

# 1.- Las estructuras resistentes a los esfuerzos.



Las estructuras son sistemas que de forma estable soportan pesos y fuerzas en una posición determinada. Pueden ser una creación humana, pero están también presentes en la naturaleza. Por ejemplo, una persona, para descansar, se sienta en una silla; ésta tendrá que soportar su peso sin romperse, por lo que la silla es una estructura. La carrocería de un coche, la estructura de una casa, una mesa, una grúa, un puente, unas estanterías,... Todas ellas son estructuras creadas artificialmente. También la naturaleza crea las suyas: un árbol, una montaña, una cueva, el esqueleto de los animales,...

La estructura (del latín *structūra*) es la disposición y orden de las partes dentro de un todo.

La definición anterior vale para muchas cosas, algunas de la cuales no tienen que ver con nuestro tema: la estructura de capítulos de un libro, la organización de un aula, etc....

Para el tema que nos ocupa, las estructuras que nos interesan son las que tienen como misión **resistir las fuerzas físicas** a las que están sometidas.

Todos los cuerpos poseen algún tipo de estructura, también las que encontramos en la naturaleza. También el ser humano dispone de la estructura ósea para que su cuerpo se mantenga y funcione. Son las **estructuras naturales**: el tronco de un árbol, las conchas de los moluscos, una montaña, una cueva, las estalagmitas y estalagmitas,...

Pero además de las estructuras naturales, la humanidad desde sus orígenes ha creado **estructuras artificiales** para satisfacer sus necesidades. Son las que vamos a estudiar en este tema.

Hablaremos de una **estructura** cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- 1.- Que esté formada por un conjunto de elementos simples unidos entre sí.
- 2.- Que resista las fuerzas a las que está sometido sin destruirse.
- 3.- Que conserve básicamente su forma bajo la acción de esas fuerzas.

Redefiniendo de nuevo el concepto de estructura, de acuerdo con el tema podemos decir entonces que:


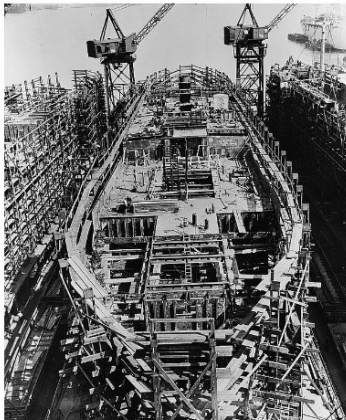


Una estructura es un conjunto de elementos unidos entre sí capaces de soportar las fuerzas que actúan sobre ella, conservando su forma.

Al conjunto de fuerzas que actúan sobre la estructura se les denomina **carga o acciones**. La estructura, según el principio físico de acción y reacción, para mantenerse en equilibrio con las fuerzas que actúan sobre ella tiene que contraponer otras fuerzas iguales y de sentido contrario. Al conjunto de fuerzas con las que la estructura reacciona ante las cargas se las denomina **reacciones**. Las fuerzas de reacción se ejercen en los puntos por donde la estructura está sujeta, o bien por donde se unen los diferentes elementos de la misma. A estos puntos de unión se les denomina **apoyos**, y a las fuerzas de reacción se les suele denominar también **coacciones**.

En la siguiente tabla puedes ver de forma resumida cuáles son las misiones o características que le encomendamos a una estructura:

### Funciones de la estructura

Soportar cargas	Es la principal función de toda estructura ya que las fuerzas o cargas siempre están presentes en la naturaleza: la gravedad, el viento, el oleaje, etc.	
Mantener la forma	Es fundamental que las estructuras no se deformen, ya que si esto ocurriese, los cuerpos podrían romperse. Es lo que ocurre cuando los esfuerzos son muy grandes. Por ejemplo, en un accidente de coche, la carrocería siempre se deforma o araña dependiendo de la gravedad del impacto.	

