

Estructuras Para Arquitectos

Mario Salvadori y Robert Heller

3ª EDICION



KLICZKOWSKI PUBLISHER
ASPPAN CP67

Capítulo Cinco

Estados básicos de tensión

5.1 Tracción simple

Las estructuras se deforman cuando se las somete a la acción de cargas. Aunque rara vez estas deformaciones pueden apreciarse a simple vista, las tensiones correspondientes tienen valores mensurables. Las distribuciones de tensión pueden ser muy complejas: con todo, cada una consiste a lo sumo en sólo tres estados básicos de tensión: tracción, compresión y corte.

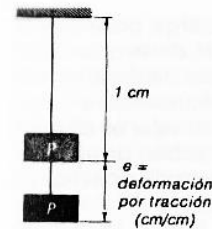
Tracción es el estado de tensión en el cual las partículas del material tienden a separarse. El peso del ascensor tiende a separar las partículas del cable de acero usado para el ascenso o descenso de aquél (véase Fig. 4.1). Bajo la acción del peso, los cables se alargan: el alargamiento es típico de la tracción. El de una *longitud unitaria* de cable se denomina *alargamiento específico por tracción* (Fig. 5.1).

Con tal que las tensiones no sobrepasen el régimen de elasticidad (véase Sección 3.1), el alargamiento del cable depende sólo de su sección transversal, de su longitud y de la magnitud de la carga. Cuanto mayor sea el diámetro del cable, tanto menor será el alargamiento unitario; el alargamiento es proporcional a la carga por unidad de área de la sección del cable, o a la *tensión de tracción* del cable (Fig. 5.2). La relación entre la tensión y la deformación por tracción es una característica del material, denominada su *módulo de elasticidad* a la tracción (véase Sección 3.2).

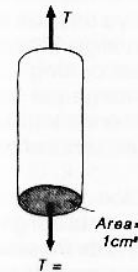
Para una deformación dada, el alargamiento del cable es proporcional a su longitud: si el cable se alarga 6 milímetros cuando el ascensor se encuentra en el piso superior de un edificio de ocho pisos, se alargará 48 milímetros cuando el ascensor se encuentre en el piso bajo (Fig. 5.3).

Ciertos materiales, tales como el hormigón, se rompen fácilmente por tracción; otros, como el acero, por ejemplo, son más resistentes. Un cable de acero de alta resistencia, de sección igual a un centímetro cuadrado (aproximadamente 1,2 cm de diámetro) puede resistir sin peligro una carga de 7.000 kilogramos, y se romperá sólo bajo la acción de una carga de 14.000 kilogramos. Como el peso unitario del acero es aproximadamente de 7,5 gramos por centímetro cúbico, este cable podría colgar con una longitud de 8.500 metros sin romperse. Un cable de aleación de aluminio, con igual resistencia a la tracción que el acero y un peso unitario igual a la tercera parte del de este material, podría tener una longitud igual al triple de aquélla, es decir, podría colgar unos 56 kilómetros. Como tendría tres veces la longitud del cable de acero, y como el aluminio se estira tres veces más que el acero (véase Sección 3.2), el cable de aluminio se alargaría nueve veces más que el cable de acero.

El alargamiento no es la única deformación que acompaña a la tracción. La

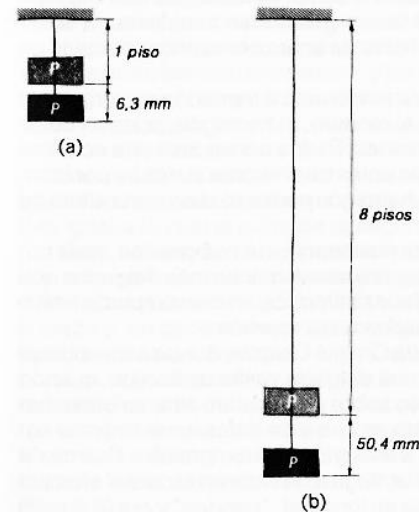


5.1 Alargamiento específico por tracción.



Tensión de tracción

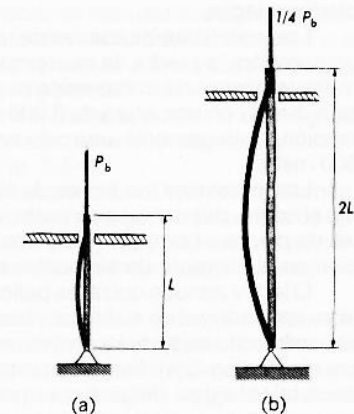
5.2 Tensión de tracción.



