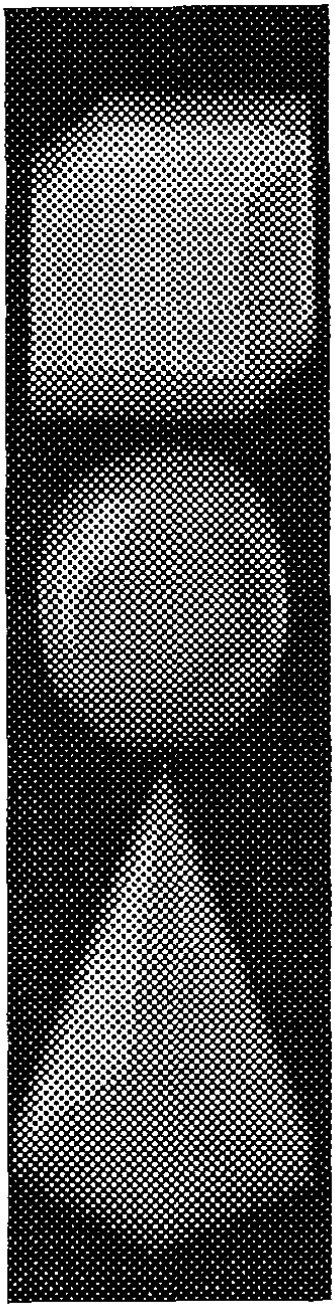
TEMA

36



ORG. Y PROY. DE FABRICACIÓN MECÁNICA

Desarrollo de los temas

Secciones prácticas en construcciones metálicas. Normativa vigente. Materiales. Esfuerzos. Métodos de cálculo. Criterios de selección. Características.

elaborado por
EL EQUIPO DE PROFESORES
DEL CENTRO DOCUMENTACIÓN

CEDE

GUIÓN - ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. SECCIONES PRÁCTICAS EN CONSTRUCCIONES METÁLICAS. CRITERIOS DE SELECCIÓN

3. NORMATIVA VIGENTE

4. MATERIALES

5. ESFUERZOS

5.1. Composición de los esfuerzos mecánicos
5.2. Principio de la superposición
5.3. Cálculo de esfuerzos
5.3.1. Módulos o coeficientes fundamentales
5.3.2. Tracción simple
5.3.2.1. Ecuaciones de deformaciones y de resistencia
5.3.3. Compresión simple
5.3.4. Cortadura simple
5.3.4.1. Ecuaciones de deformaciones y de resistencia
5.3.5. Flexión simple
5.3.5.1. Hipótesis fundamentales en la flexión
5.3.5.2. Ecuaciones de deformaciones y de resistencia
5.3.5.3. Esfuerzo cortante en la flexión
5.3.6. Torsión simple
5.3.7. Pandeo o flexión lateral
5.3.7.1. Fórmula de euler y tensiones críticas
5.3.7.2. Método de los coeficientes ω

BIBLIOGRAFÍA COMENTADA

AENOR **Normativa diversa (Código Técnico de edificación, Catálogo de aceros, Aceros para estructuras metálicas, etc.)**.

El organismo regulador AENOR recopila en diversos textos las normas UNE de aplicación en esta materia. Algunas de estas normas presentan total identidad con las normas europeas.

ARGÜELLES **La estructura metálica hoy**. Ed. Bellisco.

Este libro muestra los principales sistemas metálicos. En él se realiza una amplia descripción de los elementos constructivos y se desarrolla el cálculo de las estructuras.

McCORMAC **Diseño de estructuras metálicas**. Ed. Alfaomega.

Realiza un estudio muy profundo de las construcciones metálicas, incluido el análisis de elementos auxiliares tales como las uniones entre barras. No profundiza en la parte descriptiva de la materia tratada.

ORTIZ BERROCAL **Resistencia de materiales**. Ed. McGraw-Hill.

Es un libro de texto que trata con rigor todo tipo de esfuerzos mecánicos. Es muy conveniente si se quiere profundizar en el tema.

RODRÍGUEZ AVIAL **Estructuras metálicas**. Ed. Dossat.

Es un texto muy extenso en el que se analizan profundamente todas las estructuras empleadas en la industria. Su gran ventaja radica en que describe someramente todos los elementos que pueden formar parte de una construcción metálica. Su estudio desborda el nivel de conocimientos exigido para este tema.

RODRÍGUEZ AVIAL **Resistencia de materiales**. Ed. Dossat.

Este libro explica, con claridad y detalle, el dimensionado de sólidos sometidos a esfuerzos mecánicos.

ZIGNOLI **Construcciones Metálicas**. Ed. Dossat.

Es un extenso texto donde se aborda tanto la parte descriptiva como el cálculo de las estructuras metálicas.

El inconveniente de este libro, al igual que ocurre con los de otros autores indicados en esta bibliografía, es que, al no ser libros actuales, no es válida mucha de la normativa aplicada ni se enseña el cálculo de estructuras mediante programas informáticos.

1. INTRODUCCIÓN

El presente tema comienza con una definición de las secciones más habituales empleadas en las construcciones metálicas, justificando la aplicación concreta de cada una de ellas.

Una vez analizados también los materiales empleados, se realiza un estudio de los distintos tipos de esfuerzos a los que se encuentran sometidos estas secciones.

2. SECCIONES PRÁCTICAS EN CONSTRUCCIONES METÁLICAS. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Los sólidos empleados como elementos resistentes en construcciones metálicas presentan unas secciones normalizadas que han sido elegidas por cuestiones económicas y técnicas (resistencia, estabilidad, etc). Las más usuales son:

a) Perfil en doble T (fig. 1): es uno de los elementos de construcción más importantes ya que soportan elevados esfuerzos de flexión. Constan de un alma o nervio unido al centro de dos alas.

Pueden ser de dos tipos:

1) De alas estrechas.
2) De alas anchas.

Su principal aplicación reside en:

1) Puentes-grúa.
2) Estructuras metálicas de edificación: como correas en las armaduras de cubiertas, como viguetas de piso, como vigas principales apoyadas sobre las viguetas, etc.
3) Puentes: vigas principales y largueros.

Estos perfiles normalmente son excluidos para actuar como soportes aislados, excepto los de alas anchas, sobre todo cuando el pandeo está impedido en el eje y-y, en consecuencia solo permitido en el eje x-x.

b) Perfil en simple T (fig. 2): se distinguen dos tipos:

1) De ala estrecha: h = b.
2) De ala ancha: h < b.

siendo h la altura de la viga y b la longitud del ala.

Su aplicación fundamental es en la construcción de edificios, como elemento de armazón de ventanales y de claraboyas.

c) Perfil en ángulo o perfil L: se distinguen dos tipos: de lados iguales o desiguales (fig. 3). Suelen trabajar acoplados de dos en dos. En cada tamaño de perfil están normalizados tres espesores distintos, de forma que, si es posible, se elegirán los menores por cuestión de economía.

Su principal aplicación es como alas de una viga, como barras de cerchas, o como barras de relleno en las armaduras de celosía.

d) Perfil U: tiene la forma indicada en la figura 4. Como puede observarse, solo posee un eje de simetría, por lo que no suele trabajar sola, sino unida a otro perfil U, con el fin de conseguir una estructura con dos ejes de simetría.

