

# 1

# INTRODUCCION

## 1. ESTADO ACTUAL DEL ANÁLISIS Y DISEÑO DE MAQUINAS

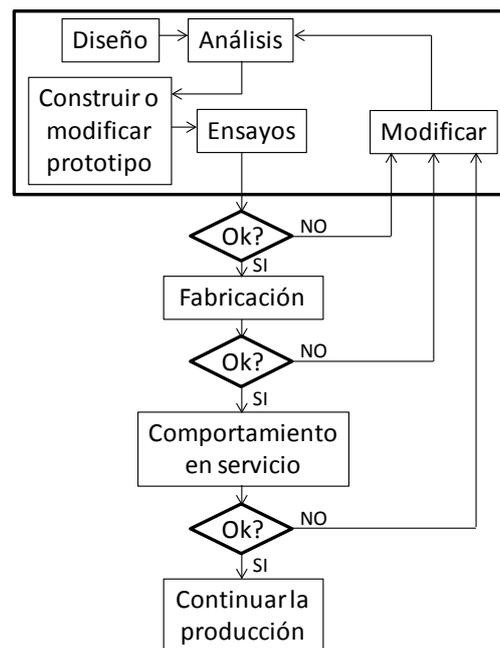
---

Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema. Si el plan resulta en la creación de un producto, entonces éste debe ser funcional, seguro, fiable, competitivo, útil, etcétera; en definitiva, debe cumplir ciertos criterios de diseño, muchos de los cuales se enumeran más adelante en este Tema. El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo, basado en la toma continua de decisiones.

En el diseño mecánico de cualquier sistema o subsistema (para diseñar un sistema mecánico es necesario tener amplios conocimientos sobre el diseño de los elementos que lo componen), se distinguen varias fases dentro del proceso iterativo, según se representa en el esquema de la Figura 1: diseño, análisis, construcción de prototipos y ensayos. Este proceso iterativo conecta a su vez con el proceso de fabricación y con el seguimiento de comportamiento en servicio de las series ya comercializadas.

El proceso de diseño comienza por el planteamiento del sistema en su conjunto, dividiendo el sistema en subsistemas (puede ser tan solo uno) y éstos en componentes. Tras esto, se realiza el dimensionamiento global de los principales componentes, sin descender a nivel de detalle; es lo que se puede denominar como boceto o esquema del esqueleto del subsistema. También se puede en este momento tomar decisiones iniciales sobre los materiales a utilizar para los principales componentes, así como fijar el coeficiente de

seguridad (CS) y la fiabilidad requeridos.



**Figura 1. Diagrama del proceso iterativo de diseño mecánico.**

Ya que aquí se va a tratar del diseño y análisis mecánico, a continuación será preciso realizar una estimación de las solicitaciones (deterministas o aleatorias) a las que va a estar sometido el sistema; este trabajo puede ser muy difícil de hacer con suficiente aproximación, sobre todo en las fases iniciales del proceso de desarrollo de producto. A partir de las solicitaciones generales del sistema, se calculan las solicitaciones en cada uno de los subsistemas y, dentro de cada uno de ellos, las que corresponden a cada componente o elemento. Esta tarea es también muy difícil de realizar, y además está sujeta a aproximaciones e hipótesis simplificadoras cuya validez depende de la experiencia y conocimiento del grupo de trabajo. Piénsese por ejemplo en el caso de una máquina compleja como un automóvil, que incluye diferentes subsistemas a su vez también complejos (suspensión, transmisión, sistema de frenado, chasis, etcétera), que igualmente tienen componentes complejos (ejes, rodamientos, engranajes, etcétera).

Una vez especificadas las solicitaciones a las que se ve sometido cada componente, se procede al análisis del mismo para conocer la respuesta del componente ante tales solicitaciones, para verificar si cumple con los requisitos de diseño. Siguiendo con el ejemplo anterior, habría que analizar si el eje (que ya se había predimensionado anteriormente) no falla a fatiga, a velocidad crítica, etcétera. Estos análisis se pueden llevar a cabo mediante métodos tradicionales, métodos numéricos (por ejemplo el Método de Elementos Finitos, MEF) y/o ensayos experimentales. A continuación se explican estos

métodos de análisis que permiten conocer la respuesta del componente y decidir sobre la validez de su diseño.