5.3 Alargamiento por tracción.



5.4 Pandeo por compresión.



5.5 Carga de pandeo en función de la longitud.

medición cuidadosa del cable antes y después de aplicar la carga, pone de manifiesto que con el aumento de ésta, y el alargamiento de aquél, disminuye el diámetro. El físico francés Poisson descubrió este cambio lateral de dimensión a principios del siglo pasado. La relación entre deformación transversal y longitudinal se denomina *coeficiente de Poisson*; para el acero, su valor es de alrededor de un tercio. El cable de 8.500 metros sometido a la acción de su peso propio, sufriría por acción del fenómeno de Poisson una disminución de diámetro muy pequeña, alrededor de dos centésimas de milímetro.

5.2 Compresión simple

Compresión es el estado de tensión en el cual las partículas del material se aprietan entre sí [ver Fig. 3.7 (b)]. Una columna sobre la cual apoya un peso se halla sometida a compresión: su altura disminuye por efecto de la carga. El acortamiento es típico de la compresión. El acortamiento de una unidad de longitud, o *deformación específica por compresión*, es proporcional a la carga por unidad de área de la columna, o *tensión de compresión*. La relación entre tensión de compresión y deformación por compresión es el *módulo de elasticidad* por compresión (véase Sección 3.2).

Las deformaciones provocadas por compresión son de sentido contrario a las producidas por tracción: hay un acortamiento en la dirección de la carga y un ensanchamiento perpendicular a esa dirección, debido al efecto de Poisson. Así, pues, teóricamente podría fabricarse una columna de acero, capaz de soportar su propio peso, de una altura de 8,5 kilómetros, y se acortaría tanto como se alargaría un cable de igual longitud.

Los elementos estructurales sometidos a compresión simple son muy comunes, pues, en última instancia, todas las cargas deben transferirse a la tierra: aparecen tanto en los modernos edificios de acero como en los templos de piedra griegos.

Los materiales incapaces de resistir tracción son a menudo resistentes a la compresión: la piedra, la mampostería, el mortero, el hormigón, pueden desarrollar tensiones de compresión muy elevadas. Podría construirse una columna de mármol con una altura de 3.000 metros antes de provocar su rotura por compresión; análogamente, una columna de hormigón podría alcanzar una altura de 600 metros.

Los materiales modernos de elevada resistencia a la compresión, tales como el acero, pueden usarse para construir columnas mucho más delgadas que las de piedra u hormigón, pero esa delgadez introduce un nuevo tipo de limitación en el proyecto de elementos sometidos a compresión.

El lector conoce quizá las películas de Charlie Chaplin, donde a menudo se le ve apoyado sobre su famoso bastón, una delgada varilla de bambú: cuando el hombrecito se apoya con todo su peso sobre ese bastón, éste se curva hacia afuera (Fig. 5.4). Este comportamiento es típico de todos los elementos estructurales largos, *delgados*, sometidos a esfuerzos de compresión. Cuando la carga de compresión aumenta lentamente, llega a un valor en el cual el elemento delgado, en lugar de limitarse a acortar su longitud, "pandea" y por lo común se rompe. Este valor peligroso se denomina *carga de pandeo* del elemento. Se

convierte en un factor básico del diseño cuando la resistencia de los materiales a la compresión es suficientemente elevada para permitir el uso de secciones pequeñas y, por tanto, de elementos estructurales delgados.

El fenómeno de pandeo puede apreciarse en forma útil desde otro punto de vista. Una columna delgada se acorta cuando se la comprime por medio de un peso aplicado en su parte superior; al hacerlo, la posición del peso se desplaza hacia abajo. La tendencia de todos los pesos a desplazarse hacia abajo es una ley básica de la naturaleza. Según otra ley básica de la naturaleza, cuando es posible elegir entre distintas trayectorias, todo fenómeno físico seguirá el camino "más fácil". Frente a la posibilidad de curvarse o acortarse, resulta más fácil a la columna acortarse ante cargas relativamente pequeñas y curvarse ante cargas relativamente grandes. En otras palabras, cuando la carga alcanza su valor de "pandeo", resulta a la columna más fácil bajar el punto de aplicación de la carga curvándose, y no acortándose.

