Diseño de Máquinas

Antonio José Besa Gonzálvez
Francisco Valero Chuliá

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Antonio José Besa Gonzálvez
Francisco José Valero Chuliá

Diseño de Máquinas

Editorial
Universitat Politècnica
de València

Colección Académica

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Besa Gonzálvez, A.J. ; Valero Chuliá, F.J. (2016). *Diseño de Máquinas*. Valencia: Universitat Politècnica de València

© Antonio José Besa Gonzálvez
Francisco José Valero Chuliá

© 2016, Editorial Universitat Politècnica de València
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.:0524_03_01_20

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN:978-84-9048-529-3
Impreso bajo demanda

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

Impreso en España

Prólogo

Esta publicación pretende cubrir los conocimientos básicos del diseño de elementos de máquinas para las titulaciones de ingeniería. La obra se organiza en dos bloques, en el primero, que está formado por tres capítulos, se inicia con un Capítulo de introducción sobre el fallo mecánico y el comportamiento mecánico de los materiales. El segundo Capítulo aborda el diseño bajo cargas constantes de tipo multiaxial, sirviendo de base para poder realizar a continuación el estudio bajo cargas variables (diseño a fatiga) que se aborda en el Capítulo tercero.

El segundo bloque se dedica al estudio de algunos de los elementos de máquinas más comunes, tales como los ejes que se estudian en el Capítulo cuarto, rodamientos, en el Capítulo quinto y por último las transmisiones, haciendo especial hincapié en el diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos cuyo estudio centra el contenido del Capítulo sexto.

Al final de cada capítulo se incluyen ejercicios que muestran la aplicación práctica de los conocimientos teóricos en la resolución de problemas de diseño mecánico.

Índice

Prólogo i
Índice iii
Capítulo 1 Introducción al Diseño de Máquinas 1
1 Introducción 1
2 Clasificación de materiales. Características básicas 2
2.1 Metales y aleaciones 3
2.1.1 Fundiciones de hierro y aceros 3
2.1.2 Aluminio 5
2.1.3 Aleaciones de zinc 5
2.1.4 Aleaciones de níquel 5
2.2 Designación de los aceros 5
2.2.1 Categoría 1 6
2.2.2 Categoría 2 6
2.2.3 Sistema de designación AISI 7
2.3 Tabla de aceros empleados en componentes de máquinas 8
3 Conocimientos básicos de elasticidad 11
3.1 Tensión en un punto 11
3.2 Tensión plana 13
3.2.1 Círculo (principal) de Mohr 14

4 Ensayos de caracterización del material 16
4.1 Ensayo de tracción 16
4.2 Ensayo de torsión sobre probeta tubular 19
5 Tipos de fallos 21
5.1 Fallos por deformación 21
5.1.1 Deformaciones independientes del tiempo 21
5.1.2 Deformación dependiente del tiempo (creep) 22
5.2 Fractura 22
5.2.1 Fractura frágil 23
5.2.2 Fractura dúctil 23
5.2.3 Otras consideraciones 24
6 Coeficiente de seguridad en el diseño 25
7 Ejercicios 26
7.1 Cálculo de tensiones principales 26
Capítulo 2 Diseño a Carga Estática 29
1. Introducción 29
2. Criterios de fallo: forma general 30
3. Criterio de la máxima tensión normal 31
4. Criterio de la máxima tensión tangencial 31
4.1. Tensiones hidrostáticas y criterio de máxima tensión tangencial 34
5. Criterio de la energía de distorsión 34
6. Comparación de los criterios básicos de fallo 36
7. Criterio de fluencia de Coulomb-Mohr 38
8. Fractura en materiales frágiles 38
8.1. Criterio de Coulomb-Mohr 39
8.2. Criterio de fractura modificado de Mohr 41
9. Comentarios adicionales sobre los criterios de fallo 43
9.1. Comportamiento frágil y dúctil 43
9.2. Efecto de los concentradores de tensión (entallas) 44
9.3. Necesidad de la mecánica de la fractura 47
10. Ejercicios 47

10.1. Comparación criterios máxima tensión tangencial y energía de distorsión..47
10.2. Aplicación del criterio de fluencia de Coulomb-Mohr.....49
10.3. Aplicación del criterio modificado de Mohr 51

Capítulo 3 Diseño a Fatiga.....53

1. Introducción 53

2. Mecanismo de fallo por fatiga 54
2.1. Nucleación. 54
2.2. Propagación.....55
2.2.1. Propagación de la grieta en metales dúctiles.....55
2.2.2. Propagación de la grieta en metales frágiles.....56
2.3. Fallo final 56

3. Enfoques del análisis de fatiga.....57
3.1. Fatiga de alto ciclo 57
3.2. Fatiga de bajo ciclo 58

4. Definiciones y conceptos 59
4.1. Descripción de la carga cíclica.....59
4.2. Curvas tensión-vida (curvas S-N) 60
4.3. Máquinas de ensayo 62

5. Tendencias en las curvas S-N y estimaciones.....64
5.1. Tendencias del límite de fatiga en función de S_u 64
5.2. Factores modificadores del límite de fatiga 66
5.2.1. Factor de superficie k_a 66
5.2.2. Factor de tamaño k_b 68
5.2.3. Confiabilidad k_e.....69
5.2.4. Otras influencias k_x 70

