

# 2

---

## MÉTODOS DE DISEÑO

---

El objetivo principal de este libro es estudiar el diseño de estructuras para edificios en los que se usan elementos de madera. También está pensado para que sirva como una obra de referencia introductoria al estudio del tema general de las estructuras de madera. Para este último objetivo, es necesario observar muchos fenómenos y temas por separado con el fin de concentrar las actividades de aprendizaje. Sin embargo, el diseño es característicamente una actividad de objetivos muy ambiciosos, con una base más amplia. El proceso de diseño en el trabajo profesional funciona, en general, al revés en comparación con los procesos comunes de aprendizaje programado, ya que es normal que pase de una primera consideración del edificio entero a la de los elementos que lo componen. En este capítulo se presentan los aspectos generales del trabajo de diseño, con aplicación específica a las situaciones que se encuentran en el diseño de estructuras para edificios con productos de madera.

### 2.1 OBJETIVOS DEL DISEÑO

Generalmente, el diseño de cualquier estructura para edificio en particular tiene algunos objetivos simples. Su orden de importancia puede variar en situaciones diferentes, pero los objetivos comunes son los siguientes:

- Diseñar una estructura con las características de seguridad adecuada para resistir las condiciones de carga esperadas. La seguridad se refiere a la salvaguarda de las vidas de los usuarios del edificio.
- Dimensionar y proyectar la estructura de tal modo que se puedan acomodar los otros elementos en la construcción del edificio con la mayor facilidad y la menor interferencia.
- Diseñar una estructura completa al menor costo, en términos de opciones viables con capacidades de desempeño equivalentes.
- Observar los estándares actuales de la práctica de diseño, tal como han sido establecidos por la industria y por las organizaciones profesionales, así como por los reglamentos de construcción vigentes.

Alcanzar estos objetivos representa un juicio profesional considerable y, a menudo, una evaluación subjetiva. Sin embargo, la seguridad y el costo (cantidad de dinero gastada) pueden medirse con una exactitud razonable. Se comprende que la seguridad es una prioridad muy importante a los ojos de la comunidad, en tanto que el costo es el que encabeza normalmente la lista de prioridades de los propietarios de edificios o inversionistas. Se considerará con cierto detalle cada uno de estos objetivos básicos, sin tomar en cuenta el orden jerárquico.

## Costo

La estimación de costos de las estructuras propuestas la hacen varias personas antes de terminar la construcción; y pueden modificarse muchas decisiones de diseño significativas, en especial aquellas que incluyan la selección de materiales y tipos de productos. Aun cuando lo mejor es dejar la estimación de costos a quienes la hacen en forma rutinaria y continua de manera profesional, todo proyectista debe tener una noción general de los factores de costo y del costo de la construcción ordinaria, con objeto de no pasar una vergüenza porque los diseños preliminares resulten ser completamente irrealizables por el alto costo.

El análisis del costo es una parte muy difícil del diseño estructural, pero necesaria. Para la estructura propiamente dicha, el costo base es el costo de entrega de la estructura terminada que se mide en unidades monetarias por metro cuadrado de construcción. Para los componentes individuales, como un muro aislado, las unidades pueden usarse de otra manera. Los factores o los componentes individuales del costo, como el costo de los materiales, la mano de obra, el transporte, la instalación, las pruebas y la inspección, deben sumarse para producir un solo costo unitario para la estructura completa.

El proyecto basado en el control del costo de la estructura es sólo un aspecto del problema de diseño. El costo más significativo es el de la construcción del edificio completo. Es posible que ciertos esfuerzos para abatir costos aplicados a la estructura puedan conducir a un incremento del costo en otras partes de la construcción. Un ejemplo común es el de la estructura de piso para

edificios de varios niveles. Las vigas de piso son muy efectivas si tienen un peralte grande en relación con el claro. Sin embargo, considerando la necesidad inmutable de disponer del espacio necesario para la construcción del piso y del cielo raso y la instalación de ductos y de elementos de iluminación, agregar pulgadas al peralte de la viga significa incrementar la distancia de piso a piso y la altura total del edificio. Los incrementos resultantes en el costo por el acabado del edificio, muros interiores, elevadores, tubería, ductos, escaleras, etcétera, pueden anular los pequeños ahorros en el costo de las vigas. La estructura que reduce costos verdadera y efectivamente es, con frecuencia, aquella que genera ahorros importantes en costos no estructurales, en algunos casos, a expensas de una menor eficiencia estructural.