<p><b>Proteger partes delicadas</b></p>	<p>Una estructura debe proteger las partes delicadas de los objetos que las poseen. Por ejemplo, el esqueleto protege nuestros órganos internos, la carcasa de un ordenador protege el microprocesador, las tarjetas, etc. Pero hay estructuras que no tienen partes internas que proteger, como los puentes o las grúas.</p>	
<p><b>Ser ligeras</b></p>	<p>Las estructuras deben ser lo más ligeras posibles. Si la estructura fuese muy pesada, podría venirse abajo y, además se derrocharían muchos materiales.</p>	 <p><small>Taraxacum officinale. De KoS en Wikimedia Commons. Licencia dominio público.</small></p>
<p><b>Ser estable</b></p>	<p><i>La estructura no puede volcar o caerse aunque reciba diferentes cargas.</i></p>	 <p><small>Tataragi Dam in Asago, Hyōgo Pref., Japan. De 663highland en Wikipedia Commons. Licencia CC-BY.</small></p>

## 2.- Fuerza

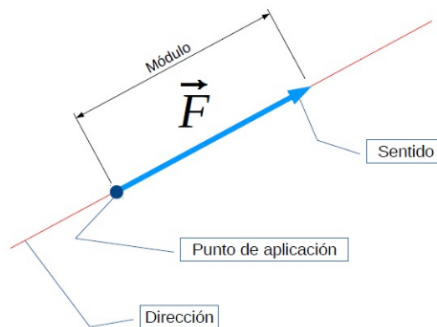
Aunque hablar de fuerza es bastante habitual en muchos ámbitos de la vida diaria, no siempre se hace de acuerdo con su verdadero significado. Comencemos entonces definiendo este concepto.



**Denominamos fuerza a cualquier causa (acción, esfuerzo o influencia) que puede alterar el estado de movimiento o de reposo de cualquier cuerpo o bien deformarlo.**

Es una magnitud física que se representa mediante **vectores**. La representación vectorial nos presenta una imagen simbólica de las fuerzas, indicándonos un **punto de aplicación**, una **dirección** de la fuerza, un **sentido** y un valor, dado por la longitud del segmento que la representa, denominado **módulo**.

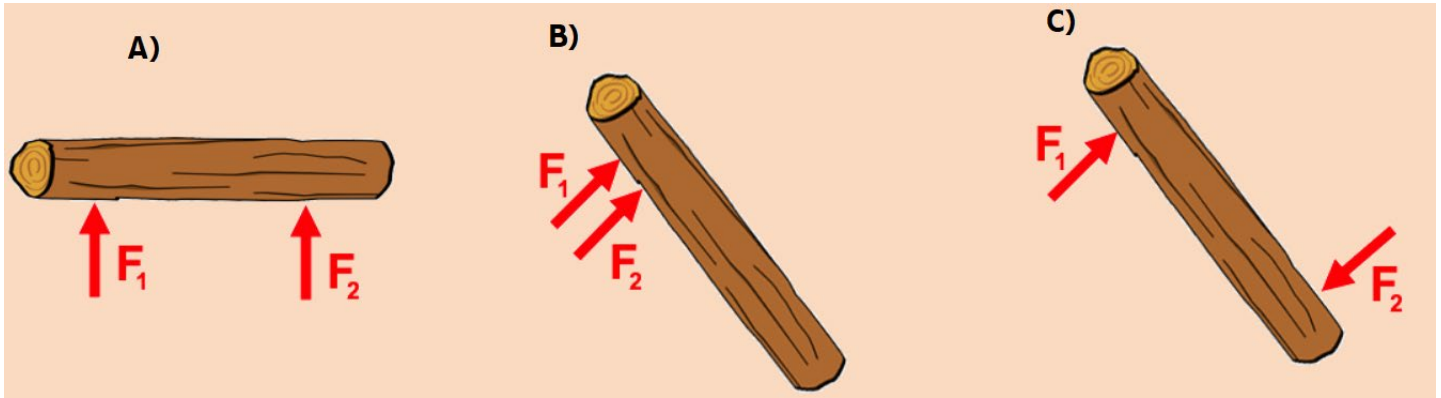
El uso de vectores para representar las fuerzas permite el estudio gráfico de los estados de las fuerzas en las estructuras, campo que se denomina **grafostática**.



Hay magnitudes que para describirlas es necesario conocer la dirección en la que se aplica, ya vimos que éste era el caso de la velocidad, y que por eso le poníamos signo.

Esto pasa también con las fuerzas, dependiendo de la **dirección** y el **sentido** de la misma se conseguirán distintos efectos.

