

# 3

---

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL

---

Una parte fundamental de todo el trabajo de diseño estructural es la necesidad de entender y evaluar el comportamiento físico de la estructura al resistir las cargas que debe soportar. Generalmente, debe hacerse cierto trabajo matemático para apoyar este análisis. En este capítulo se presentan algunos de los fundamentos de mecánica aplicada que se utilizan en este trabajo. Finalmente, lo que se debe realizar es el trabajo de diseño; pero en ese trabajo deben considerarse los comportamientos estructurales simples descritos aquí.

### 3.1 GENERALIDADES

Como un prelude al estudio de la resistencia y el comportamiento de la madera estructural sometida a una carga, es necesario establecer claramente el concepto de *esfuerzo unitario*. En este libro se encontrarán muchos términos técnicos con los cuales se puede estar familiarizado o no, dependiendo del alcance de la experiencia del lector en el trabajo estructural. Para aquellos que han tenido alguna preparación en mecánica estructural (estática y resistencia de materiales), el material de este capítulo servirá como un repaso. De cualquier modo, es importante que se entiendan con precisión estos términos y los conceptos a los cuales se aplican.

### 3.2 FUERZAS Y CARGAS

En mecánica, una *fuerza* se define como aquello que tiende a modificar el estado de reposo o movimiento de un cuerpo. Se considera como empujar o jalar un cuerpo en un punto definido y en una dirección definida. Una fuerza así tiende a impartir movimiento a un cuerpo en reposo, pero esta tendencia puede ser neutralizada por la acción de otra fuerza o fuerzas. En la construcción de edificios son muy importantes las fuerzas en equilibrio; es decir, los cuerpos en reposo. Las unidades de fuerza son las libras, los kilogramos, las toneladas, etcétera, y en la práctica de ingeniería se usa ampliamente el término *kip* (kilolibra), que representa 1000 libras. El peso de un cuerpo es una fuerza vertical debida a la gravedad.

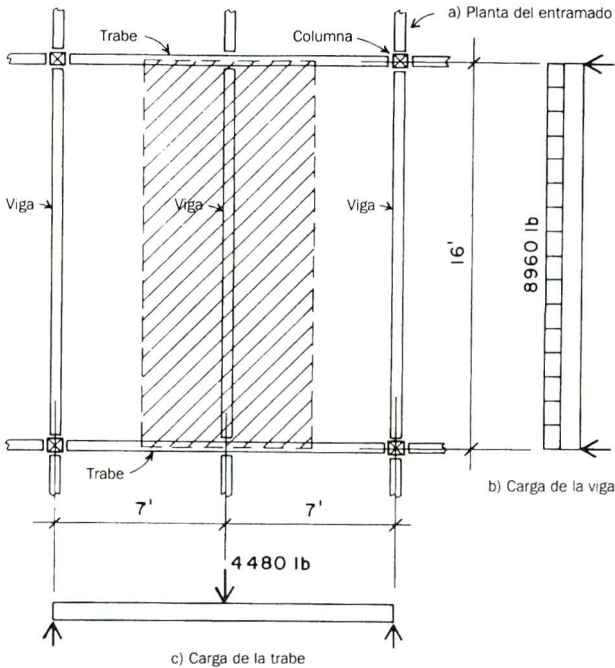
Una *carga* es la magnitud de una presión o tensión debida a la colocación de un cuerpo sobre otro. Los dos tipos más comunes en problemas de ingeniería, son las *cargas concentradas* y *cargas uniformemente distribuidas*.

Una carga uniformemente distribuida es una carga que tiene una magnitud uniforme por unidad de longitud y que se ejerce sobre una parte de un elemento o sobre su longitud total. Una vigueta que soporta una cubierta de piso es un ejemplo de elemento que soporta una carga uniformemente distribuida. Hay que hacer notar que el peso propio de la vigueta constituye una carga uniformemente distribuida.

Una carga concentrada es aquella que se aplica sobre una porción tan pequeña de la longitud de una viga o trabe, que se supone actúa en un punto. Una trabe de un edificio recibe cargas concentradas en los puntos en los cuales las vigas del piso se enmarcan en ella.

