sus elementos,  
historia y  
significado

Leland M. Roth

prólogo de Josep Maria Montaner

GG

**Editorial Gustavo Gili, SL**

Roselló 87-89, 08029 Barcelona, España. Tel. (+34) 93 322 81 61

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

# **Entender la arquitectura**

## **Sus elementos, historia y significado**

**Leland M. Roth**

**Título original**

*UNDERSTANDING ARCHITECTURE*

*Its Elements, History, and Meaning*

**Versión castellana** de Carlos Sáenz de Valicourt, arq.

**Diseño de la cubierta** de Eulàlia Coma Spc

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 la editorial si necesita reproducir 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.

© Leland M. Roth, 1993

Publicado de acuerdo con Harper-Collins Publishers, Inc.  
y para la edición castellana:

© Editorial Gustavo Gili, SL, Barcelona, 1999

ISBN: 978-84-252-2580-2 (digital PDF)

[www.ggili.com](http://www.ggili.com)

*A Carol,  
por su colaboración*



# Contenido

<i>Lista de mapas</i>	XII
<i>Lista de ilustraciones</i>	XIII
<i>Prólogo a la edición española por Josep Maria Montaner</i>	XXIX
<i>Prefacio</i>	XXXI
<b>Introducción: La arquitectura, el arte inevitable</b>	<b>1</b>
<b>PRIMERA PARTE: LOS ELEMENTOS DE LA ARQUITECTURA</b>	<b>6</b>
<b>1 “Utilidad”: ¿cómo funciona un edificio?</b>	<b>8</b>
<b>2 “Solidez”: ¿cómo se sostiene un edificio?</b>	<b>18</b>
<i>La columna y el dintel</i>	22
<i>Entramados</i>	27
<i>Arcos</i>	27
<i>Bóvedas</i>	29
<i>Armaduras de cubierta</i>	34
<i>Mallas espaciales y cúpulas geodésicas</i>	37
<i>Láminas</i>	37
<i>Estructuras suspendidas</i>	40
<i>Membranas (carpas) y estructuras neumáticas</i>	42
<i>Tecnología y riesgo</i>	43
<i>La estructura como expresión cultural</i>	45
<b>3 “Deleite”: el espacio en la arquitectura</b>	<b>46</b>
<b>4 “Deleite”: ver la arquitectura</b>	<b>58</b>
<i>Percepción visual</i>	59
<i>Proporción</i>	64
<i>Escala</i>	68
<i>Ritmo</i>	69
<i>Textura</i>	73
<i>Luz y color</i>	77
<i>Fealdad</i>	82
<i>Ornamento</i>	83
<b>5 “Deleite”: acústica arquitectónica, forma y sonido</b>	<b>94</b>
<b>6 El arquitecto: del sumo sacerdote al profesional</b>	<b>108</b>
<b>7 La arquitectura como parte del entorno</b>	<b>126</b>
<b>8 Arquitectura, memoria y economía</b>	<b>140</b>

<b>SEGUNDA PARTE: LA HISTORIA Y EL SIGNIFICADO DE LA ARQUITECTURA</b>	<b>144</b>
<b>Gráfico cronológico</b>	<b>144</b>
<b>9 La invención de la arquitectura: de las cavernas a las ciudades</b>	<b>146</b>
<i>Terra Amata (Niza, Francia)</i>	148
<i>Cultura Neanderthal</i>	149
<i>Las moradas del Homo sapiens</i>	151
<i>Moradas neolíticas</i>	154
<i>Stonehenge</i>	158
<i>Skara Brae</i>	160
<i>Las primeras ciudades</i>	160
<i>Çatal Hüyük</i>	160
<i>Ciudades mesopotámicas</i>	163
<i>Inventando la arquitectura y la ciudad</i>	164
<b>10 Arquitectura egipcia</b>	<b>166</b>
<i>El paisaje de Egipto</i>	167
<i>La cultura de Egipto</i>	170
<i>Historia de Egipto</i>	172
<i>La pirámide escalonada de Zoser en Saqqara</i>	174
<i>Las pirámides de Gizeh</i>	176
<i>Poblados y casas egipcias</i>	182
<i>La tumba de Hatsepsut en Deir el-Bahari</i>	183
<i>El templo de Amón en Karnak</i>	185
<i>Arquitectura egipcia tardía</i>	190
<i>Una arquitectura de la permanencia</i>	190
<b>11 Arquitectura griega</b>	<b>192</b>
<i>La geografía de Grecia</i>	193
<i>La Grecia minoica y micénica</i>	195
<i>El carácter griego</i>	198
<i>La 'polis' griega</i>	201
<i>Urbanismo griego</i>	202
<i>Arquitectura doméstica</i>	204
<i>Edificios públicos</i>	205
<i>El templo griego</i>	207
<i>Arquitectura helenística</i>	221
<i>Una arquitectura de la excelencia</i>	222
<b>12 Arquitectura romana</b>	<b>224</b>
<i>Historia de Roma</i>	225
<i>El carácter romano</i>	228
<i>La religión de Roma y el templo romano</i>	229
<i>Urbanismo romano</i>	231
<i>El cierre y la manipulación del espacio</i>	235
<i>Arquitectura doméstica</i>	241
<i>Edificios públicos</i>	244
<i>Arquitectura romana barroca</i>	250
<i>Una arquitectura de la universalidad</i>	251
<b>13 Arquitecturas paleocristiana y bizantina</b>	<b>254</b>
<i>La transformación del Imperio Romano</i>	255
<i>Arquitectura paleocristiana</i>	258
<i>Iglesias de Constantino</i>	259
<i>El Imperio después de Constantino</i>	266

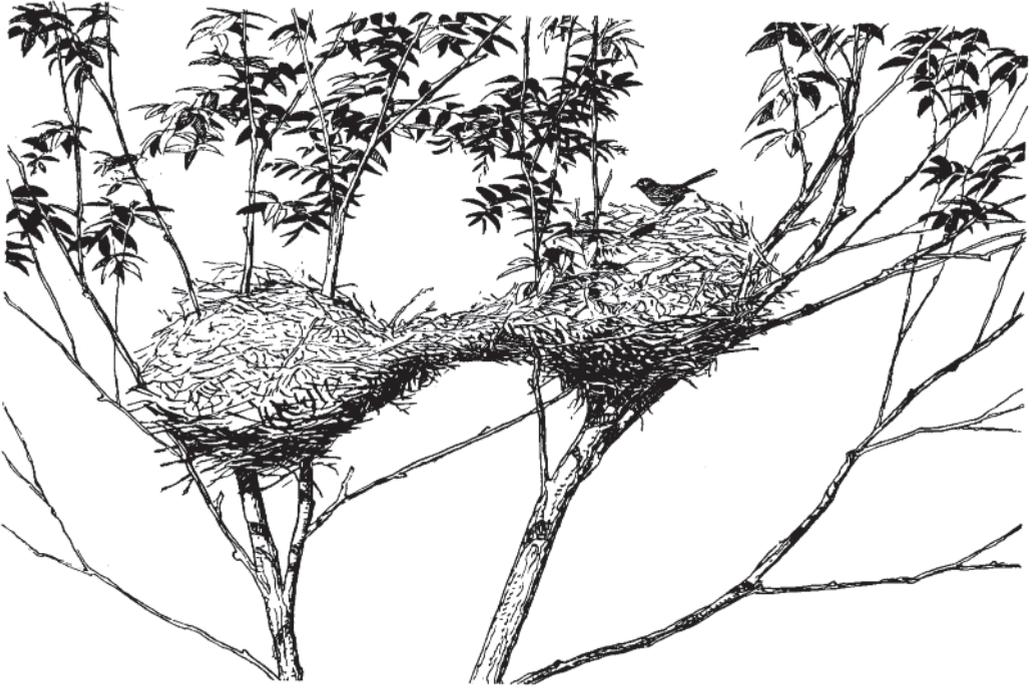
<i>Arquitectura bizantina</i>	269
<i>Iglesias justinianas</i>	269
<i>Iglesias tardobizantinas</i>	276
<i>Una arquitectura del Cielo</i>	280
<b>14 Arquitectura medieval primitiva</b>	<b>282</b>
<i>El renacimiento carolingio</i>	284
<i>La arquitectura doméstica y los castillos medievales</i>	286
<i>Monasterios medievales</i>	290
<i>San Martín de Canigó</i>	292
<i>Monasterio de Saint-Gall</i>	293
<i>Monasterio de Cluny</i>	294
<i>Iglesias románicas</i>	297
<i>Saint-Michael de Hildesheim</i>	297
<i>Santa María de Ripoll</i>	297
<i>Iglesias de peregrinación</i>	298
<i>Sainte-Foi, Conques</i>	299
<i>Saint-Sernin, Toulouse</i>	301
<i>Santiago de Compostela</i>	302
<i>Saint-Philibert, Tournus</i>	304
<i>Iglesias románicas en Italia</i>	305
<i>Catedral de Durham</i>	306
<i>Una arquitectura del refugio</i>	308
<b>15 Arquitectura gótica</b>	<b>310</b>
<i>Cambios políticos y sociales. El resurgir de la ciudad</i>	311
<i>Cambios religiosos. El escolasticismo</i>	313
<i>La catedral gótica</i>	314
<i>La iglesia abacial de Saint-Denis</i>	314
<i>Notre-Dame de Amiens</i>	318
<i>Saint-Pierre de Beauvais</i>	322
<i>Catedral de Salisbury</i>	325
<i>La Sainte-Chapelle, París</i>	326
<i>Arquitectura gótica en España</i>	327
<i>Iglesias con techumbre de madera</i>	329
<i>Arquitectura gótica tardía</i>	329
<i>Arquitectura doméstica y arquitectura pública</i>	334
<i>Una arquitectura de la aspiración</i>	337
<b>16 Arquitectura del renacimiento y del manierismo</b>	<b>340</b>
<i>Italia en el quattrocento</i>	342
<i>El mecenazgo renacentista</i>	342
<i>Humanismo</i>	343
<i>Vitruvio y la forma ideal</i>	345
<i>Brunelleschi y la ordenación racional del espacio</i>	348
<i>La forma ideal y la iglesia de planta central</i>	353
<i>Las iglesias de planta en cruz latina de Alberti</i>	354
<i>Bramante y la nueva iglesia de San Pedro de Roma</i>	358
<i>Arquitectura residencial. Los palacios de los príncipes mercaderes</i>	364
<i>Palazzo Medici, Florencia</i>	364
<i>Palazzo Rucellai, Florencia</i>	364
<i>Palazzo Farnese, Roma</i>	366
<i>Villas de Palladio</i>	366
<i>El manierismo. El renacimiento en transición</i>	369
<i>El Palazzo del Te</i>	373
<i>Los jardines tardorenacentistas</i>	375
<i>La expansión del renacimiento fuera de Italia</i>	378
<i>El renacimiento en España</i>	381
<i>Una arquitectura de los ideales humanistas</i>	385

## X Contenido

<b>17</b>	<b>Arquitectura barroca y rocó</b>	<b>388</b>
	<i>Una arquitectura para los sentidos</i>	390
	<i>Iglesias barrocas romanas</i>	391
	<i>Una arquitectura del impacto emocional</i>	394
	<i>La planta central modificada</i>	397
	<i>Iglesias de Bernini</i>	397
	<i>Iglesias de Borromini</i>	399
	<i>Iglesias de Guarini</i>	404
	<i>La escala barroca</i>	405
	<i>La propagación del barroco fuera de Italia</i>	408
	<i>Barroco francés. Versalles</i>	408
	<i>Barroco inglés</i>	411
	<i>La escalera barroca</i>	418
	<i>Arquitectura barroca en España</i>	418
	<i>Arquitectura rocó. El fin del barroco</i>	422
	<i>El Amalienburg</i>	424
	<i>Vierzehnheiligen</i>	425
	<i>Una arquitectura del artificio</i>	428
<b>18</b>	<b>Arquitectura en la era de la ilustración, 1720-1800</b>	<b>430</b>
	<i>Reinventando una arquitectura racional</i>	433
	<i>Sainte-Geneviève, París</i>	437
	<i>"Arquitectura parlante"</i>	438
	<i>El museo del Prado</i>	442
	<i>El proyecto de la ciudad</i>	442
	<i>El jardín inglés</i>	443
	<i>El eclecticismo. La arquitectura de la elección</i>	448
	<i>Revolución y arquitectura</i>	451
	<i>Una arquitectura de la razón</i>	454
<b>19</b>	<b>Arquitectura del siglo XIX</b>	<b>456</b>
	<i>Neoclasicismo</i>	458
	<i>El resurgimiento del gótico</i>	462
	<i>El Parlamento inglés, Londres</i>	462
	<i>Saint Giles, Cheddle</i>	465
	<i>Eclecticismo creativo</i>	467
	<i>Neobarroco segundo imperio</i>	468
	<i>Neogótico victoriano</i>	471
	<i>La arquitectura de la industrialización</i>	473
	<i>El impacto de la industria</i>	473
	<i>Reacciones contra la máquina</i>	477
	<i>Industria y crecimiento urbano</i>	478
	<i>El urbanismo en España</i>	480
	<i>Eclecticismo racionalista. École des Beaux-Arts</i>	482
	<i>Una arquitectura de utilidad pragmática y expresión simbólica</i>	491
<b>20</b>	<b>Arquitectura de principios del siglo XX: la perfección de la utilidad</b>	<b>500</b>
	<i>Arquitectura: La voluntad de la época concebida desde el punto de vista del espacio</i>	507
	<i>Peter Behrens (1868-1940)</i>	507
	<i>Walter Gropius (1883-1969)</i>	508
	<i>Ludwig Mies van der Rohe (1886-1969)</i>	512
	<i>Le Corbusier (1887-1966)</i>	515
	<i>El primer racionalismo en España</i>	521
	<i>Una arquitectura de la función perfecta: ¿éxito o fracaso?</i>	522

<b>21 Arquitectura de finales del siglo xx: una cuestión de significado</b>	<b>528</b>
<i>Expresionismo alemán (1918-1930)</i>	529
<i>Neoexpresionismo (1955-1970)</i>	531
<i>Arquitectura de la ambivalencia</i>	544
<i>Neomodernismo</i>	547
<i>Posmodernismo</i>	548
<i>Arquitectura de finales de siglo xx en el mundo hispanoparlante</i>	560
<i>Una arquitectura de la sustancia</i>	564
<b>Glosario</b>	569
<b>Índice</b>	585

# Entender la arquitectura



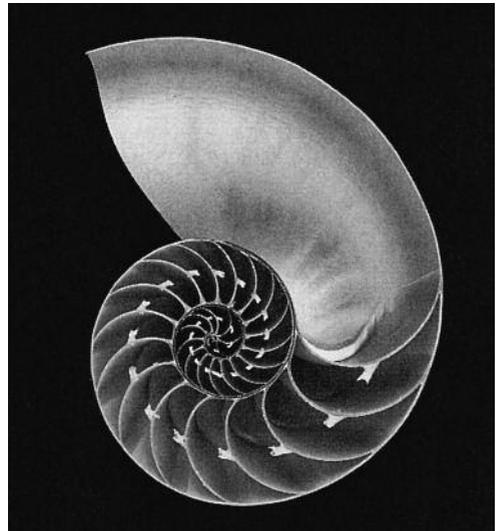
*1. Nido del petirrojo suramericano constructor de castillos, un ejemplo de construcción intencional dentro del reino animal.*

# La arquitectura, el arte inevitable

La arquitectura es el arte inevitable. Despiertos o dormidos, durante las 24 horas del día estamos en edificios, en torno a edificios, en los espacios definidos por ellos o en paisajes o ambientes creados por la mano del hombre. De quererlo así, nos resultaría fácil evitar deliberadamente la visión de pinturas, esculturas, dibujos o cualquier otro producto de las artes visuales, pero la arquitectura nos afecta constantemente, configura nuestra conducta y condiciona nuestro estado de ánimo psicológico. Los ciegos no pueden ver cuadros y los sordos no pueden escuchar música, pero ambos están obligados a tener trato con la arquitectura, como todos los demás seres humanos. La arquitectura, más que limitarse a ser un mero cobijo o paraguas protector, es también la crónica física de las actividades y aspiraciones humanas. Es nuestro patrimonio cultural.

El arquitecto Louis Kahn escribió que “la arquitectura es lo que la naturaleza no puede hacer”.<sup>1</sup> El hombre pertenece a la categoría de animales que construyen, y realmente algunas de las estructuras construidas por pájaros, abejas o termitas, por nombrar sólo algunos, son, por su economía estructural, como obras de la ingeniería humana. En Suramérica existe un petirrojo que construye unos nidos de dos cámaras, comunicadas entre sí mediante un túnel colgante; el conjunto tiene la forma de unas pesas de barra, de las que se usan para hacer gimnasia [1]. Ciertas termitas ciegas construyen unos atrevidos arcos de barro, empezando por los arranques y remontándose hasta que se encuentran en un punto en el aire. Algunos moluscos, como el nautilo, construyen sus moradas en torno a sí mismos, creando una cáscara dura de carbonato de calcio.

El caparazón del nautilo es útil como metáfora para el entorno edificado del hombre. Conforme el nautilo crece, va añadiendo una nueva y más amplia cámara a su cáscara curva, quedando la cámara desocupada llena de gas nitrógeno, lo que le sirve para aumentar la flotabilidad de la masa añadida; las partes más antiguas de la cáscara permanecen, sin embargo, como un registro de la historia del animal [2]. La arquitectura es como la cáscara del nautilo de la especie humana; es el entorno que construimos para nosotros mismos y que, a medida que vamos adquiriendo experiencia y conocimientos, cambiamos y adaptamos a nuestro nuevo ámbito expandido. Si queremos conservar nuestra identidad, debemos tener la precaución de no eliminar la *cáscara* de nuestro pasado, ya que



2. Sección del caparazón de un nautilo. La construcción de la cáscara se ha realizado mediante un proceso biológico inconsciente.

## 2 Introducción



3. Cobertizo para guardar bicicletas, Departamento de Tráfico, Eugene (Oregón), 1984. El cobertizo para bicicletas forma parte de un conjunto de edificios, incluyendo una zona de terminal de autobuses, destinado a fomentar el uso del transporte público.

es como la crónica física de nuestras aspiraciones y nuestros logros.

En tiempos no muy lejanos era frecuente pensar que la arquitectura consistía únicamente en los edificios considerados como *importantes*, es decir en los grandes edificios para la Iglesia y el Estado, que precisaban del dispendio de muchas energías y grandes sumas de dinero. Tal vez la causa de esto haya que atribuirlo a que, en el pasado, las historias de la arquitectura fueron escritas principalmente por arquitectos, espléndidos mecenas o cronistas de la corte que querían agudizar la distinción entre sus propias obras y la masa circundante de los edificios populares. Nikolaus Pevsner, en su compacta obra *Breve historia de la arquitectura europea*, publicada por primera vez en 1943, empezaba por hacer la siguiente distinción: “un cobertizo para una bicicleta es un edificio; la catedral de Lincoln es una obra de arquitectura” [3, 4].<sup>2</sup> La sabiduría popular a

menudo establece la misma distinción, como demuestra la anécdota, ya tópica, de aquel fabricante de estructuras metálicas que ofrecía al cliente un amplio abanico de adornos para las puertas: estilo colonial, mediterráneo, clásico, etc. Tras un temporal de viento que produjo daños en varias de sus estructuras, el representante de la fábrica se tomó la molestia de telefonar a sus clientes para indagar cómo se habían comportado sus estructuras ante el temporal. Uno de ellos, cuya puerta de estilo colonial había sido arrancada por el viento, mientras el resto del granero permanecía en pie, le contestó: “El edificio ha resistido bien, pero la arquitectura ha volado”.<sup>3</sup>

De hecho, si tuviéramos que estudiar la *arquitectura* de las catedrales de Lincoln o de Notre-Dame de Amiens, o cualquier otra, sin tener en cuenta los *edificios* –es decir, todas las casas humildes que conformaban la ciudad en torno a aquéllas–, llegaríamos a una

idea errónea de la posición que ocupaba la Iglesia en el contexto cultural y social de la edad media. Es preciso examinar *ambas* cosas; es decir, la catedral y las casas corrientes que la rodean, porque la arquitectura medieval está constituida por *todos* los edificios como conjunto. Análogamente, si queremos comprender la totalidad de la arquitectura de la ciudad contemporánea, tendremos que considerar todos sus elementos componentes. Por ejemplo, para aprehender la ciudad de Eugene (Oregón), necesitaremos estudiar los cobertizos para bicicletas que están integrados como parte del sistema de transporte [3]; en ellos, los ciclistas dejan sus bicicletas atadas bajo techo y toman un transporte público motorizado. Los cobertizos para bicicletas son parte de la política ecológica municipal, que se esfuerza en mejorar el medio ambiente fomentando el uso de medios alternativos al transporte en coche particular.