Supongamos que queremos mover un tronco empujando entre dos personas, dependiendo de la dirección y el sentido en el que se empuje tendremos un movimiento del tronco u otro como puedes observar en las siguientes animaciones:



## 2.1.- Tipos de fuerzas

Las fuerzas están presentes en todas las actividades y elementos. Podemos clasificarlas atendiendo a criterios diversos:

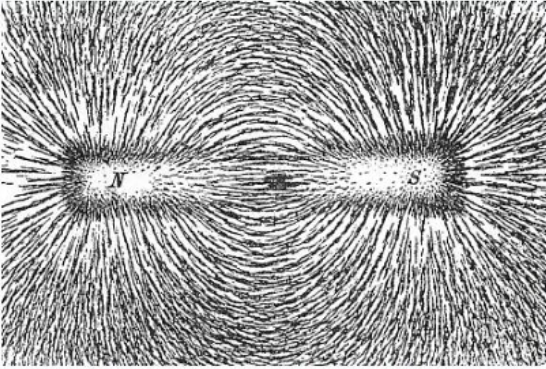
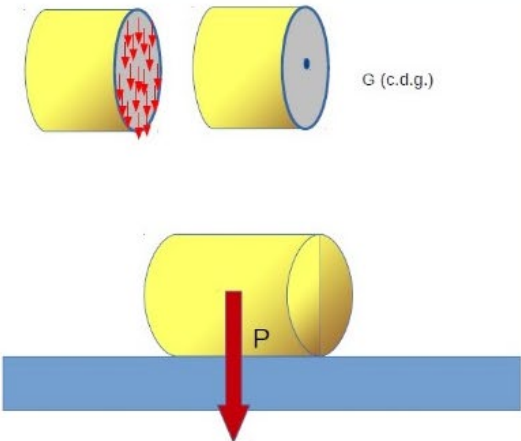
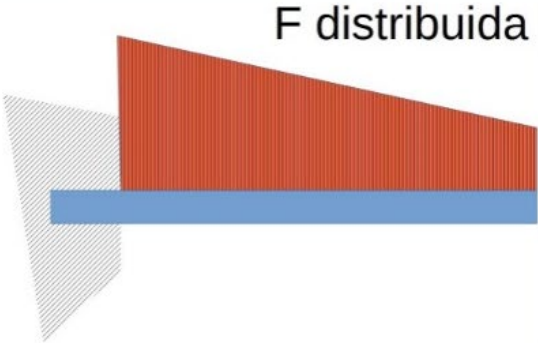
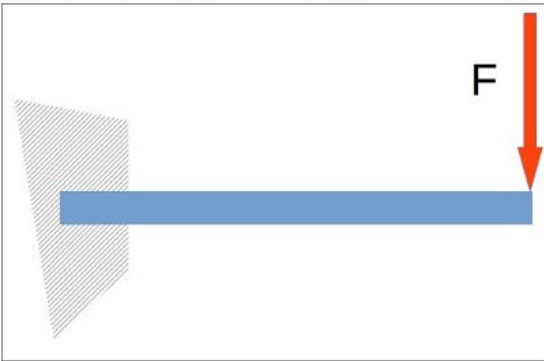
### En función de la duración

Fuerzas fijas o permanentes	Fuerzas variables o intermitentes
. Siempre están presentes en la estructura y ésta tendrá que soportarlas en todo momento. Por ejemplo: el peso de un edificio, del cuerpo o de un tronco.	Pueden aparecer o desaparecer en función de las condiciones externas a la estructura. Por ejemplo: la acción del viento, nieve.
<p>La imagen representa la acción de las fuerzas en un árbol. Por un lado está el peso propio del árbol, (fuerza fija), y por otro la acción del viento, (fuerza variable).</p>	

**En función de cómo actúan.**

Fuerzas estáticas	Fuerzas dinámicas
<p>La variación de la intensidad, lugar o dirección en la que actúa la fuerza no cambia o cambia muy poco en periodos cortos de tiempo. Por ejemplo: el peso de un edificio, nieve.</p>	<p>Las fuerzas que actúan sobre la estructura cambian bruscamente de valor, de lugar de aplicación o de dirección. Por ejemplo: terremotos, impactos bruscos, fases en el trabajo de las máquinas,...</p>
 <p><i>Marcas de flotación en el casco del buque. De Wikiseacher en Wikimedia Commons. Licencia dominio público.</i></p>	 <p><i>Fuerzas dinámicas presentes en el trabajo de una máquina excavadora. Elaboración propia a partir de: John Deere loader. De: Ike4014 en Wikimedia Commons. Licencia CC-BY-SA</i></p>
<p>Las marcas de flotación de un barco nos indican el tonelaje del mismo. Según su nivel de carga, las marcas variarán. El tonelaje del barco es una carga estática, al igual que el peso propio de los edificios.</p>	<p>Las máquinas suelen estar sometidas a acciones de tipo dinámico. Esta máquina, además de tener que soportar su propio peso, recibe los efectos de fuerzas dinámicas al realizar su ciclo de trabajo.</p>

