

Estructuras Para Arquitectos

Mario Salvadori y Robert Heller

3ª EDICION



KLICZKOWSKI PUBLISHER

ASPPAN

CP67

hormigón a la compresión y la elasticidad del acero a la tracción, pues éste se halla distribuido en toda la masa de mortero, para mantener unidas sus partículas aun cuando se aplique al elemento un esfuerzo de tracción. Una de las aplicaciones más importantes del ferrocemento es la construcción de pequeños cascos de barcos, que Nervi comenzó en 1920.

Por último, cabe mencionar que la elevada resistencia a la compresión de los cerámicos puede combinarse con la resistencia a la tracción del acero y con las propiedades de cohesión del hormigón, para crear un material de comportamiento similar al hormigón armado. Torroja, entre otros, ha demostrado con cuánta imaginación es posible usar un material de esa índole en países donde el acero tiene un costo prohibitivo y son bajos, en cambio, los costos de mano de obra. (Ver Sección 10.6).

Los materiales plásticos y sintéticos que usan sustancias orgánicas como ligamentos, encuentran amplias aplicaciones en el campo de las estructuras por sus propiedades variadas, pero, generalmente no se usan todavía como materiales estructurales debido a sus altos costos.

La mayoría de los plásticos estructurales son de cristal reforzado. Las fibras de cristal con una resistencia de hasta 42.000 kilogramos por centímetro cuadrado se usan comúnmente para reforzar las resinas de epoxi moldeadas en las partes de un avión y otros elementos estructurales. Las tramas de cristal le dan resistencia a las resinas de epoxi y poliéster usadas para fabricar los paneles estructurales, y para el polivinil y otros materiales plásticos que, constituyen las membranas de los techos aéreos de gran tamaño (ver Sección 11.3). Las espumas de uretano y poliestireno, que tienen poca fuerza compresiva y tracción pero suficiente fuerza de corte, se usan como núcleos de paneles sandwich de madera terciada, aluminio, acero o plásticos, con excelente relación entre peso y resistencia y propiedades de aislación térmica (ver Sección 10.6).

Es fácil pronosticar que los desarrollos crecientes en el campo de los plásticos harán que estos materiales compitan cada vez más con los materiales estructurales clásicos.

El uso adecuado de los materiales estructurales es fundamental para el proyecto correcto, pues los materiales disponibles limitan la elección de los sistemas estructurales en todos los problemas importantes.

Capítulo Cuatro

Exigencias estructurales

4.1 Exigencias básicas

Los adelantos modernos en producción de materiales, técnicas constructivas y métodos de análisis han introducido nueva flexibilidad en el proyecto arquitectónico, ampliando considerablemente su alcance. Los capítulos siguientes ejemplificarán los resultados alcanzados en este campo; se describirán y analizarán en ellos los sistemas estructurales de uso más corriente en la arquitectura contemporánea.

Estas nuevas libertades no eximen a las estructuras modernas de la obligación de satisfacer determinados requisitos básicos que han constituido siempre los fundamentos de la buena arquitectura y que pueden dividirse en las siguientes categorías: equilibrio, estabilidad, resistencia, funcionalidad, economía y estética.

4.2 Equilibrio

La exigencia fundamental del equilibrio se relaciona con la garantía de que el edificio, o una cualquiera de sus partes, no se moverá. Como es evidente, esta exigencia no puede imponerse en forma estricta, y cierto grado de movimiento no sólo es inevitable, sino necesario; pero comparados con sus dimensiones, los desplazamientos admisibles en un edificio son por lo general tan pequeños, que a simple vista parece inmóvil y sin deformación alguna.

Las leyes que gobiernan el movimiento de los cuerpos, publicadas por Isaac Newton en 1687, se llaman *Leyes de Newton*. Los casos particulares de estas leyes que gobiernan el equilibrio, es decir, la *falta* de movimiento, son de importancia básica en la teoría estructural porque se aplican a *todas* las estructuras y son suficientes para el diseño de algunos de ellos. Tales estructuras, llamadas *estáticamente determinadas*, soportan cargas desarrollando fuerzas cuyos valores *no* dependen del material usado. Las estructuras que no pueden diseñarse sobre la base de las leyes de Newton solamente requieren un conocimiento de las propiedades del material, se llaman *estáticamente indeterminadas*. La mayoría de las estructuras modernas son estáticamente indeterminadas.

Es fácil representarse algunas condiciones elementales que aseguran el equilibrio de estructuras muy simples. La tracción del cable sostiene el ascensor que cuelga de él; a su vez, el cable cuelga de la polea instalada en la parte superior del edificio. Si el ascensor pesa quinientos kilogramos y se halla en reposo, el cable ejercerá sobre aquél una fuerza de igual valor. El peso del ascensor y la tracción del cable son iguales y "se anulan": el ascensor está "en