Su principal función es la construcción de soportes sometidos a esfuerzos de compresión o cordones de vigas de celosía.

e) Perfil en S (fig. 5): tienen una aplicación muy limitada en la construcción, si acaso como correas en estructuras.

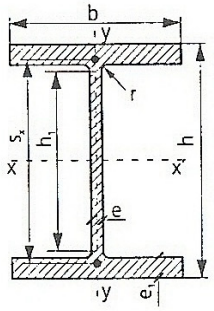


Figura 1

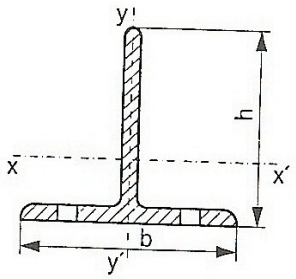


Figura 2

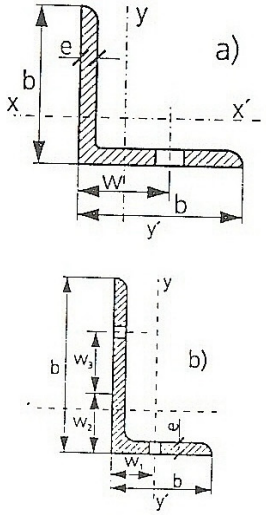


Figura 3

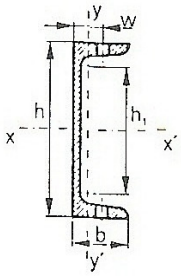


Figura 4

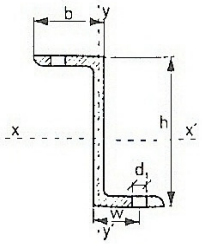


Figura 5

f) Perfil Zorés (fig. 6): de empleo exclusivo en los tableros de puente.

g) Otros tipos de perfiles: en este apartado podemos incluir los que poseen sección regular, como:

1) Cuadrados y redondos (fig. 7): estos últimos se emplean en la construcción del hormigón armado, como cerchas, etc.

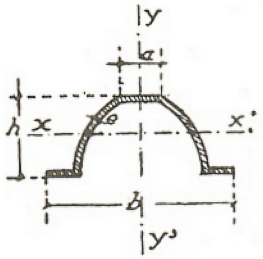


Figura 6

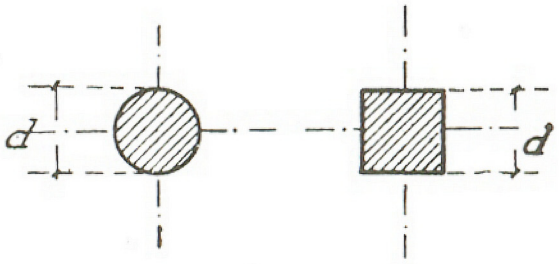


Figura 7

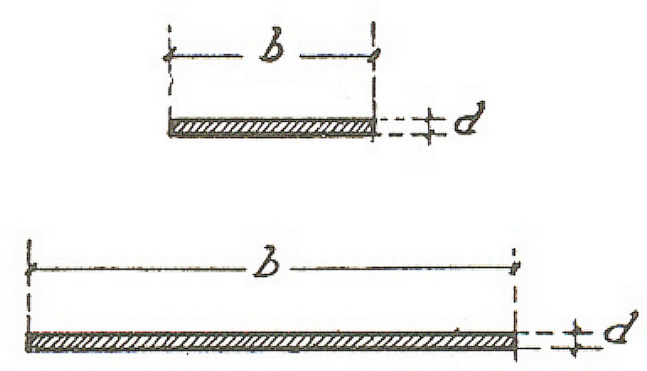


Figura 8

2) Planos (fig. 8): se clasifican en:

2.a) Chapas: es aquel perfil plano con una anchura superior a 600 mm, o con cualquier medida si es perfil irregular.
2.b) Planos anchos: cuando la anchura del perfil plano mide entre 200 mm y 600 mm.
2.c) Llantas: posee menos de 200 mm de anchura y un espesor entre 10 mm y 100 mm.
2.d) Pletinas: el ancho es menor de 200 mm y el espesor se sitúa entre 4 mm y 10 mm.
2.e) Flejes: si siendo la anchura menor de 200 mm el espesor lo es de 4 mm.

Las chapas se van a dividir, a su vez en:

a) Lisas: se clasifican en:

a.1) Gruesa: se construye de 5 mm a 35 mm de espesor.

a.2) Mediana: de 3 mm a 5 mm de espesor. Tanto este tipo como la gruesa se emplean en las paredes de depósitos, como almas de vigas compuestas, etc.

a.3) Fina: el espesor es menor de 3 mm. Se aplican en la construcción como forro o como elemento constructivo no resistente, o para obtener la chapa ondulada.

b) Chapas onduladas: se dividen en:

b.1) Llanas (fig. 9): b > h. El espesor varía de 0,5 mm a 2 mm.

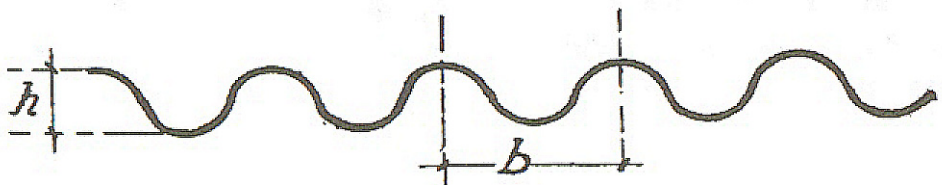
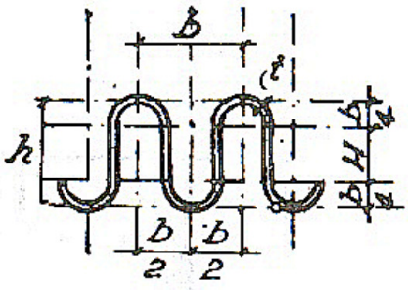
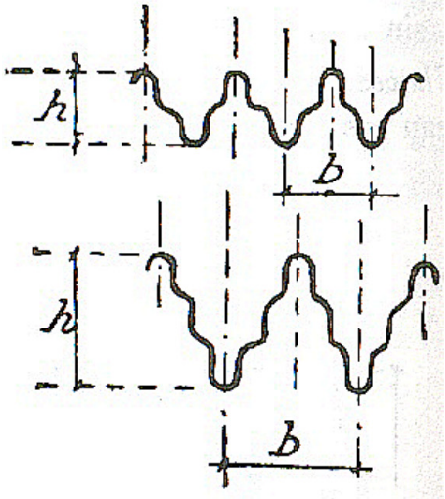


Figura 9

b.2) Planchas altas (fig. 10): b < 2 h. Valiendo el espesor 0,5 mm o 1 mm.

b.3) Planchas de doble y triple onda de Knudson (fig. 11): se usan muy poco.





Figuras 10 y 11

c) Chapas estriadas (fig. 12): son planchas de acero suave, con la particularidad de que una de sus caras muestra un cierto relieve. Suelen constituir una malla romboidal.

Sus aplicaciones más comunes son como plataformas giratorias, como recubrimiento de canales de construcción, etc.