**En función de su distribución sobre la estructura**

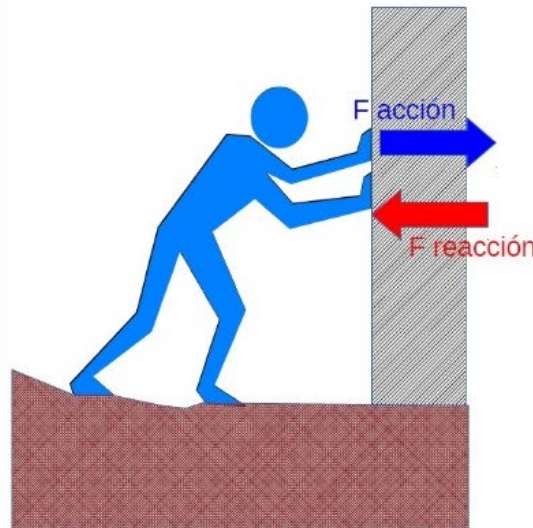
Fuerzas de volumen	Fuerzas de superficie
<p>Aquellas que actúan en todas las partículas de un cuerpo. Por ejemplo las fuerzas gravitatorias y las magnéticas.</p>	<p>Las que actúan en la periferia del cuerpo como consecuencia del contacto con otros cuerpos. A su vez las fuerzas de superficie, según su distribución, pueden ser:</p>
 <p><i>Representación de las líneas de fuerza magnética. Archivo: Magnet0873. De Newton Henry Black, Harvey N. Davis (1913) en Wikimedia Commons. Licencia dominio público.</i></p> 	<p><b>Distribuidas:</b> Aquellas que actúan en un área del cuerpo o de la estructura. Por ejemplo el peso propio de una viga.</p>  <p><b>Puntuales:</b> Cuando sólo actúan en un determinado punto. Por ejemplo la carga que colgamos en una polea.</p> 

Las fuerzas de volumen actúan sobre todas las partículas de los cuerpos. En la imagen superior vemos las denominadas "líneas de fuerza" que actúan cuando se genera un campo magnético, más intensas cuanto más cerca del foco del campo (el imán). La segunda imagen representa un sólido y las fuerzas infinitesimales que actúan en todas las partículas interiores del mismo por su propio peso. Vemos también como la actuación de esas minúsculas fuerzas equivale a la actuación de una sola fuerza resultante  $P$  aplicada en el **centro de gravedad del sólido**.

Las fuerzas de superficie actúan sobre la periferia del sólido y pueden ser de multitud de tipos. Genéricamente podemos hablar de fuerzas distribuidas cuando actúan en todo un área o a lo largo de una dirección; y fuerzas puntuales cuando son fuerzas individuales aplicadas en un punto en concreto de la viga. Los sistemas de fuerzas distribuidas, que tienen cierta complejidad para analizar, equivalen a sistemas de fuerzas puntuales donde la fuerza o fuerzas puntuales sob las resultantes de las distribuidas aplicadas en el centro de gravedad del área de aplicación. Las imágenes muestran dos vigas empotradas. Una está sometida a la acción de fuerzas distribuidas a lo largo de su directriz; y la segunda tiene una fuerza puntual en la punta.

### En función de la naturaleza de la fuerza respecto a la estructura

Fuerzas de acción, acciones o sollicitaciones	Fuerzas de reacción
Son el conjunto de fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo, y por ello sobre su estructura, y que intentan desplazarlo y/o deformarlo.	Son las fuerzas con las que la estructura del cuerpo responde a las acciones para mantener el equilibrio. Ver 3ª ley Newton.



Fuerzas de acción y de reacción cuando empujamos un elemento.



Sistema de fuerzas de acción y reacción en un trineo. Archivo:

. En "Vectors Il·scants" del open course ware "Fonaments f·sics de les estructures", Universitat d'Alacant. Licencia CC-BY-NC-SA.

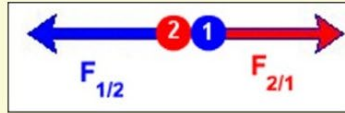


## Ampliación

Terceira ley de Newton o principio de acción y reacción.

Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto.

Al interaccionar dos partículas, la fuerza  $F$  que la primera ejerce sobre la segunda es igual y opuesta a la fuerza  $F$  que la segunda ejerce sobre la primera, estando ambas sobre la recta que las une.