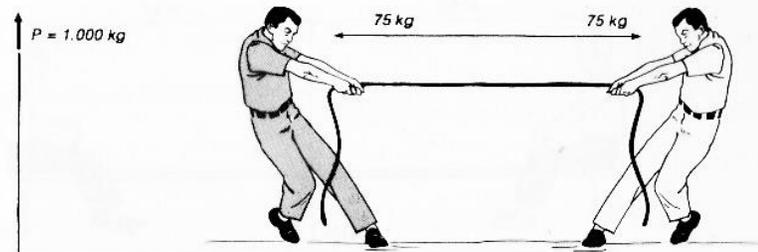
equilibrio" (Fig. 4.1). Dos hombres que tiran de una cuerda con fuerzas iguales, no se mueven: la cuerda está en equilibrio (Fig. 4.2). Pero si uno de ellos ejerce mayor fuerza que el otro, apartará a éste de su posición y tanto los hombres como la cuerda se moverán: se ha roto el equilibrio. Análogamente, si se coloca sobre una columna una estatua cuyo peso es mil kilogramos, aquélla ejerce sobre ésta un empuje de mil kilogramos (Fig. 4.3). Si la columna ejerciera una fuerza menor, la estatua se movería hacia abajo y habría una falta de equilibrio.

Estos ejemplos elementales ponen de manifiesto que un cuerpo no se mueve en una determinada dirección si las fuerzas a él aplicadas en esa dirección se anulan: a toda fuerza aplicada en una dirección dada, debe oponerse otra fuerza de igual magnitud y dirección, aplicada en sentido contrario. Cuando esto sucede, decimos que *hay equilibrio en esa dirección*.

El equilibrio de un puente en dirección vertical, cuando pasa sobre él una locomotora, presenta una situación ligeramente más complicada. El puente apoya sobre pilares en ambos extremos y podemos despreciar su peso propio. Cuando la locomotora se halla en el punto medio del puente, cada pilar soporta la mitad del peso de aquélla: el peso de la locomotora se halla "equilibrado" por las dos "reacciones de los apoyos", iguales [Fig. 4.4 (a)]. Tan pronto como la locomotora entra en el puente por la izquierda, es el pilar de ese lado el que resiste casi exclusivamente el peso. A medida que aquélla se desplaza sobre el puente, la reacción del apoyo izquierdo disminuye y aumenta la del apoyo derecho [Fig. 4.4 (b)], hasta igualarse cuando la locomotora se halla en el centro. A partir de ese momento, la reacción del pilar derecho continúa aumentando y la del izquierdo decreciendo, y aquél soporta casi la totalidad del peso de la locomotora cuando ésta se halla a punto de abandonar el puente [Fig. 4.4 (c)]. El puente transmite a los pilares de apoyo el peso de la locomotora, cualquiera sea su posición: para tener equilibrio vertical, la suma de las dos reacciones debe ser siempre igual a ese peso, pero las reacciones tienen valor distinto según la ubicación del peso.

Otra situación familiar de equilibrio es la ilustrada por dos muchachos de peso *idéntico*, sentados en los extremos de un sube y baja de brazos *iguales*. El apoyo de éste "equilibra verticalmente" los pesos de los dos muchachos y "reacciona" con una fuerza hacia arriba igual a la suma de los pesos [Fig. 4.5 (a)]. El equilibrio se rompe cuando los muchachos se sientan a distancias distintas del punto de apoyo: el sube y baja gira en la dirección del más distante del punto de apoyo [Fig. 4.5 (b)]. Las distancias al punto de apoyo se denominan "brazos de palanca". A fin de garantizar el "equilibrio rotatorio", el peso y los brazos de palanca de ambos muchachos deben ser iguales. Si los pesos son distintos, puede obtenerse equilibrio rotatorio dando al más liviano de los muchachos un mayor brazo de palanca y al más pesado, un brazo de palanca menor. En efecto, el *equilibrio rotatorio* requiere que el *producto* del peso por el brazo de palanca de los dos muchachos sea el mismo [Fig. 4.5 (c)].

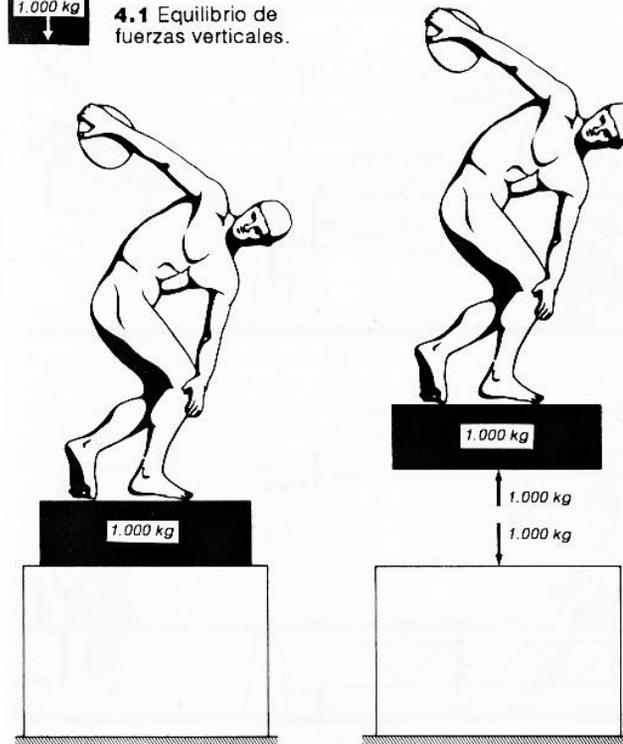
Estos simples principios de equilibrio se aplican a todas las estructuras. Fuerzas de igual magnitud y sentido contrario garantizan el equilibrio en una dirección dada; productos de igual magnitud y de sentido contrario, entre fuerzas y brazos de palanca, garantizan el equilibrio rotatorio. En la figura 4.5 (c) el sube y baja está en equilibrio de rotación porque el momento alrededor del pivot



