



Diseño de máquinas

Antonio José Besa González
Francisco Valero Chuliá



EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Antonio José Besa González
Francisco José Valero Chuliá

Diseño de Máquinas

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Los contenidos de esta publicación han sido revisados por el Departamento de Ingeniería mecánica y de materiales de la Universitat Politècnica de València

Colección Académica

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: BESA GONZÁLVEZ, A.J. y VALERO CHULIÁ, F.J. (2016). Diseño de Máquinas. Valencia: Universitat Politècnica de València

Primera edición, 2016 (versión impresa)
Primera edición, 2016 (versión electrónica)

© Antonio José Besa González
Francisco José Valero Chuliá

© 2016, Editorial Universitat Politècnica de València
distribución: Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es / Ref.:6341_01_01_01

ISBN:978-84-9048-529-3(versión impresa)
ISBN:978-84-9048-530-9(versión electrónica)

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

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, 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 | <i>Deformaciones independientes del tiempo</i> | 21 |
| 5.1.2 | <i>Deformación dependiente del tiempo (creep)</i> | 22 |
| 5.2 | Fractura..... | 22 |
| 5.2.1 | <i>Fractura frágil</i> | 23 |
| 5.2.2 | <i>Fractura dúctil</i> | 23 |
| 5.2.3 | <i>Otras consideraciones</i> | 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 |
| 10. | Ejercicios | 47 |
| 10.1. | Criterios de máxima tensión tangencial y de energía de distorsión..... | 47 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 10.2. | Aplicación del criterio de fluencia de Coulomb-Mohr..... | 48 |
| 10.3. | Aplicación del criterio modificado de Mohr..... | 50 |
| 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. | <i>Propagación de la grieta en metales dúctiles.....</i> | <i>55</i> |
| 2.2.2. | <i>Propagación de la grieta en metales frágiles.....</i> | <i>56</i> |
| 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. | <i>Factor de superficie k_a.....</i> | <i>66</i> |
| 5.2.2. | <i>Factor de tamaño k_b.....</i> | <i>68</i> |
| 5.2.3. | <i>Confiabilidad k_c.....</i> | <i>69</i> |
| 5.2.4. | <i>Otras influencias k_x.....</i> | <i>70</i> |
| 6. | Efecto del concentrador de tensiones..... | 72 |
| 6.1. | Introducción..... | 72 |
| 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..... | 82 |
| 7. | Influencia de las tensiones medias en fatiga uniaxial..... | 83 |
| 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) .. | 93 |
| 9.2 | Estados complejos (material dúctil) | 93 |
| 9.3 | Materiales frágiles..... | 94 |
| 10 | Carga de amplitud variable | 95 |
| 10.1 | La regla de Palmgren-Miner | 95 |
| 10.2 | Conteo de ciclos para historias temporales irregulares | 97 |
| 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 | Conteo de ciclos y daño acumulado..... | 107 |
| Capítulo 4 Ejes..... | | 111 |
| 1. | Introducción | 111 |
| 2. | Determinación de fuerzas actuantes..... | 112 |
| 2.1. | Transmisión por cadena | 113 |
| 2.2. | Transmisión por correa de fricción | 113 |
| 2.3. | Engranajes cilíndricos de dientes rectos..... | 115 |
| 2.4. | Engranajes cilíndricos helicoidales | 116 |
| 2.5. | Engranaje cónico de dientes rectos | 117 |
| 3. | Determinación de momentos flectores..... | 117 |
| 4. | Estado tensional | 118 |
| 5. | Diseño a fatiga | 120 |
| 5.1. | Material dúctil | 120 |
| 5.2. | Material frágil | 122 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 6. | Otras consideraciones de diseño | 123 |
| 6.1. | Deformaciones laterales por flexión..... | 123 |
| 6.2. | Rigidez torsional | 130 |
| 6.3. | Vibraciones | 130 |
| 7. | Ejercicios | 132 |
| 7.1. | Cálculo de fuerzas transmitidas..... | 132 |
| 7.2. | Cálculo a fatiga de eje sometido a par variable..... | 133 |
| 7.3. | Rigidez torsional | 136 |
| 7.4. | Cálculo del diámetro necesario a fatiga de un eje..... | 137 |
| Capítulo 5 | Rodamientos | 143 |
| 1. | Introducción | 143 |
| 2. | Tipos de rodamientos y características | 147 |
| 2.1. | Rodamientos radiales | 147 |
| 2.1.1. | <i>Rígido de bolas</i> | 147 |
| 2.1.2. | <i>De contacto angular</i> | 147 |
| 2.1.3. | <i>De autoalineación</i> | 148 |
| 2.1.4. | <i>De rodillos cilíndricos</i> | 149 |
| 2.1.5. | <i>De rodillos cónicos</i> | 149 |