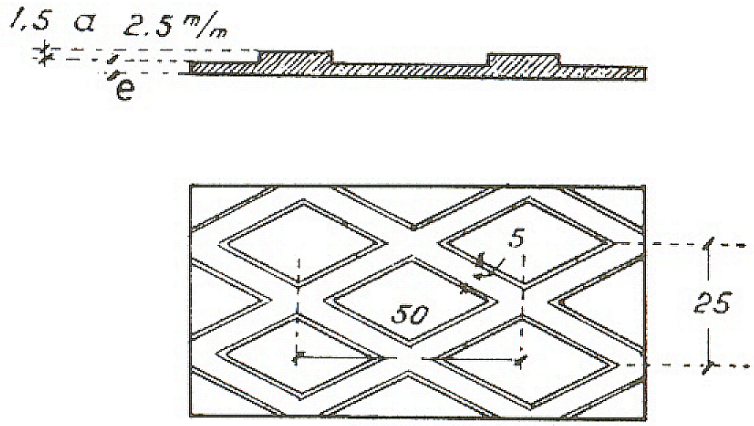
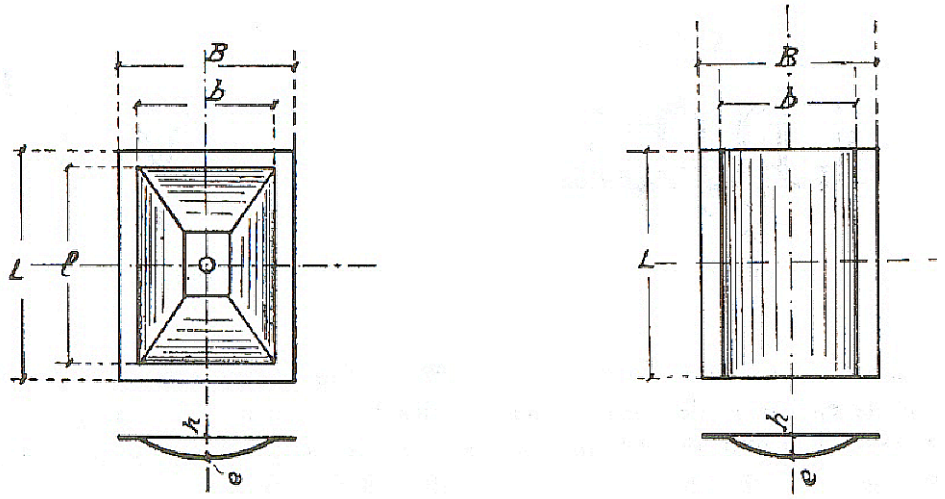


Figura 12

d) Chapas bombeadas o embutidas (fig. 13) y chapas combadas (fig. 14): las primeras se utilizan como tableros de puentes metálicos.



Figuras 13 y 14

Aparte de los perfiles normalizados indicados en esta pregunta, se utilizan perfiles compuestos en distintas disposiciones, con la finalidad de aumentar la resistencia a los esfuerzos. Por ejemplo, con dos perfiles en U soldados y dispuestos de tal forma que su geometría sea similar a la de un cuadrado hueco se consigue aumentar el momento de inercia y en consecuencia ofrecer mejor resistencia a flexión o a pandeo. Esa misma geometría también se puede conseguir con dos perfiles angulares (Fig. 15).

Figura 15

3. NORMATIVA VIGENTE

La normativa que se debe aplicar en un proyecto de construcciones metálicas es muy variada. Normativa sobre materiales empleados, edificación, prevención de riesgos laborales, seguridad contra incendios, etc.

El organismo regulador AENOR recoge las normas UNE de obligado cumplimiento en este y otros campos. Además, algunas de estas normas las recopila en distintos textos clasificados por temas. Así, por ejemplo, los textos más destacados son:

a) Código Técnico de Edificación: El 6 de mayo de 2000 entró en vigor la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE) que: "tiene por objeto regular en sus aspectos esenciales el proceso de la edificación, estableciendo las obligaciones y responsabilidades de los agentes que intervienen en dicho proceso, así como las garantías necesarias para el adecuado desarrollo del mismo, con el fin de asegurar la calidad mediante el cumplimiento de los requisitos básicos de los edificios y la adecuada protección de los intereses de los usuarios".

Dentro de esta ley, se define un Código Técnico de la Edificación que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad.

b) Catálogo de aceros: en el se encuentran designaciones, normas UNE, uso previsto, composición química y características mecánicas.

c) Aceros para estructuras metálicas: tipos y grados de acero, acabado superficial, barras, perfiles huecos y laminados, productos planos, chapas recubiertas y tablestacas.

d) Reacción y resistencia al fuego de materiales de construcción: recogido en el Real Decreto 312/2005 del 18 de marzo.

4. MATERIALES

Los requisitos que tienen que cumplir los materiales empleados en las construcciones metálicas son fundamentalmente alta resistencia mecánica, homogeneidad estructural y alto límite elástico.

Deben ofrecer además un buen comportamiento frente al envejecimiento, la rotura frágil o la fatiga (para perfiles sometidos a vibraciones o a frecuentes variaciones de carga).

Los materiales más utilizados son:

a) Aceros:

a.1) Aceros al carbono: se obtienen con distintos porcentajes de carbono. Además es destacable el porcentaje de manganeso presente en la composición.

a.2) Aceros de alta resistencia y baja aleación: presentan pequeños porcentajes (hasta un máximo en total del 5%) de vanadio, cromo, silicio, niquel, etc.

a.3) Aceros inoxidables: gracias a la adición, en proporciones adecuadas, de cromo y níquel, entre otros elementos, se consiguen aceros de alta resistencia a la corrosión.

b) Aleaciones ligeras: son aleaciones de aluminio.

Los principales metales utilizados para su aleación son: cobre (Cu), silicio (Si), cinc (Zn), magnesio (Mg) y manganeso (Mn).

Las aleaciones más importantes:

b.1) Aleaciones aluminio-cobre: son las más empleadas.
b.2) Aleaciones aluminio-silicio: el porcentaje de silicio varía entre el 5% y el 20%.
b.3) Aleaciones aluminio-manganeso: hasta un 25% de Mn.
b.4) Aleaciones aluminio-magnesio: el magnesio se presenta en proporciones inferiores al 10%.

La presentación final del material en la construcción metálica puede ser muy variada con la finalidad de evitar problemas de corrosión o simplemente por estética (galvanizado, tratado con pinturas anticorrosión, anodizado, etc.).

5. ESFUERZOS

5.1. COMPOSICIÓN DE LOS ESFUERZOS MECÁNICOS

Un sistema de fuerzas exteriores que actúa sobre un sólido se puede reducir a una fuerza única llamada resultante general y un par o momento resultante sobre un punto. Si al actuar sobre dicho sólido un sistema de fuerzas que esté en equilibrio, se selecciona una sección cualquiera cuyo centro de gravedad (c.d.g.) es conocido y se suprime una de las partes del sólido, sobre la sección considerada, actuarán bien las fuerzas situadas a la izquierda o bien las situadas a la derecha, si se traslada una parte de las dos mencionadas anteriormente al c.d.g. de la sección, obteniendo la resultante general y el momento resultante de las fuerzas consideradas.