Se escribe  $F_{1/2}$  para indicar la fuerza que el cuerpo 1 ejerce sobre el cuerpo 2 y  $F_{2/1}$  para indica la fuerza que el cuerpo 2 ejerce sobre el 1 .

### Características de las fuerzas de Acción - Reacción

- Surgen de una interacción.
- Nunca aparece una sola: son dos y simultáneas.
- Actúan sobre cuerpos diferentes: una en cada cuerpo.
- Nunca forman un par de fuerzas: tienen la misma línea de acción.
- Un cuerpo que experimenta una única interacción no está en equilibrio ( $\Sigma F \neq 0$ ), pues sobre él aparece una fuerza única que lo acelera. Para estar en equilibrio se requieren por lo menos dos interacciones.



Sir Isaac Newton (1642-1727). En Wikimedia Commons. Licencia dominio público

### Interacción de fuerzas.

Una **interacción** entre dos objetos siempre **produce dos fuerzas iguales y opuestas**, aplicadas una en cada objeto.

Las interacciones pueden ser a distancia como la **gravitatoria** y la **electromagnética** o por contacto, como las originadas en un choque.

**Las dos fuerzas de una interacción aunque son iguales no se anulan porque actúan cada una en un cuerpo diferente.**

Pasa el ratón por la figura para ver la diferentes fuerzas.

## 3.- Momento

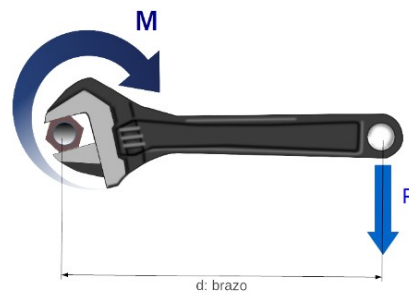
En general, tal como decíamos, una fuerza intenta provocar un desplazamiento o deformación en el cuerpo sobre el que se aplica. La estructura tratará de impedir el movimiento o la deformación, contraponiéndole una fuerza del mismo valor (módulo), misma dirección y de sentido contrario. (Es lo que nos dice la tercera ley de Newton). Sin embargo en muchas ocasiones el punto de aplicación de la fuerza no coincide con el punto de aplicación en el cuerpo. En este caso la fuerza actúa sobre el objeto y su estructura a cierta distancia, mediante un elemento que traslada esa acción de esta fuerza hasta el objeto.

A esa combinación de fuerza aplicada por la distancia al punto de la estructura donde se aplica se le denomina **momento de la fuerza  $F$  respecto al punto**. El momento va a intentar un desplazamiento de **giro** o **rotación** del objeto. A la distancia de la fuerza al punto de aplicación se le denomina **brazo**.

Matemáticamente se calcula mediante la expresión

$$M = F \cdot d$$

Siendo **F** la **fuerza** en **Newton (N)**, **d** la **distancia** en **metros (m)** y **M** el **momento**, que se mide en **Newton por metro (Nm)**.



$$M = F * d$$

M: momento (N.m.)  
F: fuerza aplicada (N)  
d: brazo (m)

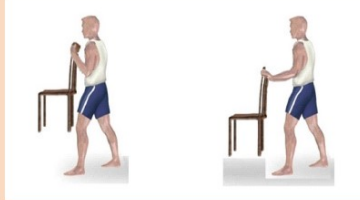
Existen muchos casos en los que aparecen momentos que producen o intentan producir **movimientos de rotación**, como en el caso de abrir una puerta, girar un volante, etc....

Cuando las fuerzas que provocan el momento son acciones, el momento es también una **acción** o **solicitud**. Siguiendo la misma condición e equilibrio, para que una estructura de un objeto esté en equilibrio, tiene que responder a la acción de un momento con otro del mismo valor y de sentido contrario. En este caso, si el momento que actúa busca la rotación hacia la derecha, la reacción será un momento que busque la rotación hacia la izquierda, y viceversa.



Se trata de intentar sujetar, con un solo brazo, durante el mayor tiempo posible una silla de la clase. Primero con el brazo totalmente extendido y después con el brazo pegado al cuerpo. El peso de la silla y por tanto la fuerza (permanente) de la silla (debida a la gravedad de la tierra que la atrae hacia su centro) es la misma en los dos casos. Pero su efecto sobre la estructura, que en este caso es nuestro cuerpo, es muy diferente.