| 2.1.6. | <i>De rodillos esféricos</i> | 150 |
| 2.1.7. | <i>Rodamientos de agujas</i> | 150 |
| 2.2. | Rodamientos axiales..... | 151 |
| 2.2.1. | <i>De bolas</i> | 151 |
| 2.2.2. | <i>De rodillos cilíndricos</i> | 151 |
| 2.2.3. | <i>De rodillos esféricos</i> | 151 |
| 3. | Lubricación de rodamientos..... | 151 |
| 3.1. | Lubricación con grasa | 154 |
| 3.2. | Lubricación con aceite | 155 |
| 4. | Cálculo de la vida en rodamientos | 156 |
| 4.1. | Introducción | 156 |
| 4.2. | Carga en los elementos rodantes | 157 |
| 4.2.1. | <i>Fuerza equivalente en rodamientos rígidos de bolas</i> | 157 |
| 4.2.2. | <i>Fuerza equivalente en rodamientos de rodillos cónicos</i> | 158 |
| 4.2.3. | <i>Fuerza equivalente en rodamientos de rodillos cilíndricos</i> | 159 |
| 4.3. | Fallo bajo carga estática | 159 |
| 4.4. | Fallo a fatiga del rodamiento..... | 161 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.5. | Factores de corrección de vida | 162 |
| 4.5.1. | Por fiabilidad (a_1) | 162 |
| 4.5.2. | Por condiciones de trabajo (a_{iso}) | 163 |
| 4.6. | Recomendaciones de vidas de rodamientos | 169 |
| 4.7. | Rodamientos sometidos a cargas variables | 170 |
| 5. | Juego interno del rodamiento | 171 |
| 6. | Montajes típicos de rodamientos | 172 |
| 7. | Ejemplo de hoja de un catálogo | 175 |
| 8. | Ejercicios | 175 |
| 8.1. | Cálculo de la vida esperada de un rodamiento | 175 |
| 8.2. | Selección de un rodamiento rígido de bolas | 177 |
| Capítulo 6 Transmisiones Engranajes Cilíndricos | | 183 |
| 1 | Introducción a las transmisiones | 183 |
| 1.1 | Transmisiones por rozamiento, correas | 183 |
| 1.1.1 | Correas planas | 184 |
| 1.1.2 | Correas trapeciales | 186 |
| 1.2 | Transmisiones flexibles por engrane | 187 |
| 1.2.1 | Cadenas | 187 |
| 1.2.2 | Correas dentadas o sincronas | 188 |
| 1.3 | Transmisiones por engranajes | 189 |
| 2 | El perfil de evolvente. Normalización | 191 |
| 2.1 | Interferencia | 194 |
| 2.2 | Geometría del dentado helicoidal | 195 |
| 3 | Cálculo de engranajes cilíndricos | 199 |
| 3.1 | Causas de fallo | 199 |
| 3.2 | Proceso de diseño | 200 |
| 3.3 | Cálculo a fallo superficial | 200 |
| 3.4 | Cálculo a flexión. Método de Lewis modificado | 205 |
| 3.5 | Condiciones reales de funcionamiento en engranajes cilíndricos | 207 |
| 3.5.1 | Coficiente de aplicación K_A | 207 |
| 3.5.2 | Coficiente dinámico K_V | 209 |
| 3.5.3 | Coficientes de distribución de carga longitudinal $K_{F\beta}$ y $K_{H\beta}$ | 211 |
| 3.5.4 | Coficientes de distribución de carga transversal $K_{F\alpha}$ y $K_{H\alpha}$ | 212 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.6 | Seguridad frente al fallo..... | 213 |
| 3.6.1 | <i>Coefficiente de seguridad a flexión</i> | 213 |
| 3.6.2 | <i>Coefficiente de seguridad a presión superficial</i> | 214 |
| 3.7 | Criterio de dimensionado | 214 |
| 4 | Lubricación de engranajes cilíndricos | 215 |
| 4.1 | Método UNITED | 215 |
| 4.2 | Método de la norma ANSI/AGMA 9005-E02 | 216 |
| 5 | Características resistentes del material de engranajes..... | 217 |
| 5.1 | Resistencia superficial | 218 |
| 5.2 | Resistencia a la rotura por flexión..... | 218 |
| 5.3 | Características del engranaje de referencia | 219 |
| 5.4 | Tensiones límite a fallo superficial S_{HL} y a flexión S_{FL} | 219 |
| 5.5 | Coefficientes correctores..... | 222 |
| 5.5.1 | <i>Coefficiente de duración</i> | 222 |
| 5.5.2 | <i>Coefficientes de influencia debidos a la película de aceite</i> | 223 |
| 5.5.3 | <i>Coefficiente de relación de durezas Z_W</i> | 224 |
| 5.5.4 | <i>Coefficiente de tamaño Z_X</i> | 225 |
| 5.5.5 | <i>Coefficiente de duración por flexión Y_{NT}</i> | 225 |
| 5.5.6 | <i>Coefficiente de sensibilidad relativo a la entalla $Y_{\delta T}$</i> | 226 |
| 5.5.7 | <i>Coefficiente de rugosidad relativa Y_{RrT}</i> | 227 |
| 5.5.8 | <i>Coefficiente de tamaño Y_X</i> | 228 |
| 5.6 | Materiales empleados en la construcción de engranajes..... | 228 |
| 6 | Ejercicios | 231 |
| 6.1 | Cálculo de las tensiones admisibles a fallo superficial S_{HP} y a flexión S_{FP} | 231 |
| 6.2 | Cálculo del coeficiente de seguridad de una transmisión..... | 233 |
| 6.3 | Diseño de una transmisión de engranajes cilíndricos helicoidales..... | 237 |
| 6.4 | Selección del lubricante para una transmisión de engranajes | 242 |
| | Bibliografía..... | 245 |