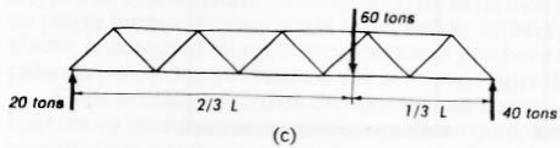
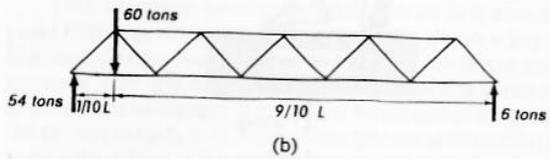
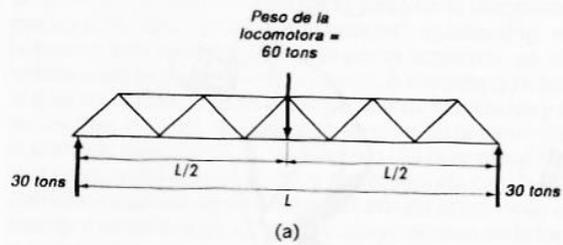
4.2 Equilibrio de fuerzas horizontales.



4.1 Equilibrio de fuerzas verticales.

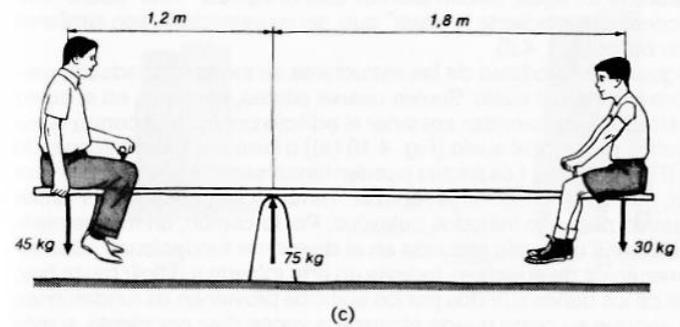
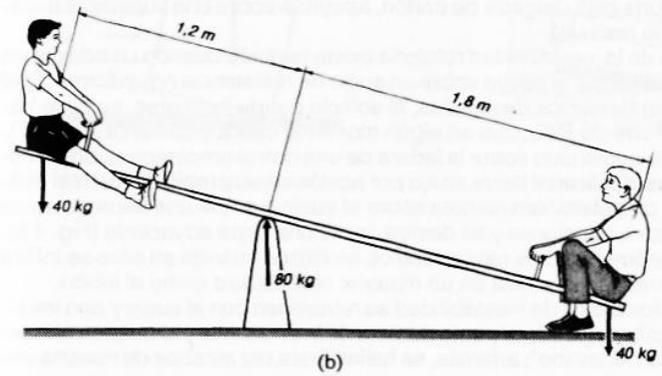
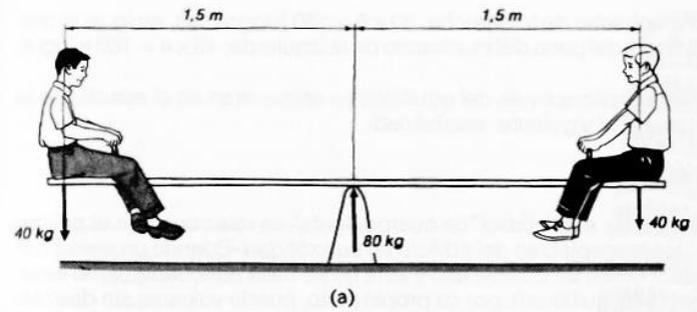


4.3 Equilibrio de fuerzas verticales.



4.4 Reacciones de un puente.

Editorial 46 CP67



4.5 Equilibrio rotatorio.

Editorial 47 CP67

del peso del muchacho de la derecha, $30 \times 6 = 180$ kilogramos, es igual al momento en que baja del peso del muchacho de la izquierda, $45 \times 4 = 180$ kilogramos.

Las primeras aplicaciones del equilibrio se encuentran en el estudio de la exigencia estructural siguiente: estabilidad.

4.3 Estabilidad

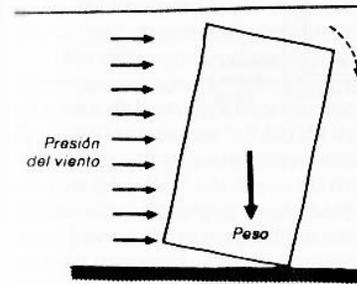
La exigencia de *estabilidad* "de cuerpo rígido" se relaciona con el peligro de movimientos inaceptables del edificio *en su totalidad*. Cuando un viento huracanado actúa sobre un edificio alto y éste no se halla adecuadamente arraigado en la tierra o equilibrado por su propio peso, puede volcarse sin desintegrarse (Fig. 4.6). El edificio es *inestable* desde el punto de vista rotatorio. Esto se aplica sobre todo a edificios altos y angostos, como puede demostrarse soplando sobre una caja delgada de cartón, apoyada sobre una superficie áspera (para que no resbale).