6. Efecto del concentrador de tensiones.....73
6.1. Introducción 73
6.2. Causas del efecto $k_f < k_t$.....78
6.3. Sensibilidad a la entalla y estimaciones empíricas de k_f 79
6.4. Efecto de entalla en vidas cortas e intermedias 83

7. Influencia de las tensiones medias en fatiga uniaxial 84
7.1. Presentación de datos con tensiones medias 84
7.2 Estimación del diagrama tensión media – alternante (material dúctil) 85
7.3 Influencia de las tensiones medias en materiales frágiles 88

7.4 Tensiones equivalentes 89
8 Efectos combinados de entallas y tensiones medias 91
9 Tensiones multiaxiales 91
9.1 Planteamiento para estados de tensiones proporcionales (material dúctil) 92
9.2 Estados complejos (material dúctil) 93
9.3 Materiales frágiles 93
10 Carga de amplitud variable 94
10.1 La regla de Palmgren-Miner 95
10.2 Conteo de ciclos para historias temporales irregulares 96
11 Criterios de diseño a fatiga 98
11.1 Diseño para vida infinita 99
11.2 Diseño para vida segura 99
11.3 Diseño seguro al fallo 99
11.4 Diseño tolerante al fallo 100
12 Anexo. Historia del Comet I 100
13 Ejercicios 102
13.1 Cálculo de la vida de un eje sometido a flexión rotativa 102
13.2 Influencia del concentrador de tensiones 103
13.3 Tensiones multiaxiales en un depósito esférico. 105
13.4 Fatiga multiaxial en material frágil. 107
13.5 Conteo de ciclos y daño acumulado. 109
Capítulo 4 Ejes 115
1. Introducción 115
2. Determinación de fuerzas actuantes 116
2.1. Transmisión por cadena 117
2.2. Transmisión por correa de fricción 117
2.3. Engranajes cilíndricos de dientes rectos 119
2.4. Engranajes cilíndricos helicoidales 120
2.5. Engranaje cónico de dientes rectos 121
3. Determinación de momentos flectores 121
4. Estado tensional 122
5. Diseño a fatiga 124

5.1. Material dúctil 124
5.2. Material frágil 126
6. Otras consideraciones de diseño 127
6.1. Deformaciones laterales por flexión 127
6.2. Rigidez torsional 134
6.3. Vibraciones 134
7. Ejercicios 136
7.1. Cálculo de fuerzas transmitidas 136
7.2. Cálculo a fatiga de eje sometido a par variable 137
7.3. Rigidez torsional 140
7.4. Cálculo del diámetro necesario a fatiga de un eje 141
7.5. Estimación de la velocidad crítica de un eje 145
Capítulo 5 Rodamientos 151
1. Introducción 151
2. Tipos de rodamientos y características 155
2.1. Rodamientos radiales 155
2.1.1. Rígido de bolas 155
2.1.2. De contacto angular 155
2.1.3. De autoalineación 156
2.1.4. De rodillos cilíndricos 157
2.1.5. De rodillos cónicos 157
2.1.6. De rodillos esféricos 158
2.1.7. Rodamientos de agujas 158
2.2. Rodamientos axiales 159
2.2.1. De bolas 159
2.2.2. De rodillos cilíndricos 159
2.2.3. De rodillos esféricos 159
3. Lubricación de rodamientos 159
3.1. Lubricación con grasa 162
3.2. Lubricación con aceite 163
4. Cálculo de la vida en rodamientos 164
4.1. Introducción 164
4.2. Carga en los elementos rodantes 165
4.2.1. Fuerza equivalente en rodamientos rígidos de bolas 165

4.2.2. Fuerza equivalente en rodamientos de rodillos cónicos 166
4.2.3. Fuerza equivalente en rodamientos de rodillos cilíndricos..... 167
4.3. Fallo bajo carga estática 167
4.4. Fallo a fatiga del rodamiento..... 169
4.5. Factores de corrección de vida 170
4.5.1. Por fiabilidad (a_1) 170
4.5.2. Por condiciones de trabajo (a_{iso})..... 171
4.6. Recomendaciones de vidas de rodamientos 177
4.7. Rodamientos sometidos a cargas variables 178
5. Juego interno del rodamiento..... 179
6. Montajes típicos de rodamientos 180
7. Ejemplo de hoja de un catálogo. 183
8. Ejercicios 183
8.1. Cálculo de la vida esperada de un rodamiento 183
8.2. Selección de un rodamiento rígido de bolas..... 185
8.3. Cálculo de rodamientos de rodillos cónicos..... 189
Capítulo 6 Transmisiones Engranajes Cilíndricos..... 195
1 Introducción a las transmisiones..... 195
1.1 Transmisiones por rozamiento, correas..... 195
1.1.1 Correas planas 196
1.1.2 Correas trapeciales 198
1.2 Transmisiones flexibles por engrane..... 199
1.2.1 Cadenas..... 199
1.2.2 Correas dentadas o síncronas 200
1.3 Transmisiones por engranajes..... 201
2 El perfil de evolvente. Normalización 203
2.1 Interferencia..... 206
2.2 Geometría del dentado helicoidal 207
3 Cálculo de engranajes cilíndricos 211
3.1 Causas de fallo 211
3.2 Proceso de diseño..... 212
3.3 Cálculo a fallo superficial 212
3.4 Cálculo a flexión. Método de Lewis modificado 217