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

| | |
|---|--|
| <p>Metales y aleaciones Hierros fundidos y aceros Aleaciones de aluminio Aleaciones de titanio Aleaciones de cobre; bronce Aleaciones de manganeso Superalac. de base níquel</p> | <p>Cerámicas y vidrios Productos arcillosos Cemento Alúmina (Al_2O_3) Carburo de tungsteno Aluminuro de titanio (Ti_3Al) Cristales de sílice (SiO_2)</p> |
| <p>Polímeros Polietileno (PE) Policloruro de vinilo (PVC) Poliestireno (PS) Nylons Epoxis Gomas</p> | <p>Compuestos Contrachapado Carburos cementados Fibra de vidrio Grafito-epoxi Aluminio – refuerzo carburo de silicio ARALL Aramida de aluminio laminado</p> |

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, 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 aleaciones basadas en el hierro son los materiales metálicos más utilizados. 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 °C 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 °C 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 °C) 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 alea (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 10027-1:2006 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 | °C |
| 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, resulturado S (0,1%) |
| 12xx | Fácil mecanizado, resulturado 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 EN 10027-1 AISI / UNE (ant.) | Composición | | | | | | Tratamiento | | Propiedades mecánicas | | | |
|--|-------------|------|------|-------|------|-------|-------------|-------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni /V | Tipo | Temp (°C) | 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 | 900 | 490 | 310 | 22 | 150 |
| | | | | | | | T R | 870 480 | 570 | 430 | 28 | 168 |
| C35 1035 / F-1130 | 0.35 | | 0.65 | | | | LC | | 585 | 375 | 29 | 190 |
| | | | | | | | N | 900 | 680 | 420 | 28 | 183 |
| | | | | | | | T R | 840 430 | 730 | 520 | 15 | 212 |
| C45 1045 / F-1140 | 0.45 | | 0.65 | | | | N | 870 | 660 | 390 | 20 | 197 |
| | | | | | | | Rec | 790 | 600 | 360 | 23 | 180 |
| | | | | | | | T R | 825 450 | 850 | 640 | 14 | 248 |
| C60 1060 | 0.6 | | 0.75 | | | | N | 870 | 760 | 410 | | 225 |
| | | | | | | | T R | 815 430 | 1000 | 790 | 6 | 315 |
| ALEACIÓN INFERIOR AL 5% | | | | | | | | | | | | |
| 20MnCr5 5120 / F-150 D | 0.2 | | 1.25 | 1.15 | | | N | 900 | 680 | 400 | 23 | 207 |
| | | | | | | | C T R | 880 860 150 | 980 | 735 | 14 | 302 |
| 20NiCrMoS2-2 8620 / F-1522 | 0.2 | | 0.8 | 0.55 | 0.2 | 0.55 | LF | 1100/850 | 650 | 320 | 22 | 192 |
| | | | | | | | N | 900 | 600 | 340 | 26 | 174 |
| | | | | | | | C T R | 910 845 150 | 850 | 580 | 19 | 255 |
| 41Cr4 5140 / F-1202 | 0.41 | | 0.75 | 1.05 | | | LF | 1050/850 | 770 | 520 | | 229 |
| | | | | | | | N | 870 | 760 | 470 | 23 | 227 |
| | | | | | | | T R | 840 540 | 970 | 840 | 18 | 293 |
| 42CrMo4 4140 / F-1252 | 0.42 | | 0.75 | 1.05 | 0.22 | | N | 900 | 950 | 560 | 19 | 277 |
| | | | | | | | Rec | 830 | 650 | 420 | 25 | 192 |
| | | | | | | | LF | 1100/850 | 1030 | 720 | 15 | 311 |
| | | | | | | | T R | 840 540 | 1120 | 1040 | 14 | 321 |
| 34CrNiMo6 4340 / F-128 | 0.34 | | 0.65 | 1.5 | 0.22 | 1.5 | LF | 1150/900 | 1300 | 860 | | 401 |
| | | | | | | | N | 870 | 1280 | 860 | 12 | 388 |
| | | | | | | | T R | 840 540 | 1210 | 1100 | 14 | 352 |
| 51CrV4 6150 | 0.51 | | 0.9 | 1.05 | | 0.17 | LF | 1100/850 | 950 | 630 | | 285 |
| | | | | | | | N | 860 | 940 | 615 | 21 | 277 |
| | | | | | | | T R | 840 540 | 1200 | 1155 | 14 | 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 frío (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 frío (bulones de alta calidad) |
| 34CrNiMo6 | Piezas de aviones y automóviles sometidas a carga elevada. Piezas para temperaturas debajo de 0 °C |
| 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.