El peligro de la inestabilidad rotatoria existe también cuando un edificio no está "bien equilibrado" y apoya sobre un suelo de resistencia no uniforme. Si el suelo sufre asentamientos desiguales, el edificio puede inclinarse, como lo hace todavía la Torre de Pisa, que en algún momento caerá totalmente (Fig. 4.7).

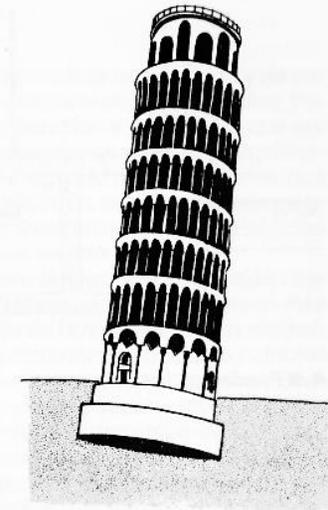
Un edificio construido sobre la ladera de una colina empinada puede mostrar tendencia a deslizarse hacia abajo por acción de su propio peso. Esto puede deberse a que el edificio resbala sobre el suelo o a que una capa de suelo se adhiere a las fundaciones y se desliza sobre una capa adyacente (Fig. 4.8). El segundo fenómeno no es raro en suelos arcillosos cuando en ellos se infiltra agua, transformando la arcilla en un material resbaladizo como el jabón.

Todos estos casos de inestabilidad se relacionan con el suelo y con los cimientos del edificio. Desde el punto de vista de la economía y el uso, los cimientos son un "mal necesario"; además, se hallan fuera del alcance de nuestra vista, de modo que el lego rara vez tiene conciencia de su importancia y de su costo. Así, por ejemplo, los cimientos de una estructura pesada construida sobre arena floja saturada de agua, deben permitir que el edificio "flote" sobre ese suelo: se las construye mediante "balsas" que, en su estructura, son similares al casco de un barco (Fig. 4.9).

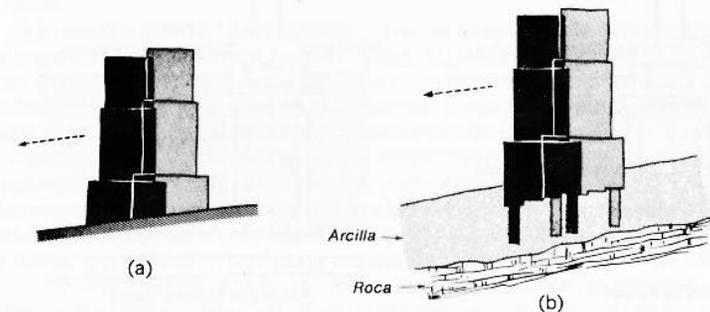
Para asegurar la estabilidad de las estructuras se toman cuidadosas precauciones contra fallas del suelo. Suelen usarse pilotes, hincados en el suelo hasta profundidades que permitan sostener el edificio por fricción contra la superficie de dichos pilotes y el suelo [Fig. 4.10 (a)] o bien por haber alcanzado la roca sólida [Fig. 4.10 (b)]. Los pilotes pueden hincarse por impacto o bien por deslizamiento, mediante vibraciones rápidas. También se consolidan a veces los suelos, usando para ello métodos químicos. Por lo común, un mejoramiento de las condiciones del suelo redundará en el diseño de fundaciones adecuadas; pero la mecánica de suelos es todavía un arte incierto y difícil; hasta hoy, la mayor parte de los daños sufridos por los edificios provienen de fundaciones defectuosas, aunque su costo puede alcanzar a veces diez por ciento, o más aun, del costo total del edificio.



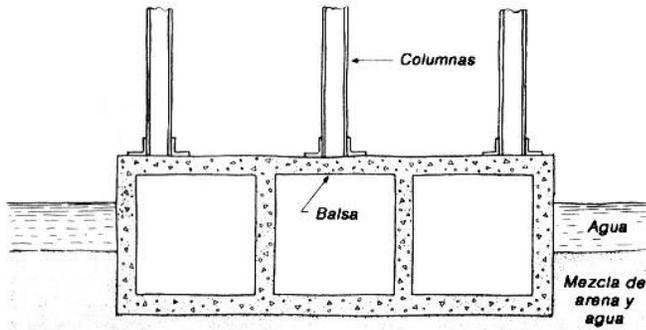
4.6 Inestabilidad debida al viento.