Colocando un sistema de ejes coordenados con el origen situado en el c.d.g. y los ejes(y, z) contenidos en el plano de la sección, descomponiendo tanto la resultante general como el momento resultante en sus componentes según los tres ejes elegidos, se obtiene lo siguiente (fig. 16):

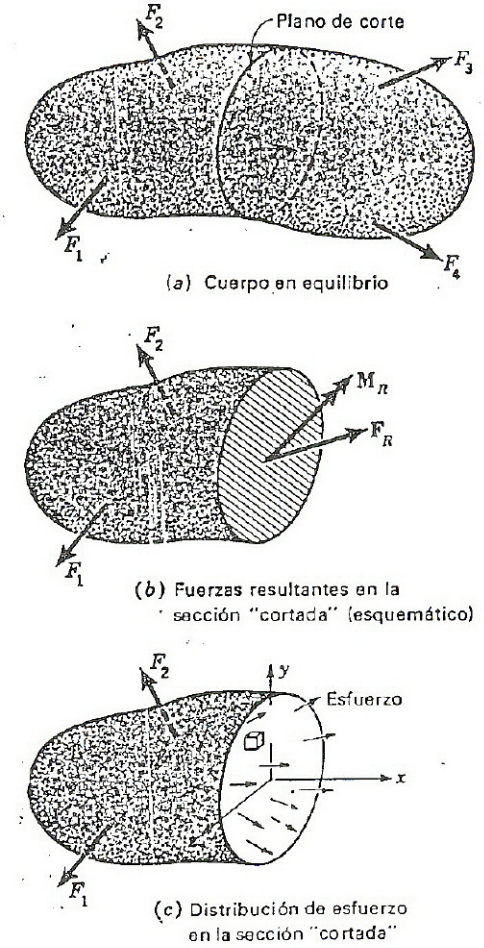


Figura 16

Las componentes según los ejes (y, z) de la resultante producen cortadura sobre la sección y la componente según el eje x produce tracción o compresión según el sentido de la fuerza.

En cuanto a los momentos, los actuantes según los ejes (y, z) producen flexión sobre cada uno de los ejes y el actuante según el eje x produce torsión alrededor del mismo.

5.2. PRINCIPIO DE LA SUPERPOSICIÓN

En este principio, de gran importancia en Resistencia de Materiales y de acuerdo con la experiencia, se admite que si obran sobre un sólido un sistema de n fuerzas simultáneas y producen una deformación total determinada, la deformación que produce cada fuerza es independiente de las deformaciones que producen las restantes fuerzas, es decir, que produce la misma deformación que si actuase ella sola, y la deformación total producida por las n fuerzas

simultáneas es suma de las deformaciones parciales debidas a cada fuerza, pudiendo componerse éstas al igual que los vectores.

5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

En esta pregunta se van a exponer y explicar las ecuaciones de Resistencia y de Rigidez o Deformaciones características de los distintos tipos de esfuerzos mecánicos.

5.3.1. Módulos o coeficientes fundamentales

Los cálculos que se realizarán en las preguntas posteriores exigen el conocimiento de ciertas constantes o funciones que dependen de la naturaleza y del tipo de material empleado.

A continuación se definen estos coeficientes:

a) Coeficiente o módulo de elasticidad E: Se llama así a la relación entre la carga por unidad de sección transversal σ y el alargamiento o acortamiento por unidad de longitud o unitario ε, o sea $E = \sigma/\varepsilon$. Tomaremos para tracción y compresión el mismo módulo, el valor medio del correspondiente a cada uno de esos esfuerzos.

b) Coeficiente de rotura σ_r: Expresa la carga por unidad de sección transversal con la cual el material empieza a romperse: $\sigma_r = F/A$.

En general se considerará el Newton (N) y derivados como unidades de fuerza o carga y el centímetro cuadrado (cm^2) como unidad de superficie.

c) Coeficiente de trabajo o fatiga de trabajo (σ_t): Expresa la carga por unidad de sección transversal que resiste el material sometido a un esfuerzo uniformemente repartido en dicha sección transversal con toda seguridad.

Prácticamente se toma una fracción del coeficiente de rotura, variable según los casos, o una fracción del límite de elasticidad. Para los metales se tomarán unos valores comprendidos entre 0,16 σ_r y 0,25 σ_r. Se representarán los coeficientes de trabajo a la tracción, compresión y cortadura por σ_t, σ_c y τ respectivamente.

d) Coeficiente de seguridad (C_s): Se llama así a la relación $C_s = \sigma_r/\sigma_t$ entre el coeficiente de rotura y el coeficiente de trabajo en un material cualquiera.

5.3.2. Tracción simple

Cuando un sólido está sometido a la acción de un sistema de fuerzas exteriores de tal manera que la resultante de las fuerzas que actúan en uno de los trozos en que queda divido por una sección transversal al mismo tiene una componente normal aplicada en el c.d.g. de la sección transversal considerada, se dice que el citado sólido está sometido a tracción simple o compresión simple, según que la referida resultante tenga su sentido hacia el exterior o interior de la parte considerada del sólido.

Debido a esta componente, el eje del sólido se alarga sin cambiar la curvatura, sufriendo cada sección transversal una traslación en la dirección del eje. En la figura 17 se ha considerado un prisma empotrado en su base superior y sometido a un sistema de fuerzas paralelas del mismo sentido, uniformemente repartidas en la sección transversal, y cuya resultante P coincide con el eje EF.

Evidentemente, para cada punto de la sección transversal existe una tensión o fuerza elástica, y la resultante de todas las tensiones, paralelas a la fibra media y todas ellas de la misma intensidad, tiene que ser igual y directamente opuesta a P para que exista el equilibrio. El efecto del esfuerzo P será el alargamiento l sufrido por el prisma, alargamiento que será función de P, L y A (área de la sección transversal o normal al eje EF) y del material utilizado.

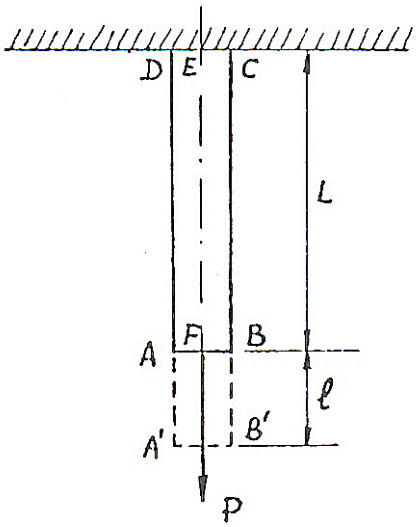


Figura 17

5.3.2.1. **Ecuaciones de deformaciones y de resistencia**

En la tracción simple, la carga soportada por unidad de sección transversal es la tensión normal de tracción:

$$\sigma = F/A$$

Se define el alargamiento por unidad de longitud (ε) como:

$$\varepsilon = \Delta L/L$$

donde: L: longitud del prisma.
ΔL: alargamiento experimentado.

Como se va a cumplir la ley de Hooke (los alargamientos son proporcionales a los esfuerzos):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

siendo E el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young. Es una constante característica del tipo de material.

Operando con las ecuaciones anteriores, se llega a la ecuación de las deformaciones:

$$F/A = \sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow F = E \cdot \varepsilon \cdot A$$

Pero para que el sólido resista con seguridad es necesario que la tensión normal de tracción sea inferior o igual a la tensión admisible del material σ_{adm} (que corresponderá al coeficiente de fatiga σ_t). Tomando el máximo valor, la condición de resistencia será:

$$\sigma = F/A = \sigma_t$$

Ésta es la ecuación de resistencia.