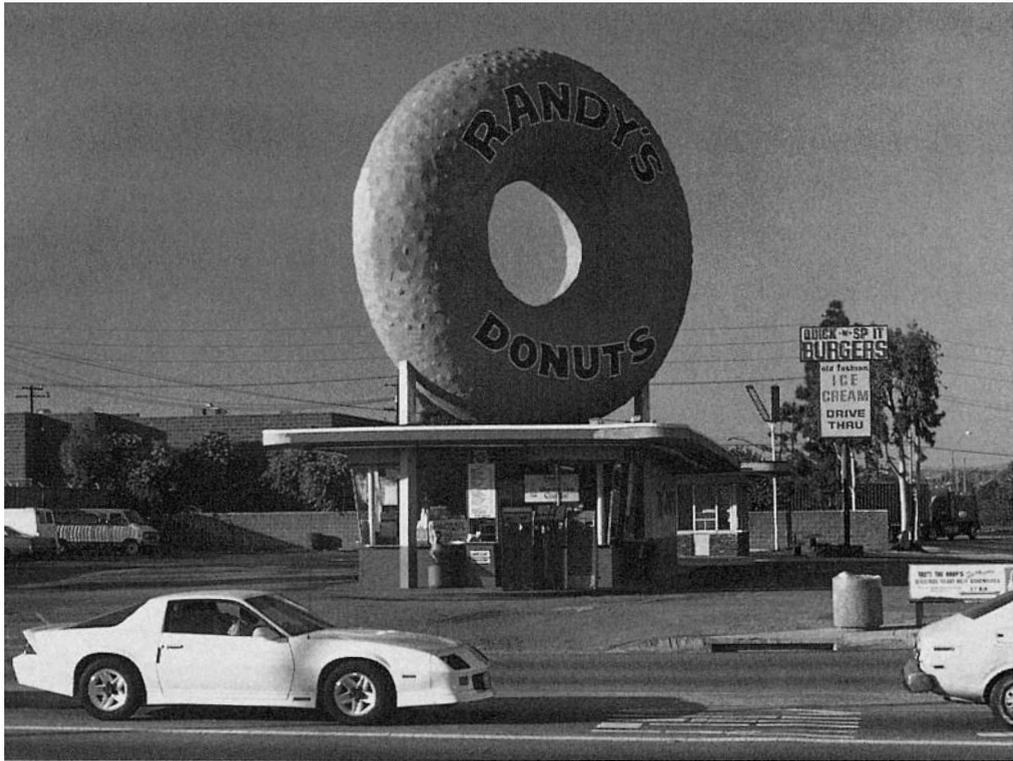
La enfática distinción que hace Pevsner entre arquitectura y edificio es comprensible dada la concisión de su compacto libro, pues ello le permitió tratar mejor el amplio material que tenía que manejar. El punto de vista de Pevsner es consecuencia de la extendida influencia del crítico del siglo XIX John Ruskin, quien hizo la misma distinción en la segunda frase de su libro *Las siete lámparas de la arquitectura* (Londres, 1849). El libro empezaba así: “Al comienzo de cualquier investigación, es sumamente necesario distinguir cuidadosamente entre arquitectura y edificio”. Ruskin quería fijar su atención en los edificios religiosos y públicos, pero también reconocía que la arquitectura era un artefacto cultural sumamente informativo. En otro de sus escritos, el prefacio de *St. Mark s Rest* (Londres, 1877), advertía: “las grandes naciones escriben sus autobiografías en tres manuscritos: el libro de sus hazañas, el libro de sus palabras y el libro de su arte. Ninguno de esos libros puede ser interpretado por sí solo a menos que se lean los otros dos; pero de los tres, el único medianamente fiable es el último”.<sup>4</sup> Como el propio Ruskin reconocía, para abordar el conocimiento de la arquitectura del pasado, de cualquier periodo o cultura anterior al nuestro, tenemos que empaparnos de la historia y la literatura de ese periodo, que son como la crónica de sus actos y de su pensamiento, antes de poder

comprender en toda su integridad el mensaje que transmite la arquitectura. Por lo tanto, la arquitectura es como la historia y la literatura escritas, un recuerdo de la gente que las produjo y, en buena medida, puede ser *leída* de la misma forma. La arquitectura es un modo de comunicación no verbal, una crónica muda de la cultura que la produjo.

Ese concepto –el de la totalidad del entorno construido entendido como arquitectura y el del entorno como una forma de diálogo con el pasado y el futuro– es el que subyace en este libro. La arquitectura se interpreta aquí como la globalidad del entorno construido por el ser humano, incluyendo los edificios, espacios urbanos y paisajes. Y, dado que en un libro de este tamaño no es posible examinar detalladamente todos los tipos de edificio de todas las épocas, el lector debe tener siempre presente la idea de que lo que constituye la arquitectura de cual-



4. Catedral de Lincoln, Lincoln (Inglaterra), 1192-1280. Este edificio fue construido a modo de demostración pública del poder de la Iglesia y de orgullo cívico.



5. Henry J. Goodwin, Big Donut Shop, Los Ángeles, 1954. Edificio creado como respuesta a la cultura del automóvil y al deseo por parte del público de comidas rápidas.

quier periodo es el espectro global de su edificación, y no unos pocos edificios señalados.

A diferencia de otras criaturas que construyen, el ser humano piensa mientras construye, razón por la cual la edificación humana es un acto consciente, un acto que engloba innumerables decisiones y alternativas. Este hecho es el que distingue las construcciones humanas de los nidos de los pájaros y las celdas de las abejas, que son construidos como resultado de una programación genética. Los seres humanos construyen para satisfacer una necesidad, pero, aún así, sus obras expresan sentimientos y valores; expresan en madera, piedra, metal, yeso y plástico lo que consideran vital e importante, ya sea un cobertizo para bicicletas o una catedral. Esto puede adoptar la forma de un mensaje claramente entendido y deliberadamente incorporado por el cliente y el arquitecto, o puede ser una afirmación inconsciente o subconsciente, descifrable más tarde por el observador. De ahí que el edifi-

cio del Capitolio, en Washington DC, tenga tantas cosas que comunicarnos acerca del simbolismo del gobierno republicano de Estados Unidos en el siglo XIX como las pueda tener el Empire State de Nueva York acerca del capitalismo y el precio del suelo urbano en el siglo XX. Análogamente, el Big Donut Shop, construido en 1954 en Los Ángeles por Henry J. Goodwin [5], tiene tanta importancia como artefacto cultural que como arquitectura, pues es un reflejo del amor de los norteamericanos por el automóvil y de su deseo de una gratificación alimentaria instantánea.

La arquitectura es el arte inevitable. Estamos en continuo contacto con ella, a menos que nos vayamos al bosque o al desierto; es una forma de arte en la que habitamos. Tal vez sea esta familiaridad la que nos hace verla sólo como un agente utilitario, simplemente como la más grande de nuestras contribuciones técnicas, a la que no prestamos más atención que la que dedicamos a cual-

quier aparato de uso cotidiano. Y, a pesar de ello, a diferencia de otras artes, la arquitectura tiene el poder de condicionar y afectar al comportamiento humano; el color de las paredes de una habitación, por ejemplo, puede influir en nuestro estado de ánimo. La arquitectura actúa sobre nosotros creando un sentido de temor reverente cuando paseamos entre las gigantescas columnas pétreas de la sala hipóstila del templo egipcio de Karnak; o arrastrándonos, como por la fuerza de la gravedad, hacia el centro del vasto espacio cubierto por la cúpula del Panteón, en Roma; o haciéndonos sentir el flujo del espacio y el enraizamiento en la tierra de la casa de la Cascada, de Frank Lloyd Wright.

Qué duda cabe que una parte de nuestra experiencia de la arquitectura está basada, fundamentalmente, en nuestro disfrute de esas respuestas psicológicas –que el arquitecto experto sabe cómo manipular para obtener el máximo efecto–, pero la experiencia más completa de la arquitectura la adquirimos si ampliamos nuestros conocimientos sobre un edificio, su estructura, su historia y su significado, contribuyendo, a la vez, a aminorar nuestros prejuicios y nuestra ignorancia.

También conviene recordar que la arquitectura, además de proporcionarnos cobijo, es una representación simbólica. Como escribiera sir Herbert Read, el arte es “una forma de discurso simbólico, y donde no hay símbolo ni, por lo tanto, discurso, no hay

arte”.<sup>5</sup> Este contenido simbólico se percibe con mayor facilidad en los edificios religiosos y públicos, en los que el objetivo principal es hacer una proclamación clara y enfática de los valores y creencias de la comunidad. Cuando un edificio nos parece raro, suele ser porque el símbolo que representa no pertenece a nuestro vocabulario cotidiano. A los norteamericanos, que carecen de un legado arquitectónico gótico, la construcción del Parlamento de Londres en estilo medieval en pleno siglo XIX puede parecerles a primera vista anacrónica. Pero resulta más comprensible si recordamos que este edificio debía incorporarse al conjunto de edificios góticos “auténticos” que subsistieron al incendio que motivó su construcción, y que, para el inglés del siglo XIX, la arquitectura gótica era inherentemente inglesa y, por lo tanto, tenía una conexión de siglos con el gobierno parlamentario. Para muchos ingleses de la época, el gótico era el *único* estilo apropiado.

La arquitectura es la ciencia y el arte de la construcción. Para entender más claramente el arte de la arquitectura y su discurso simbólico es preciso comprender primero la *ciencia* de la construcción arquitectónica. Por consiguiente, en los próximos capítulos de la primera parte se explorarán los pragmáticos temas de la función, la estructura y el proyecto. Después, en la segunda parte, se abordará el simbolismo de la arquitectura como medio de comunicación no verbal.

## NOTAS

1. Louis I. Kahn, “Remarks”, en *Perspecta*, The Yale Architectural Journal, n° 9-10, 1965, p. 305.

2. Nikolaus Pevsner, *An Outline of European Architecture*, Londres, 1943. Esta obra se ha convertido en un clásico; (versión castellana: *Breve historia de la Arquitectura Europea*, Alianza Editorial, Madrid, 1994).

3. Walter McQuade cuenta una anécdota similar en “Where s the Architecture?”, en *Connoisseur*, n° 215, noviembre, 1985, p. 82.

4. El libro de Ruskin *Seven Lamps of Architecture*; (versión castellana: *Las siete lámparas de la arquitectura*, Aguilar, SA de Ediciones,

Madrid, 1964), se sigue imprimiendo. Debido a las numerosas ediciones que existen de los escritos de Ruskin, la mejor fuente de información es la edición estándar en muchos volúmenes publicada por E.T. Cook y A. Wedderburn, *The Works of John Ruskin*, Londres, 1903-1912; para el prefacio de *St. Mark s Rest*, véase el volumen 24.

5. Sir Herbert Read, “The Disintegration of Form in Modern Art”, en *The Origins of Form in Art*, Nueva York, 1965, p. 182; versión castellana: *Orígenes de la forma en el Arte*, Editorial Proyección, Buenos Aires, 1967.



6. Stonehenge III, llanura de Salisbury, Wiltshire (Inglaterra), ca. 2000-1500 a. de C. Detalle de un trilito central.

PRIMERA PARTE

# Los elementos de la arquitectura



1.2. Adler & Sullivan, edificio de la Guaranty Trust, Buffalo, 1895. Louis H. Sullivan expresó claramente en la fachada las tres zonas funcionales fundamentales del moderno rascacielos de oficinas.

# “Utilidad”: ¿cómo funciona un edificio?

*Haec autem ita fieri debent, ut habeatur ratio firmitatis, utilitatis, venustatis.* (Deben llevarse a cabo de tal manera que se tenga en cuenta la resistencia, la utilidad, la gracia).

Marco Vitruvio, *De architectura*, hacia el 25 a. de C., 1.iii.ii

En arquitectura, como en las demás artes operativas, el fin debe guiar a los medios. El fin es construir bien. La buena construcción debe cumplir tres condiciones: utilidad, solidez y deleite.

Sir Henry Wotton, *The Elements of Architecture*, 1624

Tal vez la definición más básica de arquitectura sea la que escribiera el antiguo arquitecto romano Marco Vitruvio, hacia el año 25 a. de C. Como se comprueba al leer este tratado, la arquitectura ya era objeto de estudios críticos mucho antes de la época en que fue escrito. Varios arquitectos griegos recopilaban libros sobre arquitectura durante los siglos anteriores al nacimiento de Cristo, y sus obras condujeron a la escrita por Vitruvio. En esta obra se relacionan 63 libros de arquitectura griegos y romanos consultados por el autor para escribir el suyo, algunos de los cuales se remontan al siglo IV a. de C.<sup>1</sup>

Los elementos básicos de la arquitectura descritos por Vitruvio han permanecido sin cambios esenciales desde la antigüedad. “La arquitectura”, escribió, “debe proporcionar utilidad, solidez y belleza” o, como parafraseó sir Henry Wotton en el siglo XVII, “utilidad, solidez y deleite”. Por utilidad, Vitruvio entendía la disposición de las habitaciones y los espacios de forma y manera que no hubiera trabas a su uso y que el edificio se adaptara perfectamente a su emplazamiento. Por solidez entendía que los cimientos debían ser sólidos y los materiales de construcción debían ser juiciosamente elegidos. Belleza sig-

nificaba para él que “el aspecto de la obra es agradable y de buen gusto, y [que] sus elementos están adecuadamente proporcionados con arreglo a los principios de la simetría”.<sup>2</sup> No importa cómo se haya entendido esta noción de belleza, o *venustas*, a lo largo de los siglos, el hecho es que la tríada vitruviana sigue siendo un compendio válido de los elementos de la buena arquitectura. Las cuestiones fundamentales de la arquitectura son las siguientes: la primera, ¿sirve el edificio para cumplir sus fines?, ¿realza el edificio su entorno?; segunda, ¿está suficientemente bien construido como para permanecer en pie?, ¿resisten bien a la intemperie los materiales que lo componen?; tercera, aunque no menos importante, ¿es atractivo el edificio?, ¿sirve para proporcionar satisfacción y goce?, ¿proporciona deleite?

La definición tripartita vitruviana de arquitectura será la base de la exposición que se hace en los siete capítulos siguientes, empezando por el elemento que, a primera vista, podría parecer más directo pero que, a mediados del siglo XX, mostró ser sumamente problemático. Este elemento, el primero citado por Vitruvio, es la *función*. La función o utilidad pragmática de un objeto —o, si se prefiere, su aptitud para un uso particular— es un criterio que ya fue analizado por filósofos o historiadores griegos como Platón, Aristóteles o Jenofonte.<sup>3</sup> Las dificultades que nos hemos encontrado en los últimos tres cuartos de siglo son, en parte, debidas a que en español sólo existe una palabra para definir la función, de la misma manera que en la mayoría de las lenguas europeas existe una única palabra para definir la nieve, por contraste con los esquimales que tienen numerosas voces para describir las diferentes propiedades de la nieve según las condicio-

nes del tiempo. Análogamente, necesitamos variaciones para describir diferentes tipos de función. Nuestra alternativa es construir palabras compuestas, como *función de circulación* o *función acústica*, por ejemplo.

Para agravar aún más el problema, hacia la década de 1920, la definición de función se restringió a un sentido puramente mecánico, con el nacimiento de lo que se llamaría arquitectura moderna internacional, el “estilo internacional”, como fue bautizado en 1932 por Henry Russell Hitchcock y Philip Johnson. El modelo para este tipo de edificio lo proporcionaron la fábrica de turbinas AEG (1908-1909), en Berlín, de Peter Behrens, y la fábrica Fagus (1911), en Alfeld (Alemania), de Walter Gropius [20.7, 20.8]. En ambos casos, la forma del edificio estaba casi absolutamente dictaminada por los procesos industriales internos. En 1926, Gropius proyectó el nuevo edificio para la Escuela de la Bauhaus en Dessau (Alemania), cuya ala de talleres ejemplificaba el mismo determinismo industrial. Aproximadamente por la misma época, Gropius escribió sobre la nueva arquitectura: “Cada cosa está determinada por su naturaleza y, para que funcione correctamente, su esencia debe ser examinada y comprendida en su integridad. Cada cosa debe responder a su propia función en todos los aspectos, es decir, debe cumplir su finalidad en un sentido práctico y, por lo tanto, debe ser útil, fiable y barata”.<sup>4</sup> El arquitecto suizo-francés Charles Édouard Jeanneret (más conocido por su seudónimo de Le Corbusier) describió la inadecuación funcional de la casa contemporánea, diciendo que, para la nueva era y la nueva arquitectura que demandaba, “la casa es una máquina de vivir”.<sup>5</sup> En 1929, el arquitecto Bruno Taut resumió así el propósito de la arquitectura moderna: “El objetivo de la arquitectura es la creación de la más perfecta –y, por ende, más bella– eficiencia”.<sup>6</sup> En pocas palabras, la belleza surgiría *automáticamente* de la más estricta y desnuda utilidad.

Sin embargo, el problema que se fue desvelando paulatinamente a medida que avanzaba el siglo xx, es que muy pocas tipologías de edificio (excepción hecha de las fábricas y otros edificios industriales) poseen esa clase de proceso interno capaz de determinar la forma de una manera tan directa, unívoca y utilitaria. La mayoría de las actividades hu-

manas no puede ser cuantificada o reducida a una mera fórmula mecánica. El arquitecto norteamericano Louis I. Kahn opinaba que “cuando uno crea un edificio, crea una vida. Surge de la vida y, realmente, se crea vida. Le habla a uno. Si *solamente* se tiene la comprensión de la función del edificio, difícilmente podrá éste constituir el ambiente para una vida”.<sup>7</sup>

Otro problema que se nos ha presentado durante los dos últimos siglos es que pocos edificios siguen usándose para la función para la que fueron creados. Ello se ha traducido en ampliaciones, reformas o en la construcción de edificios completamente nuevos, cuando no en la reconversión del edificio original para un nuevo uso. En este caso, la tentación más inmediata es argumentar que el viejo edificio nunca fue funcional porque no puede dar acomodo al *nuevo* uso que queremos darle, aunque, en realidad, lo más probable es que, en su tiempo, el edificio cumpliera perfectamente su función original.

Una alternativa a esta cuestión sería proyectar el edificio de manera que pudiera dar acomodo a cualquier actividad que se plantease en el futuro. Este fue el enfoque adoptado a mediados del siglo xx por Ludwig Mies van der Rohe, quien ideó lo que él mismo llamó el *Vielzweckraum*, el *espacio multifuncional* o *espacio universal*. Efectivamente, Mies sostenía que él y sus asociados no adaptaban la forma a la función: “Damos la vuelta a este concepto, es decir, creamos una forma práctica y satisfactoria y, después, acomodamos las funciones en ella. Hoy en día, ésta es la única manera práctica de construir, ya que las funciones de la mayoría de los edificios cambian continuamente, mientras que el edificio no puede alterarse de manera económica”.<sup>8</sup> La demostración práctica de este aserto la tenemos en la gran sala sin pilares de la Crown Hall, en el Instituto Tecnológico de Illinois (IIT), en Chicago (1952-1956) [1.1]. El problema es que, si bien una sala de tan amplias dimensiones puede dar acomodo a una gran diversidad de actividades, en cambio funciona bastante mal acústicamente, ya que un sonido emitido en cualquier punto de la sala produce ecos y reverberaciones a través de todo el espacio. Sencillamente, Mies van der Rohe dio forma construida a lo que muchos de los arquitectos de la arquitectura moderna internacional pensaban



1.1. Ludwig Mies van der Rohe, Crown Hall, Instituto Tecnológico de Illinois (IIT), Chicago, 1952-1956. El interior consiste simplemente en una amplia sala concebida para satisfacer una gran variedad de funciones diferentes.

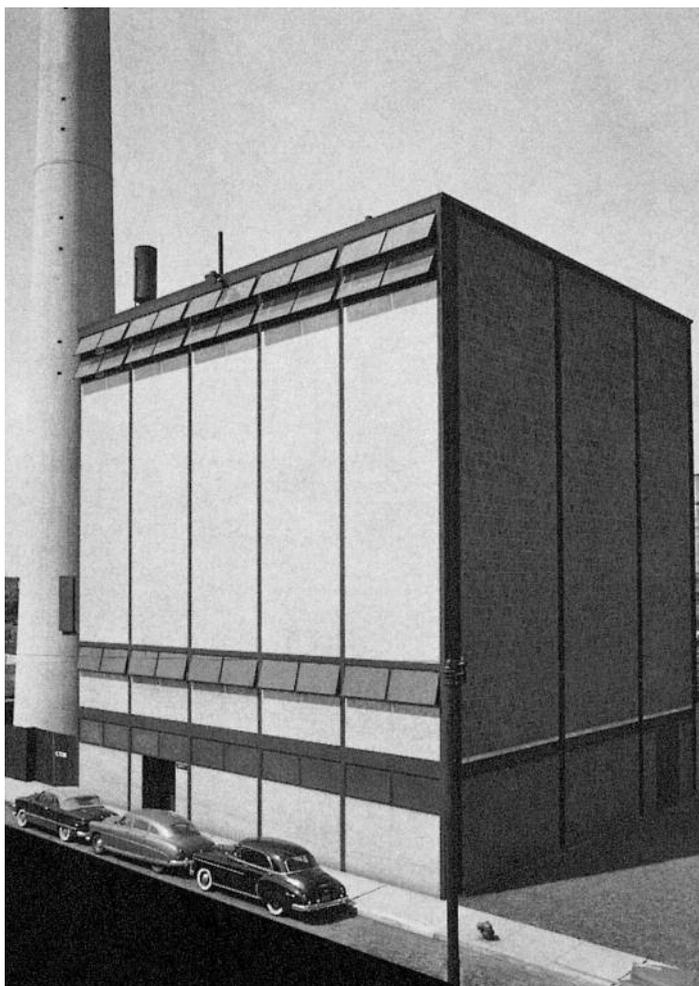
desde los años veinte: que había una universalidad de necesidades humanas y de funciones. Le Corbusier llegó incluso a afirmar que era posible proyectar “un solo edificio para todos los países y climas”.<sup>9</sup> Por desgracia, esta afirmación, tan atractiva debido a su aparente simplicidad científica, ignora dos verdades fundamentales, a saber: que la función está sometida a influencias sociales y culturales, y que la forma del edificio es también una respuesta a su entorno físico y climático.

