

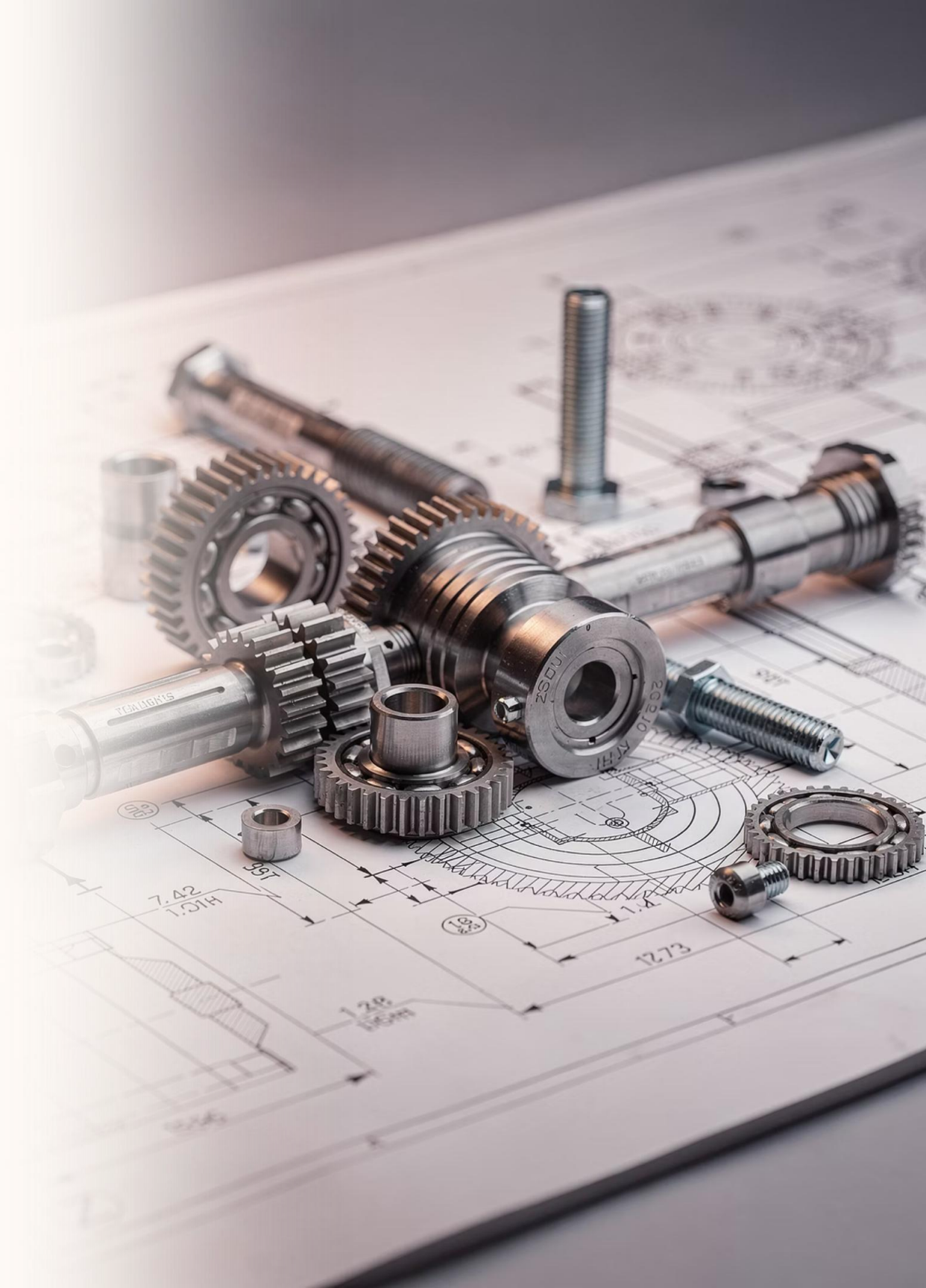
# Guía Técnica de Materiales para el Diseño y Fabricación de Elementos de Máquinas

Una referencia concurrente y científica para la selección óptima de materiales en ingeniería mecánica: desde metales ferrosos hasta compuestos avanzados, con criterios de rendimiento, fabricabilidad y normativa global.