Una ecuación de gran utilidad es la de Wertheim (deducida a partir de la ecuación de las deformaciones):

$$\Delta L = F \cdot L/E \cdot A$$

Esta fórmula nos define que dentro del periodo elástico los alargamientos son directamente proporcionales al esfuerzo de tracción y a la longitud del sólido e inversamente proporcionales a la sección transversal y al módulo de elasticidad del material.

5.3.3. Compresión simple

Este tipo de trabajo en los sólidos es similar al descrito para la tracción simple, en el cual las cargas son también perpendiculares a la sección transversal considerada y están aplicadas en el centro de gravedad de las mismas. En este caso, el eje del sólido se acorta y cada sección transversal sufre una traslación en la dirección del eje, acortándose el sólido y dilatándose las secciones transversales.

En la compresión se pueden aplicar las mismas fórmulas y leyes deducidas para la tracción, produciéndose las tensiones de signo contrario a las de tracción y sustituyéndose los coeficientes por los correspondientes a la compresión.

El coeficiente de elasticidad es sensiblemente igual para ambos esfuerzos, y el de trabajo más pequeño, a excepción de algunos casos, como en la fundición, que presenta más resistencia a la compresión.

Sin embargo, todas las hipótesis, leyes y fórmulas son aplicables solamente cuando la longitud de pandeo no es grande respecto de la menor de las dimensiones de la sección transversal, pues en caso contrario existe flexión lateral, bien por no coincidir exactamente el esfuerzo con el eje, por la falta de homogeneidad del sólido, por la actuación de otros esfuerzos, etc, produciéndose pandeo y rompiéndose el sólido por flexión antes del aplastamiento.

Existe, no obstante, un caso particular de la compresión, denominado aplastamiento. Se puede dividir en:

a) Aplastamiento sobre superficies planas: se produce cuando se presentan dos superficies planas comprimidas una contra otra. La fuerza normal (N) a las superficies de contacto ejercerá una presión sobre la superficie de valor:

$$p = N/A$$

donde A es la sección de contacto.

b) Aplastamiento sobre superficies curvas: en este caso la presión no es constante a lo largo de la superficie, sino que será máxima en la dirección de la carga y decrecerá lateralmente a dicha carga.

Para el cálculo de la presión se supone un valor medio distribuido de forma homogénea sobre la superficie proyectada.

Un ejemplo de este caso sería la presión generada sobre un muñón cilíndrico macizo por un cojinete (Fig. 18):

$$p = P/A_{proy} = P/d \cdot l$$

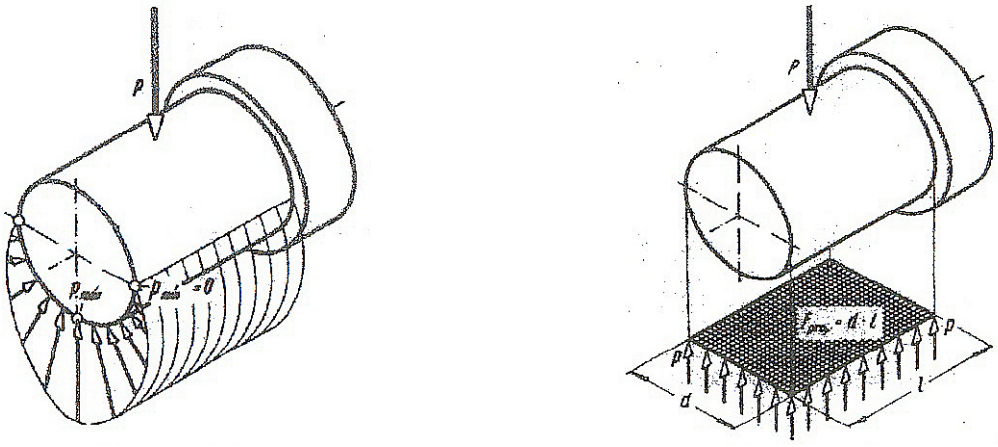


Figura 18

5.3.4. Cortadura simple

También se denomina cizallamiento, y se produce cuando se aplica una fuerza tangente a una sección considerada, provocando la consiguiente deformación, y en el caso límite, la rotura de la pieza (fig. 19).

La fuerza actuante se denomina esfuerzo cortante.

5.3.4.1. **Ecuaciones de deformaciones y de resistencia**

El esfuerzo cortante por unidad de superficie resultará ser una tensión tangencial:

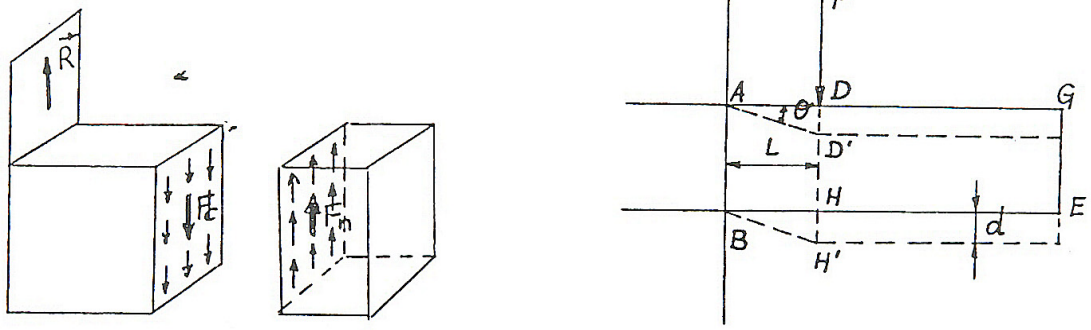
$$\tau = F/A$$

Al cumplirse la ley de Hooke:

$$\tau = G \cdot \theta$$

donde: G: Módulo de elasticidad transversal o de deslizamiento. Se suele tomar G = (2/5) · E.
θ: Deformación o resbalamiento por unidad de longitud.

$$\theta = d/L \text{ (fig. 20)}$$



Figuras 19 y 20

Operando, se llega a ecuaciones similares a las de la tracción:

$$F = G \cdot A \cdot \theta \quad \text{(Ecuación de deformaciones)}$$
$$d = (F \cdot L)/(G \cdot A)$$
$$\theta = F/G \cdot A)$$

La deformación relativa es proporcional al esfuerzo cortante e inversamente proporcional al área de la sección y al coeficiente de elasticidad transversal.

La ecuación de resistencia vendrá definida así:

$$F/A \leq \tau$$

La tensión admisible a cortadura (tensión de fatiga) se considera comprendida entre los 4/5 y los 2/3 de la tensión admisible a tracción simple.

5.3.5. Flexión simple

Se dice que un sólido está sometido a flexión cuando debido a las fuerzas que actúan sobre el mismo, varía la curvatura de su eje.

Una estructura está solicitada a flexión pura cuando en sus secciones transversales actúan únicamente momentos flectores M. Si además de los momentos flectores, actuasen fuerzas cortantes F_c, estaremos en un caso de flexión simple. Por último, si la fuerza normal F_n es la que actúa conjuntamente con el momento flector M, a la flexión se la denomina compuesta.