Se aplica el término de *carga muerta* al peso de los materiales de construcción; es decir, al peso de las vigas, las trabes, el piso, los muros divisorios, etcétera. La *carga viva* representa la carga probable debida a la ocupación de un edificio e incluye el peso de las personas, el mobiliario, el equipo, los materiales almacenados y la nieve. La *carga total* es la suma de todas las cargas muertas y vivas.

En la figura 3.1a se representa el entramado de piso de una crujía en un edificio cuya estructura es de madera. Las columnas están separadas 14 pies de centro a centro en una dirección y 16 pies en la otra. Las trabes y vigas se colocan en la menor dirección y las vigas en la mayor. Cada trabe soporta una viga en el centro de su claro de 14 pies. Las vigas, a su vez, soportan los tablones del piso (que no aparecen en el dibujo) y que van paralelos a las trabes. Supóngase que la carga total sobre el piso, viva y muerta, es de 80 libras por pie cuadrado ( $\text{lb}/\text{pie}^2$ ). El área de piso soportada por la viga central en esta crujía se señala mediante el área sombreada en la figura; es igual a  $7 \times 16 = 112 \text{ pie}^2$ . Por lo tanto, la carga total uniformemente distribuida es  $112 \times 80 = 8\,960 \text{ lb}$ . La figura 3.1b es el diagrama convencional que representa esta viga y su carga. En este libro se usa  $W$  para representar la carga total uniformemente distribuida



**Figura 3.1** Determinación de las cargas de los miembros en un sistema entramado.

y  $w$  para la carga uniformemente distribuida por pie lineal. En este caso,  $W = 8\,960$  lb y  $w = 8\,960 \div 16 = 560$  lb por pie lineal (lb/pie).

La carga de esta viga es simétrica con respecto al centro de su claro (figura 3.1b) y, en consecuencia, ejerce una fuerza de  $8\,960 \div 2 = 4\,480$  lb en cada extremo, sobre las trabes. Esta fuerza se convierte en una carga concentrada sobre las trabes como se indica en la figura 3.1c. Si se tratara de un problema de diseño de las trabes, tendríamos que tomar en cuenta las cargas transmitidas por las vigas en las crujeas adyacentes. Si se supone que las crujeas adyacentes tienen la misma disposición y longitudes de claro que éste, la carga concentrada aplicada en la mitad del claro de las trabes sería  $4\,480 \times 2 = 8\,960$  libras.

### 3.3 ESFUERZO DIRECTO

Un *esfuerzo* en un cuerpo es una resistencia interna a una fuerza externa. Cuando la fuerza externa actúa a lo largo del eje del cuerpo, se le conoce como *fuerza axial* o *carga axial*. En la figura 3.2, el polín de madera  $B$  soporta una carga axial causada por el peso  $P$ . La carga ejerce una fuerza de compre-

sión sobre el polín, con tendencia a acortarlo; esta tendencia la resiste el esfuerzo de compresión generado en el polín. Se conoce como *esfuerzo directo* al esfuerzo producido en el polín bajo esta condición de carga axial.

Una característica del esfuerzo directo es que se supone que la resistencia interna está uniformemente distribuida sobre el área transversal del cuerpo sujeto a esfuerzo. Así, si  $P$  en la figura 3.2 es igual a 6 400 lb y  $B$  es un polín de  $6 \times 6$  (área efectiva = 30.25 pulg<sup>2</sup>), cada pulgada cuadrada de la sección transversal del polín está sujeta a un esfuerzo de  $6\,400 \div 30.25 = 212$  libras por pulgada cuadrada (lb/pulg<sup>2</sup>). A este esfuerzo por unidad de área se le conoce como *esfuerzo unitario* para diferenciarlo de la fuerza interna de 6 400 lb. Si se denomina  $P$  a la carga o fuerza externa,  $A$  al área de la sección transversal y  $f$  al esfuerzo unitario, esta relación fundamental que gobierna al esfuerzo directo se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{P}{A} \quad \text{o} \quad P = fA \quad \text{o} \quad A = \frac{P}{f}$$

Al usar esta ecuación, recuérdense las dos suposiciones sobre las cuales se basa: la carga es axial y los esfuerzos están distribuidos uniformemente sobre la sección transversal. Obsérvese también que si se conocen dos de las cantidades, se encuentra la tercera.