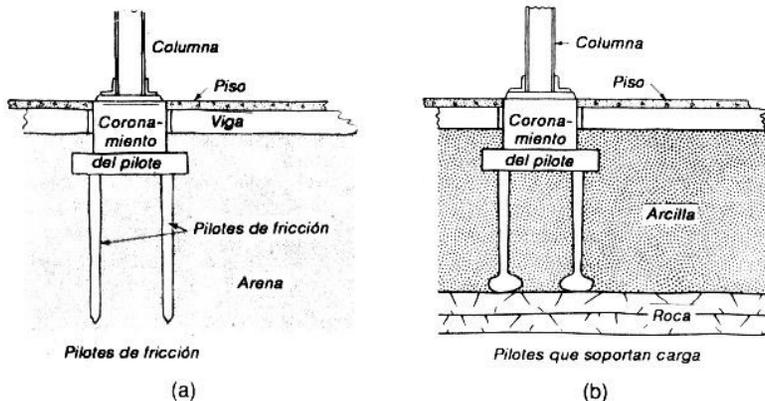
4.7 Inestabilidad debida a asentamiento irregular.



4.8 Inestabilidad debida a deslizamiento.



4.9 Fundación flotante.



4.10 Cimiento sobre pilotes.

4.4 Resistencia

El requisito de resistencia concierne a la integridad de la estructura y de cada una de sus partes, sometidas a cualquiera y a todas las cargas posibles. Para ello se elige primero el sistema estructural y se establecen las cargas que actuarán sobre él; se determina luego el estado de tensiones en puntos significativos de la estructura y se compara con el tipo y magnitud de las tensiones que el material puede resistir sin peligro. Se usan coeficientes de seguridad de magnitud diversa para tener en cuenta las incertidumbres en cuanto a condiciones de carga y propiedades de los materiales (véase Sección 3.2).

No debe confundirse rigidez con resistencia: dos estructuras pueden ser igualmente seguras, aunque sometidas a las mismas cargas una flexione más que otra. Si bien constituye a menudo una medida de la resistencia a las cargas, la rigidez puede ser indicio de debilidad en una estructura sometida a cambios de temperatura, a asentamientos desiguales y a cargas dinámicas (véase Secciones 2.5 y 2.6). Ciertos tipos de debilidad estructural pueden provocar daños moderados, mientras otros pueden llegar a producir el derrumbe de la estructura. Por tanto, el proyectista debe verificar la resistencia ante distintas condiciones de carga, a fin de obtener la peor configuración de tensiones en puntos significativos de la estructura. El optimista se inclina a creer que una estructura se derrumba sólo si a los defectos de proyecto se unen defectos de construcción, y a todo ello se agrega además un acto de Dios. El pesimista, cauteloso, cree, en cambio, que las estructuras se derrumban a la menor excitación. En la práctica las estructuras se derrumban, si bien ello no es muy frecuente; además, debido al comportamiento plástico de los materiales estructurales (véase Sección 3.1), la mayoría de los derrumbes no se producen en forma repentina y raras veces cobran vidas humanas (Véase capítulo 8).

A menudo se estima la resistencia de una estructura conforme a las reglas y estipulaciones de los códigos de edificación. Este procedimiento es por lo general seguro, mas puede resultar poco económico cuando no tiene en cuenta las técnicas de reciente aplicación y los materiales empleados en los últimos tiempos.

La responsabilidad de la resistencia recae directamente sobre los hombros del ingeniero especializado en estructuras. Su tarea crece día a día en complejidad y también en seguridad, debido al mayor conocimiento teórico y a las herramientas perfeccionadas con que cuenta. Entre estas nuevas herramientas merecen especial atención las computadoras electrónicas. Estos "cerebros electrónicos" permiten realizar en pocos segundos o minutos largos cálculos que resultarían imposibles de otra manera, y son especialmente útiles en el tipo de cálculo básico que el ingeniero debe realizar todos los días. De hecho, la computadora electrónica ha reemplazado ya al ingeniero en prolongados cálculos de rutina, pero también ha hecho mucho más.

La posibilidad de repetir un cálculo largo en cuestión de minutos, permite considerar diversas combinaciones de formas, tamaños y materiales, y elegir "el mejor" de una serie de proyectos. Las computadoras han introducido, de esta manera, la "optimización parcial" de los problemas estructurales, lo cual hasta hace poco tiempo era posible sólo en el plano teórico.

Además, la computadora permite un análisis más exacto de problemas de complejidad excepcional, como los vinculados al proyecto de estructuras antisísmicas. Antes de la aparición de la computadora, el análisis riguroso de tales problemas significaba un costo tan elevado, en tiempo como en dinero, que era imprescindible recurrir a soluciones aproximadas, con el consiguiente desperdicio de materiales. Hoy se realizan grandes economías y se logra mayor seguridad mediante los estudios más detallados y realistas que posibilitan las computadoras.

Cuando es imposible realizar con rapidez y economía el análisis matemático de un problema excepcionalmente difícil, el proyectista puede resolverlo ensayando con un modelo de la estructura del edificio. La construcción de modelos a escala reducida requiere un conocimiento cabal de las propiedades del material, de las relaciones apropiadas para reproducir longitudes y espesores a la escala elegida (por lo común las relaciones para longitudes y espesores difieren), y de las relaciones correctas para reproducir a esa escala las cargas estáticas y dinámicas. Existen en el mundo varios laboratorios bien equipados y con personal suficiente, en calidad y cantidad, para realizar ensayos de modelos estructurales: represas, grandes cúpulas y otras estructuras excepcionales se proyectan a menudo sobre la base de ensayos con modelos.