## 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MÁQUINAS: CÁLCULOS APROXIMADOS, MEF, PROTOTIPOS

---

El diseño de un elemento o pieza comienza siempre por un predimensionado aproximado. Una vez predimensionado, en base a la aplicación y a la experiencia del diseñador, se debe decidir sobre la necesidad o no de realizar un análisis para comprobar si este diseño inicial cumple o no con los requisitos de diseño. Así, hacer un análisis de la pieza es absolutamente necesario en la industria aeroespacial y nuclear ya que se trata de piezas muy optimizadas y de gran responsabilidad, mientras que no lo es tanto en otras industrias como la automovilística y la máquina herramienta, por poner unos ejemplos.

Una vez obtenidos los resultados del análisis se observa e interpreta la respuesta del elemento, y en el caso de una respuesta no válida o mejorable, se realizan modificaciones en el diseño original, buscando un diseño óptimo a base de ciclos iterativos de prueba-error.

Al analizar una pieza, es preciso decidir el procedimiento de análisis que se va a emplear. Cada procedimiento tiene sus características, y es habitual combinar varios de ellos (no son excluyentes). Los principales procedimientos de análisis son los métodos tradicionales, los métodos numéricos y los ensayos experimentales. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos:

- a) Los métodos tradicionales de análisis mecánico son aquellos derivados de la Teoría de Elasticidad, Resistencia de Materiales, Teoría de Estructuras, Teoría de Vibraciones... Estos procedimientos suelen estar basados en hipótesis simplificativas, de manera que el análisis puede realizarse de forma sencilla. En contraposición, la precisión que aportan no es generalmente muy elevada y tienen un rango de aplicación relativamente limitado. Por ejemplo, las fórmulas de Resistencia de Materiales permiten calcular las tensiones en una barra sometida a carga axial ( $\sigma=F/A$ ), no obstante esta fórmula está limitada a vigas esbeltas y pequeñas deformaciones, y tampoco considera fenómenos locales como las zonas de concentración de tensiones originadas por posibles cambios de sección en la barra. Además de fórmulas como la anterior, los métodos tradicionales emplean ábacos, tablas, gráficos, etcétera para analizar el elemento o pieza.

b) Los métodos numéricos se implementan generalmente en un ordenador (Computer Aided Engineering, CAE) y permiten realizar análisis que los métodos tradicionales no pueden abordar. Es decir, se utilizan para analizar elementos con geometrías, estados de carga, materiales, u otras características que no cumplan las hipótesis simplificativas en las que se basan los métodos tradicionales. Por ejemplo, mientras el análisis de una celosía puede realizarse con los métodos tradicionales, el análisis de impacto de un coche debe abordarse mediante métodos numéricos (geometría compleja, cargas de impacto, contactos, grandes deformaciones, material en régimen elastoplástico...). El método numérico de análisis mecánico más utilizado actualmente es el Método de Elementos Finitos (MEF), sobre el cual trata uno de los Temas de este libro.

c) Por último, los ensayos experimentales proporcionan los resultados más precisos, pero a la vez más costosos de obtener (en tiempo y dinero), por eso sólo deben utilizarse cuando realmente sean necesarios en el proceso de diseño de la pieza.

Ahora bien, ¿cuándo se debe utilizar un procedimiento u otro? Siguiendo con los ejemplos presentados anteriormente, si se quiere analizar una celosía, es decir, si se quieren obtener las fuerzas, tensiones y desplazamientos en las barras, es absurdo recurrir a ensayos experimentales, ya que los métodos tradicionales ofrecen unos resultados muy precisos con un coste de análisis muy reducido. No obstante, si se quiere realizar el análisis de impacto de un coche los métodos tradicionales no son viables. En este caso es necesario recurrir a métodos numéricos, analizando el modelo de Elementos Finitos de la estructura del coche por ordenador. Ahora bien, debido a la complejidad del fenómeno que se está analizando, será necesario recurrir además a pruebas experimentales (“crash test”) en las que se colisiona un prototipo contra un bloque rígido para ver su respuesta estructural exacta y las implicaciones en la seguridad de los viajeros; no obstante, el análisis por Elementos Finitos habrá servido para detectar, con un compromiso coste-precisión aceptable, puntos débiles de la estructura y probar diseños alternativos de geometría o materiales, de tal manera que reducirá considerablemente la cantidad de ensayos experimentales necesarios. Tal y como se verá más adelante en el libro, algo similar sucede en el análisis a fatiga de una pieza. La gran complejidad y dispersión del fenómeno obliga casi inevitablemente a realizar ensayos experimentales, pero haber utilizado previamente procedimientos de análisis tradicionales, como el método general que se explica en este libro, resulta ser un complemento perfecto. Y es que mediante el método general se pueden lograr unos resultados que, aunque no se puedan considerar definitivos, sí nos dan una idea del comportamiento de la pieza y nos