Debe comprenderse que desde el punto de vista teórico, la columna se curvará aun cuando sea perfectamente homogénea y aunque la carga se halle perfectamente centrada. En la práctica, toda pequeña imperfección en el centro de la carga o toda falla del material, facilitan el pandeo.

El peligro de pandeo no se vincula a la sollicitación del material por encima de una tensión relativamente admisible, ni a su fluencia en estado de sollicitación plástica. El valor de la carga de compresión por el cual una columna delgada pandea puede producir tensiones inferiores a los valores seguros determinados sobre la base de la resistencia del material a la compresión. En cierto sentido, el pandeo es similar a la resonancia: si una carga inferior a la admisible oscila en resonancia con la estructura, ésta flexiona más y más hasta romperse; si una carga de compresión inferior a la admisible se halla cerca del valor de pandeo, la columna se curva más y más hasta romperse.

La carga de pandeo de una columna depende de su material, su longitud, la forma de su sección transversal, y las restricciones impuestas a sus extremos. La carga de pandeo es proporcional al módulo de elasticidad del material: una columna de acero tiene una resistencia al pandeo igual a tres veces la de una columna idéntica, pero de aluminio. La carga de pandeo es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de la columna: una columna de longitud igual a dos veces la de otra y con idéntica sección, tiene una resistencia al pandeo igual a la cuarta parte de la segunda (Fig. 5.5).

Para ser resistentes al pandeo y aun así eficientes, los elementos sometidos a compresión no deben ser delgados y, sin embargo, emplear una cantidad limitada de material. El perfil doble T con alma delgada y alas anchas, el perfil cajón y, en general, las secciones que presentan la mayor parte del material lejos del centro, se adaptan a esta aplicación.

La carga de pandeo aumenta con las restricciones impuestas a los extremos del elemento comprimido. Una columna con un extremo libre pandea como la mitad de una columna de longitud igual al doble de la primera, apoyada en ambos extremos; por consiguiente, su carga de pandeo es igual a la cuarta parte de la carga correspondiente a la misma columna con apoyo simple (Fig. 5.6).

5.3 Corte simple

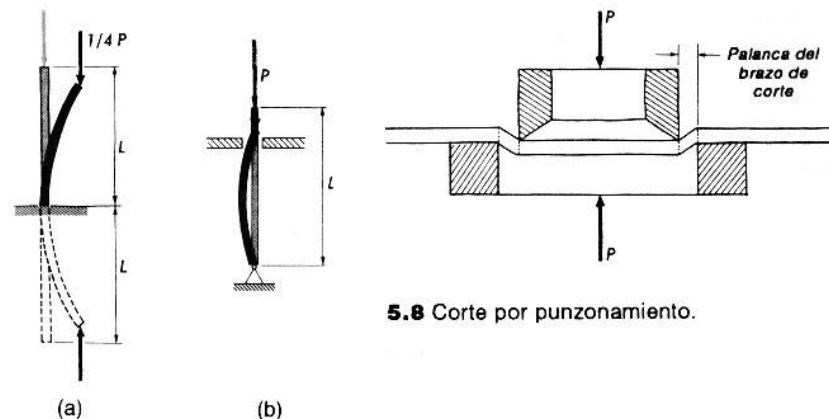
Corte es el estado de tensión en el cual las partículas del material se deslizan con movimiento relativo entre unas y otras [ver Fig. 3.7 (c)]. En uniones remachadas, los remaches tienden a cortarse (Fig. 5.7). Una perforadora emplea el corte para producir agujeros en la hoja de papel (Fig. 5.8). El peso de una viga en voladizo, empotrada en una pared, tiende a cortar la viga por su "raíz" (Fig. 5.9).

El corte introduce deformaciones capaces de cambiar la forma de un elemento rectangular, convirtiéndolo en un paralelogramo inclinado (Figs. 5.7, 5.8, 5.9). La *distorsión* se mide por el ángulo de inclinación del rectángulo deformado (Fig. 5.9) y no por una variación de longitud, tal como sucede en el caso de la tensión o la compresión.