### 3.4 TIPOS DE ESFUERZOS

Los tres tipos básicos de esfuerzos que son de interés principal son *compresión*, *tensión* y *cortante*. Como se observó en la sección 3.3, el esfuerzo de compresión es el que se produce cuando una fuerza tiende a comprimir o aplastar

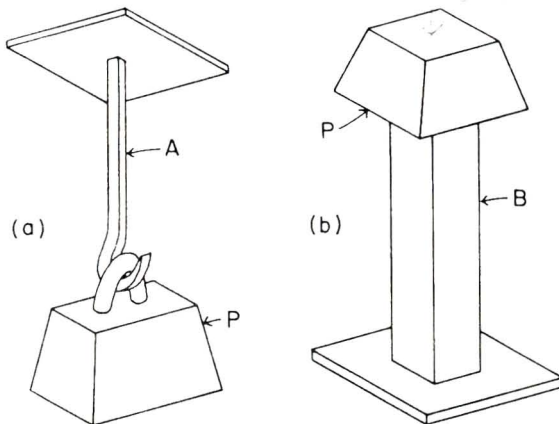


Figura 3.2 Esfuerzo directo.



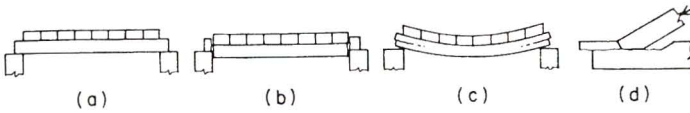


Figura 3.3 Generación del esfuerzo cortante.

un miembro. El esfuerzo de 212 lb/pulg<sup>2</sup> que se encontró en esa sección es un *esfuerzo de compresión*.

Un *esfuerzo de tensión* es el esfuerzo que se produce cuando una fuerza tiende a estirar o alargar un miembro (figura 3.1a). La cuerda inferior y ciertas almas de miembros de armaduras y cables atirantados (capítulo 12) trabajan a tensión. Si se conoce la fuerza total de tensión axial (esfuerzo total) en un miembro, así como el área de su sección transversal, el esfuerzo unitario de tensión se encuentra a partir de la fórmula básica de esfuerzo directo  $f = P/A$ .

Se produce un *esfuerzo cortante* cuando dos fuerzas iguales, paralelas y de sentido contrario tienden a hacer resbalar, una sobre otra, las superficies contiguas de un miembro. En la figura 3.3a se representa una viga con una carga uniformemente distribuida. Existe una tendencia en la viga a fallar colapsándose entre los apoyos, como se indica en la figura 3.3b. Éste es un ejemplo de cortante vertical. En la figura 3.3c se muestra, en forma exagerada, la flexión de una viga y la falla de partes de la viga por deslizamiento horizontal. En la figura 3.3d se ilustra la tendencia de la cuerda inferior de una armadura de techo a fallar por cortante debido al empuje de la cuerda superior en un nudo extremo. Las dos figuras 3.3c y d son ejemplos de *cortante horizontal*. Se demuestra posteriormente que las fallas por cortante en las vigas de madera se deben al esfuerzo cortante horizontal, no al vertical. Esto es verdad debido a que la resistencia al esfuerzo cortante de la madera es mucho menor en el sentido paralelo a la veta que en el transversal a ésta. En el capítulo 7 se explica el método para determinar los esfuerzos cortantes unitarios máximos horizontales en vigas.

Además del cortante, se generan *esfuerzos flexionantes* (tanto de compresión como de tensión) en las vigas sujetas a carga. En el capítulo 7 se estudia el esfuerzo flexionante de control, conocido como el *esfuerzo de la fibra extrema*.

### 3.5 DEFORMACIÓN

Siempre que un cuerpo está sometido a una fuerza, hay un cambio en su tamaño o forma; a este cambio se le llama *deformación*. Sin importar la magnitud de la fuerza, siempre tiene lugar una deformación, aunque a menudo es tan pequeña que su medición es difícil, aun con los instrumentos más sensibles. Cuando las fuerzas axiales son de compresión y de tensión, las deformaciones son acortamientos y alargamientos, respectivamente. Cuando una fuerza ac-

túa sobre un miembro flexionándolo (como lo hacen las cargas en las vigas), la deformación se llama *flecha*. En el capítulo 7 se estudia el cálculo de la flecha en vigas de madera sujetas a diferentes condiciones de carga.