En los casos raros en que puedan caber dudas aun sobre los resultados de un ensayo con modelos, el ingeniero debe decidir aquél a escala natural de un elemento estructural. Este procedimiento se adopta por lo general cuando un elemento importante, que aparece repetidas veces en la estructura, no se presta a un análisis claro. Es un método costoso y requiere mucho tiempo, y si bien suministra información indiscutible sobre el comportamiento de ese elemento de la estructura, raras veces se recurre a él.

4.5 Funcionalidad

La funcionalidad estructural se refiere a las influencias de la estructura sobre la finalidad para la cual se construye el edificio. Así, por ejemplo, los entrepisos pueden construirse de manera económica dándoles cierta curvatura, tal como se hace con las cúpulas de las iglesias: disminuirían sobremanera el espesor y el costo. Pero como la atracción de la gravedad es vertical, los pisos deben ser horizontales.

Los puentes colgantes son estructuras flexibles. El Puente de la Puerta de Oro (Golden Gate Bridge) de San Francisco, oscila hasta 3,90 metros bajo la acción de fuertes ráfagas de viento. Esos movimientos deben limitarse, por supuesto, no sólo para que los vehículos no se desvíen de su camino, sino también porque la presión de un viento continuo produce oscilaciones aerodinámicas capaces de destruir el puente si éste es demasiado flexible (véase Sección 2.6).

La excesiva flexibilidad de una estructura puede menoscabar su funcionalidad si las deformaciones debidas a cargas estáticas tornan difícil o incómodo el movimiento de las personas sobre aquélla. El aluminio, con una flexibilidad igual a tres veces la del acero, exige muchas veces *proyectar tomando como base la deformación* y no la resistencia. Condiciones peores pueden surgir por

acción de cargas resonantes: una corriente de tránsito puede producir una vibración continua e incómoda en toda una estructura, afectando seriamente su utilidad. Los edificios construidos sobre subterráneos o vías ferroviarias apoyan a menudo sobre bloques aislantes de plomo, cuya finalidad es absorber esas vibraciones.

4.6 Economía

La economía no siempre es una exigencia de la arquitectura. Algunos edificios se construyen con fines monumentales o simbólicos: enaltecer a los propietarios a los ojos de público o subrayar valores espirituales. Los monumentos al Estado o a las "imágenes de empresa" pertenecen a la primera categoría; a la segunda pertenecen las iglesias. El costo de esos edificios guarda escasa relación con su valor financiero.

Pero el carácter utilitario de la estructura es tan fundamental que la economía influye aun sobre los sistemas estructurales de edificios no utilitarios. En otras palabras, siempre es necesario atenerse a un presupuesto estructural estricto, a menos que *la estructura misma* constituya un "display" publicitario: quizá se requiera una estructura de aluminio, fuere cual fuere su costo, a fin de subrayar el hecho de que el edificio es propiedad de una firma productora de ese metal.

En la mayor parte de los casos, el ingeniero especialista en estructuras hace estudios comparativos de costo y, a igualdad de los demás factores, elige la estructura más económica. En un edificio moderno, otros costos técnicos, sobre todo los relativos a instalaciones (calefacción, aire acondicionado, electricidad, instalación sanitaria) superan en mucho a los estructurales. El costo de la estructura no alcanza por lo común a 20-30 por ciento del costo total del edificio. Por lo tanto, aun una disminución sustancial en la estructura rara vez representa una economía superior a un pequeño porcentaje del costo total.

Al establecer el costo estructural, debemos considerar el del proyecto, que representa sólo 1 a 2 por ciento del costo total del edificio. El dinero asignado al proyecto de la estructura se subdivide en un presupuesto para anteproyecto, en el cual se determina el sistema a utilizar, y otro para proyecto final, que incluye preparación de planos definitivos de obra, verificación de los planos de taller preparados por el contratista y, a veces, inspección o supervisión completa durante la construcción. Los planos finales son trabajos complicados, y pueden costar de mil a dos mil dólares cada uno.

Los dos factores más importantes en el costo de una estructura son los materiales y la mano de obra. A este respecto, hoy encontramos en el mundo dos tipos básicos de economía. En la primera, usual en los países industriales más avanzados, el costo de materiales es relativamente bajo y el de mano de obra relativamente alto. En la segunda, corriente en los países menos desarrollados o subdesarrollados, esa relación se invierte.

La relación entre el costo de materiales y el de la mano de obra influye de manera fundamental en la solución del problema de la estructura. En el primer tipo de economía antes mencionado, se utiliza todo tipo de máquina (grúas, cintas transportadoras, excavadoras, compresores, herramientas eléctricas) para

reducir los costos de mano de obra y acelerar la construcción: lo normal es contar con elementos prefabricados, de fácil montaje; el acero es a menudo el material típico. En el segundo tipo de economía se usa abundante mano de obra tanto para el transporte como para la construcción y se emplean elementos pequeños para reducir al mínimo el uso de equipos pesados; los materiales típicos son: mampostería, ladrillo y hormigón. Pero las diferentes proporciones de materiales y costos de labor pueden influenciar la elección de un sistema estructural hasta en diferentes áreas del mismo país.