Sólo quienes entregan la construcción terminada pueden determinar las cifras reales del costo. Las estimaciones de costos son más confiables en forma de ofertas reales o licitaciones por el trabajo de construcción. Entre menos datos tenga el especialista en costos del requerimiento real los bienes a entregar, más especulativa es su estimación.

Los arquitectos o ingenieros de proyecto, a menos que sean en realidad los constructores, deben basar cualesquiera estimaciones de costos en evaluaciones producto del conocimiento y la experiencia que provengan de alguna comparación con obras similares hechas recientemente en la misma región. Esta especie de conjetura debe ajustarse con respecto a las obras más recientes, en términos de mercados locales, competitividad de constructores y proveedores, y el estado general de la economía. Entonces, las cuatro mejores estimaciones se colocan en un sombrero y se saca una.

La estimación profesional de costos requiere capacitación y experiencia y una fuente progresiva de información confiable y oportuna. Para proyectos importantes se dispone de diferentes fuentes, como publicaciones o bancos de datos en computadora.

Las siguientes son algunas reglas generales para intentos que pueden integrarse en el trabajo de diseño estructural, con objeto de tener una visión panorámica y general para reducir costos:

1. La reducción del volumen de material es generalmente un medio de reducir costos. Sin embargo, se deben tener en cuenta los precios unitarios para diferentes calidades. Las categorías superiores de acero o de madera pueden ser, proporcionalmente, más caros que los valores mayores de esfuerzo que representan; mayor volumen de material más barato puede ser menos caro.
2. El uso de productos estándar, por lo común en existencia, provoca una disminución normalmente, en los costos, ya que las dimensiones y formas especiales pueden tener precios muy altos. Los montantes de madera de  $2 \times 3$  pueden tener un precio mayor que los de  $2 \times 4$ , ya que estos últimos se usan ampliamente y se compran en grandes cantidades.

3. Reducir la complejidad de los sistemas representa, por lo general, una reducción en costo. La simplicidad en la compra, manejo, administración de inventarios, etcétera, se reflejará en propuestas con menores costos, ya que los contratistas esperan actividades más simples. El uso del menor número posible de clases diferentes de materiales, tamaños de sujetadores, y otras variables de este tipo es tan importante como el menor número posible de partes diferentes. Esto es en especial cierto para cualquier ensamble que se haga en el lugar de la obra; es posible que los inventarios grandes no sean un problema en una fábrica, pero sí lo son en el sitio de la construcción.
4. Por lo general, se logra una reducción del costo cuando los materiales, productos y métodos de construcción son muy conocidos para los contratistas y los obreros locales de la construcción. Si existen varias opciones reales, elegir la “acostumbrada” es el mejor camino.
5. No adivine con los factores de costo; use la experiencia real, la suya o la ajena. Los costos varían localmente, según las dimensiones de la obra y el tiempo. Manténgase actualizado con la información de costos.
6. En general, el costo de la mano de obra es mayor que el costo de los materiales. La mano de obra para cimbrar la construcción, la instalación de las varillas, el colado del concreto y el terminado de las superficies de concreto, son los principales factores de costo en el concreto colado en obra. Los ahorros en estas actividades son mucho más significativos que el ahorro en el volumen de material.
7. Para edificios levantados con fines de inversión, el tiempo es dinero. La velocidad de construcción puede ser una gran ventaja. Sin embargo, el montaje rápido de la estructura no es una ventaja real a menos que los otros aspectos de la construcción puedan beneficiarse con el tiempo ganado. Con frecuencia, los marcos de acero se ensamblan rápidamente, sólo para permanecer en pie y oxidarse mientras el resto del trabajo se empareja.

## Seguridad

La salvaguarda de vidas es uno de los aspectos más importantes en la construcción de estructuras. Dos consideraciones fundamentales son: la resistencia al fuego y una baja probabilidad de colapso por carga. Ambas afectan considerablemente las decisiones que debe tomar el ingeniero estructurista. Los elementos principales de la resistencia al fuego son:

*Combustibilidad de la estructura.* Si los materiales estructurales pueden quemarse, añadirán combustible al fuego y acelerarán el colapso de la estructura.

*Pérdida de resistencia a altas temperaturas.* Esto ocasiona una carrera contra el tiempo, desde el momento de inicio del fuego hasta la falla de la

estructura, un largo intervalo que representa una mejor oportunidad para que los ocupantes escapen del edificio en llamas.