5.3.5.1. **Hipótesis fundamentales en la flexión**

En el estudio de la flexión se admiten como válidas las siguientes hipótesis:

1) Hipótesis de Bernouilli: La cual nos dice que las secciones transversales planas antes de la deformación, permanecen planas después de la deformación y normales al eje deformado, variando tan poco, que podemos considerar mantiene la misma forma y dimensiones iniciales, lo cual equivale a suponer que el sólido es elástico en sentido longitudinal y rígido en el transversal.

2) Hipótesis de Navier: Que debido a las fuerzas exteriores unas fibras se alargan (tracción) y otras se acortan (compresión), quedando entre ambas una zona en la cual las fibras no sufren variación en longitud, que se denominan fibras neutras o eje neutro, siendo el alargamiento o acortamiento de las fibras, tanto mayor cuanto más alejadas se encuentran de la fibra neutra.

En general, el eje del sólido o fibra media no está en el plano de la fibra neutra.

3) Las fuerzas exteriores, producen deformaciones muy pequeñas en el sólido de modo que las tensiones de tracción, compresión y cortadura, pueden suponerse inferiores al límite de elasticidad y cumplen la ley de Hooke.

4) Que la deformación producida en el sólido no altera el valor de las fuerzas, con lo cual se puede considerar, que el estado de equilibrio elástico, es muy próximo al estático, cumpliéndose las seis ecuaciones generales de equilibrio, referentes al estado primitivo del sólido.

5.3.5.2. **Ecuaciones de deformaciones y de resistencia**

La ecuación de deformaciones responde a esta expresión:

$$M = E \cdot I \cdot (d^2y/d^2x)$$

siendo: M: momento de flexión en la sección considerada.
I: momento de inercia de la sección.
d^2y/d^2x: curvatura de la deformación sufrida por el eje de la viga. Es la inversa del radio de curvatura (r). El eje x coincide con el eje de la pieza sometida a flexión.

Para la verificación de esta ecuación es necesaria la adopción de signos tomando para d^2y/d^2x mayor o menor que cero según que el eje deformado tenga su concavidad del lado del eje de las “y” positivo o negativo, y lo mismo resultaría de los momentos de flexión.

Este convenio, sin embargo, es de carácter secundario, ya que para los problemas de flexión lo que realmente interesa es el valor absoluto del momento flector.

La ecuación anterior se puede poner de la forma:

$$1/r = M/(E \cdot I) \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

El primer miembro expresa la curvatura, que es directamente proporcional al momento de flexión e inversamente proporcional al momento de inercia de la sección y al módulo de elasticidad.

Para el mismo material, cuanto mayor sea I menor será la curvatura, luego conviene que el momento de inercia sea grande.

La sección correspondiente a la mayor curvatura, donde se producirá la rotura, se denomina sección peligrosa.

Por otro lado, considerando la fórmula que cumple la ley de Hooke y sustituyendo el valor de la deformación unitaria, se tendrá:

$$\sigma = E \cdot y/r \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Como de la ecuación 1 se deduce que:

$$r = E \cdot I/M$$

Sustituyendo en la ecuación 2:

$$\sigma = M \cdot y/I$$

Esta fórmula es la fundamental de la flexión plana simple, la cual expresa que las tensiones sufridas por las fibras de la sección considerada son directamente proporcionales a su distancia a la fibra neutra. Así resulta que la tensión de las fibras será tanto mayor cuanto más alejada esté de la citada fibra, o sea, en la superficie libre del sólido, y nula en la fibra neutra ($y = 0$).

La tensión es inversamente proporcional al I y por lo tanto será tanto mayor cuanto menor sea éste. De aquí la ventaja de hacer grande el momento de inercia alejando la materia de la sección transversal del eje neutro, como ocurre en los perfiles en doble T.

Finalmente, como M es constante para todas las secciones, ya que el para puede trasladarse paralelamente a su plano, e I también es constante, entonces σ dependerá únicamente de "y" alcanzando el valor máximo cuando "y" esté lo más alejado de la fibra neutra.

Para que el sólido resista, σ debe ser necesariamente igual o inferior a los coeficientes de trabajo admisibles a tracción y a compresión (ambas designadas por σ_{adm}). Luego se debe verificar (considerándose el valor máximo de "y") que:

$$\sigma_{adm} = M \cdot y_{max}/I = M/W$$

Ecuación de resistencia a la flexión o fórmula de Navier.

El coeficiente W es el llamado módulo resistente a la flexión de la sección considerada.

La sección en que M es máximo recibe el nombre de sección peligrosa.

5.3.5.3. **Esfuerzo cortante en la flexión**

En los puntos anteriores, se ha estudiado el caso, en que las fuerzas verticales exteriores actuantes en el plano de simetría del sólido, se reducían a un par, cuyo eje es perpendicular al mencionado plano, es decir, cuando la resultante de traslación es nula.

Consideremos ahora el caso de flexión plana, en el que la citada resultante no es nula.

Para una sección transversal cualquiera, tomando como centro de reducción el centro de gravedad de la misma (c.d.g.), el sistema se reduce a una resultante F_R que es paralela a las fuerzas, actuando en su mismo plano, y a un par. Hay que considerar, además del momento de flexión como en el caso anterior (cuyo valor variará de una sección respecto a otra) el esfuerzo cortante, que llamaremos F_C debido a la resultante F_R.

Para el estudio nos referimos, a un sólido perfectamente empotrado, en su posición inicial situada a la izquierda, y sometido en el extremo libre a una fuerza vertical F (fig. 21), actuando en el plano de simetría, considerando una sección transversal EF.

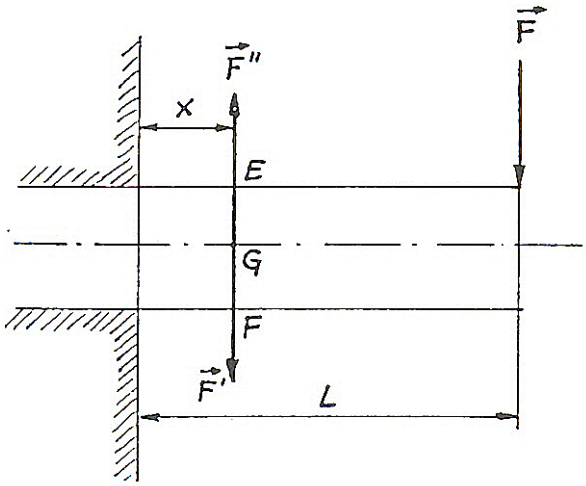


Figura 21

Se toma como centro de reducción el punto G, que es el c.d.g. de la sección EF y se tiene que el sistema de fuerzas exteriores (en este caso la fuerza F) que se reduce a una fuerza F' equipolente a la F, y a un par (F, –F''), siendo el valor del momento $-F\cdot(L - x)$, en el que L es la longitud del sólido y x la abscisa de G, respecto el origen elegido.

Por lo tanto, aparecerá en dicha sección un momento flector de valor $-F\cdot(L - x)$ que provocará una tensión de flexión, y una fuerza cortante ($F_c = F'$) que generará un esfuerzo de cortadura.

Por otro lado, se cumple una importante relación entre el momento flector y el esfuerzo cortante, que es la siguiente:

Para tramos de viga entre cargas y para tramos donde haya aplicada una carga distribuida, la fuerza cortante será la derivada del momento flector respecto de x:

$$F_c = dM/dx$$

5.3.6. Torsión simple

Una estructura está sometida a torsión cuando en sus secciones transversales actúan momentos torsores M_t, que se considerarán positivos cuando estén dirigidos en el sentido positivo (de las agujas del reloj) del eje normal x.