Los cambios continuos de productividad y de equilibrio económico introducen diversas condiciones intermedias, según el lugar y el tiempo. El hormigón obtiene mayor aceptación y se torna más competitivo en países donde el acero reinaba sin competencia hasta hace pocos años; las estructuras metálicas se difunden en países donde, hasta ahora, el hormigón era el material más económico.

La disponibilidad de equipos pesados es uno de los principales factores que limitan el uso de elementos prefabricados de gran tamaño en la construcción. Algunos de los trabajos más interesantes realizados en Europa se conciben con elementos básicos no superiores a la capacidad de las grúas más fácilmente disponibles, o sea pocas toneladas. En cambio, en los Estados Unidos aun los pequeños contratistas usan comúnmente elementos de decenas de toneladas.

La disponibilidad de mano de obra calificada limita de varias maneras los métodos de construcción. El empleo del ferrocemento de Nervi no resulta económico en los Estados Unidos, pues el mortero de cemento que llena los espacios entre las mallas de alambre superpuestas, debe echarse a mano (véase Sección 3.3). No es posible adoptar en este caso las pistolas de cemento, pues la velocidad con que sale el mortero lo hace rebotar sobre las mallas. La mayor parte del delicado trabajo de talla, típico de los edificios medievales está hoy fuera de toda cuestión, debido a la carencia de artesanos especializados en tallar la piedra, cuya tradición de aprendizaje se ha extinguido. Asimismo, la escasez de soldadores especializados puede imposibilitar en un determinado momento la consideración de una estructura de acero, económica en otras condiciones. Aun la falta del equipo necesario para verificar las delicadas juntas soldadas puede excluir una solución de esa índole.

Otros factores más sutiles pueden influir también de manera decisiva en el costo. A veces, las estipulaciones de los códigos locales inclinan la balanza económica en favor de determinados materiales específicos, imponiendo restricciones a otros. Así, por ejemplo, ciertos códigos especifican el espesor mínimo de las losas planas de hormigón. La aplicación de esta norma a las losas curvas, que desde el punto de vista estructural podrían ser mucho más delgadas, puede tornar antieconómica la construcción de una pequeña cúpula de hormigón armado. La exclusión del aluminio como material estructural es típica de las limitaciones impuestas por ciertos códigos.

Las reglamentaciones relativas a incendios pueden favorecer al hormigón debido a su resistencia al fuego, y la comparación de las primas de seguros contra incendios puede aconsejar, en forma igualmente decisiva, el uso de ese material.

El costo inicial de una estructura no es sino uno de los factores que hacen a su economía: el mantenimiento es otro. Los bajos costos de mantenimiento de las estructuras de hormigón y aluminio pueden inclinar la balanza en su favor, cuando se los compara con los correspondientes a las estructuras de acero. Análogamente, las consideraciones de energía influncian la economía de una estructura a través de su *costo del ciclo de vida*.

La rapidez de construcción influye en el monto de los intereses que deben pagarse durante el período improductivo que abarca esa etapa, y es otro factor a considerar cuando se trata de elegir un sistema estructural. Los elementos prefabricados, cualquiera que fuere el material, permiten trabajar al mismo tiempo en las fundaciones y en la superestructura, y abrevian los tiempos de construcción; por lo tanto, su popularidad aumenta día a día. En ocasiones, los organismos de gobierno y los sindicatos han demorado o acelerado la adopción de sistemas estructurales modernos. Igual efecto tienen las condiciones políticas.

En la estructura, la economía se obtiene mediante el juego recíproco de muchos y variados factores: debe confiarse en que proyectista y contratista pesarán esos factores con cuidado, a fin de desarrollar el método más apropiado de construcción para cada conjunto de condiciones. Este análisis es tan complejo que, en el caso de los grandes edificios, se recomienda a los especialistas llamados *directores de construcción* que aconsejan al arquitecto y a sus ingenieros durante la fase de diseño y el contratista durante la fase de construcción.

4.7 Estética

No puede negarse la influencia de la estética sobre la estructura: al imponer sus postulados estéticos al ingeniero, el arquitecto fija a menudo limitaciones esenciales al sistema estructural. En realidad, el arquitecto mismo sugiere el sistema que cree más adecuado para expresar su concepto del edificio, y rara vez el ingeniero se halla en situación de modificar radicalmente la propuesta de aquél.

En algunos casos, el arquitecto consulta al ingeniero desde el comienzo mismo de su proyecto y éste participa en la concepción de la obra, haciendo de la estructura una parte integral de la expresión arquitectónica. El equilibrio de objetivos y medios así alcanzado ha de producir, sin duda, una mejor estructura y una arquitectura más satisfactoria.

La influencia de la estructura sobre la arquitectura y, en particular, sobre la estética, es más discutible. En la Sección 1.1 se observó que una estructura totalmente genuina y correcta conduce a resultados estéticos, pero que algunos arquitectos se inclinan a ignorar por completo la estructura como factor de la estética arquitectónica. Ambas maneras de pensar pueden llegar a conclusiones correctas, a condición de que sus postulados se limiten a ciertos campos de la práctica arquitectónica. En el proyecto de un edificio relativamente pequeño, nadie puede dudarle, la importancia de la estructura es limitada, y es posible alcanzar resultados estéticos forzando la estructura de manera antieconómica e incluso irracional. En un extremo, el arquitecto se sentirá libre para "esculpir" y, de esa manera, crear formas arquitectónicas esencialmente débiles desde el

punto de vista estructural, aunque realizables.