### 3.6 LÍMITE ELÁSTICO

La práctica actual de diseño para los miembros de madera estructural se basa en la teoría elástica, que establece que las *deformaciones son directamente proporcionales a los esfuerzos*. En otras palabras, si una fuerza aplicada (medida según su esfuerzo unitario resultante) produce una cierta deformación, el doble de esta fuerza producirá el doble de la cantidad de deformación. Esta relación entre esfuerzo y deformación se mantiene sólo hasta cierto límite, después del cual la deformación comienza a aumentar en un grado mayor que los incrementos de la carga aplicada. El esfuerzo unitario para el cual esto ocurre se conoce como *límite elástico* o *límite de proporcionalidad* del material.

*Elasticidad* es la propiedad de un material que le permite recuperar su tamaño y forma originales cuando se suprime la carga bajo la cual estaba sometido. Sin embargo, esto ocurre *solamente cuando el esfuerzo unitario no excede el límite elástico*. Más allá del límite elástico se produce una *deformación permanente* en el miembro. Los esfuerzos unitarios admisibles que se usan en el diseño de miembros de madera estructural, se establecen de modo que no se sobrepase el límite elástico o proporcional del material sometido a cargas de servicio.

### 3.7 ESFUERZO DE RUPTURA O RESISTENCIA MÁXIMA

El *esfuerzo de ruptura* de un material se define como el esfuerzo unitario que se presenta en la ruptura o justo antes de ésta. Algunos materiales estructurales poseen considerable resistencia de reserva entre el límite elástico y el esfuerzo de ruptura, pero esta resistencia “inelástica” no se considera directamente en la teoría elástica del diseño estructural.

Obsérvese que las propiedades de resistencia de las diferentes especies de madera no están tan claramente definidas, como en el caso de otros materiales de construcción, como el acero estructural. Las pruebas con muestras de la misma especie y tamaño, y en las mismas condiciones, pueden arrojar una variación considerable en los valores de resistencia. Por supuesto que se toma en cuenta esta inconstancia de los resultados de los ensayos cuando se establecen esfuerzos admisibles (valores de diseño) para las diferentes especies y clases de madera estructural.

### 3.8 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El *módulo de elasticidad* de un material es la medida de su *rigidez*. Una probeta de acero sufre cierta deformación cuando se le somete a una carga dada, pero una muestra de madera de las mismas dimensiones, sometida a la misma carga, probablemente se deforme 15 a 20 veces más. Se dice que el acero es *más rígido* que la madera. Se llama módulo de elasticidad del material, a la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación unitaria, siempre que el esfuerzo unitario no exceda el límite elástico del material. Se denota mediante el símbolo  $E$  y se expresa en lb/pulg<sup>2</sup>. Para el acero estructural  $E = 29\,000\,000$  lb/pulg<sup>2</sup> (200 GPa), y para la madera, según la especie y el tipo, varía de un poco menos de 1 000 000 lb/pulg<sup>2</sup> a cerca de 1 900 000 lb/pulg<sup>2</sup> (7 a 13 GPa). El módulo de elasticidad de la madera estructural se usa para calcular las flechas en las vigas.

### 3.9 VALORES ADMISIBLES PARA EL DISEÑO

Un *esfuerzo unitario admisible* es el esfuerzo que se usa en los cálculos de diseño y representa el esfuerzo unitario máximo de un tipo especial considerado aceptable en un miembro estructural sujeto a cargas. Algunas veces los esfuerzos unitarios admisibles se conocen como *esfuerzos de trabajo* y se les denominó *valores de diseño* en la edición de 1991 del *National Design Specification for Wood Construction* publicada por la *National Forest Products Association* (referencia 1); actualmente se le denomina la NDS. Los procedimientos para establecer esfuerzos unitarios admisibles para tensión, compresión, cortante y flexión, son diferentes para distintos materiales y se señalan en las especificaciones establecidas por la *American Society for Testing and Materials*. En el capítulo 4 se estudian los esfuerzos unitarios admisibles para la madera estructural.