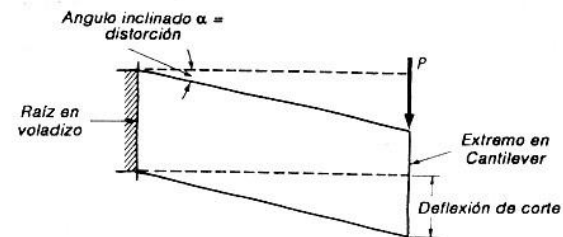
Las fuerzas que producen esta deformación actúan sobre los planos en los cuales se produce el deslizamiento; cuando se las mide sobre una unidad de superficie, se denomina *tensiones de corte* (Fig. 5.10). En el intervalo de comportamiento elástico, la deformación es proporcional a la fuerza y, por consiguiente, la distorsión es proporcional a la tensión de corte. La relación entre tensión y distorsión se denomina *módulo de elasticidad por corte*. Es una característica del material y su valor es aproximadamente la mitad del módulo por tracción o compresión: el acero, por ejemplo, tiene un módulo por corte de 810.000 kilogramos por centímetro cuadrado.

Una característica fundamental del corte es producir deslizamiento no en un solo plano, sino en *dos planos*, siempre perpendiculares entre sí. Si se aísla un elemento rectangular perteneciente a la raíz de una viga en voladizo, se ve que debido a la acción del peso propio actúan fuerzas de corte verticales sobre sus caras verticales (Fig. 5.11). Estas fuerzas tienden también a hacer girar el rectángulo, tal como el empuje y el tirón de los brazos del conductor tienden a hacer girar la dirección de un automóvil. Si el elemento aislado ha de hallarse en equilibrio rotatorio (véase Sección 4.2), tal como se halla en la viga, deben actuar sobre los lados horizontales del rectángulo dos fuerzas de igual magnitud y sentidos contrarios, de modo de contrarrestar la acción de giro de las fuerzas verticales (Fig. 5.12). Las fuerzas horizontales necesarias para mantener el equilibrio producen una tendencia al corte en planos horizontales. Así, pues, el corte en planos verticales implica, *necesariamente*, corte en planos horizontales y *a la inversa*. Además, para mantener el equilibrio rotatorio (Fig. 5.12) las tensiones de corte vertical y horizontal deben tener magnitudes.

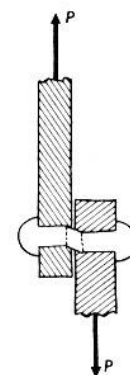
La existencia de las fuerzas horizontales de corte puede deducirse también analizando la deformación del elemento rectangular. La inclinación del elemento produce un alargamiento en una de sus diagonales y un acortamiento en la otra. Como al alargamiento acompaña siempre una tracción y al acortamiento una compresión, la misma deformación podría obtenerse comprimiendo el elemento en el plano de la diagonal corta y sometiendo a tracción en el de la diagonal larga (Fig. 5.13). Así, pues, el corte puede considerarse como una combinación de tracción y compresión normales entre sí, en direcciones que forman ángulos de 45 grados con la dirección del corte. La consideración del corte como efecto de compresión y tracción reviste gran importancia práctica. Un ma-



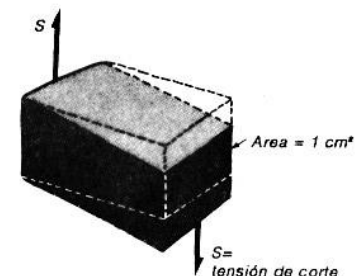
5.6 Influencia de los empotramientos sobre la carga de pandeo.



5.9 Deformación de corte de una viga en voladizo.



5.7 Corte en remaches.



5.10 Tensión de corte.

material de baja resistencia a la tracción no puede ser resistente al corte, pues se romperá por tracción en una dirección inclinada a 45 grados respecto de la de corte. Análogamente, una hoja *delgada* no puede tener resistencia al corte, pues pandeará en la dirección del esfuerzo de compresión equivalente.

La tendencia al deslizamiento, característica del corte, se encuentra en elementos estructurales torsionados por acción de las cargas aplicadas. Considérese una barra de sección circular sobre cuya superficie se ha dibujado un cuadrilado de circunferencias y rectas [Fig. 5.14 (a)]. Si se torsiona esta barra de modo que una sección extrema gire respecto de la otra, los cuadrados dibujados sobre su superficie se transforman en cuadriláteros inclinados [Fig. 5.14 (b)]. Como el mismo tipo de deformación puede deberse sólo al mismo tipo de esfuerzo, la torsión debe producir distorsiones y, por lo tanto, tensiones de corte en la sección de la barra; para mantener el equilibrio, debe producir también tensiones de corte en los planos perpendiculares a la sección. Este estado de tensión, aunque de corte puro, se denomina *torsión*.