permiten obtener un buen diseño preliminar de la misma. Además, las sencillas fórmulas de este método permiten comprobar cómo cambia el comportamiento de fatiga de la pieza al modificar los factores que afectan a dicho comportamiento (como pueden ser el acabado superficial, las concentraciones de tensión, el tamaño...) con lo que los ensayos experimentales que debamos realizar a posteriori estarán mejor planificados y serán menos numerosos. En definitiva, no existe ningún procedimiento de análisis que sea mejor que los demás. En cada caso, el analista deberá utilizar el que mejor se adapte a sus necesidades concretas, siendo habitual combinar varios procedimientos.

### 3. CÓDIGOS Y NORMAS

---

En este libro se recogen métodos de análisis de elementos de máquinas que sirven para diseñar dichos componentes. Sin embargo, en muchos casos se deben seguir códigos gubernamentales y normas promulgadas por la industria que, si bien la mayor parte solo son recomendaciones, algunos son de obligado cumplimiento por ley. El ingeniero de diseño debe ser consciente de la existencia de estos códigos y normas.

A continuación se listan algunas de las organizaciones y sociedades que han establecido especificaciones para normas y códigos de diseño o seguridad en el ámbito de la Ingeniería Mecánica: American Society of Mechanical Engineers (ASME), American Gear Manufacturers Association (AGMA), International Standards Organization (ISO), Society of Automotive Engineers (SAE), etcétera. Los estados y las ciudades también tienen códigos propios, aunque la mayoría se refieren a estructuras de acceso al público y a componentes como elevadores, escaleras eléctricas y normativa sobre prevención de incendios.

### 4. CRITERIOS DE DISEÑO

---

Se denomina criterio de diseño a toda aquella característica que influya en el diseño de un determinado elemento o sistema. Los criterios de diseño de máquinas más comunes son los siguientes: resistencia, rigidez, seguridad, fiabilidad, coste, fabricación, peso, vida, estilo, forma, tamaño, propiedades térmicas, estado superficial, lubricación, mantenimiento, responsabilidad legal, etcétera. Los criterios de diseño son, en definitiva, aquellos aspectos que el diseñador debe tener en cuenta cuando lleve a cabo el diseño de un elemento o sistema. En este libro se estudia el diseño de máquinas tomando como criterios aquellos

relacionados con la ingeniería mecánica (resistencia, rigidez, fiabilidad, vida...). Aun así, no debe olvidarse que existen muchos criterios no ingenieriles que también ser considerados (estética, responsabilidad legal...).

## 5. SELECCIÓN DE MATERIALES: PROPIEDADES CUALITATIVAS Y CUANTITATIVAS

---

El buen funcionamiento de los componentes y sistemas de máquinas depende en gran medida de los materiales que especifique el diseñador. Los elementos de máquinas se fabrican con metales o aleaciones metálicas como el acero, aluminio, hierro colado, zinc, titanio o bronce, entre otros. Conocer las propiedades de los distintos materiales permite seleccionar el material más adecuado para una pieza y aplicación particular. Entre las propiedades más importantes de los materiales están las siguientes:

- a) Propiedades resistentes y fiabilidad de las mismas: el material debe tener una resistencia (estática, dinámica, a fatiga...) suficiente para soportar las solicitaciones que actúan sobre la pieza o elemento sin que se produzca el fallo.
- b) Precio de la materia prima: la materia prima necesaria para fabricar el material debe tener un coste asumible.
- c) Proceso de fabricación: el material debe ser fácil de fabricar.
- d) Manipulación, transporte y almacenaje: el material debe ser fácilmente manipulable, transportable y almacenable (por ejemplo, el vidrio no lo es).
- e) Facilidad de reparación: el material debe ser fácilmente reparable (por ejemplo, una pieza de acero “rota” se puede reparar mediante soldadura, no así una de plástico).
- f) Suministro: el suministrador del material debe ofrecer garantías en cuanto a continuidad y plazos de entrega.
- g) Viabilidad, coste y precisión de los métodos de análisis: el material debe tener unas características que no compliquen el análisis de la pieza. Por ejemplo, una de las principales ventajas del acero es su carácter homogéneo, isótropo y elástico lineal (antes de llegar a fluencia), lo que facilita enormemente su análisis.