La función, por lo tanto, tiene muchos componentes, el más básico de los cuales es la **utilidad pragmática**, o sea, el acomodo de un uso o actividad determinado a una sala o espacio específico. Una habitación puede utilizarse para acoger una simple cama para dormir, puede ser un despacho con un escritorio, o bien puede ser una gran sala de reunión o cualquier otro espacio público.

La mayoría de los edificios, naturalmente, están compuestos de numerosas habitaciones, con funciones vinculadas entre sí. Por

consiguiente, la gente necesita desplazarse de una habitación a otra, razón por la cual la **función de circulación** —es decir, la creación de espacios para dar acomodo, dirigir y facilitar los movimientos de una zona a otras casi tan importante como la función utilitaria. Cuando Charles Garnier proyectó la Ópera de París (1861-1875), analizó cuál era exactamente la *función* de la ópera. Ciertamente que los parisinos querían oír la última creación operística, pero, como Garnier observó sagazmente, para ir a la ópera existía un motivo social tal vez más importante que el mero placer de escuchar la música: la gente quería *ver* y *ser vista*. Por lo tanto, las zonas de circulación debían ser tan importantes como el escenario y el auditorio, de modo que, tal como la planta del edificio revela con claridad, la magna escalinata, el *foyer* y los vestíbulos ocupan una parte muy significativa de la superficie total [19.14, 19.15].

Al igual que Garnier, cuando Louis Sullivan, hacia finales del siglo XIX, empezó



1.3. Mies van der Rohe, edificio de calderas, Instituto Tecnológico de Illinois (IIT), Chicago, 1940. Este edificio, con su chimenea a modo de torre y sus ventanas altas tiene los atributos físicos de las iglesias primitivas.

a proyectar algunos de los primeros rascacielos de estructura metálica, lo primero que hizo fue examinar lo que este nuevo tipo de edificio significaba.<sup>10</sup> Así, descubrió que se podían establecer cuatro zonas diferenciadas, la más profunda de las cuales era el sótano, que contenía zonas de maquinaria, almacenamiento y otras de uso estrictamente utilitario. Encima, había tres zonas funcionales visibles en diversos grados: la zona de la planta baja (que contenía las entradas, el vestíbulo de ascensores y tiendas a lo largo del perímetro que daba a la calle), la franja central (pisos de oficinas organizados, uno sobre otro, en torno al núcleo de ascensores) y el piso superior de coronamiento (con la maquinaria de los ascensores, los depósitos de agua, las zonas de almacenamiento y otros

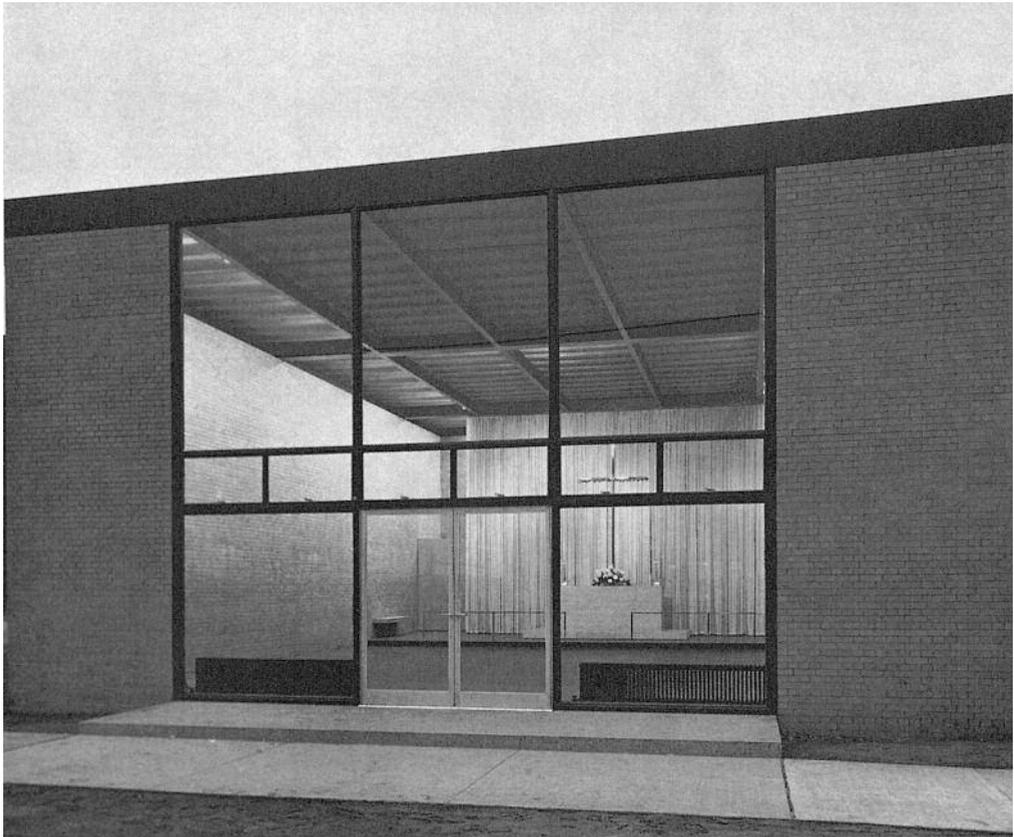
usos diversos). Dado que el nuevo tipo de edificio desarrollado en altura tenía una forma decididamente vertical, Sullivan argumentó que era misión del arquitecto dar énfasis a la verticalidad y expresar claramente sus tres zonas funcionales, tal y como haría en el edificio de la Guaranty Trust de Buffalo, Nueva York (1895) [1.2].

Otro arquitecto que explotó el potencial expresivo de la forma mediante la exteriorización de las diferentes actividades funcionales fue el finés Alvar Aalto. Entre sus mejores ejemplos de ello cabe citar uno de los dos edificios que proyectó en Estados Unidos, la biblioteca del colegio benedictino de Mount Angel, en Oregón (1967-1971) [21.36]. Su función pragmática principal es la de contener libros, los cuales están dis-

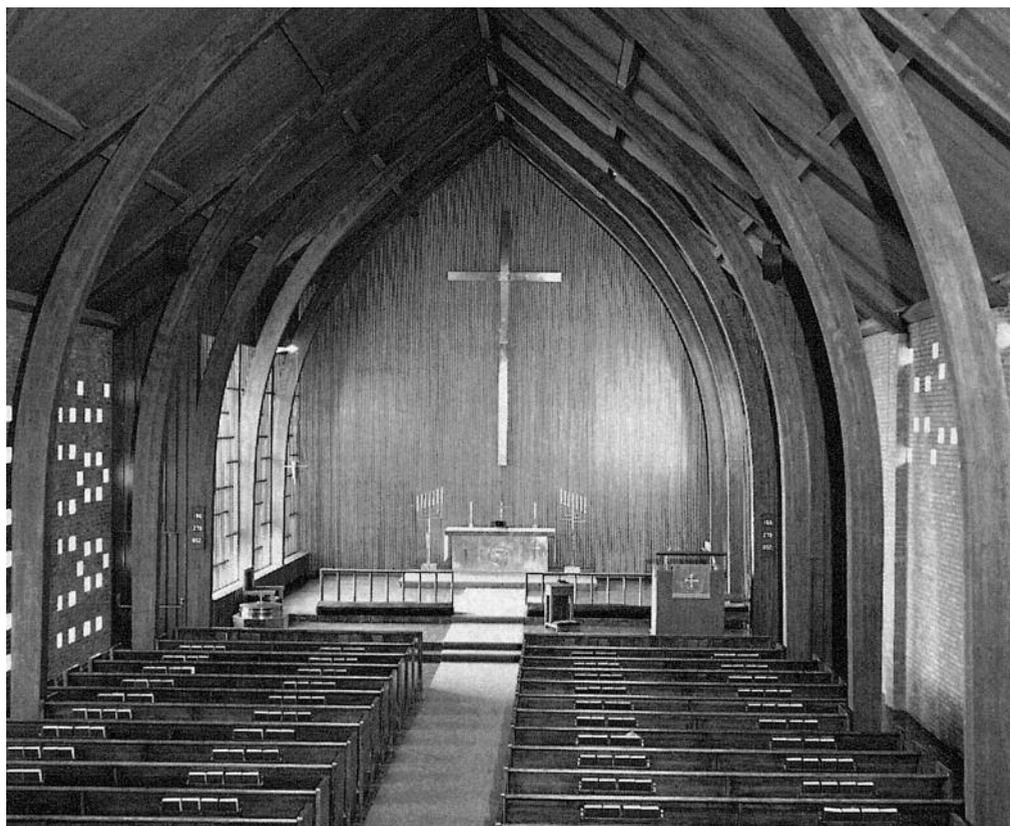
puestos en estantes que se despliegan en forma de abanico hacia el lado norte, partiendo del núcleo central de lectura y circulación. Pero las demás actividades de apoyo requieren espacios diferentes; en el lado sur, además del vestíbulo, se disponen una serie rectilínea y compacta de oficinas y salas de trabajo para el personal, y un auditorio en forma de cuña. Cada uno de los espacios ha sido ubicado por el arquitecto en el lugar necesario y con la forma precisa para dar acomodo a su uso, a la vez que está engarzado con los demás para formar un todo armónico.

El edificio tiene también una **función simbólica** que supone una manifestación visible de su uso. Por lo general, siempre esperamos algún tipo de correspondencia entre el uso que un edificio *sugiere y lo que realmente es*. Entre los egipcios, griegos y romanos, y para el arquitecto del renacimiento y

del barroco entre 1400 y 1750, existían unas pautas generales sobre la forma y el aspecto de los edificios destinados a ciertos usos, pero actualmente la libertad sobre este punto es mucho mayor. De ahí que, aproximadamente a partir de la década de 1920, los arquitectos hayan tenido que afrontar dos cosas simultáneamente: inventar formas originales utilizando las nuevas tecnologías constructivas e idear nuevas representaciones simbólicas apropiadas a las funciones que acoge el edificio. Es frecuente que la explotación de nuevas tecnologías se imponga a la representación simbólica, de manera que muchos edificios del siglo xx no nos dicen casi nada de lo que se desarrolla en su interior. A modo de ejemplo, compararemos dos edificios proyectados por Mies van der Rohe para el campus del Instituto Tecnológico de Illinois durante el período 1949-1952 [1.3, 1.4]. Uno es el edificio de calderas, tal vez el más uti-



1.4. Mies van der Rohe, capilla, Instituto Tecnológico de Illinois (IIT), Chicago, 1949-1952. Pese a tratarse de una capilla, este edificio no contiene ninguna de las claves que convencionalmente se asocian a su función.



1.5. Pietro Belluschi, iglesia luterana Si3n, Portland (Oreg3n), 1950. Se sugiere la imagen tradicional de una iglesia mediante el simple uso de vidrieras de color y arcos de madera laminada.

litario del conjunto; el otro es la capilla. Pues bien, no hay nada, ni en la forma ni en los materiales de que est1 construida la capilla, que nos permita deducir en qu1 se diferencia su funci3n de la asignada a la casa de calderas. Pudiera ser que Mies van der Rohe concibiera la capilla como un espacio multifuncional y evitara conscientemente conferirle una imagen demasiado unívoca que pudiera impedir darle cualquier otro uso diferente en el futuro. Por contraste, se puede comparar la capilla del Instituto Tecnol3gico con el interior de la iglesia luterana en Portland, de 1950, proyectada por Pietro Belluschi [1.5], y que para muchos cr1ticos encarna el car1cter funcional de un edificio religioso, sin tratar de ser una recreaci3n de los signos identificativos de las iglesias g3ticas, como b3vedas, florones o agujas.

En Estados Unidos, el edificio del Capitolio Nacional, en Washington, estableci3 una

imagen de gobierno y, desde el a1o de su construcci3n, en 1830, esta imagen ha sido evocada en innumerables ocasiones. Un ejemplo notable es el Capitolio del Estado de Minnesota, Saint Paul (1895-1905), de Cass Gilbert [1.6]. Como el Capitolio Nacional, 1ste tiene dos c1maras, una a cada lado de una c1mara central de circulaci3n rematada por una c1pula. En este caso, la c1pula est1 inspirada espec1ficamente en la de San Pedro de Roma, pero la imagen que transmite es la de un edificio en donde se legisla; la brillante c1pula de m1rmol blanco proclama a los cuatro vientos esa funci3n, al elevarse por encima de los edificios circundantes. Podemos referirnos a otro ejemplo: cuando, en 1956, Eero Saarinen recibic3 el encargo de proyectar la terminal de la compa1a Trans World Airlines en el aeropuerto de Idlewild (hoy, aeropuerto Kennedy), en Nueva York, dise1n3 unas formas para el edificio que, en

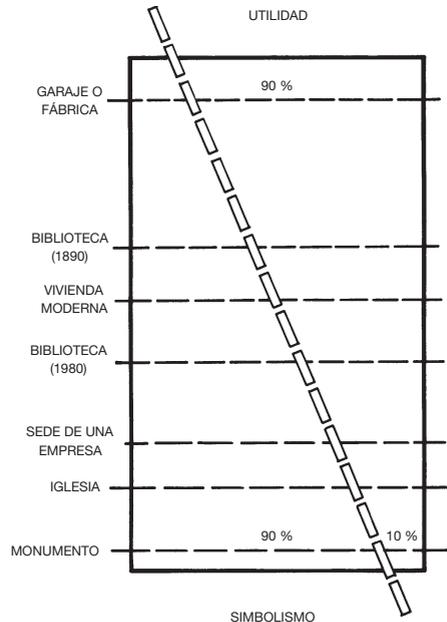


1.6. Cass Gilbert, Capitolio del Estado de Minnesota, Saint Paul, 1895-1905. Este edificio, basado en el Capitolio de Washington DC, evoca claramente la imagen de edificio gubernamental norteamericano.

1.7. Diagrama de los componentes relativos de la función en diferentes tipos de edificio. Un garaje o una fábrica tienen componentes principalmente utilitarios, mientras que en un santuario o en un monumento predomina claramente el componente simbólico.

términos arquitectónicos, querían transmitir simbólicamente la sensación de vuelo. Él y sus socios concibieron un edificio con una gran cáscara de hormigón que se extendía a partir del centro como unas alas gigantescas, y cuyas superficies interiores se curvaban y elevaban sin ángulos agudos ni esquinas [21.14]. En consecuencia, cuando lo atravesamos para embarcar, la propia forma nos prepara para el milagro del vuelo.

No hay edificio que esté dedicado enteramente a una sola función. La mayoría de los edificios contiene una mezcla de funciones puramente utilitarias y de funciones simbólicas. La figura 1.7 representa el universo





1.8. Louis I. Kahn, Instituto Biológico Jonas Salk, La Jolla (California), 1959-1965. Vista del patio interior. Las zonas de trabajo en equipo están situadas en amplios espacios multifuncionales, mientras que los estudios para análisis individuales están agrupados en el patio central y se comunican con los anteriores mediante escaleras y pasarelas.

de contenidos utilitarios y simbólicos para cualquier edificio dado; la línea diagonal que atraviesa el diagrama muestra qué contenidos relativos puede contener un garaje (90% de contenido utilitario y 10% de simbólico), mientras que, por contraste, en un monumento conmemorativo o en una iglesia se pueden invertir las proporciones (10% de contenido puramente utilitario y 90% de contenido simbólico). Una vivienda estaría situada en un término medio, con unos contenidos utilitario y simbólico aproximadamente iguales. Una biblioteca pública o un ayuntamiento moderno se podrían situar, más o menos, en la misma ubicación en el gráfico, tal vez con un ligero predominio de la función simbólica o representativa sobre la estrictamente utilitaria, mientras que, si tales edificios se hubieran construido en el siglo XIX, el predominio de la función simbólica habría sido mayor. De ahí que el diagrama de la figura 1.7 fije la combinación de funciones simbólicas y utilitarias en un momento concreto en el tiempo. Para un período diferente, pasado o futuro, las líneas para diversos tipos de edificio tendrían distintas ubicaciones en el cuadro.

La buena arquitectura también tiene que

satisfacer funciones físicas y psicológicas. Por ejemplo, una sala de espera en el despacho de un médico o en el departamento de urgencias de un hospital es un lugar en el que la mayoría de la gente experimenta una cierta ansiedad. Para contrarrestarlo, el arquitecto puede optar por crear un ambiente doméstico, como el de la sala de estar de una vivienda, proporcionando vistas sobre un jardín interior, en lugar de conferirle la aséptica atmósfera hospitalaria.

También existe una **función psicológica** que se podría definir como la satisfacción óptima de todos los tipos de función que acabamos de describir. Tal vez, el arquitecto moderno que mejor consiguió responder a la función psicológica fue el norteamericano Louis I. Kahn, como demostró en el Instituto Biológico Jonas Salk, en La Jolla (California), construido entre 1959 y 1965 [1.8]. Al igual que hiciera Garnier en la Ópera de París, Kahn realizó un agudo análisis del conjunto de funciones que debía cumplir el laboratorio y llegó a la conclusión de que resolver la función puramente utilitaria, proporcionando espacio para realizar los experimentos, era sólo una parte de su tarea. También es verdad que tuvo la suerte de contar con un

cliente, el científico Jonas Salk, que ya había percibido la necesidad de satisfacer algo más que la mera utilidad. Como dijo Kahn, Salk reconocía que “el científico (...) necesitaba, más que nada, la presencia de lo inmensurable, que es el reino del artista”.<sup>11</sup> Así, los espacios de laboratorio se dividieron en dos partes, los espacios de mayor tamaño para el trabajo de investigación en equipo, y los espacios más pequeños e íntimos para los análisis individuales. Los espacios de mayor tamaño se dispusieron en la parte exterior de la planta en forma de U, y los despachos privados ocupan la parte interior; ambos están comunicados mediante escaleras y pasarelas. Los espacios de trabajo son expansivos y funcionalmente eficientes, mientras que los estudios son pequeños, íntimos y privados, están revestidos en madera de teca y disponen de ventanas en ángulo que

permiten a los investigadores tener una visión hacia poniente del océano Pacífico. Los espacios de trabajo están concebidos y dedicados al desarrollo de la investigación empírica; el diseño de los despachos pretende fomentar la reflexión sobre el significado de la investigación. Como Kahn y Salk pretendían dejar patente, la ciencia es algo más que la mera acumulación de datos. Aunque la ciencia emane del inextinguible deseo humano de conocer, tal conocimiento influye, inevitablemente, en la calidad de la vida humana y, por lo tanto, demanda la reflexión más aguda. Como conocía sobradamente Salk, la ciencia va más allá de la mera acumulación de datos. Análogamente, la arquitectura es algo más que la pura utilidad funcional o que la exhibición de audacia estructural; es el recipiente que conforma la vida humana.

## NOTAS

1. Desgraciadamente, la mayoría de esos manuscritos se ha perdido, por lo cual el tratado de Vitruvio, escrito originalmente en 10 rollos de pergamino, ha adquirido una especial importancia histórica. El libro nos proporciona solamente una vista fugaz sobre el pensamiento de los arquitectos de la antigüedad. La copia completa más antigua del manuscrito de Vitruvio data sólo del siglo VIII d. de C., y fue transcrita por los monjes calígrafos del monasterio de Northumbria (Inglaterra). Las otras 16 copias que subsisten del libro de Vitruvio derivan de ésta y datan de entre los siglos X al XV. Las traducciones más recientes de Vitruvio al inglés son: Frank Granger (trad.), *Vitruvius, On Architecture*, 2 vols., Cambridge, Massachusetts, 1931, en la que se proporciona una relación de varios manuscritos medievales de Vitruvio; y Morris Hickey Morgan (trad.), *Vitruvius, Ten Books on Architecture*, Cambridge, Massachusetts, 1914, en la cual se adapta el texto de Vitruvio a un inglés más sencillo. La última versión castellana es: *Los diez libros de arquitectura*, Editorial Iberia, Barcelona, 1970. Las principales traducciones de Vitruvio a las lenguas europeas aparecen relacionadas en el libro traducido por Granger, xxxiii-xxiv, incluyendo la versión parafrástica de sir Henry Wotton, *The Elements of Architecture*, Londres, 1624.

2. Vitruvius, *Ten Books on Architecture*, traducción inglesa de Morgan, p. 17.

3. Sobre el debate de la utilidad y la adaptación al uso en la antigüedad, véase sir Edward Robert De Zurko, *Origins of Functionalism Theory*, Nueva York, 1957, pp. 15-31.

4. Walter Gropius, “Where Artists and Technology Meet”, en *Die Form*, nueva colección, n° 1, 1925-1926, pp. 117-120.

5. Le Corbusier, *Vers une Architecture*, París, 1923; versión castellana: *Hacia una arquitectura*, Editorial Poseidón, Buenos Aires, 1965.

6. Taut, Bruno, *Modern Architecture*, Londres, 1929, p. 204.

7. Louis I. Kahn, entrevista contenida en John W. Cook y Heinrich Klotz, *Conversations with Architects*, Nueva York, 1973, p. 204.

8. *Architectural Forum*, n° 97, noviembre, 1952, p. 94.

9. Le Corbusier, *Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme*, París, 1930, p. 64.

10. Louis Sullivan, “The Tall Building Artistically Considered”, en *Lippincott's Magazine*, n° 57, marzo, 1896, pp. 403-409; reeditado en L. M. Roth, ed., *America Builds*, Nueva York, 1983, pp. 340-346.