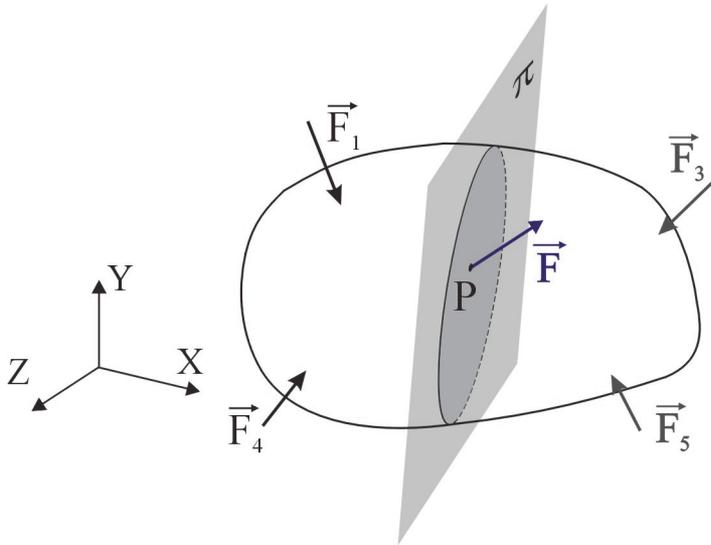


Figura 1.1. Sólido sometido a fuerzas exteriores

Sea dA un elemento diferencial de área contenido en el plano π alrededor del punto P y $d\vec{F}$ 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:

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

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.

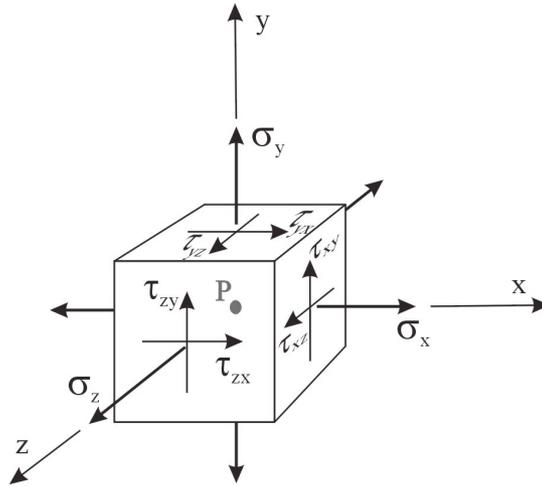


Figura 1.2. Tensiones sobre las caras de un elemento diferencial de volumen alrededor del punto P

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:

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

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.

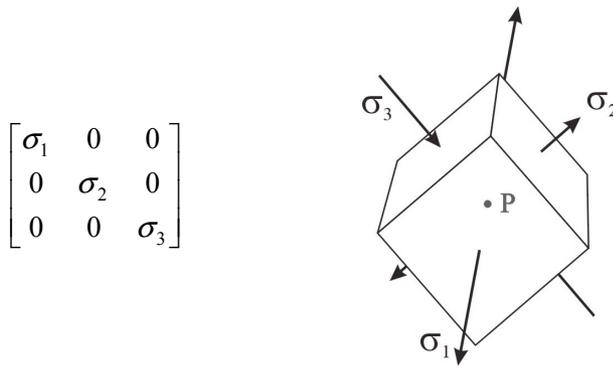


Figura 1.3. Tensiones principales

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 haga click aquí