Si se atiende a las propiedades mecánicas del material, éstas se pueden clasificar como cualitativas o cuantitativas. A continuación se describen las más importantes.

## 5.1 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS CUALITATIVAS

Las propiedades cualitativas de un material son aquellas que no se pueden medir. A continuación se explican brevemente las más importantes:

a) Homogeneidad: un material es homogéneo cuando tiene las mismas propiedades en todos sus puntos. Los aceros, aleaciones de aluminio, titanio y casi todos los metales y muchos otros no metales pueden considerarse homogéneos, no así los materiales compuestos de matriz orgánica y fibras (polímeros reforzados con fibra de vidrio o de carbono), el hormigón armado, etcétera.

b) Isotropía: un material es isótropo cuando tiene las mismas propiedades en todas direcciones. La mayor parte de los materiales metálicos pueden considerarse isótropos, mientras que las piezas de plástico fabricadas por inyección y prácticamente todos los materiales compuestos son claramente anisótropos.

c) Elasticidad: es la capacidad de un material para recuperar la forma original una vez que se eliminan las sollicitaciones que actúan sobre él. Desde un punto de vista general se puede afirmar que prácticamente la totalidad de los materiales que se utilizan en diseño de máquinas son elásticos, aunque según aumenta la carga se entra en régimen plástico.

d) Linealidad: un material es lineal cuando la curva tensión-deformación es una recta (no confundir con elasticidad). La linealidad permite la aplicación del principio de superposición y por tanto simplifica el análisis en comparación con materiales con comportamiento no lineal.

e) Plasticidad: es la capacidad de un material de deformarse sin romper, dentro de un límite de tensión, de forma que una vez eliminada la sollicitación no desaparece completamente la deformación.

f) Ductilidad y fragilidad: un material dúctil posee una gran deformación  $\epsilon_u$  en la rotura, que corresponde con una zona plástica amplia; un material frágil rompe con una deformación pequeña  $\epsilon_u$ , aunque la tensión  $\sigma_u$  pueda ser elevada. La frontera entre material dúctil y frágil no es sencilla de definir: desde el punto de vista teórico, se suele considerar que un material es dúctil si  $\epsilon_u > 5\%$  y frágil si  $\epsilon_u < 5\%$ . La característica más notable de un material dúctil está en su capacidad de absorber sobrecargas sin producir el fallo de la pieza (esto se explicará más adelante), y es por ello que en el diseño de máquinas se utilizan mayormente materiales dúctiles.

## 5.2 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS CUANTITATIVAS

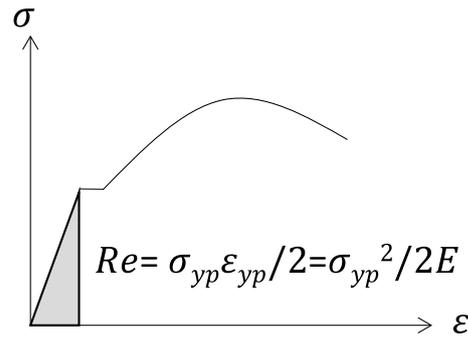
Las propiedades cuantitativas de un material son aquellas que se pueden medir a través de ensayos con probetas, como por ejemplo el ensayo de tracción. Entre las propiedades cuantitativas más importantes se encuentran las siguientes: resistencia a tracción, resistencia a fluencia, resistencia a torsión, resiliencia, tenacidad, dureza, resistencia a fatiga y creep o cedencia térmica.

a) Resistencia a tracción ( $\sigma_u$ ): también denominada tensión última, es la tensión de la probeta del ensayo de tracción en el momento de la rotura. Muchos materiales empleados en diseño de máquinas tienen diferentes propiedades resistentes a tracción y a compresión. Los materiales frágiles presentan un valor de tensión de rotura a compresión superior al de tracción ( $\sigma_{uc} > \sigma_{ut}$ ).