11. Louis I. Kahn, citado en Ann Mohler, ed., “Louis I. Kahn: Talks with Students”, en *Architecture at Rice*, n° 26, 1969, p. 13.



2.1. Columnas, templo de Poseidón, Paestum (Italia), ca. 550 a. de C. Esta columna de piedra, de mayor tamaño de lo estructuralmente necesario, transmite una inequívoca impresión de su resistencia.

# “Solidez”: ¿cómo se sostiene un edificio?

Arquitectura... es la cristalización de su estructura interior, el lento desplegar de la forma. Esta es la razón por la cual tecnología y arquitectura están tan estrechamente relacionadas.

Mies van der Rohe, “Conferencia a los estudiantes del Instituto Politécnico de Illinois” (1950), en Conrads, U., ed., *Programas and Manifestoes on 20th-Century Architecture*. (Versión castellana: *Programas y manifiestos de la arquitectura del siglo xx*, Editorial Lumen, Barcelona, 1973).

La parte más aparente de un edificio es su estructura, o lo que lo hace permanecer en pie. Esto es más evidente en los tiempos actuales que en el pasado, ya que los arquitectos e ingenieros se deleitan en crear estructuras cada día más esbeltas, como si quisieran desafiar a la gravedad. La tensión que experimentamos al contemplar una estructura tan delicada que parece en peligro de colapso inminente nos ilustra sobre la diferencia entre **estructura física** –literalmente, los huesos del edificio– y **estructura perceptible**, es decir, lo que vemos. No son la misma cosa, ya que una columna puede ser mucho más grande de lo estructuralmente preciso, simplemente para darnos la sensación de que tiene la suficiente resistencia para cumplir su cometido. Tal es el caso de las macizas columnas del templo de Poseidón en Paestum (Italia) [2.1].

Si comparamos el edificio de la Lever Brothers Company en Nueva York (1951-1952), de Skidmore, Owings & Merrill [2.2], con el cercano del New York Racquet and Tennis Club, del estudio de McKim, Mead & White (1916-1919), se puede apreciar la diferencia entre un muro de vidrio que oculta la estructura y un macizo muro de albañilería. El muro del club da la impresión de tener mayor robustez de la necesaria, como si quisiera transmitirnos la seguridad del exceso estructural; mientras que las columnas del

edificio de la Lever están cubiertas por una *piel* suspendida de vidrio verde que no proporciona ninguna clave perceptible sobre cómo se sostiene el edificio. La experiencia nos enseña que las hojas de vidrio no pueden por sí mismas sostener un edificio de ese tamaño, por lo que nos vemos obligados a averiguar dónde está la estructura real (los arquitectos nos instan a jugar a esta especie de juego), hasta que, al fin, descubrimos las columnas en la base del edificio. Esta contradicción entre lo que sabemos que es un edificio pesado y la ingravidez que se sugiere forma parte del atractivo que ejercen este tipo de rascacielos de piel acristalada; el observador moderno se deleita en la idea de que se ha engañado a la gravedad, aunque un observador de épocas pasadas seguramente consideraría que se trata de un caso claro de estructura pobremente expresada.

Crecemos con una clara percepción de la gravedad y de cómo afecta a los objetos que nos rodean, ya que desde el primer momento en que intentamos mover los miembros (una vez separados del estado de relativa ingravidez que teníamos en el seno materno) experimentamos el esfuerzo que hay que hacer para vencerla. De niños, tuvimos que ingeniárnoslas para ponernos de pie, mantener el cuerpo recto y aprender a movernos sobre las dos piernas. Por lo tanto, mucho antes de que pudiéramos articular la idea en términos científicos, comprendimos claramente que los objetos sin apoyo caían irremisiblemente al suelo o, para ser más exacto, hacia el centro de la tierra. Y esa es precisamente la esencia de la estructura arquitectónica, evitar que los objetos caigan al suelo, a pesar de la fuerza de atracción incesante de la gravedad.

Desde muy temprano desarrollamos una manera de entender los objetos que nos ro-

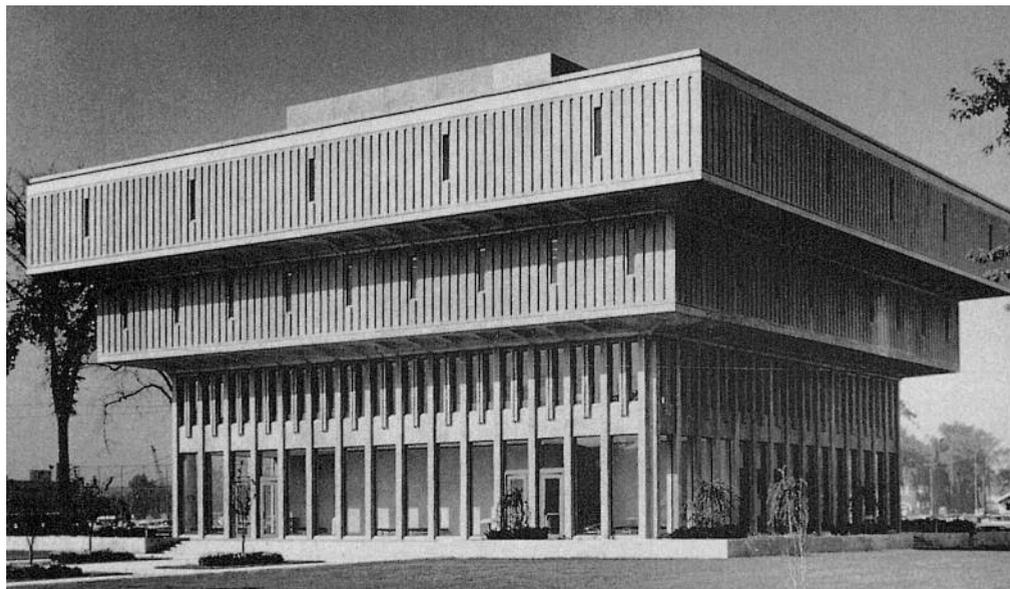


2.2. Skidmore, Owings & Merrill (SOM), Lever House, Nueva York, 1951-1952. El edificio Lever, con su piel de vidrio suspendida por delante del esqueleto interior, oculta la visión de la estructura, mientras que el edificio vecino, el New York Racquet and Tennis Club (de McKim, Mead & White, 1916-1919), luce una estructura vigorosamente expresiva.

dean a través de la **empatía**, imaginándonos que estamos en el interior del objeto y sintiendo cómo actúa la gravedad sobre él. Así, cuando, por ejemplo, contemplamos las pirámides de Egipto, tenemos la sensación de que son objetos inherentemente estables, mientras que cuando vemos algo parecido al edificio Shapero de la Facultad de Farmacia, en la Wayne State University (Detroit) [2.3], nos invade una sensación de inestabilidad y, tal vez, hasta nos maravillamos ante la pericia del arquitecto y el ingeniero que colocaron este edificio patas arriba. En el caso del edificio de la Lever, el arquitecto jugó con nuestras diferentes percepciones de la pie-

dra maciza y el vidrio transparente, sabiendo que percibiríamos uno de los edificios como sólido y *pesado* y el otro como *ligero*. De hecho, algunos arquitectos se afanan en acentuar la sensación de peso, en particular, y refiriéndonos al siglo XIX, el arquitecto norteamericano de Filadelfia, Frank Furness, y su edificio para la Provident Life and Trust Company (1876-1879), en Filadelfia, desgraciadamente demolido [2.4]. El edificio desprendía una enorme sensación de pesadez, de tal manera que sus distintas partes parecían comprimidas unas contra otras, como apretando siempre hacia abajo.

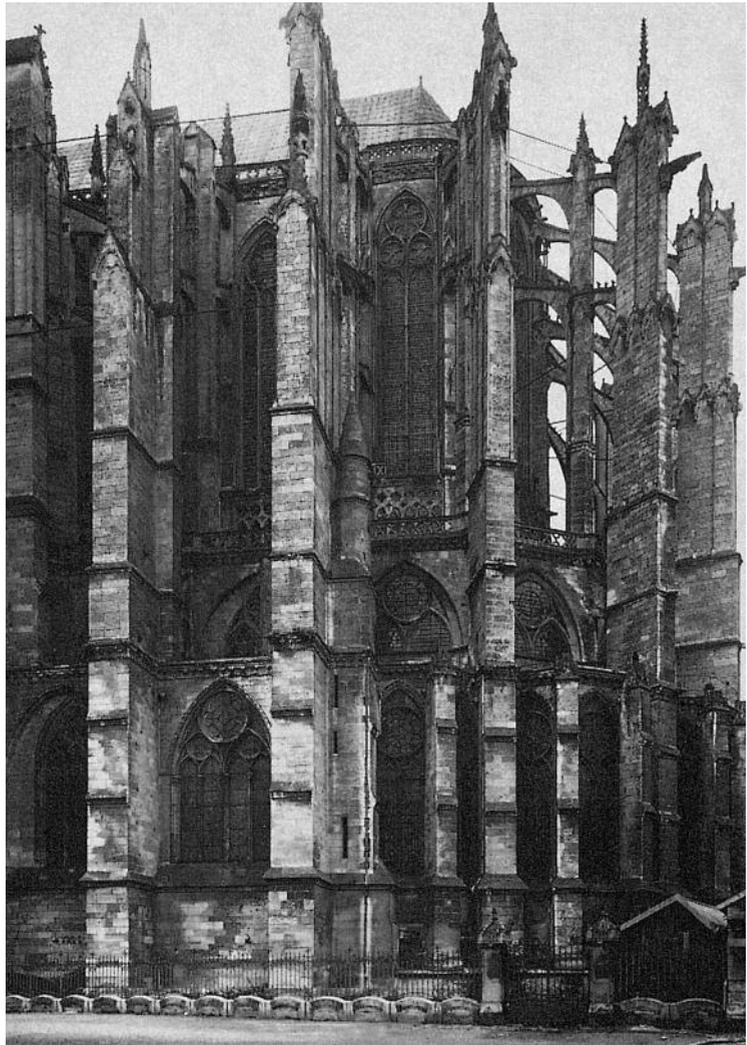
Parte de nuestra percepción de la arqui-



2.3. Paulsen & Gardner, Shapero Hall de la Facultad de Farmacia, Wayne State University, Detroit, 1965. Este sorprendente edificio está apoyado sobre una base más estrecha que el resto y parece invitar al observador a preguntarse cómo se aguanta.



2.4. Frank Furness, edificio de la Provident Life and Trust Company, Filadelfia, 1876-1879 (demolido ca. 1950). Los arquitectos explotaron deliberadamente los fuertes contrastes de formas, escala y textura para crear una imagen vigorosa y original.



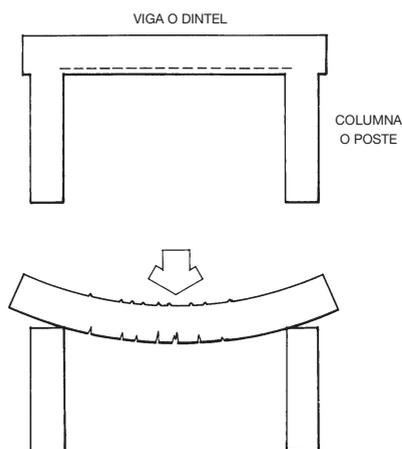
2.5. Coro de la iglesia catedralicia de Saint-Pierre, Beauvais (Francia), 1225-1569. En este edificio, que refleja la aspiración al cielo de los fieles, hay un absoluto predominio de las líneas verticales.

ectura está relacionada con este análisis enfático de cómo se manipulan las fuerzas en los edificios. De ahí que, cuando visitamos el Partenón de Atenas [11.25], la cuidadosa compensación entre elementos verticales y horizontales, en la que ninguno de ellos domina sobre los otros, sugiera un delicado equilibrio de fuerzas que nos ilustra sobre el ideal filosófico griego. Por contraste, la arquitectura gótica, como la representada por el extremo oriental de la catedral de Beauvais, en Francia [2.5], se caracteriza por sus encumbrados y estilizados contrafuertes y por la multiplicidad de líneas verticales. Todo ello sugiere ascensión, subida, ingravidez, aspiración y una negación visual de las enormes fuerzas engendradas por la mole de

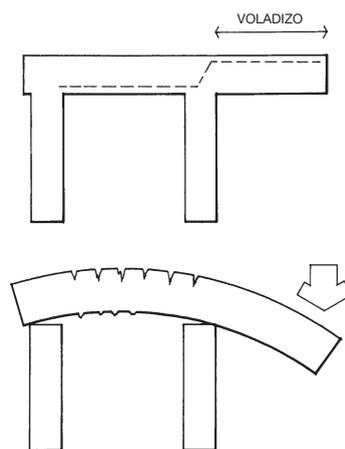
42,7 m (140 pies) de altura, que son conducidas de forma segura hacia el terreno.

### La columna y el dintel

El origen de la estructura es el muro, sea de piedra, de ladrillo, de adobe o bloques de barro, de bloques de vidrio o de cualquier otro material. Pero una habitación totalmente rodeada de muros no tiene luz ni vistas, luego es necesario abrir huecos. Para abrir un hueco, es preciso sostener los bloques o ladrillos que hay encima de él, y ello se consigue mediante una viga (de madera, o de metal a partir de 1750) o un arco. Esa viga que se inserta en el muro para sostener la pared de arriba



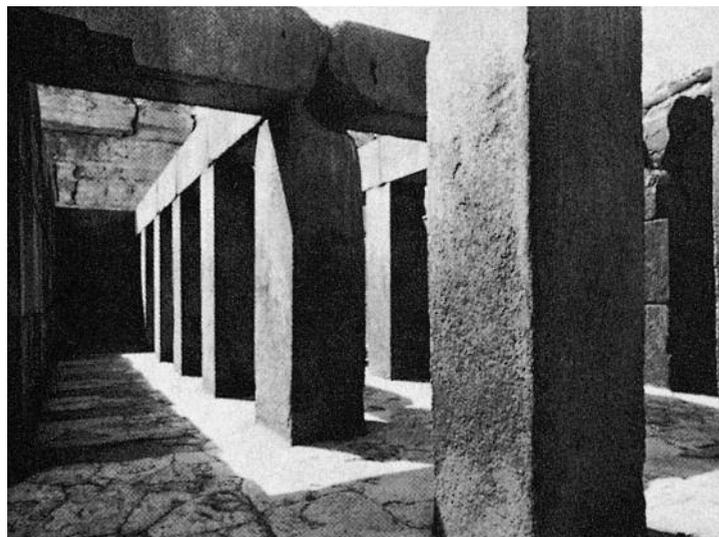
2.6. Diagrama del sistema estructural de columna y dintel.



2.8. Diagrama de un voladizo.

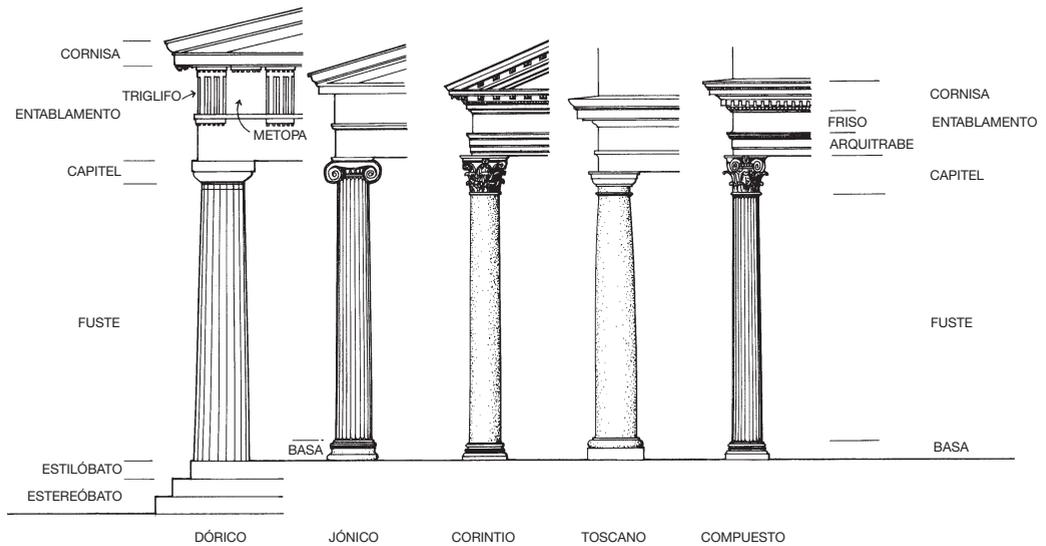
se llama **dintel**. La pared también podría eliminarse, por así decirlo, y sustituirse por bloques más delgados apilados formando columnas, con dinteles cubriendo los espacios entre ellas. En una charla a los estudiantes, Louis I. Kahn se refirió “al trascendental momento en que se *rompió* la pared y nació la columna”.<sup>1</sup> El sistema estructural de columna y dintel, de poste y dintel o, dicho de forma más actual, de pilares y jácenas [2.6], es tan antiguo como la propia construcción con materiales permanentes. Los hallazgos arqueológicos y antropológicos sugieren que los primeros materiales empleados en los sis-

temas de columna y dintel, mucho antes que la piedra, fueron la madera o los tallos de papiro; de hecho, se cree que el hombre ha utilizado el sistema de columna y dintel durante varios centenares de miles de años. Tal sistema recibe también el nombre de **adintelado** o **arquitrabado**. Uno de los ejemplos más claros de construcción adintelada es el Templo del Valle, al este de la pirámide de Kefrén, en Gizeh (Egipto), construido entre el 2570 y el 2500 a. de C. [2.7]. En él, los dinteles de sección cuadrada, en granito rojo finamente pulido, descansan sobre pilares monolíticos de base cuadrada del mismo ma-



2.7. Templo del Valle, pirámide de Kefrén, Gizeh (Egipto), ca. 2570-2500 a. de C. Este templo constituye una de las expresiones más puras del sistema estructural de columna y dintel.

## 24 Los elementos de la arquitectura



2.9. Comparación de los cinco órdenes clásicos. Los órdenes griegos son el dórico, el jónico y el corintio. Los romanos añadieron a los anteriores el orden compuesto (combinación de los órdenes jónico y corintio) y el orden dórico toscano, más sencillo y pesado.

terial, contrastando con el suelo de alabastro. La prolongación de la viga sobre el extremo de la columna da lugar a un **voladizo** o **cantilever**.

Todas las vigas, sean de piedra, madera o cualquier otro material, están sometidas a la acción de la gravedad. Como todos los materiales son flexibles en un grado u otro, las vigas tienden a flexionarse por su propio peso, y aún en mayor medida al aplicárseles una carga. Ello significa que las fibras de la parte superior de una viga comprendida entre dos apoyos tienden a comprimirse, mientras que las de la parte inferior tienden a estirarse, es decir a entrar en tensión [2.6]. En un voladizo la situación se invierte [2.8], de manera que son las fibras de la parte superior las que se estiran (es decir, experimentan esfuerzos de tracción o tensión) y las fibras inferiores las que se comprimen (o sea, sufren esfuerzos de compresión). En un voladizo, esas fuerzas son mayores en la zona más cercana al apoyo. De hecho, la continuidad del material es la que hace posible el voladizo.

La madera, como material fibroso que es, resiste bien los esfuerzos de tracción (o tensiones), al igual que el hierro dulce y el acero moderno, de manera que las vigas realizadas con estos materiales pueden sal-

var luces importantes. Los esfuerzos de tracción a lo largo de la parte inferior de una viga (o de la superior de un voladizo) están determinados por la luz del vano y por la carga aplicada, de manera que, para una luz y una carga suficientemente grandes, puede darse el caso de que se sobrepase la resistencia del material; de llegarse a esta situación, se partiría la parte inferior de la viga (o la superior del voladizo), y se produciría el colapso de la pieza. La piedra y el hormigón en masa, por ser materiales cristalinos, tienen menor resistencia a la tracción que la madera, que es un material fibroso; por lo tanto, para una misma luz, una viga de madera será capaz de soportar una carga tal que, en cambio, rompería una viga de piedra. Naturalmente, la viga de piedra empieza por ser mucho más pesada que la de madera. En vigas de hormigón la solución es colocar dentro de su masa algo que sea capaz de resistir mayores esfuerzos de tracción que el hormigón por sí solo. Esta idea, que ya fue explotada por los antiguos romanos, se materializa colocando una armadura de hierro (actualmente de acero) en forma de varillas dentro del encofrado, antes de efectuar el vertido del hormigón. El resultado es el hormigón armado. Como indican las líneas a trazos de las figuras 2.6 y 2.8, el acero se

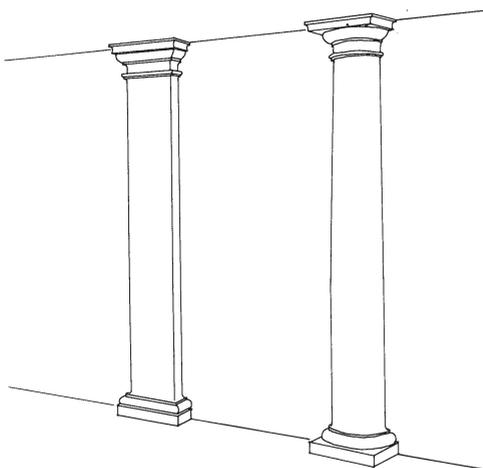
coloca allí donde se acumulan los esfuerzos de tracción, es decir, en la parte inferior de las vigas y en la superior de los voladizos. Los griegos también afrontaron este problema. El vano central de los pórticos de entrada a la Acrópolis de Atenas (construida entre el 437 y el 432 a. de C.), los Propileos [11.19], tenía que dejar el ancho de paso suficiente para las yuntas de bueyes que iban al sacrificio y para sus conductores; el resultado fue una luz de 5,5 metros (18 pies), demasiado grande para un bloque de mármol macizo, que también debía sostener la techumbre. La solución adoptada por el arquitecto Mnesicles fue la de vaciar el interior de la viga para reducir su peso propio (aunque, aún así, todavía pesaba 11 toneladas) y colocar unas barras de hierro a lo largo de la parte superior de la viga, aparentemente para soportar el peso de los bloques de mármol de encima. En este caso singular, las barras de hierro están en la parte superior de la viga, en lugar de en la inferior, como cabría esperar. A pesar de la armadura, a lo largo de los siglos han ido apareciendo grietas en esta viga-dintel.