*Contención del fuego.* Por lo general, los incendios se inician en un solo lugar y es muy recomendable evitar su propagación. Los muros, los pisos y los techos deberán construirse de tal manera que el incendio no los calcine.

Partes extensas de los reglamentos de construcción tienen que ver con aspectos de seguridad contra incendios. Los materiales, los sistemas y los detalles de construcción se clasifican por su resistencia al fuego con base en la experiencia y ensayos. Estos reglamentos constituyen limitaciones para el diseño de edificios.

La seguridad contra incendios en edificios es mucho más que una preocupación del diseño estructural. También son importantes las rutas de evacuación para los ocupantes, las salidas apropiadas, los sistemas de detección y de alarma, los dispositivos para combatir incendios (rociadores, tuberías, armarios con manguera, etc.), así como la ausencia de materiales tóxicos o muy combustibles. Todos estos factores contribuirán a la carrera contra el tiempo. En la figura 2.1 se ha simbolizado la naturaleza de esta carrera y los medios básicos para controlarla.

La estructura del edificio también debe soportar cargas. La seguridad en este caso está representada por el margen de capacidad extra de la estructura superior a aquél estrictamente requerido por la magnitud específica de las cargas. Este margen se representa en la forma de un *factor de seguridad*, FS, definido en la fórmula que se da al inicio de la página siguiente.

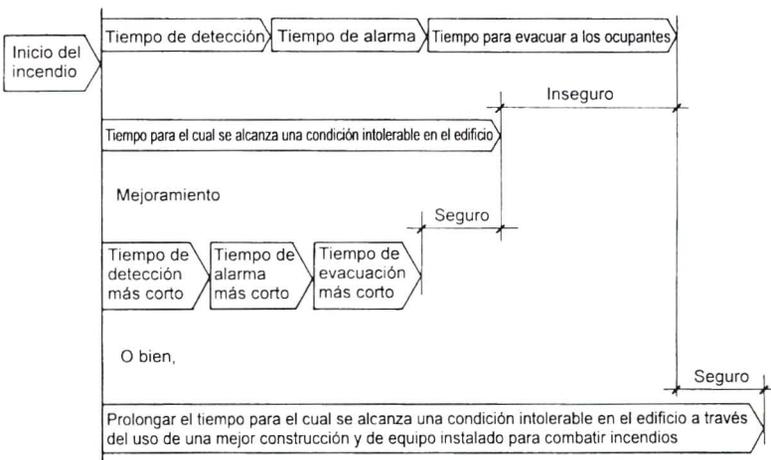


Figura 2.1 Concepto de seguridad contra incendios.

$$FS = \frac{(\text{capacidad real de la estructura})}{(\text{capacidad requerida para resistir cargas determinadas})}$$

El usuario de una estructura puede sentirse seguro con un factor de seguridad tan alto como 10, pero pueden ser prohibitivos el costo o, simplemente, las dimensiones tan grandes de una estructura así. Durante muchos años, las estructuras de los edificios han sido diseñadas con un factor de seguridad promedio de 2. No hay más razón para esto que la experiencia.

El diseño tradicional de estructuras surgió, principalmente, con un método que en la actualidad se conoce como *diseño por esfuerzos*. En este método se utilizaban relaciones básicas derivadas de la teoría clásica del comportamiento elástico de los materiales; la adecuación o seguridad de los diseños se medía al comparar con respecto a dos límites principales: un nivel aceptable para el esfuerzo máximo y un nivel tolerable para el alcance de la deformación (deflexión, alargamiento, etc.). Estos límites se calculaban tal como se presentaban en respuesta a las *cargas de servicio*; es decir, las cargas producidas por las condiciones de uso normal de la estructura. Este método también se conocía como *método de esfuerzos de trabajo*, los límites de esfuerzo se llamaban *esfuerzos de trabajo admisibles*, y los movimientos tolerables se llamaban *deflexiones admisibles, alargamiento admisible*, etcétera.

Con objeto de establecer en forma convincente ambos límites de esfuerzo y deformación, fue necesario ejecutar ensayos en estructuras reales. Esto se hizo en forma extensa, tanto en el campo (en estructuras reales) como en laboratorios de prueba (en prototipos o modelos). Cuando la naturaleza suministra sus propios ensayos en la forma de fallas estructurales, diferentes profesionales hacen con frecuencia extensos estudios forenses, con el fin de investigar o establecer responsabilidades.