3.5 Condiciones reales de funcionamiento en engranajes cilíndricos 219
3.5.1 Coeficiente de aplicación K_A 219
3.5.2 Coeficiente dinámico K_V 221
3.5.3 Coeficientes de distribución de carga longitudinal $K_{F\beta}$ y $K_{H\beta}$ 223
3.5.4 Coeficientes de distribución de carga transversal $K_{F\alpha}$ y $K_{H\alpha}$ 224
3.6 Seguridad frente al fallo 225
3.6.1 Coeficiente de seguridad a flexión 225
3.6.2 Coeficiente de seguridad a presión superficial 226
3.7 Criterio de dimensionado 226
4 Lubricación de engranajes cilíndricos 227
4.1 Método UNITED 227
4.2 Método de la norma ANSI/AGMA 9005-E02 228
5 Características resistentes del material de engranajes 229
5.1 Resistencia superficial 230
5.2 Resistencia a la rotura por flexión 230
5.3 Características del engranaje de referencia 231
5.4 Tensiones límite a fallo superficial S_{HL} y a flexión S_{FL} 231
5.5 Coeficientes correctores 234
5.5.1 Coeficiente de duración 234
5.5.2 Coeficientes de influencia debidos a la película de aceite 235
5.5.3 Coeficiente de relación de durezas Z_W 236
5.5.4 Coeficiente de tamaño Z_X 237
5.5.5 Coeficiente de duración por flexión Y_{NT} 237
5.5.6 Coeficiente de sensibilidad relativo a la entalla $Y_{\delta rT}$ 238
5.5.7 Coeficiente de rugosidad relativa Y_{RrT} 239
5.5.8 Coeficiente de tamaño Y_X 240
5.6 Materiales empleados en la construcción de engranajes 240
6 Ejercicios 243
6.1 Cálculo de las tensiones admisibles a fallo superficial S_{HP} y a flexión S_{FP} 243
6.2 Cálculo del coeficiente de seguridad de una transmisión 245
6.3 Ejemplo de diseño de una transmisión de engranajes cilíndricos helicoidales 249
6.4 Selección del lubricante para una transmisión de engranajes 254
Bibliografía 257

Capítulo 1

Introducción al Diseño de Máquinas

1 Introducción

En una economía globalizada las empresas dedicadas a la fabricación de máquinas deben trabajar con diseños que garanticen buenos niveles de prestaciones manteniendo unos costes de fabricación y funcionamiento adecuados, al mismo tiempo se debe garantizar la seguridad, durabilidad y estética del producto. Para asegurar prestaciones, seguridad y durabilidad es necesario evitar que aparezcan deformaciones excesivas en los componentes, además, debe evitarse la aparición de grietas, o si no es posible evitar su aparición, se debe lograr que estas grietas no progresen de forma descontrolada hasta provocar una fractura completa.

El estudio de la deformación y el agrietamiento en materiales se denomina comportamiento mecánico de materiales. Los conocimientos en esta área son la base que permite evitar estos tipos de fallos en las aplicaciones ingenieriles. Un aspecto concreto es el ensayo físico de muestras de material mediante la aplicación de fuerzas y deformaciones. Una vez se conoce cuantitativamente el comportamiento del material, a partir de los ensayos, se podrá evaluar su aplicación a un diseño concreto.

En las últimas décadas se ha experimentado un desarrollo tecnológico espectacular. La introducción de nuevos materiales, el aumento de velocidades de funcionamiento, las temperaturas de operación más altas, la reducción de coste obligada por la competencia, etc., han conducido al desarrollo y aplicación de mejores técnicas de diseño. Estas condiciones han impulsado el estudio del comportamiento de los materiales, de forma que se pueda modelar con mayor precisión los múltiples modos de

fallo mecánico. Se puede hacer compatible una mayor capacidad con un menor tamaño y coste, bien desarrollando nuevos materiales más resistentes o bien haciendo un uso más eficaz de los disponibles. La primera alternativa concierne a los científicos y especialistas en materiales, mientras que la segunda es responsabilidad del diseñador.

Criterios importantes que también hay que considerar son la fiabilidad, y la facilidad para la inspección o el mantenimiento. En cierto sentido, el diseño perfecto sería aquel en el que la máquina completa (todos sus componentes) fallara a una vida predefinida. Si fuera posible producir este diseño perfecto, requeriría un análisis altamente refinado, un desarrollo experimental extenso, un conocimiento preciso de propiedades de los materiales, una definición muy fiable de las condiciones de funcionamiento, y un equipo de diseñadores meticulosamente coordinado. Este planteamiento es evidentemente muy costoso, tanto en tiempo como en dinero, y en general no es competitivo. De esta forma, en general, se buscará un incremento en las prestaciones y una reducción del peso y del volumen, manteniendo la competitividad del producto.

2 Clasificación de materiales. Características básicas

Cuando el ingeniero se enfrenta al reto de un nuevo diseño dispone de una amplia variedad de materiales entre los que seleccionar el que va a emplear, materiales ingenieriles que se pueden clasificar en primera instancia en:

- Metales y aleaciones.
- Materiales poliméricos.
- Materiales cerámicos y vidrios.
- Materiales compuestos.