INGENIERÍA DE MATERIALES

DISEÑO MECÁNICO

SELECCIÓN CUANTITATIVA



# Resumen Ejecutivo

## Un cambio de paradigma

La selección de materiales ha dejado de ser un proceso empírico para convertirse en una decisión **concurrente y central** que determina el éxito operativo, la seguridad y la viabilidad económica de cualquier sistema mecánico.

## Hallazgos clave

- La **fatiga** es responsable del **90% de los fallos catastróficos** en estructuras mecánicas
- Los metales ferrosos (aceros y fundiciones) siguen siendo el pilar fundamental por su versatilidad
- Polímeros técnicos, cerámicas avanzadas y compuestos están redefiniendo el diseño de bajo peso (*lightweight design*)
- La metodología de Ashby permite optimizar componentes bajo restricciones de rigidez, resistencia y costo
- Las regulaciones RoHS y REACH son limitantes ineludibles en el mercado global

# Clasificación Taxonómica de los Materiales

La ingeniería moderna clasifica los materiales en categorías bien definidas según su **estructura atómica** y sus **propiedades macroscópicas**. Comprender esta taxonomía es el punto de partida para cualquier proceso riguroso de selección.

## Metales Ferrosos

Aceros al carbono, aleados, inoxidables y fundiciones. Base de la maquinaria pesada.

## Metales No Ferrosos

Aluminio, cobre, titanio y superaleaciones base níquel para aplicaciones especializadas.

## Polímeros

Termoplásticos y termoestables con propiedades de fricción, resistencia química y peso reducido.

## Cerámicos Técnicos

Dureza y resistencia térmica extremas, aunque con fragilidad inherente como limitación principal.



# Aceros al Carbono: La Columna Vertebral del Diseño Mecánico

Los aceros al carbono se clasifican directamente por su **contenido de carbono**, el cual determina el equilibrio entre ductilidad, maquinabilidad y resistencia mecánica disponible tras tratamiento térmico.

1

## Bajo Carbono

<0.30% C Ej. AISI 1020

Máxima ductilidad y soldabilidad. Ideal para estructuras, chasis y componentes formados en frío.

2

## Carbono Medio

0.30%–0.70% C Ej. AISI 1045

Permite tratamientos térmicos de temple y revenido para componentes de transmisión de potencia.

3

## Alto Carbono

>0.70% C

Dureza extrema tras temple. Reservado para herramientas de corte, resortes y muelles de alta carga.

# Aceros Aleados e Inoxidables

## Aceros Aleados

Incorporan elementos como **romo, níquel y molibdeno** para mejorar significativamente las propiedades mecánicas respecto a los aceros al carbono convencionales.

### AISI 4140 (Cr-Mo)

Excelente templabilidad y resistencia a la fatiga. Ejes, engranajes y herramientas.

### AISI 4340 (Ni-Cr-Mo)

Alta tenacidad y resistencia al impacto. Cigüeñales, bielas y trenes de aterrizaje.

## Aceros Inoxidables

Requieren un mínimo de **11% de cromo** para formar una capa protectora de óxido pasivada de forma espontánea.

### Austeníticos (304, 316)

Amagnéticos, máxima ductilidad y corrosión química. No templables por calor.

### Martensíticos (410, 420)

Templables por calor, mayor dureza. Cuchillería, válvulas y álabes de turbina.

### Dúplex (2205)

Combina alta resistencia mecánica con resistencia a la corrosión bajo tensión.

# Fundiciones: Hierro Fundido y sus Variantes

Las fundiciones contienen más de 2% de carbono y se distinguen por la forma en que el grafito precipita durante la solidificación, lo que define radicalmente sus propiedades mecánicas y su comportamiento dinámico.