Tanto los estudios teóricos como las pruebas de materiales y estructuras reales han demostrado, hace mucho tiempo, las limitaciones del método de esfuerzos de trabajo para predecir, con exactitud, el límite de falla de las estructuras. Una razón principal de lo anterior es la relación tan idealizada que resulta al suponer que los materiales son perfectamente elásticos. Los procedimientos de diseño estructural más recientes se basan de manera principal en el *método de la resistencia*, en el cual se usan límites de falla como base para el trabajo de diseño. En la sección 2.3 se explica este método con mayor profundidad.

En esencia, el método de esfuerzos de trabajo consiste en diseñar una estructura para *trabajar* a algún porcentaje apropiado establecido de su capacidad total. El método de la resistencia consiste en diseñar una estructura para *fallar*, pero para una condición de carga más allá de lo que debería experimentar durante su uso. Una razón principal para favorecer los métodos de resistencia es que la falla de una estructura se demuestra con relativa facilidad mediante pruebas físicas. Sin embargo, lo que es verdaderamente apropiado como una condición de trabajo tiene mucho de especulación teórica. De cual-

quier modo, en la actualidad se prefiere el método de la resistencia en el trabajo profesional de diseño. Se creó en particular para el diseño de estructuras de concreto reforzado, pero ahora está aplicándose en todas las áreas del diseño estructural.

## 2.2 DISEÑO POR ESFUERZOS ADMISIBLES

La mayor parte del trabajo de diseño estructural en estructuras de madera se ha hecho, hasta la fecha, con el método de esfuerzos admisibles. Todo el trabajo ilustrado en este libro se ha efectuado con este método tal como lo señalan los reglamentos y estándares de diseño actuales. Sin embargo, gran parte de los datos y muchas fórmulas de investigación que se emplean en la actualidad para el análisis de comportamientos estructurales, han sido generados a partir de consideraciones de respuestas de resistencia máxima (esfuerzo de ruptura) de los materiales de madera básicos o de los elementos producidos a partir de ellos.

Esta situación se está dirigiendo con lentitud hacia una aplicación más directa de los métodos de resistencia en todo el trabajo de diseño estructural. La investigación y el trabajo de diseño en los que hoy se aplican procedimientos asistidos por computadora (CAD), se ejecutan con igual facilidad con cualquiera de los dos métodos. A su debido tiempo, prevalecerán con toda seguridad los métodos más complejos y más precisos. Ya que los resultados de ensayo y los análisis estadísticos de riesgo están directamente relacionados con el método de la resistencia, es probable que el uso extensivo de las técnicas que se auxilian con el uso de la computadora conduzca al uso de los métodos de resistencia.

Mientras tanto, parece un poco más directo relacionar los problemas de diseño mismo con el mundo del método de esfuerzos de trabajo orientado a la carga de servicio o el método de esfuerzos admisibles. Para cualquiera de los dos métodos, las cargas de servicio deben determinarse en forma tan clara como sea posible; es decir, precisamente lo que se requiere que haga en particular la estructura. En el método de esfuerzos de trabajo, el siguiente paso es representar las respuestas de servicio de la estructura en términos de las condiciones del esfuerzo interno generado. Entonces, si es posible establecer límites de seguridad para estos esfuerzos (los esfuerzos admisibles), el comportamiento de las estructuras puede estar ligado de manera directa con la condición de servicio prevista.

Como una experiencia de aprendizaje, el procedimiento anterior ayuda para asociar las acciones de la estructura a las condiciones reales de carga. Esto ayuda a entender lo que está ocurriendo en la estructura, tanto en términos de esfuerzos como de deformaciones dimensionales asociadas con los esfuerzos. El manejo de las propiedades de la estructura (resistencia del

material, dimensiones de la sección transversal, etc.) puede apreciarse directamente en términos de sus modificaciones de la condición relativa de seguridad, en términos de esfuerzos o deformaciones reducidos.

Nuestra elección de usar el método de esfuerzos admisibles en este libro se basa en todas estas consideraciones. Además, estos métodos permiten análisis más simples y que el libro siga siendo conciso. Los entienden con mayor facilidad personas con instrucción limitada en matemáticas y trabajo de investigación de ingeniería; asimismo permiten usar muchos auxiliares de diseño disponibles y constituyen, en su mayoría, la base de los reglamentos codificados actuales.