En la tabla 1.1 se muestran ejemplos típicos de cada grupo de materiales.

Tabla 1.1. Clases y ejemplos de materiales ingenieriles

Metales y aleaciones	**Cerámicas y vidrios**
Hierros fundidos y aceros	Productos arcillosos
Aleaciones de aluminio	Cemento
Aleaciones de titanio	Alúmina (Al_2O_3)
Aleaciones de cobre; bronces	Carburo de Tungsteno
Aleaciones de manganeso	Aluminuro de Titanio (Ti_3Al)
Superaleac. de base Níquel	Cristales de Sílice (SiO_2)
Polímeros	**Compuestos**
Polietileno (PE)	Contrachapado
Policloruro de Vinilo (PVC)	Carburos Cementados
Poliestireno (PS)	Fibra de vidrio
Nylons	Grafito-epoxi
Epoxis	Aluminio – refuerzo carburo de silicio
Gomas	ARALL Aramida de aluminio laminado

Esta publicación se centra en el cálculo de elementos de máquinas metálicos, de ahí que se presente a continuación las características de este grupo de materiales con más detalle.

2.1 Metales y aleaciones

El metal más utilizado es el hierro, que es el constituyente fundamental de los aceros. Otros metales usualmente utilizados son el aluminio, cobre, titanio, magnesio, níquel, cobalto, cobre, zinc, plomo y estaño.

Una aleación metálica es una combinación de dos o más elementos químicos, usualmente fundidos conjuntamente, en donde el material base es el metal. Los elementos químicos de aleación más comunes además de los metales citados anteriormente son el boro, carbono, silicio, manganeso y molibdeno. Las combinaciones y proporciones de los elementos de aleación tienen efectos importantes en las características de resistencia al esfuerzo, a la temperatura, a la corrosión, sobre la ductilidad, etc. Estas propiedades también están afectadas por el procesado realizado: tratamiento térmico aplicado, conformado por deformación (forjado, laminado, extrusión o trefilado) o fundición.

2.1.1 Fundiciones de hierro y aceros

Las fundiciones de hierro se distinguen de los aceros en que su contenido en carbono es superior al límite de solubilidad (superior al 2%).

2.1.1.1 Fundiciones de hierro

Contenido en carbono entre el 2% y el 4% y del 1% al 3% de silicio. El exceso de carbono en muchas fundiciones está presente en forma de grafito.

En la **fundición gris** el grafito aparece en forma de agujas, en estas se desarrollan fácilmente grietas bajo tensiones de tracción por lo que es un material frágil. A compresión aumenta su resistencia (tres a cinco veces) y su ductilidad. Su tensión normal de rotura a tracción se encuentra comprendida entre 140 y 400 *MPa*. Se emplea en engranajes, bloques de motores y carcasas de máquinas.

La **fundición dúctil** o nodular contiene grafito en forma de esferas, esto se logra añadiendo pequeñas cantidades de magnesio, como resultado es un material más dúctil a tracción que la fundición gris y con mayor resistencia (entre 420 y 850 *MPa* de tensión normal de rotura a tracción). Se emplea en engranajes y cigüeñales.

La **fundición blanca** es dura y frágil, se logra enfriando rápidamente la colada que en otro caso daría lugar a la fundición gris, esto da lugar a la aparición de carburo de hierro (cementita). Presenta una resistencia a tracción entre 130 y 500 *MPa* (de 1400 a 1700 *MPa* a compresión). Se utiliza en el revestimiento interno de molinos.

La **fundición maleable de corazón blanco** se obtiene mediante tratamiento térmico de la fundición blanca en atmósfera descarburante. Cualquier resto de carbono se encuentra en forma de carbono de recocido.

En la **fundición maleable de corazón negro** se calienta la fundición blanca a temperaturas entre 850 y 900 ºC un tiempo prolongado en una atmósfera neutra, descomponiéndose la cementita. El grafito aparece en forma de uvas o rosetas rodeado de una matriz ferrítica, perlítica o martensítica-perlítica. Como su estructura es similar a la fundición nodular tiene una resistencia alta y una ductilidad apreciable. Se emplea en engranajes y accesorios para tuberías.

2.1.1.2 Aceros al carbono y tratamientos

Contenido en carbono usualmente inferior al 1%. También contienen pequeñas cantidades de manganeso. Las características del acero dependen de su composición y del tratamiento térmico al que se le someta. El **recocido** consiste en un calentamiento hasta temperatura de austenitización (800 - 925 °C) seguido de un enfriamiento lento. Este tratamiento aumenta la elasticidad, facilita el mecanizado de las piezas al reducir la dureza generada por el trabajo en frío y reduce las tensiones internas del material. El **normalizado** es un recocido a una temperatura ligeramente más alta, logra una estructura de grano fino y uniforme. En el **templado** el acero se calienta a unos 900 ºC enfriando rápidamente mediante inmersión en agua o aceite, con eso se logra una gran dureza y fragilidad. Con el posterior **revenido** (nuevo calentamiento a menor temperatura) se reduce el límite de fluencia, pero se aumenta la ductilidad. Al acero templado y revenido también se le conoce como acero **bonificado**. Si el calentamiento es rápido sólo afectará a la superficie del material (de 0,25 a 1 *mm*), lográndose un endurecimiento superficial (por ejemplo, en engranajes). En la **cementación** se aporta carbono a la superficie mediante difusión a alta temperatura (unos 900 ºC) aumentando la dureza superficial. En la **nitruración** se aumenta la dureza superficial y la resistencia al desgaste.