Las columnas de los Propileos son ejemplos espléndidos de uno de los tres tipos de columna desarrollados por los griegos para su arquitectura civil y religiosa [2.9]. Estos tres tipos de columna u *órdenes* fueron adaptados más tarde por los romanos, quienes añadieron ciertas variaciones ornamentales propias, y pasaron a formar parte del vocabulario arquitectónico básico desde el renacimiento, en el siglo xv, hasta nuestros días. Cada orden está formado por tres partes básicas –basa, fuste y entablamento– y arranca del *estereóbato* (de *stereós*, ‘duro’, ‘sólido’, y *bates*, ‘base’), o macizo corrido escalonado que sirve de base al templo, cuyo plano superior es el *estilóbato* (de *stulos*, ‘columna’, y *bates*, ‘base’). En todos los órdenes, la altura de la columna y el tamaño relativo de cada uno de sus componentes y del entablamento son proporcionales al diámetro del extremo inferior del fuste de la columna.

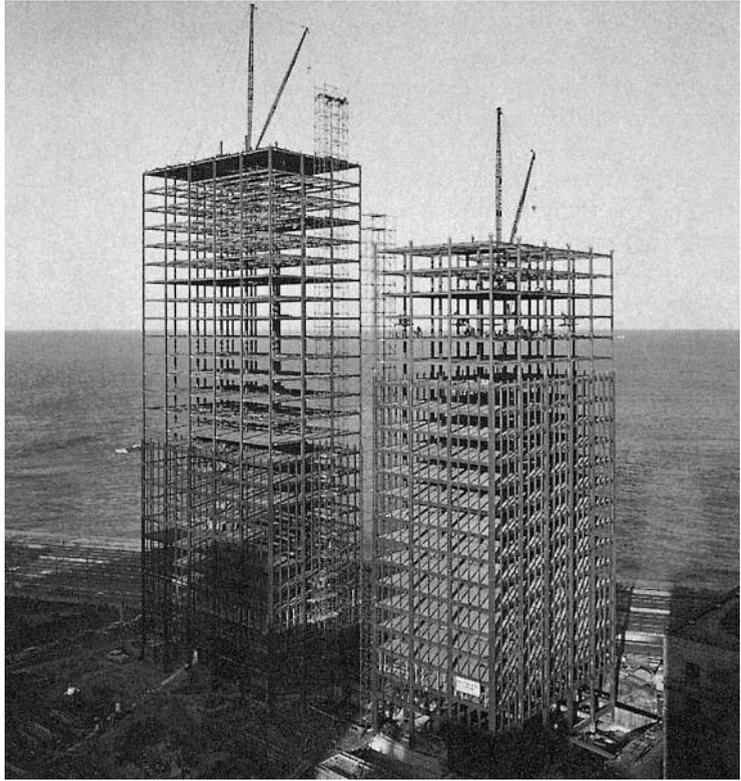
El **orden dórico** [2.9] es el más antiguo y robusto de los tres órdenes griegos. Su columna tiene una altura de cuatro a seis veces y media el diámetro del fuste en su extremo inferior y sostiene un *entablamento* (sistema estilizado de vigas y cabezas de viga) cuya altura es una cuarta parte la de la columna. El

fuste de la columna dórica descansa directamente, sin basa, sobre el estilóbato, y está surcado por 20 *estrías* o acanaladuras verticales, separadas por aristas vivas o filos agudos. El *capitel*, que carece de astrágalo, consiste simplemente en uno o varios filetes o anillos horizontales, un *equino*, más ancho por su terminación que por su arranque, y un *ábaco* cuadrado. Cada orden tiene su propio *entablamento* distintivo, el cual, en todo caso, consta de tres partes. El del orden dórico está compuesto, de abajo arriba, de: (1) un *arquitrabe* (del latín *trabs*, ‘viga’, y el prefijo griego *arkhi*, ‘principal’) muy grueso y de una sola banda; (2) un *friso* adornado con *triglifos* (cabezas de viga estilizadas) y *metopas* (espacios, a veces esculpidos, que median entre dos triglifos); y (3) una *cornisa*, remate o elemento terminal formado por varias molduras salientes.

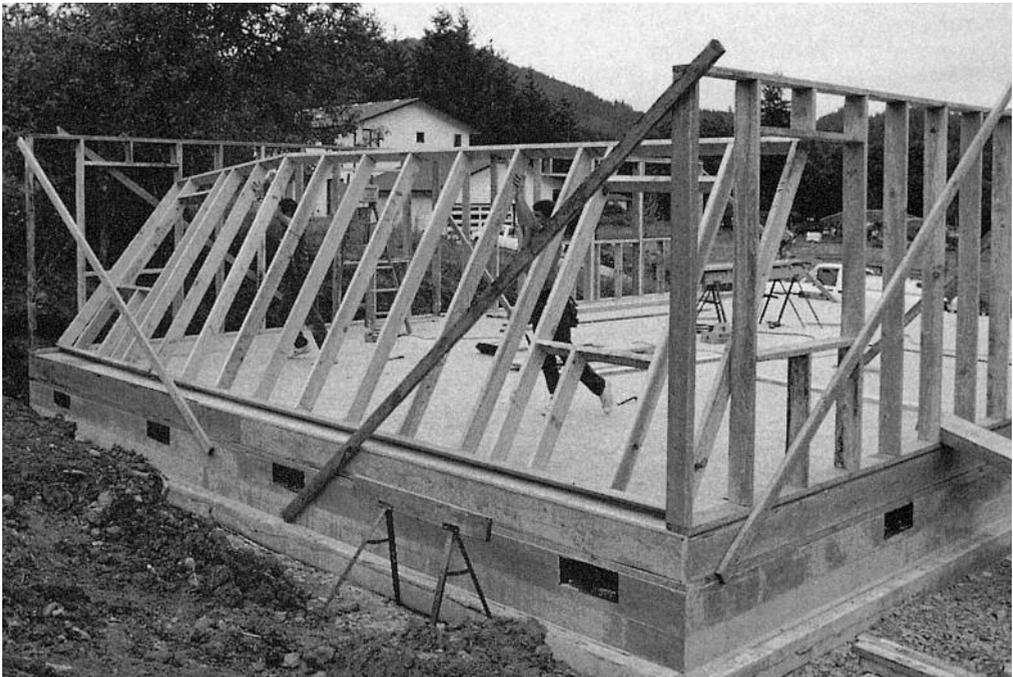
El **orden jónico** [2.9], más esbelto que el anterior, tiene una basa de la que arranca la columna, cuya altura (basa y capitel incluidos) equivale por lo común a unas nueve veces su diámetro inferior. El fuste presenta 24 *estrías*, más profundas que las del dórico y separadas por filetes. El capitel, el elemento más distintivo del orden, lo forman un par de *volutas*, unidas en los frentes por un equino moldurado, con ovas y dardos esculpidos. El entablamento tiene una altura que, aproximadamente, equivale a un quinto de la altura de la columna. Consta de *arquitrabe*, comúnmente formado por una triple *imposta* lisa, un *friso*, a veces sin adorno alguno pero frecuentemente esculpido con una serie continua de figuras, y la *cornisa*.



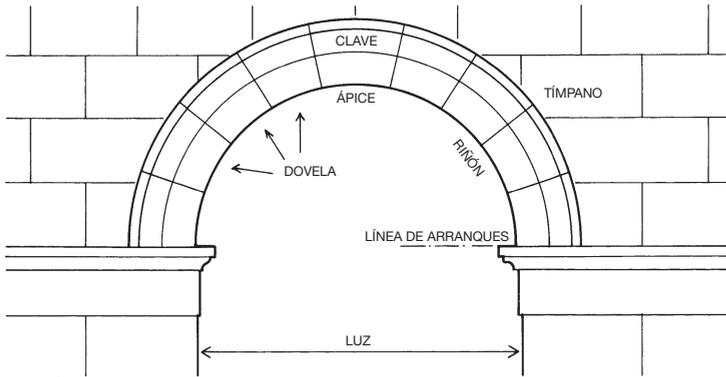
2.10. Columna adosada y pilastra.



2.11. Estructura de esqueleto de acero.



2.12. Estructura de entramado sin rigidez (balloon frame).



2.13. Diagrama de un sistema de arco.

El **orden corintio** [2.9] es ligeramente más esbelto que el anterior y su columna tiene una altura equivalente a 10 veces el diámetro del extremo inferior del fuste. Arranca de una basa similar a la jónica y también presenta 24 estrías en su superficie. El capitel corintio es el más alto de los tres y consta de dos o tres bandas concéntricas de hojas de *acanto* salientes. El entablamento es similar al del orden jónico.<sup>2</sup>

Los órdenes griegos fueron adoptados posteriormente por los romanos, quienes los utilizaron ampliamente como elementos decorativos; los principales cambios introducidos por los romanos consistieron en estilizar el orden dórico, transformándolo en el orden dórico toscano, añadiéndole una basa y eliminando las estrías del fuste [2.9]. La otra variación importante fue la creación del **orden compuesto**, formado añadiendo las volutas jónicas encima de las hojas de acanto corintias. Los romanos también introdujeron una adaptación decorativa de las columnas, combinando la columna con el muro, de manera que la media columna parece salir de la pared; es lo que se llama **columna adosada** o **columna embebida** [2.10]. Además, desarrollaron el concepto de **pilastra**, que es una columna rectangular que sobresale ligeramente de la pared, siguiendo las proporciones y líneas del orden correspondiente. Ambos artificios permiten prolongar el ritmo de una columnata a lo largo de un paño de muro que, de otra forma, sería liso.

### Entramados

Si el sistema estructural plano de columna y dintel lo extendemos en las tres dimensiones,

el resultado es un esqueleto o entramado. Este entramado puede adoptar muchas formas, que van desde el esqueleto a base de columnas y vigas de piedra del templo del Valle [2.7], hasta las estructuras de entramado sin rigidez, conocidas también como *balloon frames*, a base de piezas de madera clavadas [2.12]—y que tan populares se hicieron en la construcción de viviendas en norteamérica a partir de mediados del siglo XIX—, o las modernas estructuras a base de elementos de acero roblonados [2.11].

### Arcos

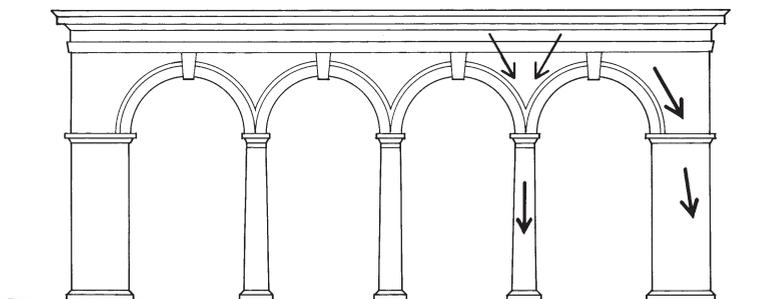
Si volvemos, una vez más, al muro básico de albañilería, podemos encontrar ahí una alternativa para salvar la luz de una abertura: el *arco* [2.13]. Al igual que el dintel, el arco puede ser de piedra, pero presenta sobre aquél dos grandes ventajas. La primera, que el arco de albañilería está construido con muchas partes pequeñas en forma de cuña, las llamadas **dovelas**, por lo cual se elimina la necesidad, a veces crítica, de encontrar una piedra lo suficientemente grande y exenta de grietas para que haga de dintel y se soluciona, de paso, el problema logístico que supone el manejo de grandes bloques de piedra. La segunda es que, por cuestiones de física estática, el arco puede cubrir distancias mucho mayores que un dintel de piedra. Las fuerzas gravitatorias engendradas por el muro que descansa sobre el arco se distribuyen a lo largo de éste transformadas en fuerzas diagonales que son, aproximadamente, perpendiculares a la cara inferior de cada una de las dovelas. Así pues, cada una de las dovelas está sometida a fuerzas de compresión. Uno de los inconvenientes al construir un arco es

que, durante la construcción, las dovelas deben ser sostenidas sobre una **cimbra** de madera, hasta que la dovela más alta, la  **piedra clave**  o, simplemente,  **clave** , cierre el arco. En ese mismo momento, el arco se convierte en autoportante y puede retirarse la cimbra para construir el siguiente.

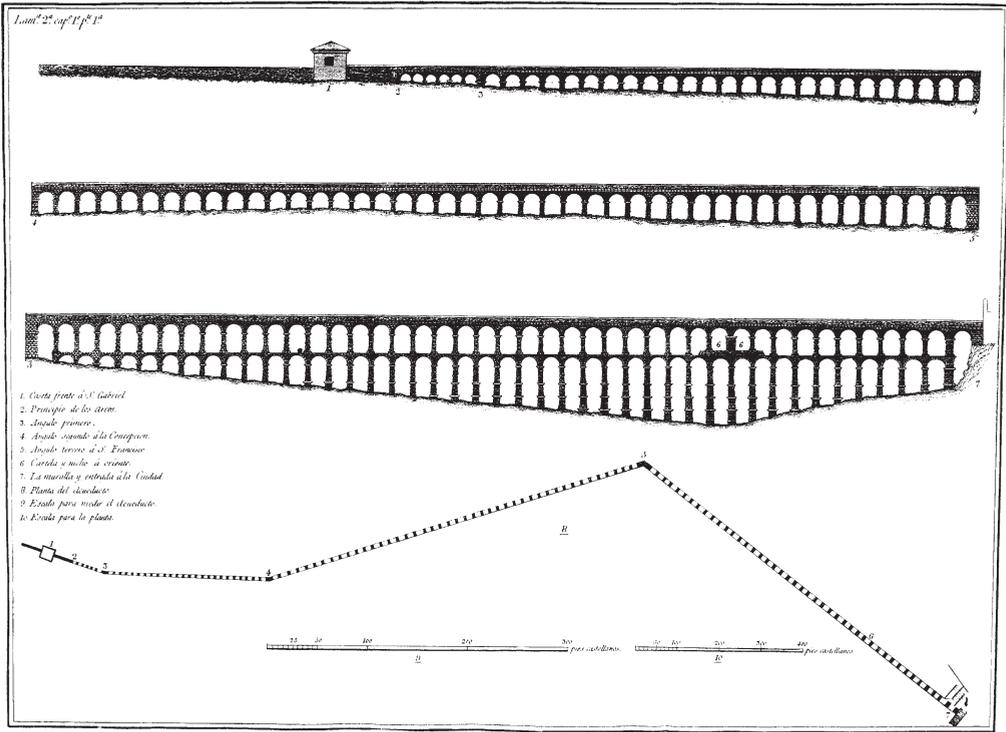
Tradicionalmente, las cimbras eran semicirculares, ya que esta forma es la que se replantea de forma más sencilla en obra, precisándose solamente de clavos y una cuerda. Por desgracia, la forma semicircular no es estructuralmente perfecta, ya que las fuerzas en la base del arco no son totalmente verticales. En casi todas las formas estructurales tradicionales se generan *empujes laterales* (hacia el exterior), además de *fuerzas verticales* (las producidas por la gravedad y que son perpendiculares al suelo). Esto se cumple muy particularmente en el arco semicircular o de medio punto, y el problema aumenta en proporción directa al incremento de las cargas verticales que soporta el arco. Esas fuerzas o empujes laterales producirían irremisiblemente la separación de los apoyos del arco, a menos que sean adecuadamente contenidas, como ocurre en un puente sostenido por un arco, en el cual los apoyos del arco empujan hacia los lechos rocosos en que están apoyados. Si el arco no tiene que sostener la carga de un muro que gravite sobre él, se plantea otro problema, el del peso propio del arco. Si el arco estuviera sometido a una carga concentrada aplicada en su ápice, o clave, se podría producir la ruptura o separación de las partes superiores del arco según un ángulo de unos  $40^\circ$  con la horizontal, aunque este problema se reduce rápidamente en cuanto se aplica una carga adicional (como la de una pared apoyada sobre

el arco) repartida uniformemente sobre él.

Cuando se trata de una serie de arcos situados uno a continuación de otro, las fuerzas laterales de cada uno de ellos se contrarrestan con las de los arcos adyacentes [2.14]. Gracias a ello, los arcos intermedios pueden sustentarse sobre estribos más delgados o simples columnas, ya que se han eliminado las fuerzas laterales (excepto, como es lógico, en los extremos de la arcada). Los romanos sacaron un excelente partido de este hecho en sus *arcadas*, como en el acueducto construido por los romanos en Segovia, en la provincia de la Hispania Ulterior [2.15], que data probablemente de la época de Augusto. Con sus 813 m de longitud y sus 28,5 m de altura en el punto más elevado, el acueducto consta de 128 arcos superpuestos, apoyados en unos pilares sorprendentemente esbeltos. Pese a la gracilidad de su apariencia, los pilares están compuestos de grandes bloques de granito *opus quadratum* que se dejaron sin desbastar, a fin de darles aspecto de mayor robustez. No menos impresionante es el puente erigido por los romanos sobre el río Tajo, no lejos de la frontera con Portugal, llamado puente de Alcántara por su cercanía a esa ciudad. El puente fue construido en el año 106 d. de C. en honor al emperador Trajano, y destaca, además de por la elegancia y esbeltez de sus proporciones, por el arco honorífico en el que figura inscrito el nombre de su arquitecto, Cayo Julio Lácer. En una arcada levantada sobre estribos o columnas quedan sin contrarrestar los empujes laterales en los extremos, aunque éstos, generalmente, se transfieren al terreno a través de muros o contrafuertes situados en cada extremo de la arcada.



2.14. Diagrama de una arcada.

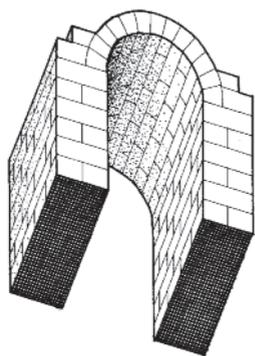


2.15. Acueducto de Segovia, Segovia (España), siglo I. Grabado de Somonostro (1842) con la planta general y diversos alzados, y vista en escorzo del tramo central del acueducto.

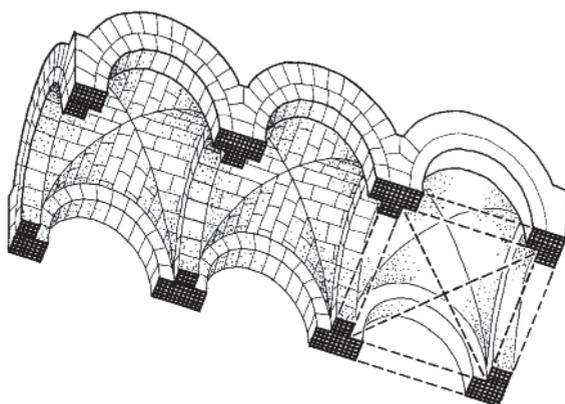
### Bóvedas

Una *estructura arqueada*, es decir, la construida sobre arcos, actúa estructuralmente en un solo plano. Si desplazamos horizontalmente el arco a través del espacio, la forma obtenida es una bóveda. En el caso particular del arco de medio punto, la bóveda resultante se llama **bóveda de cañón** [2.16]. Generalmente, tales bóvedas se apoyan sobre muros, pero, debido al excesivo

peso de las mismas, los muros tienden a separarse por su parte superior. Las fuerzas laterales que producen esta separación pueden ser contrarrestadas mediante robustos contrafuertes colocados a lo largo de los muros o aumentando el espesor de éstos. Un ejemplo de bóveda de cañón de gran altura es la nave central de la iglesia de Saint-Sernin de Toulouse (Francia), cuya construcción empezó el año 1080 [14.22]. Pero, como también podemos observar en la iglesia de



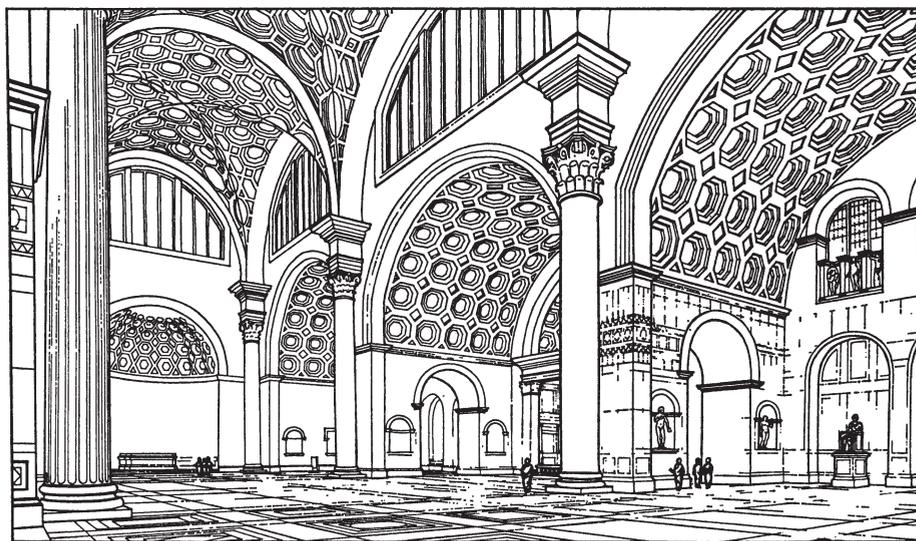
2.16. Bóveda de cañón.