b) Resistencia a fluencia ( $\sigma_{yp}$ ): es la tensión a partir de la cual la deformación crece rápidamente y de forma permanente (plástica) sin apenas incremento de la fuerza exterior. En algunos materiales esa zona de fluencia no está claramente definida, pero puesto que la tensión de fluencia es de gran importancia en diseño mecánico, por convenio  $\sigma_{yp}$  se toma como aquel valor de tensión que produce una deformación permanente del 0.2% en la probeta del ensayo de tracción.

c) Resistencia a torsión: no es un concepto muy empleado, pues el comportamiento a torsión de un material se puede extrapolar a partir de su ensayo de tracción. En caso de realizarse un ensayo, éste consistirá en someter a torsión a una probeta de sección circular y registrar los valores del momento torsor  $T$  y del correspondiente ángulo de torsión  $\theta$ . Los resultados se pueden representar en un diagrama  $\tau - \theta$ , análogo al diagrama  $\sigma - \epsilon$  del ensayo de tracción. Tal y como se verá en un Tema posterior de este libro, la resistencia a torsión es  $\tau_{yp} = 0.5 - 0.57\sigma_{yp}$  a fluencia y  $\tau_u = 0.5 - 0.57\sigma_u$  a rotura.

d) Resiliencia: es la capacidad de un material para absorber energía elástica. Su medida es el módulo de resiliencia ( $Re$ ) y se obtiene del diagrama de tracción, según se indica en la Figura 2. Así, un material es tanto más resiliente cuanto mayor sea su tensión de fluencia  $\sigma_{yp}$  y menor el módulo de Young  $E$ . Esta característica es de gran importancia en elementos que trabajan almacenando energía elástica, como por ejemplo los resortes.



**Figura 2. Resiliencia de un material (Re).**

e) Tenacidad: es la capacidad de absorción de energía de un material hasta su rotura. El módulo de tenacidad estática es el área comprendida debajo del diagrama  $\sigma$ - $\varepsilon$  del ensayo de tracción. Esta característica es de gran importancia en elementos que trabajan sometidos a fuertes impactos. En los ensayos dinámicos de tenacidad, como los de Charpy o Izod, se somete a una probeta entallada al impacto de un péndulo, siendo la tenacidad el valor de energía potencial que ha perdido el péndulo a causa del impacto (igual a la energía almacenada por el material hasta su rotura).

f) Dureza: es la resistencia de un material a ser penetrado, es por tanto una medida de la resistencia al desgaste del material. Los procedimientos Brinell y Rockwell son los más utilizados. Ambos métodos utilizan un penetrador (bola de acero endurecido) que penetra en el material dejando una huella permanente: la dureza relaciona la fuerza de penetración con el tamaño de huella, de manera que para una determinada fuerza, a mayor tamaño de huella menor es la dureza del material. En aceros, para cálculos aproximados se observa experimentalmente que la dureza Brinell BHN es:

$$BHN(\text{en } kg/mm^2) = \frac{\sigma_u(\text{en } MPa)}{3.1} \quad (1)$$

g) Resistencia a fatiga: un material sometido a esfuerzos variables falla por fatiga al cabo de miles o millones de ciclos de carga. La resistencia a fatiga hace referencia a este fenómeno, y se estudiará en este libro en los Temas correspondientes al fallo por fatiga.

h) Creep: es un fenómeno por el cual a temperaturas relativamente elevadas la deformación de una pieza sometida a tensión estática (constante) aumenta progresivamente y de forma permanente con el tiempo, aun para valores de tensión por debajo del punto de fluencia del material  $\sigma_{yp}$ .

## 6. SISTEMAS DE DESIGNACIÓN DE METALES Y ALEACIONES

---

La selección de los materiales utilizados para la fabricación de los elementos o sistemas mecánicos es una tarea importante y, para ello, varias asociaciones asumen la responsabilidad del establecimiento de normas para clasificar metales y aleaciones. Cada una tiene su propio sistema de numeración. Para evitar confusiones, se ha convenido usar los Sistemas Unificados de Numeración (UNS, de Unified Numbering Systems).

Por un lado, para la clasificación de los metales y aleaciones se utiliza la designación de la American Society for Testing and Materials o ASTM. Por otro lado, existen asociaciones para designar materiales según el tipo y/o sector de aplicación, como por ejemplo:

- a) Asociación del Aluminio (AA, Aluminum Association).
- b) Instituto Estadounidense del Hierro y Acero (AISI, American Iron and Steel Institute).
- c) Asociación para el Desarrollo del Cobre (CDA, Copper Development Association).
- d) Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, Society of Automotive Engineers).