## 2.3 DISEÑO POR RESISTENCIA

Ambos métodos básicos de diseño siguen dos pasos principales en sus procedimientos. El primero consiste en una evaluación y cuantificación de las condiciones de carga requeridas (llamadas *cargas de servicio*). En el método de esfuerzos admisibles, estas cargas se usan directamente, mientras que en el método de la resistencia se modifican multiplicándolas por un *factor de carga* para producir una carga de diseño llamada *carga factorizada*.

El segundo paso en el procedimiento de diseño, es evaluar la respuesta de la estructura al tipo de carga y, en especial, a la magnitud de la carga requerida determinada. En el método de esfuerzos admisibles, esta evaluación consiste en cierta forma de análisis de esfuerzos. En el método de la resistencia, la evaluación se hace para establecer la condición límite (*resistencia última*) para la estructura según el tipo de carga. Para responder a diferentes condiciones, esta resistencia limitante se multiplica por un *factor de resistencia* para usarse en el diseño.

### Cargas factorizadas

Las cargas que actúan sobre las estructuras provienen de diferentes fuentes; las primarias son la gravedad, el viento y los sismos. Para usarse en el análisis o en el trabajo de diseño, las cargas deben, primero, identificarse, medirse y cuantificarse de alguna manera y, luego, factorizarse (para el método de la resistencia). En la mayoría de las situaciones, también deben combinarse en todas las formas posibles que sean estadísticamente probables, lo que a menudo produce más de una condición de carga para el diseño.

El *Uniform Building Code* (Reglamento de Construcciones Uniformizado) requiere la consideración de las siguientes combinaciones como condiciones mínimas para cualquier estructura.

1. Carga muerta + carga viva de piso + carga viva de techo (o nieve).
2. Carga muerta + carga viva de piso + carga de viento (o sismo).

3. Carga muerta + carga viva de piso + carga de viento + carga de nieve/2.
4. Carga muerta + carga viva de piso + carga de nieve + carga de viento/2.
5. Carga muerta + carga viva de piso + carga de nieve + carga sísmica.

Esto no es todo para muchas estructuras, debido a problemas especiales. Por ejemplo, la estabilidad de un muro sometido a fuerza cortante es crítica con una combinación de carga muerta y carga lateral (viento o sismo). Las condiciones de esfuerzo a largo plazo en madera o los efectos de la deformación plástica por fatiga en el concreto son críticas con sólo carga muerta como una condición de carga permanente. Al final, debe prevalecer un buen juicio de diseño de ingeniería para concebir las combinaciones realmente necesarias.

Una sola combinación de carga prevalece para la consideración del efecto máximo sobre una estructura dada. Sin embargo, en estructuras complejas (armaduras, marcos de edificio resistentes a los momentos, etc.) los miembros individuales por separado se diseñan para diferentes combinaciones de carga crítica. Si bien la combinación crítica para estructuras simples algunas veces se percibe con facilidad, otras es necesario efectuar análisis completos para muchas combinaciones y luego comparar los resultados en detalle para evaluar las verdaderas condiciones de diseño.

Los factores para el método de resistencia se aplican individualmente a los diferentes tipos de carga (muerta, viva, viento, etc.). Esto contribuye a la complejidad, ya que también es posible hacerlos variar en combinaciones diferentes. En una estructura compleja e indeterminada, esto puede conducir a una montaña de cálculos para el análisis completo de todas las combinaciones.

## Factores de resistencia

La factorización (modificación) de las cargas es una forma de ajuste para el control de la seguridad en el diseño por resistencia. El segundo ajuste básico está en modificar la resistencia cuantificada de la estructura. Esto conduce a determinar primero su resistencia en algunos términos (resistencia a la compresión, capacidad de momento, límite de pandeo, etc.), y luego reducirla en algún porcentaje. La reducción (el *factor de resistencia*) se basa en diferentes consideraciones, incluyendo el interés por la confiabilidad de las teorías, el control de calidad en la producción, la capacidad para predecir comportamientos con precisión, etcétera.

Normalmente, el diseño por resistencia consiste en comparar la carga factorizada (la carga *incrementada* en cierto porcentaje) con la resistencia factorizada (la resistencia *reducida* en cierto porcentaje) de la estructura sometida a cargas. Así, aunque los factores de carga puedan parecer bajos en algunos casos, la aplicación de los factores de resistencia conducen hasta cierto punto a una magnificación del nivel de porcentaje de seguridad.