Aceros bajos al carbono, contenido en carbono inferior al 0,30 %, su tensión de fluencia es reducida, pero son muy dúctiles, se emplean en estructuras y en aplicaciones de chapa como en el automóvil.

Aceros al carbono medio, con un contenido entre el 0,30% y el 0,60%. Al tener un contenido en carbono más alto su tensión de fluencia es más alta, pero su ductilidad es menor (más frágiles). Se emplean en componentes de máquinas como los ejes.

Aceros al carbono alto, del 0,60 % al 1% y superior. Se emplean cuando se requiere gran dureza y no es problemática la fragilidad como en herramientas, rodamientos y resortes.

2.1.1.3 Aceros inoxidables

La resistencia a la oxidación se la proporciona un contenido en cromo de al menos el 11% (entre el 17% y el 26%), algunos también contienen níquel y molibdeno. Se emplean en tuberías y tornillería resistentes a la corrosión, en álabes de turbinas y en maquinaria del sector de la alimentación. Aquellos que contienen sólo cromo son magnéticos y templables. Su tensión de fluencia se sitúa entre los 200 y los 460 *MPa* y la de rotura entre 500 y 950 *MPa*.

2.1.2 Aluminio

Sus ventajas son el bajo peso, la resistencia a la corrosión y la facilidad de conformado y maquinado. Se puede encontrar sin alear (empleado en depósitos) o aleado con cobre (en estructuras de aviones, vehículos y piezas de máquinas), manganeso, silicio, magnesio y con zinc (en estructuras de aviones y para trabajo pesado).

Se puede endurecer por deformación en frío aumentando su resistencia, o mediante tratamiento térmico con calentamiento y posterior enfriamiento.

2.1.3 Aleaciones de zinc

El zinc es el cuarto metal más utilizado, gran parte en forma de zinc galvanizado para proteger al acero de la corrosión, pero también en piezas fundidas (automóvil, electrónica, construcción, …) y en las aleaciones empleadas en cojinetes de aceite. Usualmente aparece aleado con aluminio y magnesio o con cobre o níquel. Las aleaciones más usadas se denominan Zamak 5 (4% de aluminio, 0,055% de magnesio y 1% de cobre) que presenta una tensión de rotura de 320 *MPa* y una tensión de fluencia de 250 *MPa* y Zamak 3 (4% de aluminio y 0,035% de magnesio) que presenta una tensión de rotura de 280 *MPa* y una tensión de fluencia de 200 *MPa*.

2.1.4 Aleaciones de níquel

Presentan una buena ductilidad. Sustituyen al acero en ambientes corrosivos y con altas temperaturas. Se emplean en turbinas, hornos, componentes expuestos a ambiente marino, reactores nucleares. Algunas de estas aleaciones están patentadas: Inconel (níquel y cromo) que presenta tensiones de fluencia entre 340 y 570 *MPa*, Monel (níquel y cobre) con tensiones de fluencia entre 240 y 690 *MPa*.

2.2 Designación de los aceros

En la norma UNE-EN 10027-1:2017 se establece las reglas para las designaciones simbólicas de los aceros. Se clasifican en dos categorías:

Categoría 1: aceros designados en función de su utilización y características.

Categoría 2: aceros definidos en función de su composición química.

Cuando el acero se presente en forma de una pieza moldeada, su designación simbólica debe estar precedida por la letra G.

2.2.1 Categoría 1

Aceros de construcción: Se emplea la letra S seguida del valor mínimo del límite elástico expresado en *MPa* y de posibles símbolos adicionales como la resistencia a la flexión por choque (energía mínima absorbida en el impacto a una temperatura prefijada, ver tabla 1.2) u otros (C conformado en frío, F forjado, N normalizado, Q templado y revenido, W resistente a la corrosión, S construcción naval, …) ejemplo: S235JR acero de base no aleado de uso general.

Aceros para construcción mecánica: Como los aceros de construcción sustituyendo la letra S por la E.

Tabla 1.2. Característica de flexión por choque. Resiliencia

Característica de flexión por choque (Julios)			Temperatura de ensayo
27 J	40 J	60 J	ºC
JR	KR	LR	20
J0	K0	L0	0
J1	K1	L1	-10
J2	K2	L2	-20
J3	K3	L3	-30
J4	K4	L4	-40
J5	K5	L5	-50
J6	K6	L6	-60

2.2.2 Categoría 2

2.2.2.1 Aceros no aleados (excluidos los de fácil mecanización), menos del 1% de manganeso)

Letra C seguida de dígitos que indican el contenido en carbono en % multiplicado por 100 y de símbolos adicionales (C conformado en frío, E con un contenido máximo de azufre especificado, S para muelles, U para herramientas, ...). Ejemplo: C35E acero con el 0,35% de C.