Aplicándolo a un cilindro recto, se dice que este cilindro está sometido a torsión simple o trabaja a torsión cuando las fuerzas exteriores que actúan sobre el mismo se reducen a un plano que es perpendicular al eje del cilindro.

Por efecto de dicho par, llamado de torsión, las diferentes secciones transversales sufren un deslizamiento o resbalamiento sobre el plano transversal por rotación, de unas respecto a las otras, alrededor de un eje normal a su plano (eje de torsión), por lo cual se desarrollan esfuerzos tangenciales en las fibras, que son esfuerzos cortantes por rotación, análogos a los esfuerzos cortantes simples.

El momento del par se denomina momento de torsión M_t, cuyo valor absoluto es $F \cdot R$ siendo R el brazo del par y F la fuerza actuante.

5.3.6.1. **Ecuaciones de deformaciones y de resistencia**

La ecuación de las deformaciones es:

$$M_t = G \cdot \theta \cdot I_P$$

siendo: G: módulo de elasticidad por cortadura.

θ: ángulo de torsión, giro o rotación. Es el ángulo que se produce en la rotación de la sección transversal. Se expresa en radianes por unidad de longitud.

I_P: momento de inercia polar.

Por otro lado, la tensión tangencial de torsión (esfuerzo tangencial por unidad de sección) cumple esta ecuación:

$$\tau = G \cdot \theta \cdot \delta$$

donde δ es la distancia, medida radialmente, que hay desde el centro de la sección considerada a un punto cualquiera de ésta. Esto significa que la tensión tangencial es nula en el eje y máxima en la periferia ($\delta = R$).

Igualando las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\tau = (M_t/I_P) \cdot \delta$$

Para que el cilindro pueda resistir las acciones exteriores es necesario que $\tau_{max} \leq \tau_{adm}$ que se producirá cuando $\delta = R$ (ya que M_t e I_P son constantes para cada sección). Luego la ecuación de resistencia es:

$$\tau_{adm} = (M_t/I_P) \cdot R = M_t/W_o$$

siendo $W_o = I_P/R$ el módulo de torsión.

Analizando las ecuaciones anteriores se observa que las fibras más fatigadas son las extremas (para $\delta = R$), y las fatigas del eje son nulas; también que la fatiga o tensión de trabajo es directamente proporcional al momento M_t e inversamente proporcional a I_P, de aquí la ventaja de utilizar perfiles con I_P grande, estando la sección lo más alejada posible del eje, lo que se consigue utilizando secciones huecas.

5.3.7. Pandeo o flexión lateral

Cuando la carga de compresión que actúa sobre una columna, alcanza un valor determinado, cualquier perturbación por pequeña que sea, hace que la columna, se encuentre en equilibrio inestable, y en consecuencia, adopte la forma curva. La aparición de esta curvatura inicial, su rápido crecimiento y la rotura final de la columna, constituyen el fenómeno de la flexión lateral o pandeo.

El pandeo se presenta también en columnas esbeltas cargadas excéntricamente y en vigas sometidas conjuntamente a cargas transversales y de compresión.

En un sistema, que se halla en estado deformado, el equilibrio entre las cargas exteriores y las fuerzas de elasticidad originadas por ellas, puede ser estable o inestable.

El equilibrio elástico es estable, si el cuerpo deformado, por una pequeña desviación del estado de equilibrio, tiende a volver al estado inicial, cuando desaparece la acción exterior, que ha producido la perturbación.

El equilibrio elástico es inestable, si el cuerpo deformado, una vez alterado por alguna influencia, sigue deformándose en dirección de la desviación producida y cuando desaparece la influencia no vuelve al estado inicial.

Entre estos dos estados de equilibrio, se encuentra un estado transitorio denominado crítico. Durante el estado crítico, el cuerpo deformado se encuentra en equilibrio indiferente, es decir, puede volver al estado inicial, o bien, continuar deformándose, a causa de una influencia mínima.

La estabilidad de la forma del equilibrio del cuerpo deformado depende de la magnitud de la carga aplicada sobre el mismo.

La carga por encima de la cual se origina la pérdida de la estabilidad inicial del cuerpo se denomina carga crítica.

5.3.7.1. **Fórmula de Euler y tensiones críticas**

La fórmula de Euler indica que la carga crítica de pandeo es:

$$P_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{min}/L_p^2$$

siendo: E: módulo de elasticidad longitudinal.

I_{min}: momento de inercia mínimo de la sección considerada.

L_p : longitud de pandeo. Es la longitud de la semionda que formaría el eje de la barra deformada.

La longitud de pandeo depende de las condiciones de los extremos de la barra considerada:

a) Barra articulada en sus extremos (fig. 22):

$$L_p = L \Rightarrow P_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{min}/L^2$$

L: longitud de la barra.

b) Barra con un extremo empotrado y el otro libre (fig. 23):

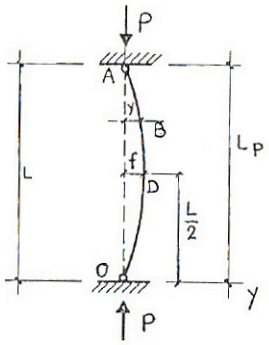
$$L_p = 2\,L \Rightarrow P_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{min}/4\,L^2$$

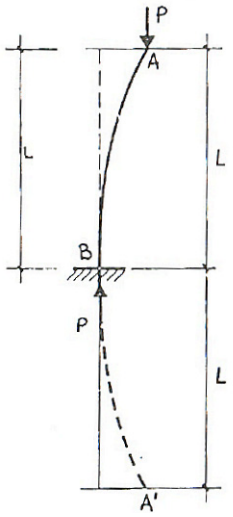
c) Barra con los dos extremos empotrados (fig. 24):

$$L_p = L/2 \Rightarrow P_{cr} = 4\,\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}/L^2$$

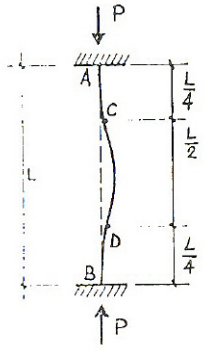
d) Barra con un extremo empotrado y el otro articulado (fig. 25):

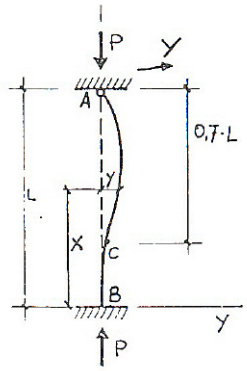
$$L_p = 0{,}7\,L \Rightarrow P_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{min}/(0{,}7\,L)^2$$





Figuras 22 y 23





Figuras 24 y 25

Se denominan esfuerzos críticos a los esfuerzos de compresión de la columna cuando actúa sobre la misma la carga P_{cr} que le hace perder la estabilidad. Si A es el área de la sección transversal de la columna, la magnitud de los esfuerzos críticos será:

$$\sigma_{cr} = P_{cr}/A$$

Introduciendo la ecuación de Euler, se tiene:

$$\sigma_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{min}/(L_P^2 \cdot A)$$

Definimos el radio de giro mínimo como: $r_{min} = (I_{min}/A)^{1/2}$

Y la esbeltez de la columna como $\lambda = L_p/r_{min}$.