Es muy probable que el acero sea el material más usado en los elementos de máquinas por sus notables propiedades de resistencia, rigidez, durabilidad y facilidad de fabricación y análisis. El acero es una aleación de hierro, carbono, manganeso y otros elementos de aleación como el azufre, fosforo, silicio, níquel, cromo, molibdeno y vanadio.

Los sistemas de designación utilizados para aleaciones férricas, hierro fundido y diversos tipos de acero varían según diversos factores (sector, mercado, proveedores...). La Tabla 1 muestra algunos de los más utilizados en el ámbito industrial.

<b>ALEACIÓN FÉRRICA</b>	<b>DESIGNACIÓN</b>
<b>Hierro colado</b>	ASTM
<b>Aceros de construcción metálica</b>	UNE, SAE
<b>Aceros de herramienta</b>	DIN, AISI
<b>Aceros de embutición</b>	UNE
<b>Aceros inoxidables</b>	AISI

*Tabla 1. Designaciones más habituales para aleaciones férricas.*

## 7. COEFICIENTE DE SEGURIDAD EN DISEÑO DE MÁQUINAS

---

En el diseño de cualquier pieza o elemento de máquina, el coeficiente de seguridad (CS) proporciona un margen de seguridad que reduce el riesgo de fallo hasta un nivel aceptable. El coeficiente de seguridad actúa por tanto como un “colchón de seguridad” ante varios factores de incertidumbre en el proceso de diseño. Estos factores son:

- a) No se conoce suficientemente la influencia de ciertos factores en el comportamiento mecánico de la pieza. Por ejemplo, en el comportamiento a fatiga influyen muchos fenómenos cuyo efecto es difícil de estimar.
- b) Determinados factores son de índole estadística, por ejemplo las propiedades de los materiales o las cargas que soportan las piezas, sin embargo al realizar un análisis es muy habitual utilizar valores deterministas para evitar tener que realizar estudios probabilísticos.
- c) Determinados factores se simplifican con hipótesis simplificativas. Estas simplificaciones son el punto de partida de la mayoría de las expresiones de los métodos tradicionales de análisis.

Cuanto mejor se conozcan estos factores de incertidumbre, mejor se podrá estimar su influencia, y en consecuencia menor será el valor del coeficiente de seguridad que se deba utilizar en el diseño.

En su forma más sencilla, el coeficiente de seguridad se define como el cociente de dos valores: el valor de fallo (entendido como el valor que incapacita la pieza para cumplir adecuadamente su misión) en el numerador y el máximo valor admisible en el denominador. En diseño mecánico, estos valores pueden ser tensiones, deformaciones, desplazamientos, duraciones, etcétera.

$$CS = \frac{\text{Valor de fallo}}{\text{Máximo valor admisible}} \quad (2)$$

Centrándose en el material más empleado en el diseño de máquinas, el acero, éste puede ser dúctil o frágil. En materiales dúctiles, el fallo se da cuando la tensión alcanza el valor de fluencia  $\sigma_{yp}$ , ya que en este punto ocurre una deformación elevada y permanente que imposibilita que la pieza trabaje correctamente. En cambio, en materiales frágiles la tensión de fallo es la tensión de rotura  $\sigma_u$ , para la que la pieza se rompe de forma repentina. Sin duda, el fallo frágil es más peligroso, ya que implica que la pieza se “parta” sin previo aviso,

mientras que en fallo dúctil la pieza “sólo” se deforma de forma visible (deformaciones elevadas y permanentes), avisando de esta forma antes de llegar a la rotura. Por esta razón, se recomienda utilizar coeficientes de seguridad mayores en materiales frágiles que en dúctiles, típicamente el doble ( $CS_{frágil} \approx 2 \cdot CS_{dúctil}$ ).

Queda claro por tanto que la elección del valor del coeficiente de seguridad es una de las decisiones más importantes en el proceso de diseño. Así, en sist

emas de elevada responsabilidad por el riesgo de daños humanos o medioambientales, se usan valores del CS legislados, de obligado cumplimiento (diseño de aparatos de elevación, instalaciones de edificios, depósitos de gas a presión...); generalmente, esos coeficientes de seguridad van acompañados de un método o código de cálculo a seguir en el diseño. En caso de no existir legislación, un buen criterio es basarse en la experiencia de la empresa, ya que los valores de CS utilizados probablemente sean los que más se adaptan a su metodología particular de trabajo (procedimientos de cálculo, procesos de fabricación, control de calidad...).