2.2.2.2 Aceros aleados con menos de un 5% de cada elemento de aleación, con más de un 1% de manganeso, aceros de fácil mecanización (excluidos los rápidos)

Dígitos que indican el contenido en carbono en % multiplicado por 100 seguidos de los símbolos de los elementos de aleación y de números separados por guión que indican el contenido de esos elementos en % multiplicado por los siguientes factores: factor =4 para el Cr, Co, Mn, Ni, Si, W, factor = 10 para el Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr, factor = 100 para el Ce, N, P, S y factor =1000 para el B. Ejemplo: 42CrMo4 acero con el 0,42 de C, 1% de Cr.

2.2.2.3 Aceros inoxidables y otros aceros aleados con al menos un elemento de aleación por encima del 5%

Letra X seguida del % en carbono multiplicado por 100, los símbolos químicos de los elementos de aleación y números separados por guiones que representan el contenido de esos elementos en % redondeados al entero más próximo. Ejemplo: X38CrMoNb16 acero inoxidable con el 0,38% de C, 16% de Cr.

2.2.3 Sistema de designación AISI

El AISI (American Iron and Steel Institute) usa un sistema de cuatro dígitos ampliamente utilizado en todo el mundo. Los dos primeros identifican a los principales elementos de aleación, mientras que los dos últimos indican la cantidad de carbono del acero en % multiplicado por 100.

Tabla 1.3. Sistema de designación AISI

10xx	Sin aleación, excepto Mn (< 1%)
11xx	Fácil mecanizado, resulfurado S (0,1%)
12xx	Fácil mecanizado, resulfurado y refosforizado
13xx	Con Manganeso (1,75%), mejora la templabilidad
15xx	Con Manganeso (> 1%) para cementar
23xx	Con Níquel (3,5%)
25xx	Con Níquel (5%)
31xx	Con Níquel (1,25%) - Cromo (0,65%)
33xx	Con Níquel (3,5%) - Cromo (1,5%)
40xx	Con Molibdeno (0,25%)
41xx	Con Cromo (0,95%) - Molibdeno (0,2%)
43xx	Con Níquel (1,8%) - Cromo (0,5 – 0,8%) - Molibdeno (0,25%)
44xx	Con Molibdeno (0,5%)
46xx	Con Níquel (1,8%) - Molibdeno (0,25%)
48xx	Con Níquel (3,5%) - Molibdeno (0,25%)
5xxx	Con Cromo (0,4%)
51xx	Con Cromo (0,8%)
51100	Con Cromo (1%). Para rodamientos. Carbono (1%)
52100	Con Cromo (1,45%). Para rodamientos. Carbono (1%)
61xx	Con Cromo (0,5 – 1,1%) - Vanadio (0,15%)
86xx	Con Níquel (0,55%) - Cromo (0,5%) - Molibdeno (0,2%)
87xx	Con Níquel (0,55%) - Cromo (0,5%) - Molibdeno (0,25%)
92xx	Con Silicio (2%)
93xx	Con Níquel (3,25%) - Cromo (1,2%) - Molibdeno (0,12%)

2.3 Tabla de aceros empleados en componentes de máquinas

En las siguientes tablas se presentan algunos ejemplos de los aceros empleados en la construcción de componentes de máquinas, con su designación, equivalencia en otras normas, tratamiento, resistencia aproximada y aplicaciones.

Tabla 1.4. Datos de aceros. N normalizado, T templado, R revenido, Rec recocido, LF laminado forjado, C cementado. S_u y S_y tensiones normales de rotura y fluencia. ε deformación en el momento de la rotura. HB dureza Brinell

Designación	Composición						Tratamiento		Propiedades mecánicas			
EN 10027-1 AISI / UNE (ant.)	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni /V	Tipo	Temp (ºC)	S_u *MPa*	S_y *MPa*	ε %	Dur HB
MOLDEADOS												
GC25 / F-8104	0.25		0.55						440	225	22	150
GC35 / F-8106	0.35		0.65						510	255	18	155
GC45 / F-8108	0.45		0.65						580	295	15	195
NO ALEADOS (Mn < 1%)												
C25 1025 / F-1120	0.25		0.55				N T R	900 870 480	490 570	310 430	22 28	150 168
C35 1035 / F-1130	0.35		0.65				LC N T R	 900 840 430	585 680 730	375 420 520	29 28 15	190 183 212
C45 1045 / F-1140	0.45		0.65				N Rec T R	870 790 825 450	660 600 850	390 360 640	20 23 14	197 180 248
C60 1060	0.6		0.75				N T R	870 815 430	760 1000	410 790	 6	225 315
ALEACIÓN INFERIOR AL 5%												
20MnCr5 5120 / F-150 D	0.2		1.25	1.15			N C T R	900 880 860 150	680 980	400 735	23 14	207 302
20NiCrMoS2-2 8620 / F-1522	0.2		0.8	0.55	0.2	0.55	LF N C T R	1100/850 900 910 845 150	650 600 850	320 340 580	22 26 19	192 174 255
41Cr4 5140 / F-1202	0.41		0.75	1.05			LF N T R	1050/850 870 840 540	770 760 970	520 470 840	 23 18	229 227 293
42CrMo4 4140 / F-1252	0.42		0.75	1.05	0.22		N Rec LF T R	900 830 1100/850 840 540	950 650 1030 1120	560 420 720 1040	19 25 15 14	277 192 311 321
34CrNiMo6 4340 / F-128	0.34		0.65	1.5	0.22	1.5	LF N T R	1150/900 870 840 540	1300 1280 1210	860 860 1100	 12 14	401 388 352
51CrV4 6150	0.51		0.9	1.05		0.17	LF N T R	1100/850 860 840 540	950 940 1200	630 615 1155	 21 14	285 277 352
ALEACIÓN SUPERIOR AL 5%												
X10CrNi18-8 304	0.1	<0.8	<2	18-20		8-10	Rec	1100	510	206	40	160
X5CrNiMo17-12-2 316	0.05	<0.8	<2	16-18	2-3	10_11	Rec	1100	510	206	40	150