Lo que acabas de experimentar se denomina en cálculo de estructuras: momento de una fuerza, y es la magnitud física que se utiliza para calcular el efecto de una fuerza teniendo en cuenta el lugar donde se está aplicando.



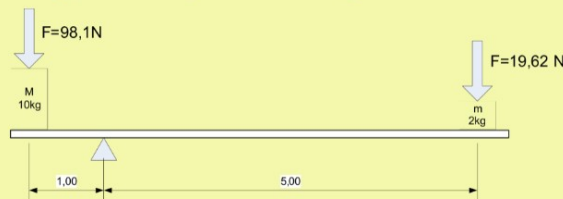
Ejemplo e imagen en: tecnologías, textos Maria Verde. Licencia CC-BY-NC-SA.



El momento de una fuerza respecto a un punto o respecto a un eje es una medida de la tendencia de la fuerza a hacer girar el cuerpo alrededor del punto o del eje.

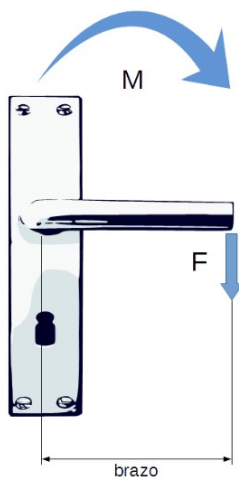


La forma más sencilla de aplicar a nuestro favor la característica del momento de las fuerzas es mediante una palanca. En el ejemplo de la imagen puedes comprobar como una masa de 2kg puede estar en equilibrio con otra de 10k. ¿Cómo?

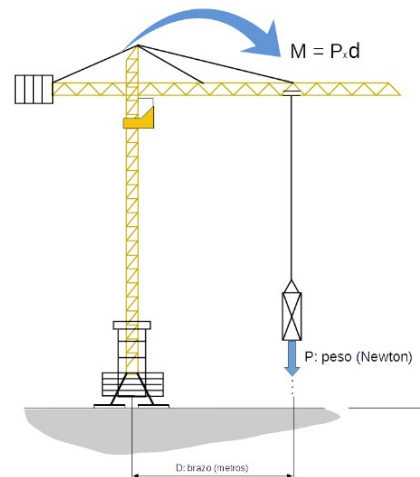


Mostrar retroalimentación

Ejemplos de aplicación de los momentos.



Cuando giramos la manilla de una puerta estamos aplicando un momento: una fuerza  $F$  aplicada en el extremo de la manilla que la hace girar.



Una grúa-torre sirve para elevar cargas y transportarlas a otros lugares dentro de su radio de alcance y su altura. Podrá elevar mayores cargas cuanto más cerca de la torre se encuentren. Por el contrario, cuánto más lejos de la torre, las cargas que puede elevar son menores, ya que al multiplicarlas por la distancia nos da momentos muy elevados. En las propias grúas existen carteles que nos indican las distancias, y los momentos admisibles.

## 4.- Esfuerzos

Hemos hablado de acciones (cargas o sollicitaciones), y de reacciones. Pero este sistema de fuerzas es una simplificación de lo que realmente ocurre en los cuerpos y en las estructuras. Cuando una fuerza (o un momento) actúa sobre un elemento de un cuerpo o de una estructura, se ven afectadas en mayor o menor medida todas las partículas del mismo. A estas partículas llega el resultado de esa acción que intenta deshacer el equilibrio que existía antes de que esta fuerza existiese. Las partículas para mantener el equilibrio, para mantener su unión y la propia cohesión del cuerpo, reaccionarán con un conjunto de **fuerzas internas** que intentan mantener unido el cuerpo. Estas fuerzas internas son los **esfuerzos** o **tensiones**. Dependiendo de cómo sean las fuerzas de acción, y de las características del propio elemento tendremos varios tipos.



Los esfuerzos son el conjunto de fuerzas internas a las que está sometido un cuerpo a consecuencia de las sollicitaciones o acciones que actúan sobre él. Estas fuerzas internas son el resultado de la interacción de unas partículas del cuerpo sobre las otras.

Tenemos esfuerzos de **tracción**, **compresión**, **flexión**, **torsión**, **cizalla** y **pandeo**. Los elementos de las estructuras están pensados para resistir adecuadamente estos esfuerzos, es decir: para trabajar a tracción, compresión, flexión, torsión, cizalla y pandeo.

Observa en la imagen cómo actúan los distintos esfuerzos:

### 4.1.- Tracción.



Un elemento trabaja a tracción, o está sometido a un esfuerzo de tracción cuando fuerzas con la misma dirección y de sentidos contrarios tienden a estirarlo.