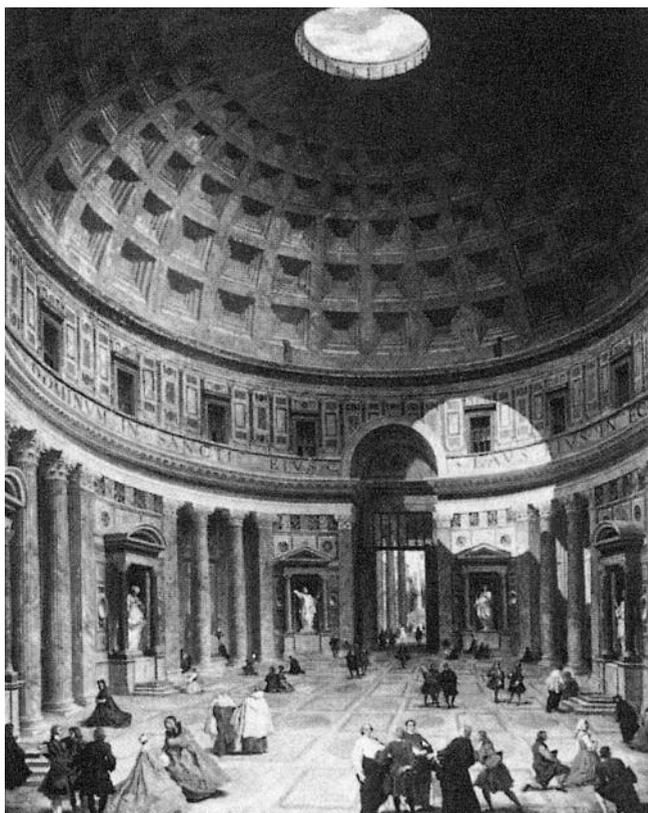
2.17. Diagrama de una bóveda por arista.

Saint-Sernin, el empleo de bóvedas de cañón redunda en la oscuridad de los interiores. Una solución, ya ideada anteriormente por los romanos, es la **bóveda por arista**; consiste en disponer bóvedas de cañón adicionales que cortan en ángulo recto a la principal, de manera que se puede iluminar la nave a través de amplios **lunetos** semicirculares en cada extremo y a lo largo de ambos lados [2.17]. Con esta disposición, las fuerzas son canalizadas hacia abajo, a través de los aristones de intersección de las bóvedas, y se concentran al pie de las mismas. Los romanos ya habían empleado bóvedas de ca-

ñón de tres crujeías en muchos de sus grandes edificios públicos, como termas y basílicas. Un ejemplo excelente es el de la inmensa basílica de Majencio, en Roma, construida entre el 307 y el 312 d. de C. [2.18, 12.10]. Fue la última basílica romana y la primera construida con *concreto* –argamasa que constituyó la forma de hormigón desarrollada por los romanos–; constaba de tres elevadas crujeías con bóveda por arista que medían 26,8 m por 25,3 m (*88 por 83 pies*) cada una, con una longitud total de 80,8 m (*265 pies*). Los empujes laterales de las bóvedas por arista, elevadas a unos 24 m de altura (*80 pies*) sobre



2.18. Basílica de Majencio, Roma, 307-312 d. de C. Este edificio jurídico, actualmente destruido en su mayor parte, es una demostración de la capacidad técnica de los romanos para cubrir amplios espacios públicos con bóvedas de hormigón de grandes luces.



2.19. Giovanni Paolo Panini, Interior del Panteón, ca. 1750. Colección de Samuel H. Kress, National Gallery of Art, Washington DC. Esta pintura transmite mejor que cualquier fotografía moderna el efecto del espacio interior del Panteón.

el suelo, son absorbidos en cada lado por tres pares de cámaras laterales con bóvedas de cañón, de 23,2 por 17,1 m (76 por 56 pies). Actualmente sólo subsisten tres de esas cámaras laterales.

El giro de un arco alrededor de un eje vertical que pase por su centro genera una cúpula; así, un arco de medio punto engendra una cúpula semiesférica o de media naranja. La solución constructiva de la cúpula también fue muy empleada por los romanos. La de mayor tamaño, la más diáfana e impresionante de todas, fue la inmensa cúpula del panteón de Adriano en Roma (120-127 d. de C.) [2.19, 12.12]. En este caso la luz libre es de 43,4 m (142 pies y 6 pulgadas). La cúpula es una imponente cáscara semiesférica de concreto, con un espesor mínimo de 1,2 m (4 pies) en el punto más alto, donde se abre un gran óculo o lucerna central de 9,1 m (30 pies) de diámetro. El espesor de la envoltura es mayor en los puntos en que tiene tendencia a romper, alcanzando los 6,4 m (21 pies) de grosor en la base. El muro del tambor que

sostiene las 5.000 toneladas que pesa la cúpula, también de 6,4 m de espesor, está ahuecado por una serie de nichos de 4,3 m (14 pies) de fondo, de tal manera que, de hecho, funcionan estructuralmente como 16 contrafuertes radiales conectados en sus partes superiores por medio de bóvedas de cañón radiales. Además, la cúpula y el tambor están entrelazados por medio de arcos de descarga y robustas bóvedas de cañón insertos en la masa del mortero de argamasa para ayudar a dirigir las fuerzas.<sup>3</sup>

Otro factor importante fue la selección graduada de los *caementa* de los concretos, según su peso y resistencia a compresión. El concreto es una pasta viscosa hecha mezclando agua, un árido de piedra machacada (en latín, *caementa*) y un material aglomerante derivado de la caliza. En el hormigón del Panteón se emplearon distintos tipos de árido según la zona del edificio; el más denso y pesado, de basalto, en el anillo de cimentación, donde se concentraban las mayores cargas, mientras que en la parte de la

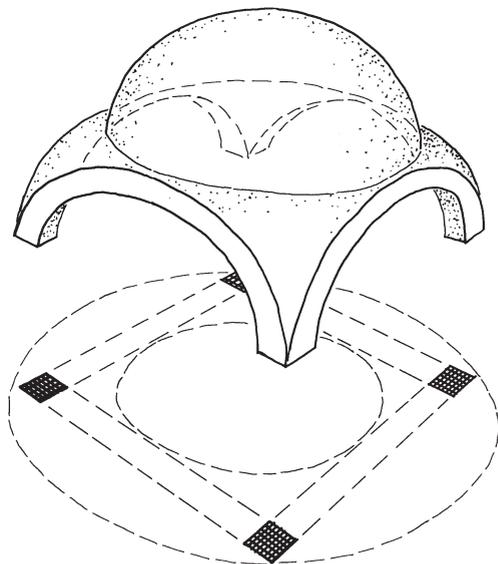
cúpula más cercana al óculo se empleó un árido muy ligero de piedra pómez, para reducir el peso propio de la cúpula.

En este punto, conviene hacer una pausa para aclarar la diferencia entre el concreto, u hormigón que empleaban los romanos, y el que usamos en la actualidad. En ambos casos, la composición básica es similar, pero el agente aglomerante del concreto de los romanos era la puzolana, una ceniza volcánica que experimenta una reacción química al molerla y mezclarla con agua, formando una piedra artificial. En el hormigón moderno, desarrollado en Inglaterra en 1924 por Joseph Aspdin, el agente aglomerante está hecho de creta y arcilla, cuidadosamente calcinadas y trituradas hasta reducir las al estado pulverulento. Al mezclar este polvo con agua, arena y grava, la piedra artificial resultante se parece mucho a la piedra caliza natural que se encuentra en la región de Portland (Inglaterra), tal como observó el propio Aspdin. Esta es la razón por la cual este cemento artificial sigue llamándose cemento portland. Tanto para los romanos como para nosotros, el cemento resultaba demasiado costoso como para hacer edificios enteros sólo con cemento. Incluso el mortero que se emplea en las juntas de los ladrillos y los bloques de piedra se alarga añadiéndole arena, mientras que el **árido** que se emplea en la fabricación del hormigón es una mezcla graduada de arena y grava. En el concreto romano, los ladrillos y losetas que aliviaban los arcos también servían como una especie de árido de gran tamaño. Como la piedra, el hormigón es sumamente resistente a la compresión, pero relativamente débil a las fuerzas de tracción. Los romanos se apercibieron de esta debilidad y, en algunos casos, añadieron barras de hierro al concreto, aunque, en general, preferían utilizar arcos de descarga de ladrillo y losetas. Desde mediados del siglo XIX se viene insertando barras de hierro o acero en los encofrados, antes de verter el hormigón, en aquellos lugares en que previsiblemente se van a desarrollar los esfuerzos de tracción. Este hormigón reforzado es lo que conocemos como hormigón armado.

El encofrado es una de las desventajas económicas del hormigón. El hormigón recién amasado es un material denso y viscoso, y debe ser contenido en encofrados, o

moldes, hasta que haya curado y secado; el encofrado es el equivalente a la cimbra que se utiliza en la construcción de arcos. Tanto en tiempos de los romanos como actualmente, esto conlleva la construcción de importantes y costosas estructuras de madera, en especial en edificios de gran tamaño, que luego hay que retirar, una vez el hormigón haya adquirido la suficiente resistencia.

Las cúpulas, particularmente las de grandes dimensiones, como la del Panteón de Roma, son espacios poderosamente evocadores, pero su planta circular dificulta la adición de espacios adyacentes. A este problema, que se agudizó hacia el siglo IV d. de C., los arquitectos bizantinos le encontraron una ingeniosa solución consistente en disponer la cúpula sobre una planta cuadrada. El elemento que hizo posible esta transición fue el triángulo curvilíneo llamado **pechina** [2.20]. Imaginemos un cuadrado sobre el cual queremos disponer una cúpula. Primero cubramos el cuadrado con una semiesfera que toque sus cuatro esquinas. Después, cortemos la semiesfera mediante cuatro planos verticales que pasen por los lados del cuadrado, de manera que, al mirar hacia abajo, se siga viendo un cuadrado. Seguidamente, cortemos el casquete superior de la semiesfera mediante un plano horizontal que pase



2.20. Diagrama de una bóveda sobre pechinas.

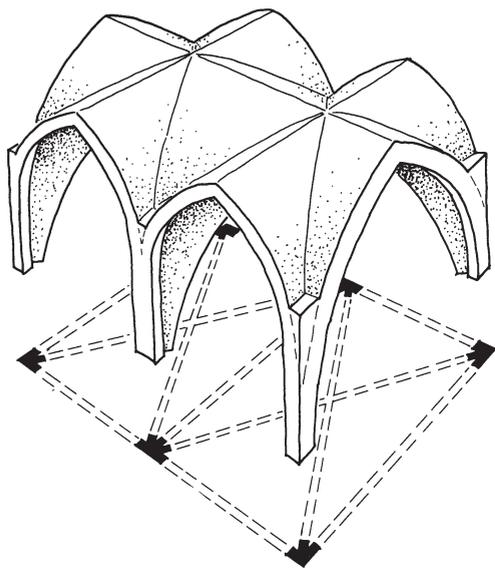


2.21. Santa Sofía (iglesia de la Divina Sabiduría), Estambul (Constantinopla), Turquía, 532-537. Vista interior.

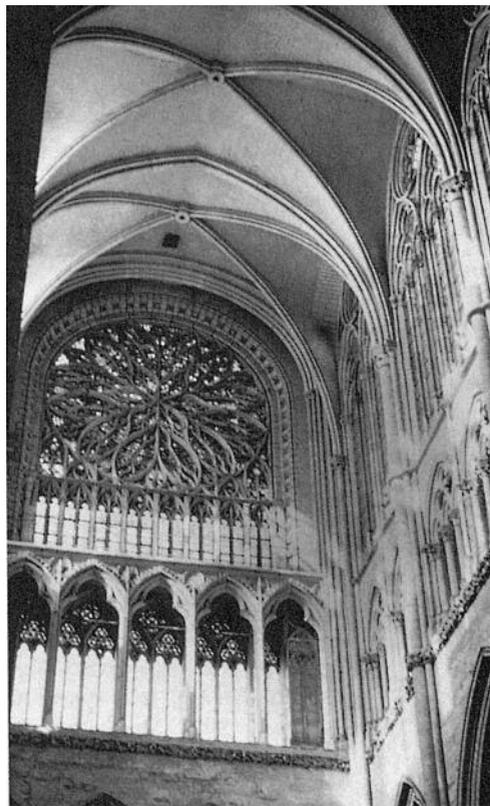
justo por el vértice de los semicírculos verticales que contienen los cuatro lados del cuadrado. La figura resultante tiene una forma circular en su parte superior, mientras que su parte inferior es un cuadrado. Los cuatro triángulos curvilíneos que quedan de la semiesfera son las pechinas, que nos permiten hacer la transición de la planta cuadrada inferior a la planta circular de arriba. La iglesia de Santa Sofía de Constantinopla (hoy Estambul, en Turquía), proyectada por Isidoro de Mileto y Antemio de Tralles, fue construida entre el 532 y el 537 [2.21, 13.15, 13.16]. Como en el Panteón de Roma, el espacio encerrado es impresionante; aquí, la cúpula tiene un diámetro de 32,6 m (107 pies) pero, con los dos casquetes de cuarto de esfera de descarga y las bóvedas de cañón, la distancia libre total de un extremo a otro de la iglesia es de 76,2 m (250 pies). La base de la cúpula de Santa Sofía está elevada 40,2 m (132 pies) sobre el plano del suelo.

La construcción del edificio pasó por un sinnúmero de vicisitudes. Debido al considerable peso y a que la mampostería de los

arcos de descarga estaba todavía húmeda, el edificio comenzó a deformarse mientras se construía, de manera que, cuando se llegó a la base de la cúpula, el espacio a cubrir se había ensanchado más de lo previsto, pese a lo cual la cúpula quedó terminada, aunque no duró más de veinte años. Tras los dos terremotos de los años 553 y 557, la cúpula se vino abajo; aunque fue reconstruida, volvió a desplomarse tras el terremoto del año 989. Para evitar que se acentuaran las inclinaciones hacia afuera de los elementos sustentantes, fueron reforzadas las pechinas de los lados noreste y sureste con enormes contrafuertes, ya que a lo largo de su eje longitudinal la cúpula ya estaba suficientemente reforzada por los dos medios casquetes; éstos, a su vez, fueron apuntalados por semicúpulas más pequeñas y bóvedas de cañón achaparradas, apoyadas en columnas y pilastras. Como resultado, las fuerzas ejercidas hacia afuera y hacia abajo por la cúpula a lo largo del eje principal fueron conducidas por toda esa cascada de semicúpulas y bóvedas hacia la parte baja de la iglesia. Pese a todo, a lo largo del eje más corto, los machones originales se



2.22. Diagrama de una bóveda nervada.



2.23. Robert de Luzarches, Notre-Dame de Amiens, Amiens (Francia), 1221-1269. Las bóvedas de Notre-Dame de Amiens son cuadripartidas, con cuatro nervios curvos en cada una de las crujeas del coro y de la nave.

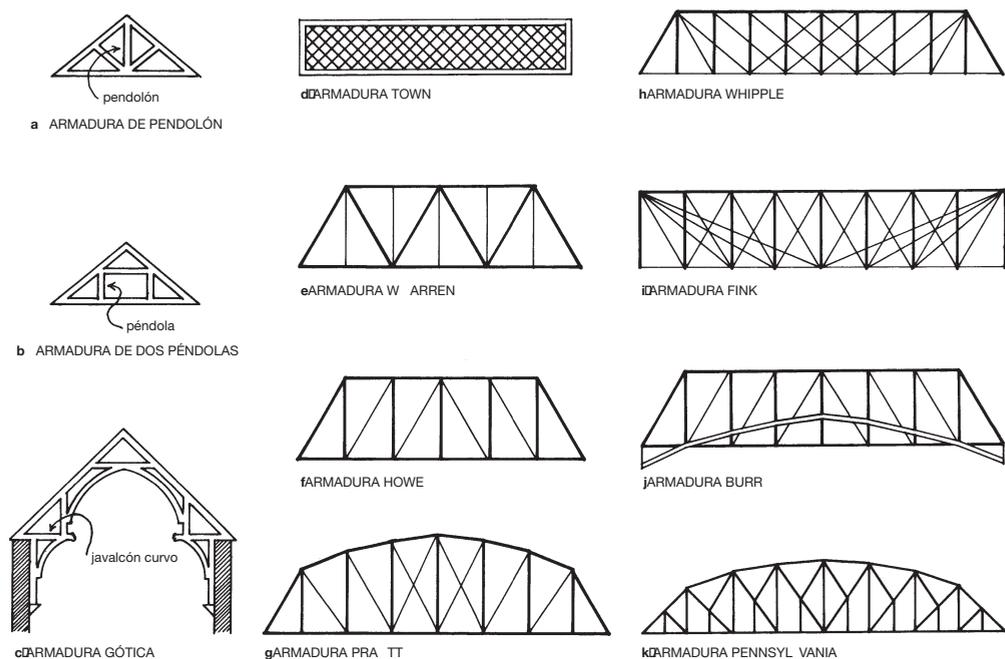
mostraron insuficientes para resistir los esfuerzos, acentuados por los terremotos, por lo cual hubo que añadir los contrafuertes de las torres exteriores que podemos ver en la actualidad.

La idea de colocar la cúpula romana sobre pechinas permitió cubrir una sala cuadrada o rectangular con una cúpula y añadir espacios anexos a sus lados, en ocasiones cubiertos con cúpulas más pequeñas. Tal es el caso de la iglesia de San Marcos de Venecia, cuya planta en forma de cruz exenta está cubierta con cinco cúpulas [13.24-13.26].

Pese a la innegable utilidad de la bóveda por arista romana, su inconveniente principal fue que sólo funcionaba bien en crujeas de planta cuadrada; en crujeas rectangulares o trapezoidales, las líneas de los aristones (líneas de intersección de las bóvedas) se curvaban y la bóveda perdía rigidez estructural; además, tales bóvedas eran de difícil realización por las dificultades inherentes a la talla de la piedra. La solución a este problema se logró por primera vez hacia el año 1110, en Durham (Inglaterra) y en Saint-Denis (Francia). Consistía en construir unos nervios diagonales autoestables a lo largo de las líneas de intersección de las bóvedas, así como también a lo largo de los bordes externos de las mismas [2.22]. Posteriormente, se rellenaban los recuadros de las bóvedas. Había nacido la *bóveda nervada* o *bóveda de crucería*. Una de las ventajas de la bóveda nervada fue la gran reducción de cimbras que suponía. Una vez construidos los nervios y recuadros de una crujea, las cimbras podían aprovecharse para la siguiente. Además, los albañiles medievales usaban arcos apuntados, contruidos con dos segmentos de circunferencia; mediante el simple cambio de los centros de las dos cimbras que formaban el arco, los albañiles podían construir los arcos de todos los lados de un trapezoide o de cualquier cuadrado o rectángulo irregular de la misma altura. Así se construyeron las bóvedas de crucería de la mayoría de las catedrales góticas, como la de Notre-Dame de Amiens, en Francia, empezada en 1221 [2.23].

### Armaduras de cubierta

Los romanos también emplearon otro tipo estructural que, mucho más tarde, en los si-

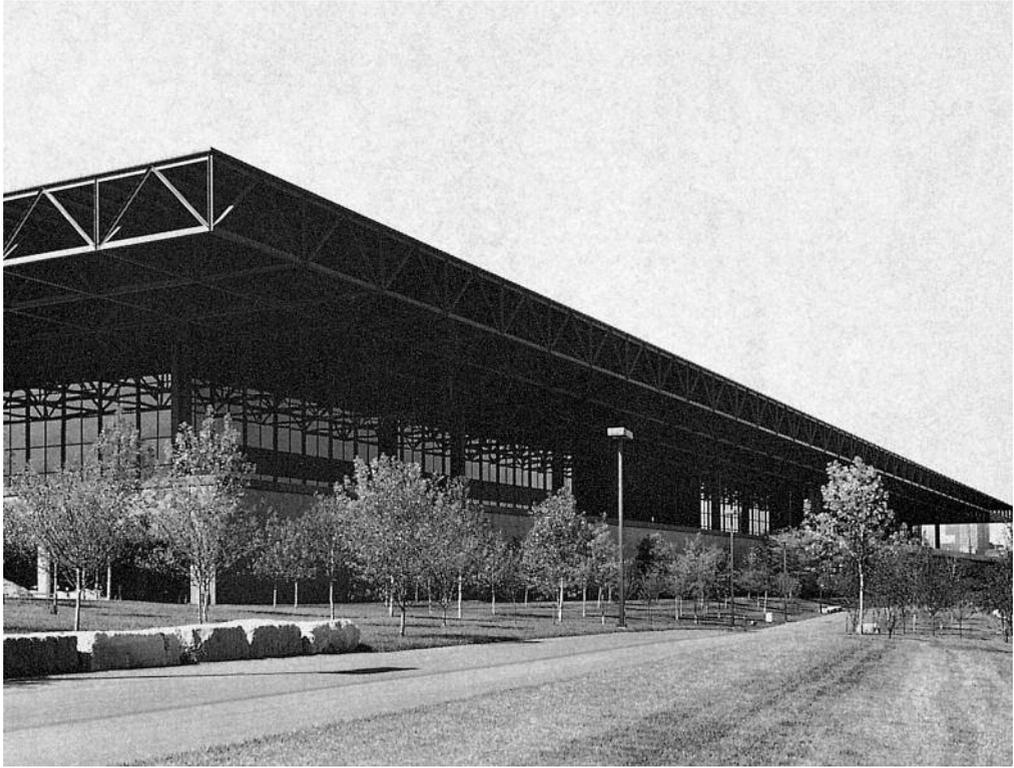


2.24. Comparación de tipos de cercha. Entre ellos hay cerchas medievales (armadura de dos péndolas, armadura de pendolón y armadura gótica) y modelos de cercha patentados del siglo XIX (armaduras Howe, Pratt, Whipple, Warren y Fink).