Por último, si no se dispone de normativa específica o experiencia previa, existen tablas de valores recomendados del CS para casos habituales. Se trata de valores orientativos, y por tanto poco rígidos e incluso discutibles en algunos casos. La Tabla 2 muestra algunos de estos valores orientativos, correspondientes a materiales dúctiles; para materiales frágiles, según se ha comentado, estos valores deben multiplicarse por 2.

VALOR ORIENTATIVO DEL CS	APLICACION	INCERTIDUMBRE
$1,25 \leq CS \leq 1,5$	Material dúctil con una fiabilidad excepcional, en condiciones de trabajo muy previsibles, con solicitaciones estáticas bien conocidas y utilizando métodos de cálculo precisos.	- ↓ +
$1,5 \leq CS \leq 2,0$	Material dúctil de propiedades bien conocidas, condiciones ambientales relativamente constantes y poco agresivas, sometidos a solicitaciones estáticas bien conocidas y tal que se puedan realizar cálculos fiables.	
$2 \leq CS \leq 2,5$	Material dúctil de calidad media para piezas en condiciones de trabajo no muy exigentes ni agresivas, sometidas a cargas estáticas y esfuerzos que pueden determinarse con cierta aproximación.	
$2,5 \leq CS \leq 3,0$	Material dúctil para el que no hay una referencia conocida de la fiabilidad de los valores de sus propiedades resistentes, o sometidos a cargas estáticas que pueden ser determinadas con cierta precisión.	
$3,0 \leq CS \leq 4,0$	Material dúctil poco conocido, en condiciones de trabajo inciertas. En lo posible debe tratar de evitarse esta situación.	

*Tabla 2. Valores orientativos del coeficiente de seguridad CS para material dúctil (para material frágil, multiplicar valores por 2).*

## 8. UNIDADES

Se entiende por magnitud todo aquello que se puede medir (peso, tiempo, longitud, potencia, fuerza, trabajo...), y para ello es necesaria una unidad. En el campo de la Ingeniería Mecánica existen tres magnitudes básicas (masa, tiempo y longitud), de las cuales se derivan el resto de magnitudes, denominadas unidades derivadas (fuerza, trabajo potencia...).

Así, para definir un sistema de unidades en primer lugar se eligen las unidades básicas, que sirven como unidades de medición para las magnitudes básicas: por ejemplo, en el Sistema Internacional (SI), las unidades serían los kilogramos (*kg*) para medir la masa, los segundos (*s*) para medir el tiempo y los metros (*m*) para medir la longitud. De ellas se deducen las magnitudes derivadas, con sus correspondientes unidades derivadas: por ejemplo, fuerza en  $\text{kgm/s}^2$ , trabajo en  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$  o potencia en  $\text{kgm}^2/\text{s}^3$ . A algunas unidades derivadas se les da un nombre propio, por ejemplo  $\text{kgm/s}^2$ =Newton (N),  $\text{kgm}^2/\text{s}^2$ =Nm=Joule (J) y  $\text{kgm}^2/\text{s}^3$ =Nm/s=Watt (W).

En este libro, salvo que se indique lo contrario, se emplearán las unidades del Sistema Internacional (SI). La Tabla 3 muestra algunas de las magnitudes más empleadas en Ingeniería Mecánica, con sus correspondientes unidades en el SI.

MAGNITUD	UNIDADES EN SI	MAGNITUD	UNIDADES EN SI
Longitud	m	Velocidad	m/s
Tiempo	s	Aceleración	m/s <sup>2</sup>
Masa	kg	Fuerza	kgm/s <sup>2</sup> (N)
Ángulo	rad	Momento	kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> (Nm)
Frecuencia	s <sup>-1</sup> (Hz)	Presión	kg/(ms <sup>2</sup> ) (N/m <sup>2</sup> =Pa)
Superficie	m <sup>2</sup>	Trabajo, Energía	kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> (Nm=J)
Volumen	m <sup>3</sup>	Potencia	kgm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> (Nm/s=W)
Densidad	kg/m <sup>3</sup>		

*Tabla 3. Varias magnitudes y unidades del SI.*