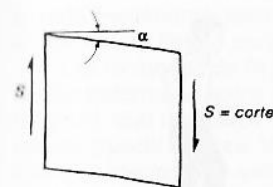
Como la torsión desarrolla tensiones de corte, debe ser equivalente a tracción y compresión perpendiculares entre sí. El ama de casa que retuerce el trapo mojado antes de colgarlo, comprueba a diario la veracidad de este aserto: la compresión inducida por torsión expulsa el agua del trapo.

Se produce torsión en un elemento estructural cada vez que las cargas aplicadas tienden a torcerlo. Así, por ejemplo, las cargas excéntricas transmitidas por una viga de piso a una pechina, provocan esfuerzos de torsión en esta última (Fig. 5.15). La rigidez a la torsión se relaciona con el módulo por corte. Las secciones más eficaces contra torsión son las huecas, que dan a las tensiones de corte el máximo brazo de palanca posible respecto del eje de la barra.

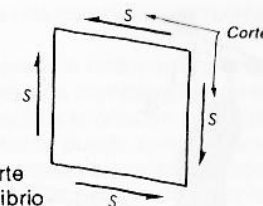
5.4 Flexión pura

Según se dijo en la Sección 5.1, todos los estados complejos de tensión son combinaciones de sólo tres estados básicos: tracción, compresión y corte. La compresión y tracción en distintas fibras del mismo elemento estructural es quizá la más común de estas combinaciones: se denomina *flexión* y desempeña un papel fundamental en la mayoría de los sistemas estructurales.

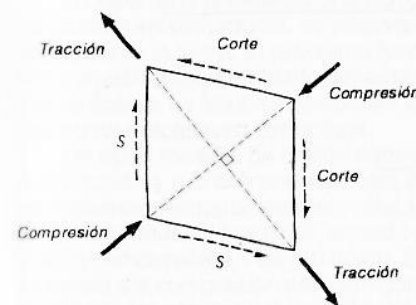
Considérese un tablón apoyado en dos piedras, con longitudes iguales en voladizo (Fig. 5.16). Si dos muchachos de igual peso se sitúan en ambos extremos del tablón, dichos extremos se desplazarán hacia abajo, mientras la parte comprendida entre las dos piedras se curvará hacia arriba: la curva adoptada por el tablón entre las dos piedras es un arco de circunferencia. Al trazar líneas verticales espaciadas sobre un lado del tablón [Fig. 5.17 (a)] y notando que al doblar el tablón estas líneas se abren en la parte superior y se agrupan en la inferior [Fig. 5.17 (b)], vemos que las fibras superiores del tablón mantienen su largo original. Pero el tablón tiene espesor, y todas sus fibras deben curvarse. Por lo tanto la flexión induce tracción en las fibras superiores y compresión en las inferiores. Además la tracción y la compresión aumentan en la proporción directa a la distancia de las fibras a la fibra *neutra* o media. (Este comportamiento, cuidadosamente descrito en el siglo XVI por Leonardo Da Vinci, fue re-descubierto sólo en el siglo XIX por el físico francés Navier). El estado en el cual es-



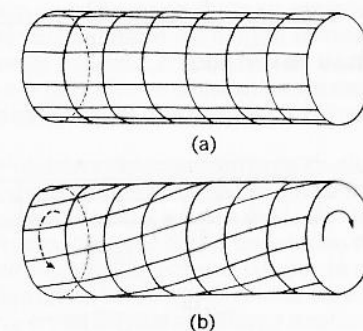
5.11 Corte vertical.