Tabla 1.5. Datos de aceros. Aplicaciones

Designación	Aplicación
MOLDEADOS	
GC25	Buena soldabilidad.
GC35	Admite soldadura. Engranajes.
GC45	Admite soldadura. Engranajes.
NO ALEADOS	
C25	Buena soldabilidad, embutición y plegado.
C35	Buena soldabilidad. Piezas fabricadas por estampado en frio (bulones, tuercas, tornillos, etc.) Otras piezas forjadas en caliente poco exigidas.
C45	Moldes. Admite soldadura. Adecuado para temple superficial. Ejes, engranajes, tornillos, cigüeñales, manivelas, chavetas, bielas.
C60	Adecuado para temple superficial. Discos de embrague, ejes
ALEACIÓN INFERIOR AL 5%	
20MnCr5	Engranajes. Coronas y piñones del diferencial. Ejes, árboles. Otras piezas de tamaño mediano.
20NiCrMoS2-2	Piezas de mediano tamaño, solicitadas a la fatiga. Piñones y coronas del diferencial. Engranajes de alta revolución.
41Cr4	Piezas de dimensiones medianas. Engranajes, ejes.
42CrMo4	Apto para temple superficial. Piezas de alta exigencia para la construcción de vehículos en general. Cigüeñales, ejes, palieres, engranajes de transmisión, etc. Piezas confeccionadas por estampado en frio (bulones de alta calidad)
34CrNiMo6	Piezas de aviones y automóviles sometidas a carga elevada. Piezas para temperaturas debajo de 0 ºC
51CrV4	Alambres para resortes. Resortes de alta calidad. Varillas de torsión. Piezas de construcción en general sometidas a esfuerzos severos. Herramientas de mano.
55Cr3	Resortes, muelles, ballestas y resortes planos de cualquier espesor. Barras de torsión. Resortes de suspensión de automóviles.
ALEACIÓN > 5%	
X10CrNi18-8	Acero inoxidable de uso general. Admite soldadura. Ejes, tornillería, válvulas
X5CrNiMo17-12-2	Acero inoxidable de uso general. Intercambiadores de calor, ejes
X6CrNiTi18-10	Acero inoxidable empleado en la industria alimenticia, química, naval y aeronáutica. Artículos de consumo, industria de la refrigeración y decoración.

3 Conocimientos básicos de elasticidad

Para poder estudiar el comportamiento del material bajo carga, es necesario definir previamente conceptos como el de tensión en un punto, tensión normal o tensión tangencial.

3.1 Tensión en un punto

Supongamos un sólido deformable, sometido a fuerzas exteriores que lo mantienen en equilibrio estático. Sea *P* un punto del sólido. Si el sólido lo dividimos en dos por un plano π que pase por el punto *P*, cada mitad del sólido queda en equilibrio si se introducen las acciones internas encargadas de mantener la cohesión del sólido.

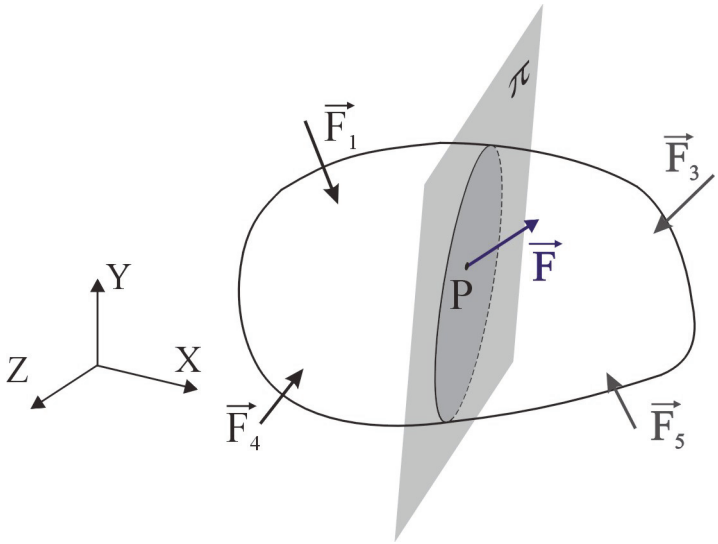

Figura 1.1. Sólido sometido a fuerzas exteriores

Sea *dA* un elemento diferencial de área contenido en el plano π alrededor del punto y *dF* el vector resultante de las acciones interiores que actúan sobre el elemento diferencial de área. Se define la tensión en el punto *P* asociada al plano π como:

$$\vec{\Sigma} = \frac{d\vec{F}}{dA} \qquad [1]$$

El valor resultante cambia si tomamos otro plano distinto, luego no es posible definir la tensión en un punto mediante un único vector. Por ello se asociará a *P* un sistema de referencia local, y se sitúa el punto en el centro de un elemento diferencial de volumen cúbico, con las caras del cubo perpendiculares a los ejes de este sistema de referencia. Cada cara de este cubo queda identificada por el eje del sistema de referencia que es perpendicular a la misma.