## Fundición Gris

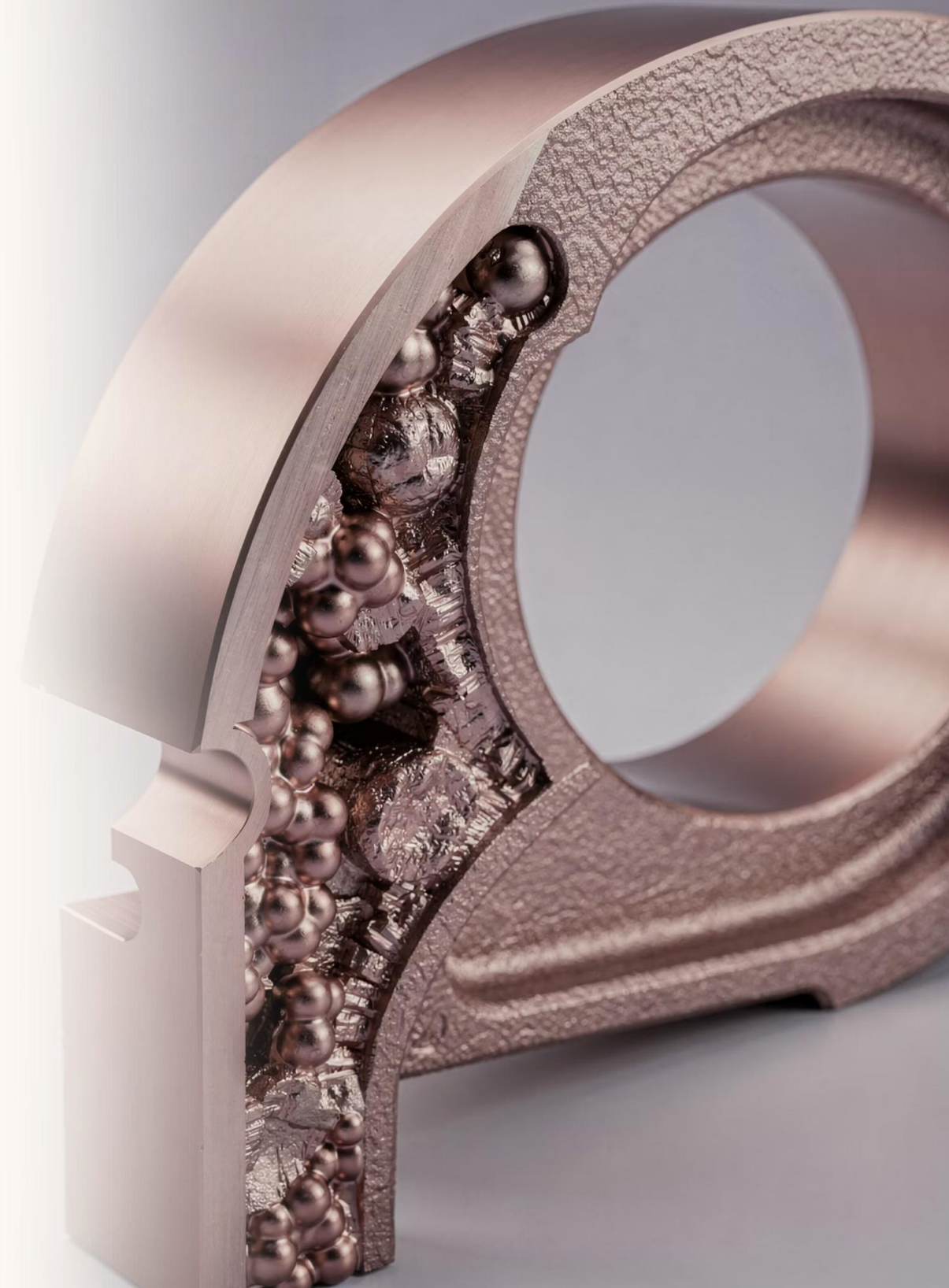
El grafito laminar actúa como amortiguador de vibraciones y reservorio de lubricante. Ideal para bancadas de máquinas-herramienta, bloques de motor y carcasas.

## Fundición Nodular (Dúctil)

El grafito esferoidal, obtenido mediante tratamiento con magnesio, confiere resistencia a la fatiga comparable al acero forjado. Aplicada en cigüeñales y árboles de levas.

## Fundición Blanca

Cementita estable de extrema dureza superficial pero muy frágil. Usada en rodillos de laminación y superficies de desgaste intenso bajo compresión.



# Aluminio y Titanio: Los Reyes del Diseño Ligero

## Aluminio

Material esencial para el **lightweight design**. La aleación **7075-T6** alcanza resistencias superiores a 500 MPa con apenas un tercio de la densidad del acero ( $2.7 \text{ g/cm}^3$  vs.  $7.8 \text{ g/cm}^3$ ). Excelente maquinabilidad y resistencia a la corrosión por capa de alúmina pasiva.