Ejemplos de elementos a tracción son los cables, cuerdas y lonas tensadas.



Anzac Bridge, Sydney. De Adam.J.W.C. en Wikimedia Commons. Licencia CC-BY-SA.



Tensile structure. De Mark Kirohner en flickr. Licencia CC-BY-NC-SA.



Big Brutus, West Mineral, Kansas. De courtney johnston en flickr. Licencia CC-BY-NC-SA.



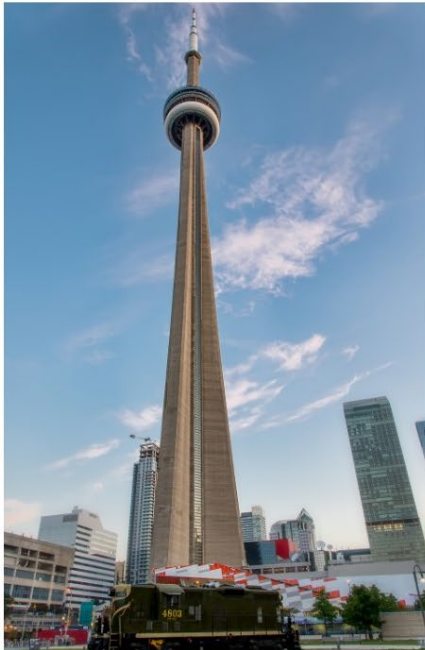
Riverside Stadium, 2010. De Chemical Engineer en Wikimedia Commons. Licencia dominio público.

## 4.2.- Compresión.



Se produce compresión cuando sobre el elemento actúan fuerzas de la misma dirección y sentido contrario que intentan a contraerlo.

Trabajan fundamentalmente a compresión los soportes o pilares, las patas de los muebles, los cimientos,...



Bajo el Puente de Randø. De Contando Estrellas en flickr. Licencia CC BY-SA.

## 4.3.- Flexión.

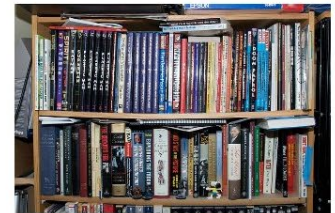


Es el esfuerzo resultante de aplicar fuerzas perpendicularmente al eje principal del elemento que tienden a doblarlo. La flexión produce compresión en la parte cóncava del elemento y tracción en la opuesta, la convexa.

Funcionan fundamentalmente a flexión las vigas, las baldas de una estantería,...



Hunslet Viaduct under construction. De Richard Kay en geograph. Licencia CC BY-SA.



Top Shelf. De Andy Ilnatko en flickr. Licencia CC BY-NC-ND.

## 4.4.- Torsión.



Las fuerzas que actúan sobre un objeto sometido a torsión tratan de retorcerlo, de girarlo en dos direcciones contrarias.

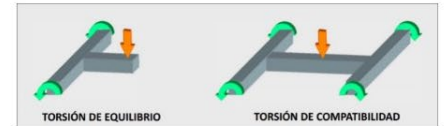
Son ejemplos de torsión los ejes, las herramientas de apriete,...



Universal joints shaft. De Panoha en Wikimedia Commons. Licencia CC-BY-SA.



Intentionally twisted (by 90°) steel (equal angle steel) showing permanent deformation. De Sunspearcler en Wikimedia Commons. Licencia CC-BY-SA.



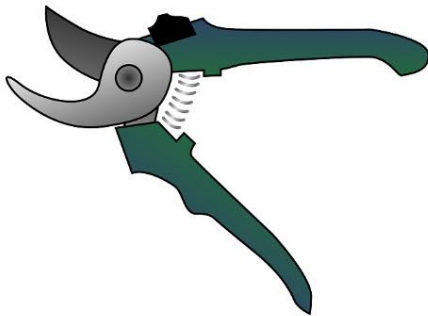
Elementos estructurales sometidos a torsión. De Luis Bañón Blázquez en "ELU de torsión" del open course ware "Estructuras de hormigón armado y pretensado (2011)", Universidad de Alicante. Licencia CC-BY-NC-SA.

## 4.5.- Cizalla, corte o cortadura.

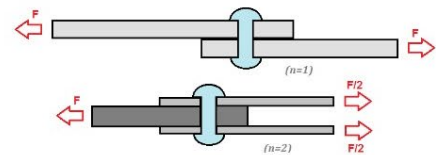


Es un esfuerzo que provocan fuerzas perpendiculares al eje longitudinal del elemento; aplicadas en sentidos contrarios casi en la misma vertical que tienden a cortarlo.