Entonces la expresión del esfuerzo crítico queda:

$$\sigma_{cr} = \pi^2 \cdot E/\lambda^2$$

Esta forma de expresar la fórmula de Euler se representa en la curva ABC o curva de Euler (fig. 14), en la que se observa que cuanto mayor es la esbeltez λ de la columna, menor es su esfuerzo crítico σ_{cr}. Para mejorar el comportamiento de una columna, con relación al pandeo, será necesario aumentar su radio de giro r_{min}, lo que se consigue sin modificar el área de la sección, aumentando el I_{min}, o sea, alejando todo lo posible el centro de gravedad de la sección. Esta es la razón por la que las columnas de sección hueca son más económicas que las de sección maciza.

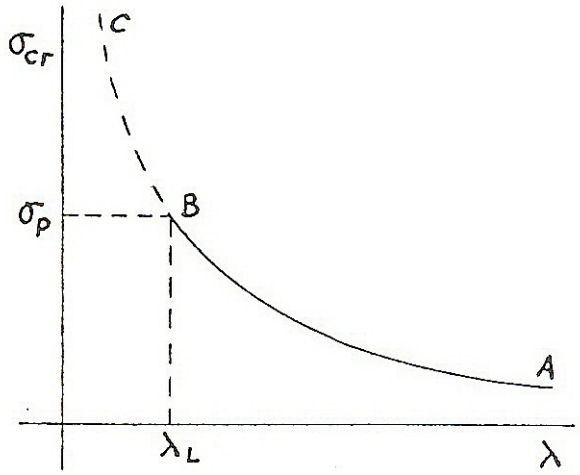


Figura 26

Cuando la esbeltez λ disminuye, el esfuerzo crítico σ_{cr} aumenta y la curva de Euler se aproxima asintóticamente al eje vertical.

Sin embargo el esfuerzo crítico σ_{cr} no debe superar el valor de σ_p del límite de proporcionalidad del material de la columna.

5.3.7.2. **Método de los coeficientes ω**

Éste es un método rápido de cálculo de piezas sometidas a pandeo.

El coeficiente ω de pandeo se define por

$$\omega = \sigma_{adm}/\sigma_{cradm}$$

donde: σ_{adm}: esfuerzo admisible del material a compresión. Coincide con el esfuerzo admisible de una columna con esbeltez nula.

σ_{cradm}: es el esfuerzo σ_{cr} afectado por un coeficiente de seguridad. De esta definición se deduce que la carga admisible de la columna será

$$P = \sigma_{cradm} \cdot A$$

Sustituyendo, la carga admisible de la columna es:

$$P = \sigma_{adm} \cdot A/\omega$$

De la que se deduce el criterio de dimensionamiento de las columnas:

$$P \cdot \omega/A \leq \sigma_{adm}$$

En esta expresión se observa que el coeficiente ω ejerce un efecto multiplicador de la carga P, efecto que será tanto mayor cuanto mayor sea la esbeltez de la columna.

El cálculo de piezas comprimidas mediante los coeficientes ω se realiza por tanteos, fijando un perfil y comprobando si resiste la carga a que se ha sometido.

Para iniciar los tanteos puede hacerse un cálculo previo utilizando la fórmula de Euler, o bien, un procedimiento menos exacto, pero más rápido y sencillo, que consiste en considerar que la barra que la barra trabaja a compresión simple, calculándose la sección necesaria en este caso por la fórmula $A = F/\sigma_{adm}$. A continuación, se elegirá para el primer tanteo un perfil de sección doble a la calculada obteniéndose el valor del radio de giro mínimo, y después en función de la longitud de pandeo, determinar la esbeltez de la columna. Seguidamente se busca en las tablas, el valor del coeficiente ω en función del material que se utilice.

Por último se comprueba la tensión de pandeo por la fórmula:

$$\sigma_p = F \cdot \omega/A$$

Si la tensión obtenida es igual o menor que la tensión admisible del material, el perfil elegido es válido, sin embargo, sí la tensión es mucho menor que la tensión admisible, se considerará un perfil más pequeño, repitiéndose el proceso de cálculo para el nuevo tanteo, hasta conseguir que la tensión se aproxime lo más posible a la tensión admisible.

Cuando la tensión obtenida, es mayor que la tensión admisible, se elige un perfil mayor, repitiéndose el mismo proceso de cálculo, comentado anteriormente, para un nuevo tanteo, hasta conseguir que la tensión sea igual o ligeramente inferior a la tensión admisible.

RESUMEN

Los perfiles más utilizados en las construcciones metálicas son: doble T (de alas estrechas y de alas anchas), simple T (de ala estrecha y de ala ancha), en ángulo o perfil L (lados iguales o desiguales), en U, en S, Zorés, cuadrados, redondos y planos (chapas, planos anchos, llantas, pletinas y flejes).

Aparte de estos perfiles normalizados, se forman perfiles compuestos en distintas disposiciones, con la finalidad de aumentar la resistencia a los esfuerzos.

El organismo regulador AENOR recoge las normas UNE de obligado cumplimiento. Además, algunas de estas normas las recopila en distintos textos clasificados por temas (Código Técnico de Edificación, Catálogo de aceros, aceros para estructuras metálicas, Reacción y resistencia al fuego de materiales de construcción, etc.).

Los materiales más utilizados en la construcción metálica son: aceros (al carbono, de alta resistencia y baja aleación, inoxidables, etc) y las aleaciones ligeras.

La presentación final del material puede ser muy variada con el fin de evitar problemas de corrosión o simplemente por estética (galvanizado, tratado con pinturas anticorrosión, anodizado, etc.).

Los esfuerzos a los que se pueden encontrar sometido un sólido son:

a) Tracción simple: la acción de un sistema de fuerzas exteriores actúa de tal manera sobre una sección, que la resultante de las fuerzas tiene una componente normal aplicada en el c.d.g. hacia el exterior.

b) Compresión simple: es el mismo caso pero con el esfuerzo dirigido hacia el interior. Un caso particular de la compresión es el Aplastamiento.

c) Cortadura simple o cizallamiento: se produce cuando se aplica una fuerza tangente a una sección considerada.

d) Flexión simple: cuando debido a las fuerzas que actúan sobre el sólido, se varía la curvatura de su eje.

Existe una importante relación entre el momento flector y el esfuerzo cortante: para tramos de viga entre cargas y para tramos donde haya aplicada una carga distribuida, la fuerza cortante será la derivada del momento flector respecto de x.

e) Torsión simple: las fuerzas exteriores que actúan sobre el sólido se reducen a un par que actúa en un plano perpendicular al eje del cuerpo.

f) Pandeo o flexión lateral: se produce cuando la fuerza de compresión aplicada sobre una pieza esbelta genera una variación de la curvatura del eje del cuerpo.

Para cada uno de estos esfuerzos se han definido dos criterios de cálculo: Dimensionado a Resistencia y Dimensionado a Rigidez o Deformaciones.

EDITA Y DISTRIBUYE:

CENTRO DOCUMENTACIÓN DE ESTUDIOS Y OPOSICIONES - C/ CARTAGENA, 129 – 28002 MADRID
www.cede.es – e-mail: oposiciones@cede.es – TEL.: 91 564 42 94