En el extremo opuesto de la escala, los edificios de tamaño excepcional dependen en tal medida de la estructura, que el sistema estructural mismo es la expresión de su arquitectura. Aquí, un enfoque incorrecto de la estructura, la falta de completa sencillez, el uso equivocado de materiales o métodos de construcción, pueden menoscabar de manera definida la belleza del edificio terminado. Los comienzos de una estética de la estructura misma se están estableciendo a través de la semiótica, la ciencia de la comunicación no verbal (ver capítulo 14).

Tanto prevalece la influencia de la estructura sobre la arquitectura moderna, que algunos arquitectos se preguntan si el campo del diseño arquitectónico no quedará por último en manos de los ingenieros. La creciente importancia de los servicios técnicos y de la estructura sugieren un peligro de esa índole. Y sería un peligro serio, pues en su calidad de técnico, el ingeniero no tiene la formación necesaria para resolver los problemas amplios del diseño arquitectónico. Pero quizá estos temores sean, después de todo, injustificados: si bien el ingeniero participa en forma creadora del proceso de diseño, sabe que en una sociedad de grupos como la nuestra, su papel se limita a colaborar con el jefe del equipo. El jefe es y será siempre el arquitecto.

4.8 Estructuras óptimas

El estudio de los requisitos básicos de las estructuras conduce, como es natural, a preguntar si es posible satisfacer todos estos requisitos y obtener "la mejor estructura" para un problema arquitectónico dado.

Para responder a esta pregunta debemos aclarar primero "para quién" será esa estructura la mejor. Para el propietario sería, probablemente, la menos costosa. Para los obreros, la que empleara la cantidad máxima de hombres-hora. Para el proveedor de un material específico, la mejor estructura será la que utilice ese material en grandes cantidades. Para el ingeniero especializado en estructuras, podría ser la más fácil de analizar, la más digna de estudiar o la más osada, según que le interese más el beneficio monetario, la destreza teórica o la satisfacción y fama personales.

Desde el punto de vista de los requisitos básicos considerados en las secciones anteriores, la mejor estructura puede ser la más estable, la más resistente, la más funcional, la más económica o la más hermosa.

Así, pues, como es evidente, el problema de determinar la "mejor" estructura no admite una respuesta única y simple. Por otra parte, uno puede esforzarse por lograr la mejor estructura ateniéndose a un número de limitaciones específicas. Se han establecido, por ejemplo, soluciones óptimas en ingeniería aeronáutica, que admiten el peso mínimo como el único criterio para juzgar los elementos estructurales. Análogamente, los perfiles laminados normales doble T y de ala ancha, elementos básicos en toda estructura de acero, se han estudiado geométricamente para lograr la máxima resistencia por unidad de peso cuando se los usa como vigas o columnas (las dos formas son geoméricamente diferentes).

Se pueden establecer criterios más generales para definir "la mejor colum-

na", considerando diversas formas y materiales, y comparando costos. Pero pronto resulta evidente que el gran número de factores que intervienen aun en el problema más simple de este tipo, imposibilita prácticamente establecer para ellos los valores que lleven a una solución óptima. La columna, uno de los elementos estructurales más simples, puede presentar diversas formas (cuadrada, circular, en forma de I, en forma de caja); cada forma puede tener diversas relaciones entre lados o entre radios; el espesor de cada lado puede ser distinto; la longitud de la columna puede ser grande o pequeña comparada con sus dimensiones laterales; la columna puede apoyar en una base o formar parte de una serie de columnas superpuestas; los materiales entre los cuales se ha de elegir pueden ser diversos; la carga a apoyar en la columna puede estar centrada o ser excéntrica. Se comprende que en los Estados Unidos un grupo de especialistas en estructuras haya trabajado durante más de 20 años para establecer criterios sencillos de resistencia y proyectos de columnas de acero y aluminio.

Un problema que preocupa a todos es determinar el "sistema estructural más liviano" que cubra la "distancia más grande" con el "peso mínimo" de material. Aun considerando un material único, un estudio sencillo pone de manifiesto que los distintos sistemas estructurales no varían de peso tanto como uno pudiera creer. El peso ahorrado por el uso de ciertos elementos estructurales resulta necesario, como se ve a menudo, en sus conexiones. A veces un sistema parece más liviano que otros, hasta que se verifica su flexibilidad: se aprecia entonces la necesidad de material adicional para conferirle rigidez y funcionalidad.

La evolución de los sistemas estructurales es un proceso lento y delicado. Esto no debe desalentar al estudioso en la investigación de nuevas posibilidades, ni al ingeniero en la adopción de nuevas técnicas. Deben saber, simplemente, que un campo tan antiguo y tan transitado como el de las estructuras, no da nuevos frutos sin el aporte de un trabajo incomparablemente mayor que el necesario en la aplicación corriente de principios establecidos.