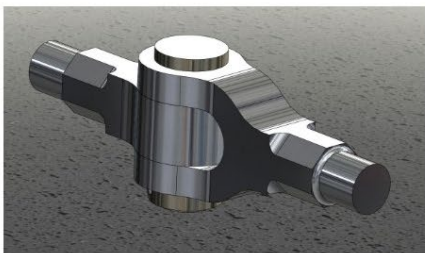
Como ejemplos de cizalla tenemos las tijeras y la cizalla o cuchilla de corte.



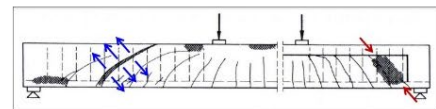
Tijeras. En pixabay. Licencia dominio público.



Fallo roblones. De Victor456 en Wikimedia Commons. Licencia CC-BY-SA.



Knuckle joint. De Sachin ghode en Wikimedia Commons. Licencia CC-BY-SA.



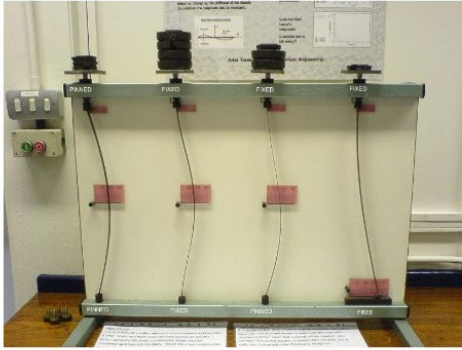
Acción del esfuerzo cortante en una viga. De Luis Bañón Blázquez en "Esfuerzo Cortante" del open course ware "Estructuras de hormigón armado y pretensado (2011)", Universidad de Alicante. Licencia CC-BY-NC-SA.

## 4.6.- Pandeo.

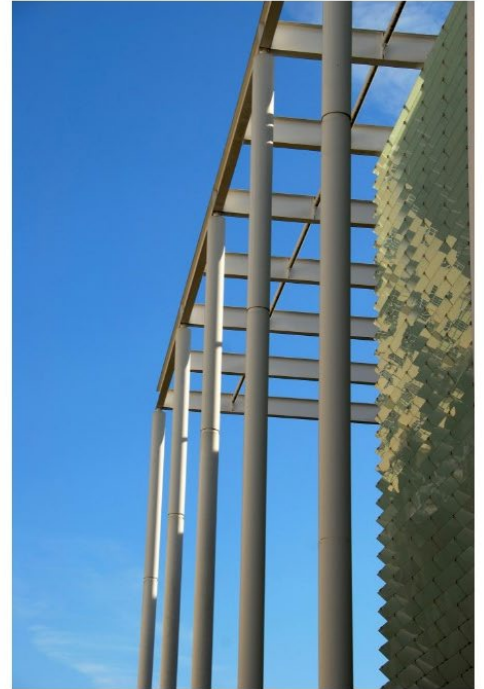


Es un tipo particular de esfuerzo relacionado con la compresión en elementos muy largos en relación con su sección transversal. Al deformarse la estructura su centro de gravedad se aleja del eje central, aumentando el momento de la fuerza y disminuyendo su resistencia.

Son ejemplos de elementos sometidos a pandeo los pilares metálicos, los barrotes,...



A demonstration model illustrating the different "Euler" buckling modes. De Grahams Child en Wikipedia. Licencia CC-BY-SA.



Imperial College Colonnade. De Rob Deutscher en flickr. Licencia CC-BY.

## 4.7.- Fatiga.

En ingeniería y, en especial, en ciencia de los materiales, la **fatiga de materiales** se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Aunque es un fenómeno que, sin definición formal, era reconocido desde la antigüedad, este comportamiento no fue de interés real hasta la **revolución industrial**, cuando a mediados del **siglo XIX** se comenzaron a producir las fuerzas necesarias para provocar la rotura de los materiales con cargas dinámicas muy inferiores a las necesarias en el caso estático y a desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables. Este no es el caso de materiales de aparición reciente, para los que es necesaria la fabricación y el ensayo de prototipos.

1. Denominado **ciclo de carga repetida**, los máximos y mínimos son asimétricos con respecto al nivel cero de carga.
2. Aleatorio: el nivel de tensión puede variar al azar en amplitud y frecuencia.