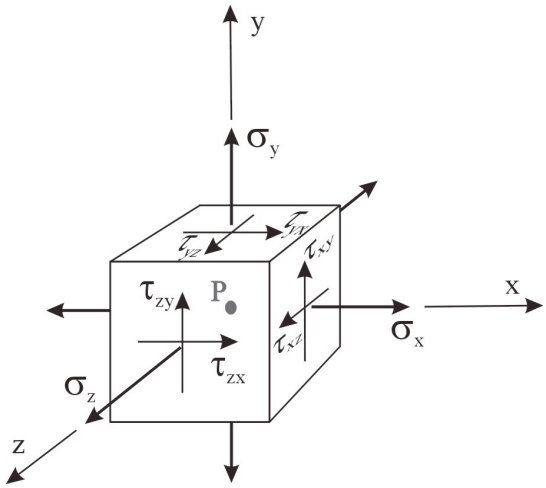

Figura 1.2. Tensiones sobre las caras de un elemento diferencial de volumen alrededor del punto P

De este modo se puede expresar el vector tensión (fuerza por unidad de superficie) asociado a cada uno de los tres planos perpendiculares a los ejes *x*, *y*, *z* en función de sus componentes según esos ejes como:

Para la cara perpendicular al eje *x*: $\vec{\Sigma}_x = \sigma_x \cdot \vec{i} + \tau_{xy} \cdot \vec{j} + \tau_{xz} \cdot \vec{k}$

Para la perpendicular al eje *y*: $\vec{\Sigma}_y = \tau_{yx} \cdot \vec{i} + \sigma_y \cdot \vec{j} + \tau_{yz} \cdot \vec{k}$

Y para la perpendicular al eje *z*: $\vec{\Sigma}_z = \tau_{zx} \cdot \vec{i} + \tau_{zy} \cdot \vec{j} + \sigma_z \cdot \vec{k}$

Las componentes perpendiculares a las caras del cubo se denominan tensiones normales y para nombrarlas se utiliza la letra griega "sigma" σ, junto con el subíndice que identifica a la cara sobre la que está aplicada (σ_x está aplicada sobre la cara del cubo que es perpendicular al eje *x*, otras nomenclaturas para esta componente de la tensión que se pueden encontrar en la bibliografía son: σ_{xx}, σ_{11}). Se asigna el signo positivo para las tensiones normales de tracción y el negativo para las de compresión.

Las componentes contenidas en las caras del cubo se denominan tensiones tangenciales o tensiones cortantes y para nombrarlas se utiliza la letra griega "tau" τ, junto con dos subíndices, el primero identifica la cara del cubo sobre la que está aplicada, y el segundo la dirección que lleva (τ_{xz} está aplicada sobre la cara perpendicular al eje *x*, llevando la dirección del eje *z*, otras nomenclaturas para estas componentes de la tensión son: σ_{xz}, σ_{13}). Por la condición de equilibrio del punto (no gira) se ha de cumplir la siguiente relación entre esas tensiones tangenciales: $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ y $\tau_{yz} = \tau_{zy}$

Agrupando las expresiones anteriores con notación matricial:

$$\begin{Bmatrix} \vec{\Sigma}_x \\ \vec{\Sigma}_y \\ \vec{\Sigma}_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{Bmatrix} \qquad [2]$$

La matriz obtenida, es el tensor de tensiones, es simétrica y sus valores propios (σ_1, σ_2, σ_3), son reales y se denominan tensiones principales. Los vectores propios asociados, conocidos como direcciones principales, son vectores ortogonales entre sí.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

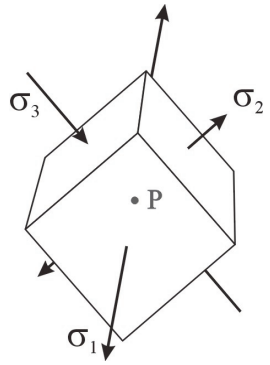

Figura 1.3. Tensiones principales

Si se alinean las caras del cubo que rodea al punto **P** según las direcciones principales, sobre dichas caras sólo aparece componente normal, siendo nulas las componentes tangenciales.

3.2 Tensión plana

En componentes de máquinas normalmente los puntos sometidos a mayores solicitaciones son los de la superficie. En esos puntos la dirección perpendicular a dicha superficie es una dirección principal, dado que cumple con la condición de que en esa cara las tensiones tangenciales son nulas, así mismo la tensión principal asociada a esa dirección principal es nula. A la hora de estudiar estos puntos miramos el elemento diferencial de volumen que los envuelve desde el eje *z* (perpendicular a la superficie), apareciendo el cubo como un cuadrado.

Para seguir leyendo, inicie el proceso de compra, click aquí