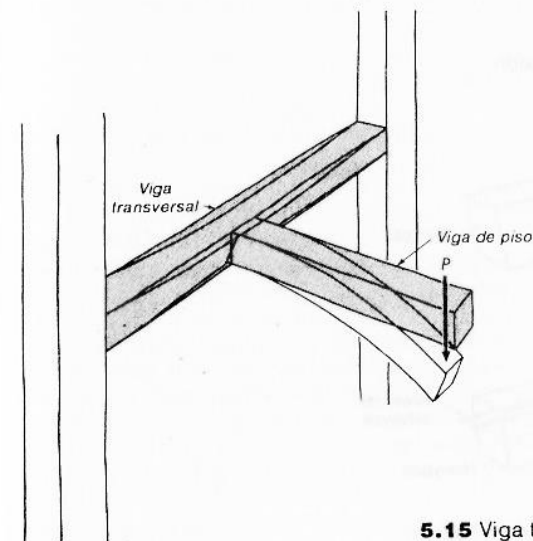
5.12 Esfuerzos de corte requeridos por el equilibrio rotatorio.



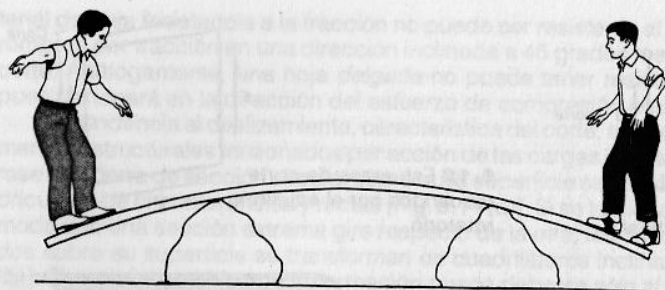
5.13 Equivalencia entre corte y tracción más compresión.



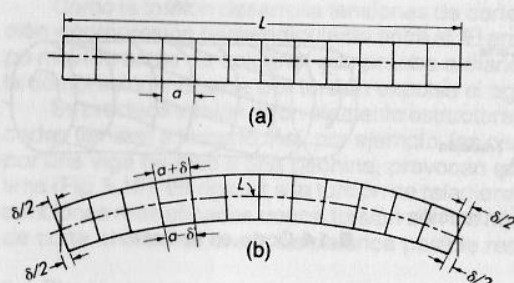
5.14 Corte en la torsión.



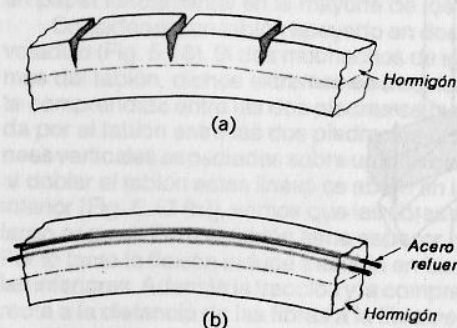
5.15 Viga transversal sometida a torsión.



5.16 Flexión pura.



5.17 Deformaciones en la flexión.



5.18 Hormigón armado sometido a flexión.

la varía linealmente desde una tracción máxima hasta una compresión máxima, se denomina *flexión pura*.

Las tensiones de flexión se curvan siguiendo el arco de circunferencia del tablón deformado, pero esta deformación es tan pequeña comparada con su longitud, que los pesos verticales de los dos muchachos producen prácticamente, puede decirse, tensiones horizontales. La *flexión* puede considerarse como un mecanismo estructural capaz de canalizar cargas *verticales* en dirección *horizontal* o, dicho en forma más general, en dirección perpendicular a las cargas. Los pesos de los muchachos se transmiten horizontalmente a las dos piedras que sirven de apoyo al tablón.

En vista de la resistencia a la compresión de la mayor parte de los materiales usados en estructuras, es relativamente fácil canalizar las cargas *verticalmente* hacia la tierra. El problema fundamental consiste, en cambio, en transferir cargas verticales *horizontalmente*, con el fin de salvar la distancia entre apoyos verticales. La flexión es entonces, como se ve, factor de importancia primordial como mecanismo estructural.

Un buen material de flexión debe tener resistencias prácticamente iguales a la tracción y a la compresión. Esto explica el predominio de la madera entre los materiales estructurales naturales, y el papel del acero, sin rival en las estructuras modernas. El hormigón armado es el único material con propiedades de flexión comparables a las del acero. En este material de factura humana, la resistencia a la compresión del hormigón se usa en las fibras comprimidas del elemento y la resistencia a la tracción del acero, en las fibras sometidas a tracción. Si el tablón a que nos referimos más arriba fuera de hormigón armado, tendríamos barras de refuerzo en la parte superior (Fig. 5.18).