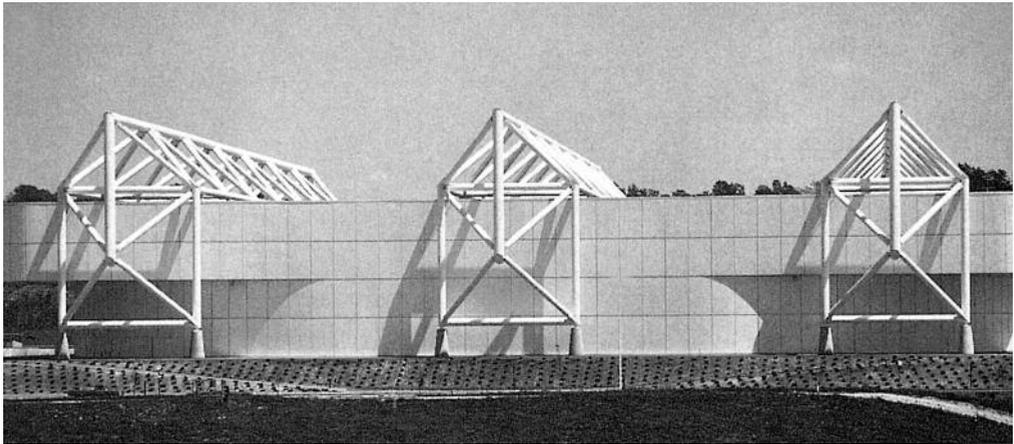
glos XIX y XX, resultó básico para cubrir grandes edificios: la *armadura de cubierta* o *cercha*. La armadura de cubierta tradicional estaba hecha de piezas de madera dispuestas formando celdas triangulares [2.24]. El triángulo, por su geometría indeformable, no puede cambiar de forma, a menos que se distorsione o flexione alguno de sus lados. De ahí que, disponiendo un triángulo junto a otro, sea posible construir figuras alargadas bastante resistentes pese a su relativa ligereza. Las cerchas de madera fueron usadas profusamente por los romanos en la construcción de cubiertas de gran variedad de formas y siguieron utilizándose durante la edad media, especialmente en la construcción de grandes graneros para el pago de los diezmos. Un soberbio ejemplo medieval de cercha de madera es la cubierta gótica de la gigantesca nave de Westminster (*Westminster Hall*), en Londres, construida entre 1394-1399 por el arquitecto Henry Yevele y el carpintero Hugh Herland, con una luz de 20,7 m (68 pies), la mayor construida en ma-

dera de toda la época medieval [15.16]. Las grandes catedrales góticas, como la de Amiens, se cubrieron con cerchas de madera instaladas sobre las bóvedas de crucería.

Durante el siglo XIX se inventaron muchas formas nuevas de cercha que, a menudo, fueron bautizadas con el nombre del ingeniero que las empleó por primera vez (en la figura 2.24 se muestran algunos ejemplos). La cercha, en especial la de acero, permite salvar luces importantes, de ahí que fuera muy empleada para cubrir grandes espacios cerrados. Valga como ejemplo la que se utilizó en la Galerie des Machines, el mayor de los edificios de la Exposición Internacional de París de 1889 [19.22], que se cubrió con una serie de cerchas curvas que salvaban una luz de 114,9 m (377 pies). En este caso, como ocurre con cualquier arco, se generaban importantes empujes laterales en la base, pero no fue necesaria la construcción de grandes contrafuertes ya que los extremos de las cerchas curvas fueron arriostrados entre sí por debajo del suelo mediante tirantes de acero.



2.25. C. F. Murphy and Associates, McCormick Place, Chicago, 1970-1971. Esta malla espacial, diseñada por Gene Summers, tiene luces de 45,7 metros (150 pies) en ambas direcciones y cubre una superficie total de 7,63 hectáreas (19 acres).



2.26. C. F. Murphy and Associates, pabellón conmemorativo R. Kemper Crosby, Kansas City (Misuri), 1975. Esta malla espacial, diseñada por Helmut Jahn, está suspendida de tres impresionantes cerchas tridimensionales, cada una de ellas de 8,25 metros de altura y 98,75 metros de luz (27 por 324 pies).

2.27. R. Buckminster Fuller, pabellón de Estados Unidos, Exposición Universal de Montreal de 1967, Montreal (Quebec, Canadá), destruido por un incendio en 1976. Una gigantesca esfera estaba contenida en el interior de una malla estructural curva de acero ligero.



### Mallas espaciales y cúpulas geodésicas

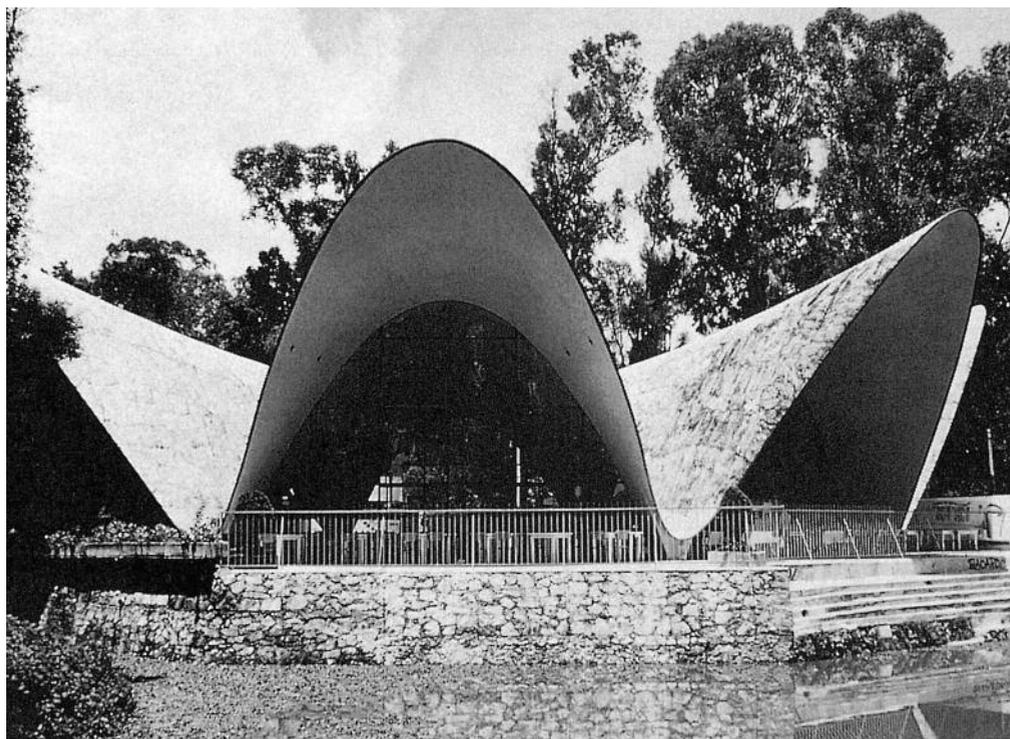
Análogamente a lo que se ha visto en las estructuras de columna y dintel o de arco, también la cercha puede ampliarse a las tres dimensiones, formando un nuevo tipo de estructura. La cercha extendida a las tres dimensiones se convierte en una *malla espacial*, una estructura relativamente nueva que empezó a usarse para grandes luces hacia 1945. Como la cercha plana, puede cubrir grandes luces. Si se proyecta adecuadamente, puede apoyarse virtualmente en cualquiera de los puntos de unión (nudos) de sus barras, como en el McCormick Place, en Chicago (1970-1971), de C. F. Murphy and Associates [2.25]. Una fascinante variación de este sistema estructural es el pabellón conmemorativo R. Kemper Crosby, en Kansas City (Misuri), construido también por C. F. Murphy en 1975 [2.26]. Aquí, la cubierta está colgada de la parte inferior de unas impresionantes cerchas tridimensionales vistas, de tubo de acero y 104,2 m (342 *pies*) de luz.

Del mismo modo que el arco, por rotación, engendra la cúpula, la cercha puede curvarse en tres dimensiones para formar lo que R. Buckminster Fuller bautizó con el nombre de *cúpula geodésica*. Al igual que la

cercha, se construye con barras de acero pequeñas y ligeras, de fácil manejo. Fuller empezó a proyectar y construir estas cúpulas a partir de 1945 y, en 1967, le fue encargado el pabellón de Estados Unidos para la Exposición Universal de Montreal (Canadá), que fue cubierto con una cúpula geodésica [2.27].

### Láminas

Otro tipo estructural es el de las láminas, que son placas delgadas curvas, generalmente de hormigón, conformadas para transmitir las fuerzas aplicadas mediante esfuerzos de compresión, tracción o cortantes que actúan tangencialmente a la superficie media. El arquitecto norteamericano Eero Saarinen se interesó muy especialmente por las formas laminares; en la sala de conferencias Kresge del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en Cambridge (1954), utilizó una forma esférica cortada para cubrir una planta triangular. Posteriormente, proyectó las aladas formas laminares de hormigón armado en voladizo para la cubierta de la terminal de la compañía TWA en el aeropuerto de Idlewild (hoy, aeropuerto Kennedy), en



2.28. Félix Candela, restaurante, Xochimilco (México), 1958. La lámina, de un espesor total de algo más de 10 centímetros (4 pulgadas), se construyó vertiendo el hormigón sobre un mallazo de alambre de acero.

Nueva York (1956-1962) [21.14]. La superficie total cubierta mide 64,6 por 88,7 m (212 por 291 pies), con unos enormes voladizos de 24,9 m (82 pies) en sus extremos. Como es lógico, los bordes de esas láminas están sometidos a esfuerzos internos y deformaciones considerables que son absorbidos mediante unas grandes vigas de borde rigidizadoras. Como puede imaginarse, los machones que sostienen las láminas voladas están fuertemente armados para soportar los enormes esfuerzos de tracción producidos por los voladizos de 24,9 m.

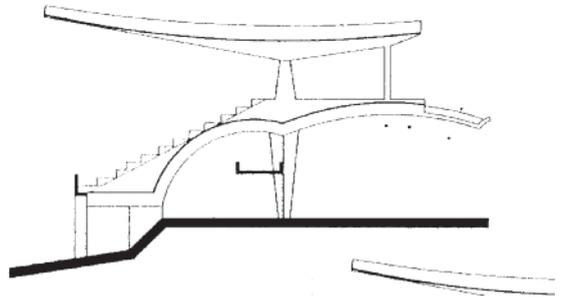
También se pueden construir láminas mucho más delgadas, como demostró el arquitecto mexicano de origen español Félix Candela en numerosos edificios, durante las décadas de 1950 y 1960. Un buen ejemplo de ello es su restaurante en Xochimilco, México (1958) [2.28]. En este edificio, la lámina de hormigón, aplicado manualmente sobre un mallazo de acero, tiene un espesor de tan sólo 10,2 cm (4 pulgadas); pero lo que realmente confiere resistencia a la estructura no es la

masa del material, sino las curvas de la cáscara. En un sentido estrictamente matemático, la rigidez de la estructura está en función de la doble curvatura de la lámina; esto es, que las dos secciones principales de la lámina son curvas.

También existen láminas de simple curvatura, es decir las que tienen una de sus secciones principales recta y la otra curva, y láminas plegadas, o sea, las formadas por planos. Un buen ejemplo de ello es la tribuna del hipódromo de la Zarzuela (1935) [2.29], construida por el ingeniero y arquitecto Eduardo Torroja (en colaboración con los arquitectos Arniches y Domínguez) en las afueras de Madrid. La tribuna está formada por una serie de delgadas bóvedas de membrana de hormigón armado que se proyectan audazmente sobre las gradas. La propia curvatura de las viseras (unida a las armaduras del hormigón) confiere a las bóvedas la resistencia necesaria para volar espectacularmente sobre las filas de asientos de los espectadores. Un caso especialmente in-



2.29. Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, 1935-1936. C. Arniches Moltó y M. Domínguez Esteban, arquitectos, y E. Torroja Miret, ingeniero. Vistas de las cubiertas del graderío y sección transversal.



2.30. Harrison & Abramovitz en colaboración con los ingenieros Ammann & Whitney, salón de actos de la Universidad de Illinois, Champaign, 1961-1962. Esta cúpula en forma de lámina plegada tiene unas ondulaciones que irradian desde el centro.

interesante de utilización de la lámina plegada es el salón de actos de la Universidad de Illinois (1961-1962), en Urbana, de Harrison & Abramovitz, en colaboración con los ingenieros Ammann & Whitney [2.30]. Esta cúpula está formada por una placa plegada de 120 m (394 pies) de diámetro, apoyada en una serie de soportes radiales que arrancan de un anillo situado en la base del edificio. Los enormes esfuerzos laterales ejercidos sobre el borde exterior de la cúpula son absorbidos por un zuncho perimetral formado por casi un kilómetro (0,622 millas) de alambre de acero, solicitado a tracción.

### Estructuras suspendidas

Las sociedades primitivas han venido utilizando lianas y cuerdas para construir puentes colgantes desde tiempo inmemorial. A partir de los albores del siglo XIX, los puentes colgantes empezaron a construirse con cadenas de hierro y, más adelante, con cables de acero. El ejemplo más clásico de puente colgante moderno es el del puente de Brooklyn, empezado por John Augustus Roebling en 1867 y terminado por su hijo, George Washington Roebling (construcción supervisada por la esposa de George, Emily), en 1883 [2.31]. En este puente se utilizaron por primera vez los cables de alambre de acero y, desde su construcción, ha venido utilizándose como modelo de puente colgante.

Mucho más reciente, a partir de 1955, es la aplicación extensiva del principio de los cables tensados en edificios distintos a los puentes. Una estructura tesa es especialmente eficiente, ya que todo el cable está en un estado de tensión pura, mientras que en la mayoría de las demás formas estructurales aparecen esfuerzos mixtos (incluso en las vigas simplemente apoyadas, en las que aparecen esfuerzos de compresión en la parte superior y de tracción en la inferior). Un cable suspendido por sus extremos adopta una forma curva muy parecida a la parábola, definida matemáticamente como la curva catenaria, y puede ser considerado como una forma estructural ideal, por estar sometida únicamente a tensión. De hecho, si fuera posible *congelar* esa forma e invertirla, el resultado sería una curva catenaria o un arco

parabólico sometido exclusivamente a esfuerzos de compresión. Tales arcos, y las formas abovedadas de él derivadas, fueron muy utilizados por el arquitecto español Antoni Gaudí en la Barcelona de finales del siglo XIX y principios del XX [19.39].

Eero Saarinen, muy interesado por las formas laminares de gran poder expresivo, también utilizó las estructuras suspendidas en varios edificios. En su pista de hockey sobre hielo Ingalls, para la Yale University en New Haven (Connecticut, 1955-1956), el techo de madera está sostenido por un delgado arco parabólico de hormigón armado, del que parten cables de acero anclados en los muros laterales. Saarinen insistió en esta idea, ampliándola, en su terminal internacional Dulles para el aeropuerto de Washington (1958-1962) [2.32]. En este caso proyectó dos hileras de pilares de hormigón inclinados hacia afuera, que se curvaban por arriba para recoger las vigas que recorrían toda la longitud de la terminal. Entre esas dos filas de vigas paralelas se suspendieron los cables. La cubierta, a base de losas de hormigón, se colgó sobre los cables. Si bien esta estructura no puede ser considerada como ligera, hay que tener en cuenta que el peso muerto de la cubierta cumple la función de evitar el aleteo por efecto del viento.

Otro edificio basado en el mismo principio es el Banco de la Reserva Federal en Minneápolis (Minnesota), de Gunnar Birkerts, construido en 1971-1973. El programa para este edificio estipulaba que debía haber una gran superficie cubierta a nivel del suelo, exenta de columnas, para que los vehículos blindados pudieran maniobrar y cargar y descargar sus cargamentos de moneda. Esto significaba que, al nivel de la calle, no debía aparecer ninguna columna sustentante de la estructura superior. La solución que dió Birkerts a este problema consistió en colgar todo el edificio sobre unos cables suspendidos por sus extremos de dos torres, es decir, algo parecido a un puente colgante [2.33]. Las paredes exteriores son retículas rígidas ligadas a los cables, y todas las vigas de los forjados están atadas a esas retículas soportadas por los cables; por lo tanto, todas las cargas de los forjados y los muros son transmitidas por los cables hacia la parte alta de las torres. En consecuencia, dado que las torres son estiradas por los ca-

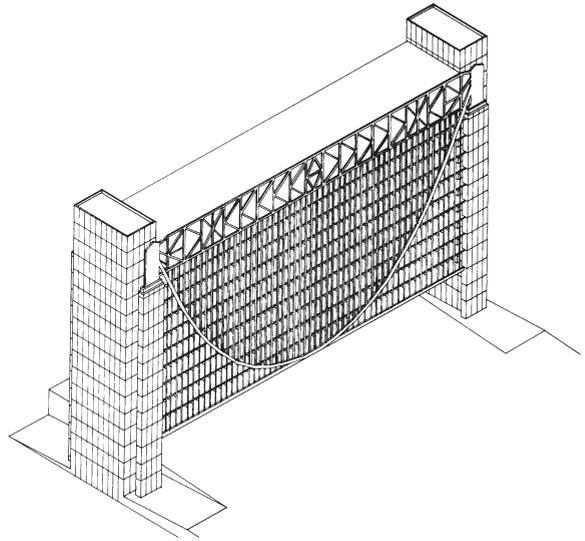


2.31. John Augustus Roebling, puente de Brooklyn, Nueva York, 1867-1883. Este puente estableció el modelo estructural para todos los puentes colgantes modernos; en él también se empleó el acero en una estructura por primera vez en América.



2.32. Eero Saarinen, terminal del aeropuerto internacional Foster Dulles, Washington DC. 1958-1962. La cubierta está colgada de cables anclados en las vigas de borde que corren a lo largo de los lados del edificio.

2.33. Gunnar Birkerts, Banco de la Reserva Federal, Minneapolis, 1971-1973. Diagrama de las partes estructurales en que se muestran los cables estructurales principales y la gran viga de celosía de la parte superior, cuya función principal es contrarrestar la tendencia que tienen los extremos de las torres a juntarse.



bles hacia el interior y hacia abajo, sus partes superiores tienden inevitablemente a juntarse; de ahí que estén conectadas mediante una gran viga de celosía, para mantenerlas separadas. Birkerts también previó la construcción de dos arcos en la parte alta de las torres, para que de ellos pudieran colgarse nuevas plantas adicionales, en caso de que tuviera que ampliarse el edificio verticalmente. De llevarse a cabo algún día esta ampliación, las fuerzas laterales hacia el exterior, generadas por las nuevas plantas sostenidas por el arco, se contrarrestarían con parte de las fuerzas laterales generadas por las plantas inferiores que cuelgan de los cables.

También se puede suspender un edificio de un único mástil mediante cables; de hecho, la mayoría de los edificios actuales se construyen con grúas de elevación de materiales basadas en este principio. Éstas tienen cables o barras de acero atados a un mástil central que sostiene la pluma y el contrapeso de la grúa. Un espectacular ejemplo de esta técnica constructiva es el edificio de la compañía Westcoast Transmission en Vancouver, en la provincia canadiense de Columbia Británica [2.34], realizado en 1968-1969 por los arquitectos Rhone & Iredale, en colaboración con los ingenieros Bogue & Babicki. En este edificio, los forjados están suspendidos de cables atados a un núcleo central que sobresale por encima del último piso.

### Membranas (carpas) y estructuras neumáticas

Desde los primeros años de la década de 1960, la aparición de una serie de nuevos materiales ha propiciado un avance considerable en técnicas constructivas, cada día más exóticas. En un futuro no muy lejano, tales materiales serán de uso tan corriente como la estructura metálica, la cual también constituyó una novedad técnica cuando, en 1851, se utilizó en el Crystal Palace de Londres y que, sin embargo, hoy por hoy, es el más corriente de los materiales para estructuras de entramado. Una variante técnica es la de la estructura de membrana tipo carpa, la cual no es sino una reinterpretación de uno de los tipos más antiguos de edificación: la tienda de campaña. El arquitecto e ingeniero alemán Frei Otto ha volcado sus energías en el desarrollo de estructuras de membrana pretensadas por la aplicación de fuerzas exteriores que se mantienen completamente tensas ante todas las condiciones de carga previstas; en ellas, la carpa está soportada por unos mástiles que mantienen en tensión a una retícula de cables entrelazados, amarrados a una serie de puntos de anclaje al terreno (para evitar que la membrana aletee con el viento). Un buen ejemplo es su pabellón alemán para la Exposición Universal de Montreal de 1967 [2.35].

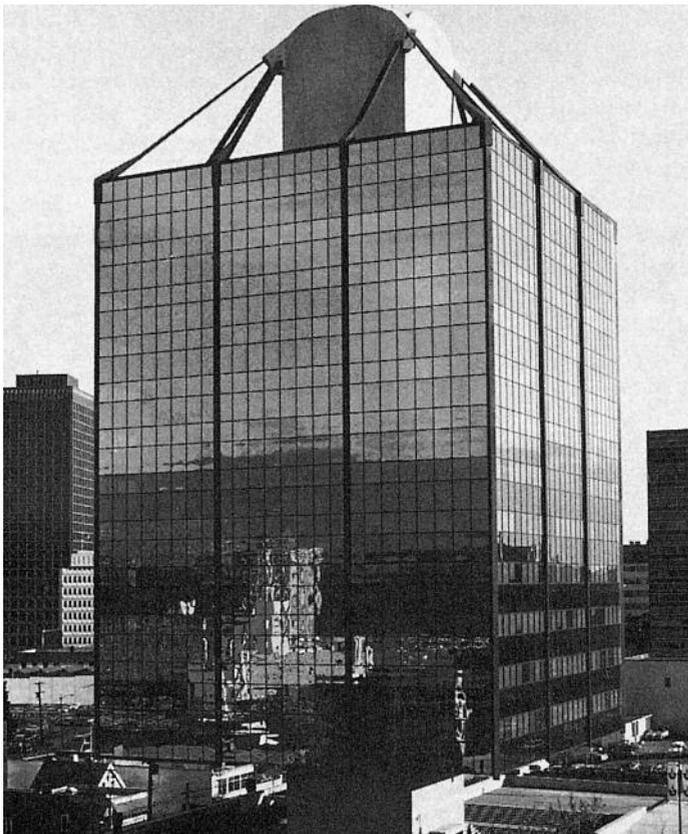
Otro nuevo tipo de construcción es el de las estructuras neumáticas, técnica cuyo de-

sarrollo ha sido posible gracias a los nuevos avances en cuanto a calidad, cosido e impermeabilización de las fibras textiles. Una de sus principales aplicaciones se da en el campo de las cubiertas provisionales sobre piscinas u otras instalaciones de temporada. A menudo, la estructura consta de una sola membrana sellada perimetralmente al terreno o a la plataforma de base; una ligera sobrepresión interior, conseguida mediante ventiladores, hace que se hinche la membrana. Una alternativa es la de las estructuras infladas con aire; éstas son siempre de doble membrana (como una versión ampliada de las piscinas infantiles hinchables); aquí, el aire se insufla a presión dentro de los propios elementos constructivos, los cuales tienen las formas adecuadas para sostener las cargas a la manera tradicional, mientras que el volumen de aire encerrado por la edificación se mantiene a la presión atmosférica normal. Un magnífico ejemplo de este tipo fue el pabellón Fuji, montado en 1970 para la Exposición Internacional de Osaka

(Japón) y proyectado por Yutaka Murata [2.36]. La desventaja de las estructuras neumáticas es que, para mantener la presión, requieren de una constante aportación de energía a los ventiladores, y que las membranas son susceptibles de agujerarse o desgarrarse. Gradualmente, las estructuras de membrana y las neumáticas se están usando cada vez más para cubrir zonas deportivas, aunque esas tecnologías son tan nuevas que nuestra información sobre su comportamiento, tras sólo unas décadas de exposición a los elementos, es aún muy limitada.

### Tecnología y riesgo

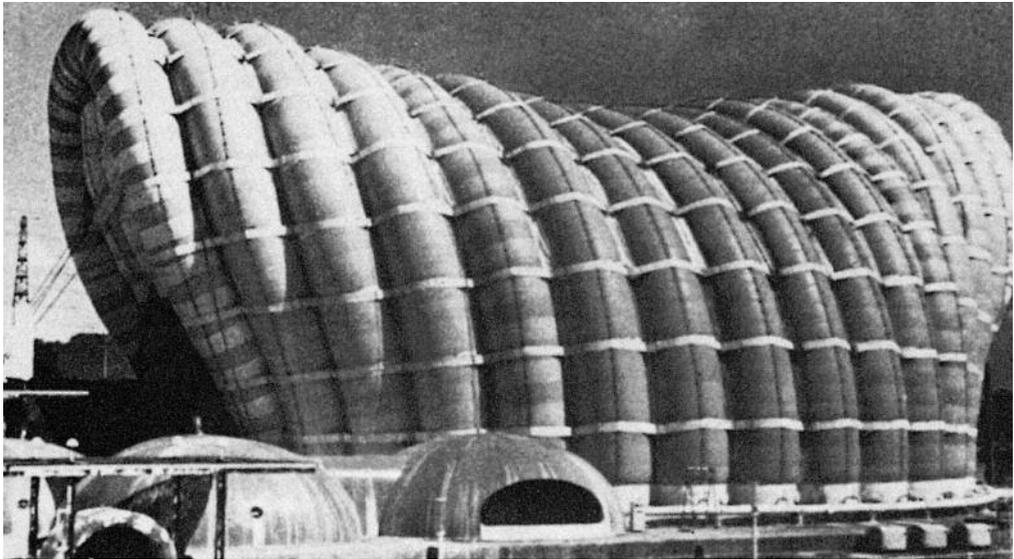
Es un hecho conocido que cuando se desarrolla una nueva tecnología se suele generar automáticamente una necesidad compulsiva de ponerla en práctica, tal vez como expresión del deseo humano de avanzar. Es como si se quisiera quemar etapas a toda prisa. Por desgracia, sucede con frecuencia que



2.34. Rhone & Iredale, en colaboración con los ingenieros Bogue & Babicki, edificio de la compañía Westcoast Transmission, Vancouver (Columbia Británica, Canadá), 1968-1969. Los forjados se sostienen sobre vigas y columnas sujetas a los cables exteriores, que, a su vez, están atados al núcleo central que sobresale por encima del último piso.



2.35. Frei Otto, pabellón de Alemania, Exposición Universal de Montreal de 1967, Montreal (Quebec, Canadá). En esta construcción, la envoltura protectora es una membrana soportada por unos mástiles que mantienen en tensión a una retícula de cables entrelazados, los cuales están amarrados a una serie de puntos de anclaje al terreno.



2.36. Yutaka Murata, pabellón Fuji, Exposición Universal de Osaka de 1970, Osaka (Japón). Los tubos de fibra textil inflada tienen integridad estructural propia; es decir, se sostienen a sí mismos. El aire en el interior de la edificación se mantiene a la presión normal.

los riesgos y desventajas de una nueva técnica o un nuevo material no se conocen hasta *después* de que la estructura está en funcionamiento. Tal vez los griegos tuvieran que aprender en propia carne lo grande que podía llegar a ser un dintel sin que se rompiera, y es probable que los arquitectos góticos tuvieran que esperar a que las bóvedas de la catedral de Beauvais se desplomaran para comprender que su tecnología había lle-

gado al límite. En la arquitectura moderna, la compulsión hacia la esbeltez y la novedad estructural se hizo especialmente evidente a partir de 1920, cuando el ideal a alcanzar era despojar a la arquitectura de materialidad visual (como en el muro transparente de vidrio del edificio Lever [2.2]). Dicho objetivo puede traducirse en “obtener el máximo rendimiento estructural con la mínima cantidad de material y con juntas y uniones lo más pe-

queñas y discretas que sea posible”. Cuando el cumplimiento de estos objetivos conduce a asumir riesgos que rebasan el límite de la prudencia, el resultado puede ser mortal, como ocurrió en el caso de las pasarelas del vestíbulo del Hyatt Regency Hotel, en Kansas City (Misuri). Aquí se produjo una insuficiente sujeción de las *pasarelas aéreas* a las esbeltas barras, con el resultado de que aquellas se vinieron abajo en julio de 1981, dejando un terrorífico saldo de 113 muertos y 180 heridos.<sup>3</sup>

### La estructura como expresión cultural

La estructura es algo más que la mera cuestión de crear un esqueleto o una envoltura. La selección de los materiales y de sus unio-

nes –sea para sugerir solidez y materialidad, o bien espiritualidad y despojamiento de cualidades materiales– forman parte de la visión que una cultura tiene de sí misma y de su relación con la historia. Así, como veremos en la segunda parte del libro, la solidez de las pirámides no es sino una expresión de la noción inmutable que los egipcios tenían del universo, la proporción del templo griego es una representación del ideal de equilibrio de la filosofía griega, la verticalidad de las catedrales góticas es una expresión de la esperanza medieval de alcanzar el cielo y los delgados soportes de las pasarelas del Hyatt Regency son el tributo de nuestra jactanciosa pretensión de conquista de la gravedad a través de la tecnología. El *cómo* construimos dice casi tanto de nosotros como el *qué* construimos.

### NOTAS

1. Louis I. Kahn, de una conferencia en la Escuela de Arquitectura, Pratt Institute, Nueva York, 1973; citada en John Lobell, *Between Silence and Light*, Boulder, Colorado, 1979, p. 42.

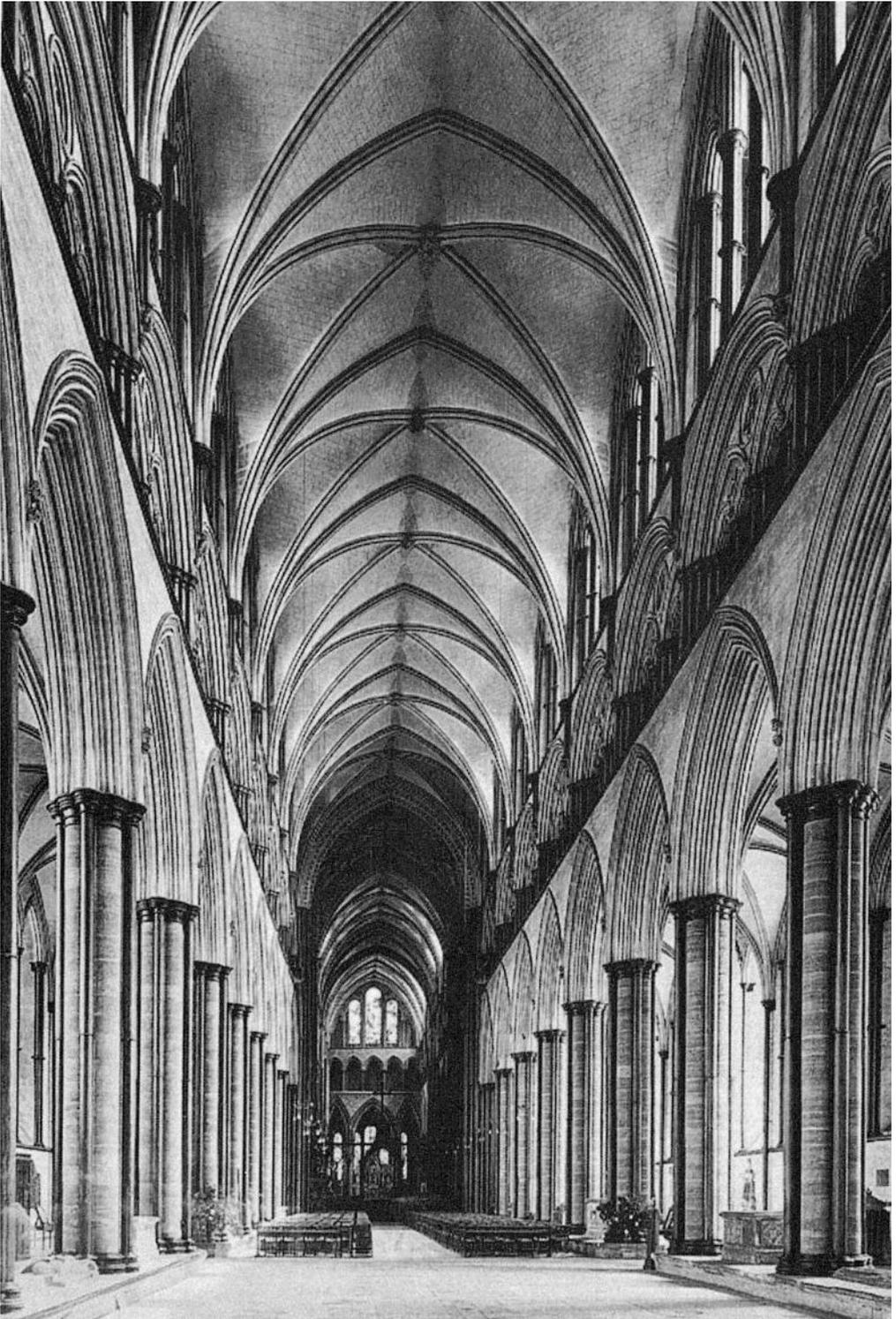
2. Las recientes investigaciones realizadas por George Hersey sugieren que los órdenes griegos se inspiraron en troncos de árboles de las arboledas sagradas y que los nombres de muchas de sus partes tienen su origen en los sacrificios ofrecidos a los dioses. Este asunto se trata con mayor detalle en el capítulo 11.

3. Para un análisis estructural del Panteón, véase Robert Mark y Paul Hutchinson, “On the Structure of the Roman Pantheon”, en *Art Bulletin*, n° 68, marzo, 1986, pp. 124-134. Véanse también R. Mainstone, *Developments in Structural Form*, y M. Salvadori, *Why Buildings Stand Up* (citado en la sugerencia de lectura anterior).

4. Sobre el análisis del colapso de las pasarelas del Hyatt Regency, véase Steven S. Ross, *Construction Disasters: Design Failures, Causes, and Prevention*, Nueva York, 1984, pp. 338-406. En enero de 1986, el estado de Misuri revocó las licencias profesionales de los dos ingenieros de estructuras que habían proyectado las pasarelas, después de que éstos fueran acusados de negligencia profesional grave en noviembre de 1985.

### BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

- Condit, Carl W., *American Building: Materials and Techniques from Beginning of the Colonial Settlements to the Present*, 2ª ed., Chicago y Nueva York, 1982.
- Condit, Carl W., *American Building Art: The Nineteenth Century*, Nueva York, 1960.
- Condit, Carl W., *American Building Art: The Twentieth Century*, Nueva York, 1961.
- Davey, Norman, *A History of Building Materials*, Nueva York, 1971.
- Gordon, James Edward, *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*, Nueva York, 1978.
- Mainstone, Rowland J., *Developments in Structural Form*, Cambridge, Massachusetts, 1975.
- Ross, Steven, *Construction Disasters: Design Failure, Causes and Prevention*, Nueva York, 1984; incluye explicaciones sobre el fracaso de la Torre Hancock, el desplome de la cubierta de la zona Kemper y el colapso de las pasarelas aéreas del Hyatt Regency.
- Salvadori, Mario, *Why Buildings Stand Up*, Nueva York, 1980.
- Salvadori, Mario y Heller, Robert, *Structure in Architecture: The Building of Buildings*, 3ª ed., Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1986.
- Timoshenko, Stephen, *History of the Strength of Materials*, Nueva York, 1983.
- Zannos, Alexander J., *Form and Structure in Architecture: The Role of Statical Function*, Nueva York, 1986.



3.10. Catedral de Salisbury, Salisbury (Inglaterra), 1220-1266. Vista de la nave central. Las crujeas repetitivas y la potente estratificación horizontal coadyuvan a que la vista se sienta fuertemente atraída hacia el fondo de la nave.

# “Deleite”: el espacio en la arquitectura

La historia de la arquitectura es primordialmente una historia de la configuración del espacio por la mano del hombre.

Nikolaus Pevsner, *Breve historia de la arquitectura europea*, 1943

La arquitectura es el arte en cuyo interior nos movemos; es el arte que nos envuelve. Si bien Nikolaus Pevsner establecía una, en mi opinión discutible, división entre *arquitectura* y *edificio*, tengo, en cambio, muchos más motivos de coincidencia con su observación siguiente de que la arquitectura es la creación de espacio.<sup>1</sup> Tal como observa Pevsner, los pintores y escultores afectan nuestros sentidos creando cambios en las formas y en las relaciones de proporción entre ellas o a través de la manipulación de la luz y del color, pero sólo los arquitectos configuran el espacio en que vivimos y en que nos movemos. Frank Lloyd Wright, pensaba que el espacio era la esencia de la arquitectura y descubrió que Okakura Kakuzo expresaba la misma idea en *The Book of Tea*. La realidad de la arquitectura no reside en los elementos sólidos que la configuran, sino que, más bien, “la realidad de la arquitectura hay que buscarla en el espacio encerrado por la cubierta y las paredes antes que en ellas mismas”.<sup>2</sup>

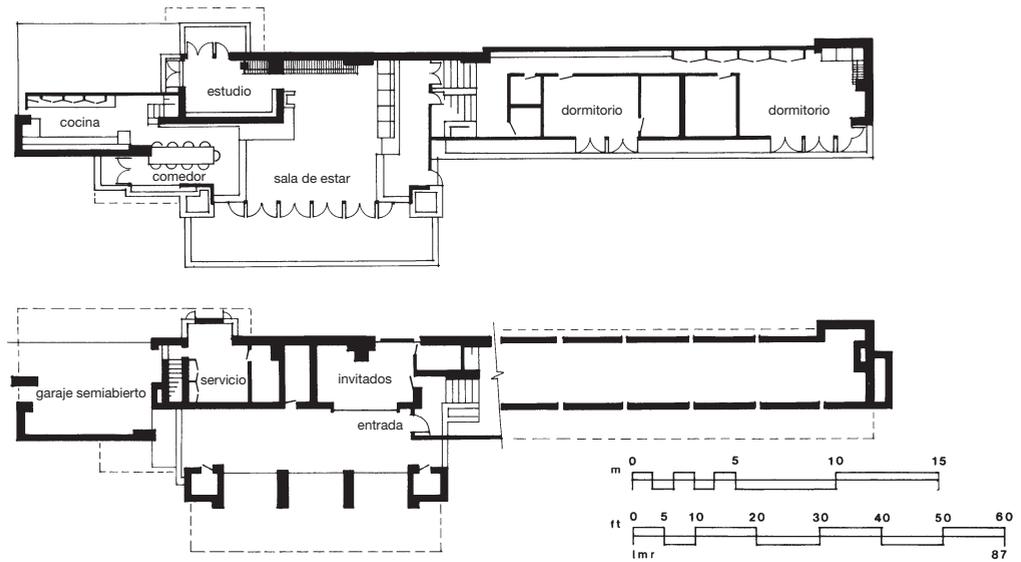
El arquitecto manipula espacios de muchos tipos. En primer lugar hay que hablar del **espacio físico**, que puede definirse como el volumen de aire limitado por las paredes, el suelo y el techo de una sala. Este espacio puede ser computado fácilmente y expresado en forma de metros cúbicos o de pies cúbicos.

Pero también existe un **espacio perceptible**, que es el que puede ser percibido o visto. Este espacio, especialmente en edificios con paredes de vidrio, puede ser realmente dilatado e imposible de cuantificar.

El **espacio conceptual**, en estrecha vinculación con el perceptivo, puede definirse como el *mapa mental* que llevamos en la cabeza, el *plano* que queda almacenado en nuestra memoria. Los edificios que funcionan bien son aquellos que los usuarios pueden comprender fácilmente con su imaginación y en los que pueden desplazarse con soltura, casi sin necesidad de que nadie se los enseñe, como con una especie de inevitabilidad. De tales edificios puede decirse que tienen un buen espacio conceptual.

El arquitecto también interviene decisivamente en la configuración del **espacio funcional**, que podría definirse como aquel en que realmente nos movemos y usamos. Para ilustrar con un ejemplo todos estos tipos de espacio, examinaremos la casa de Lloyd Lewis en Libertyville (Illinois), realizada en 1939 por Frank Lloyd Wright [3.1]. La vista de la sala de estar hacia la chimenea está definida por las librerías empotradas, el ladrillo visto del conjunto de la chimenea, el suelo y el techo [3.2]; todas las superficies son opacas y transmiten una clara sensación de confinamiento; el espacio físico es evidente. Si miramos hacia la izquierda, la vista se extiende, a través de las grandes balconeras acristaladas, hacia el prado y el bosque que quedan al otro lado [3.3]; desde esta posición, el espacio perceptible alcanza al exterior, extendiéndose a través del prado hasta el horizonte y el cielo. Si nos desplazamos hacia el comedor, podremos ver la mesa de comer fija y ligada a un machón de obra vista [3.4]. Para pasar desde la sala de estar al comedor y a la cocina es preciso rodear la mesa de comer, ya que ésta no puede ser desplazada. En un sentido estrictamente físico, la mesa ocupa realmente muy poco volumen, muy pocos metros cúbicos en relación con los centenares que tienen la sala de estar y el comedor

## 48 Los elementos de la arquitectura



3.1. Frank Lloyd Wright, casa de Lloyd Lewis (casa Lewis), Lybertyville (Illinois), 1939. Plantas baja (arriba) y semisótano.



3.2. Casa Lewis. Vista de la sala de estar, mirando hacia la chimenea. Desde este punto, el espacio se nos presenta nítidamente definido y transmite una protectora sensación de enclaustramiento.