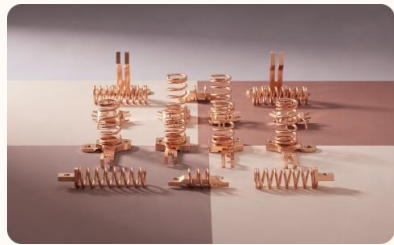
- Serie 2xxx: Al-Cu, alta resistencia, aeronáutica
- Serie 6xxx: Al-Mg-Si, buena extrusión y soldabilidad
- Serie 7xxx: Al-Zn, máxima resistencia estructural

## Titanio (Grado 5 — Ti-6Al-4V)

La combinación de **alta resistencia**, **baja densidad ( $4.5 \text{ g/cm}^3$ )** y **resistencia a la corrosión total** lo convierte en el material de referencia para aeronáutica y medicina. Su módulo de Young ( $\sim 110 \text{ GPa}$ ) es aproximadamente la mitad del acero, lo que implica mayor flexibilidad elástica.

- Resistencia a la fatiga superior en entornos corrosivos
- Biocompatibilidad certificada para implantes
- Alto costo y difícil maquinabilidad: limitante principal

# Cobre, Bronces y Superalaciones de Alta Temperatura



## Cobre-Berilio (CuBe<sub>2</sub>)

Valorado por su **alto límite de fatiga**, **naturaleza no magnética** y **excelente conductividad eléctrica**. Crítico en resortes de precisión, contactos eléctricos y herramientas para entornos explosivos donde la generación de chispa está prohibida.



## Bronces y Latones

Los bronce al estaño (CuSn) y al aluminio (CuAl) ofrecen **bajo coeficiente de fricción** y **buena resistencia al desgaste**, siendo los materiales históricos y actuales para cojinetes de deslizamiento, bujes y engranajes sin fin.



## Superalaciones Base Níquel

**Inconel 718** y **Hastelloy C-276** mantienen integridad mecánica por encima de los 800°C en entornos fuertemente oxidantes. Indispensables en álabes de turbinas de gas, intercambiadores de calor y reactores químicos.

# Polímeros Técnicos: Ligereza, Fricción y Química

Los polímeros técnicos van mucho más allá del plástico convencional. Su clasificación estructural determina sus propiedades térmicas, tribológicas y mecánicas, abriendo aplicaciones que los metales no pueden cubrir.

## Termoplásticos Amorfos (PS, PC, PMMA)

Estructura molecular desordenada que los hace **transparentes y fácilmente maquinables**. Buena resistencia dieléctrica pero menor resistencia química. Aplicados en carcasas ópticas y conectores eléctricos.

## Termoplásticos Semicristalinos (PA, PE, POM)

Estructura parcialmente ordenada que les confiere **opacidad, resistencia al desgaste y menor absorción de humedad**. El Nylon (PA6, PA66) y el Delrin (POM) son los más usados en engranajes y bujes.

## PTFE (Teflón) y PEEK

El PTFE posee el **coeficiente de fricción más bajo** de cualquier sólido (~0.04), ideal para sellos y bujes sin lubricación. El PEEK mantiene su módulo de elasticidad hasta los 250°C, siendo el polímero estructural de referencia para entornos extremos.

## Termoestables (Epoxi, Poliéster, Fenólico)

Una vez polimerizados mediante reticulación, su estructura **no se reblandece con el calor**. Mayor rigidez que los termoplásticos pero con fragilidad inherente. Base de los materiales compuestos de fibra de carbono y vidrio.

# Cerámicos Técnicos: El Pináculo de la Dureza



Los cerámicos técnicos representan el extremo del espectro de dureza y resistencia térmica, aunque su **fragilidad inherente** (baja tenacidad a la fractura,  $K_{1c}$ ) limita su uso a condiciones de carga controlada, preferentemente en compresión.

## Nitruro de Silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Resistencia a choque térmico, baja densidad ( $3.2 \text{ g/cm}^3$ ) y excelente resistencia al contacto hertziano. Estándar en rodamientos de alta velocidad (hasta 1.5 millones de rpm·mm).

## Zirconia ( $\text{ZrO}_2$ )

Resistencia a la fractura mejorada por transformación de fase. Aplicada en válvulas, sellos y herramientas de corte donde la resistencia al desgaste químico es crítica.

## Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Excelente aislante eléctrico y resistencia a la abrasión. El cerámico más económico y ampliamente disponible para sustratos electrónicos y sellos mecánicos.



CAPÍTULO 2 — PROPIEDADES MECÁNICAS

# Propiedades Mecánicas Fundamentales

La respuesta de un material ante cargas externas define su **viabilidad técnica**. El ingeniero de diseño debe comprender no solo los valores numéricos, sino el significado físico de cada propiedad y cómo interactúan bajo condiciones de servicio reales.

# Rigidez, Fluencia y Ductilidad



## Rigidez — Módulo de Young (E)

Mide la resistencia a la deflexión elástica bajo carga. El acero posee ~200 GPa, exactamente **tres veces más rígido que el aluminio** (~70 GPa) y seis veces más que los polímeros técnicos. Es una propiedad intrínseca de la naturaleza del enlace atómico y no puede modificarse con tratamientos térmicos.



## Límite de Fluencia ( $\sigma_y$ )

El esfuerzo exacto donde comienza la **deformación plástica permanente**. Es la base del diseño de componentes estáticos. Se determina por el método del 0.2% de deformación offset en materiales sin punto de fluencia definido, como el aluminio y los aceros inoxidables austeníticos.



## Ductilidad y Tenacidad

La ductilidad (% elongación) permite **deformaciones visibles antes de la fractura**, proporcionando advertencias de fallo y redistribución de esfuerzos. La tenacidad (área bajo la curva  $\sigma$ - $\epsilon$ ) mide la energía absorbida total. Los materiales frágiles como las cerámicas fallan súbitamente sin estricción, lo que los hace peligrosos en estructuras cargadas dinámicamente.

# Dureza y su Rol Tribológico

## ¿Qué mide la dureza?

La dureza es la **resistencia de un material a la penetración localizada** de un indentador. Es el mejor indicador disponible de la resistencia al desgaste abrasivo y al rayado superficial (tribología).

Existen múltiples escalas según la aplicación:

### Brinell (HB)

Para materiales blandos y de grano grueso como fundiciones y aceros recocidos. Indentador de bola de 10mm.

### Rockwell (HRC)

Estándar de producción para aceros templados. Medición rápida con cono de diamante (Brale).

### Vickers (HV)

Universal y preciso. Aplicable a todos los materiales, incluyendo cerámicos y capas superficiales delgadas.

## Relación Dureza–Resistencia

Para aceros al carbono, existe una correlación empírica bien establecida:

$$\sigma_{ult} \approx 3.4 \times HB \text{ (MPa)}$$

Esta relación permite estimar la resistencia última de un componente directamente en campo con un durómetro portátil, sin necesidad de ensayos destructivos de tracción.

---

La **dureza superficial** es crítica en pares tribológicos: se recomienda una diferencia mínima de 100 HB entre la superficie más dura y la más blanda del par para minimizar el desgaste adhesivo.



# La Fatiga: El Modo de Fallo Dominante

- ❏ **Dato crítico:** La fatiga es responsable del **90% de los fallos catastróficos** en estructuras mecánicas en servicio. Los fallos por fatiga ocurren de forma silenciosa y súbita, sin deformación plástica visible previa, lo que los hace especialmente peligrosos.

El fallo por fatiga se produce bajo **cargas cíclicas a tensiones menores al límite de fluencia**, mediante tres etapas: nucleación de la grieta, propagación estable (marcas de playa visibles en fractografía) y fractura final súbita. Se analiza mediante curvas S-N (Wöhler) y el diagrama de Goodman para esfuerzos medios no nulos.

# Vida Infinita y el Diagrama de Goodman

## El Límite de Resistencia a la Fatiga ( $S_e$ )

Para aleaciones de **hierro y titanio**, existe un nivel de esfuerzo por debajo del cual el material tiene vida teóricamente infinita. Este límite, denominado  $S_e$ , es aproximadamente el 50% de la resistencia última ( $S_u$ ) para aceros.

**El aluminio y el cobre NO poseen este límite.** Para estos materiales, siempre se define una vida finita (típicamente  $10^8$  ciclos) como criterio de diseño, ya que fallarán eventualmente sin importar cuán baja sea la amplitud de carga aplicada.

## Relación de Goodman Modificada

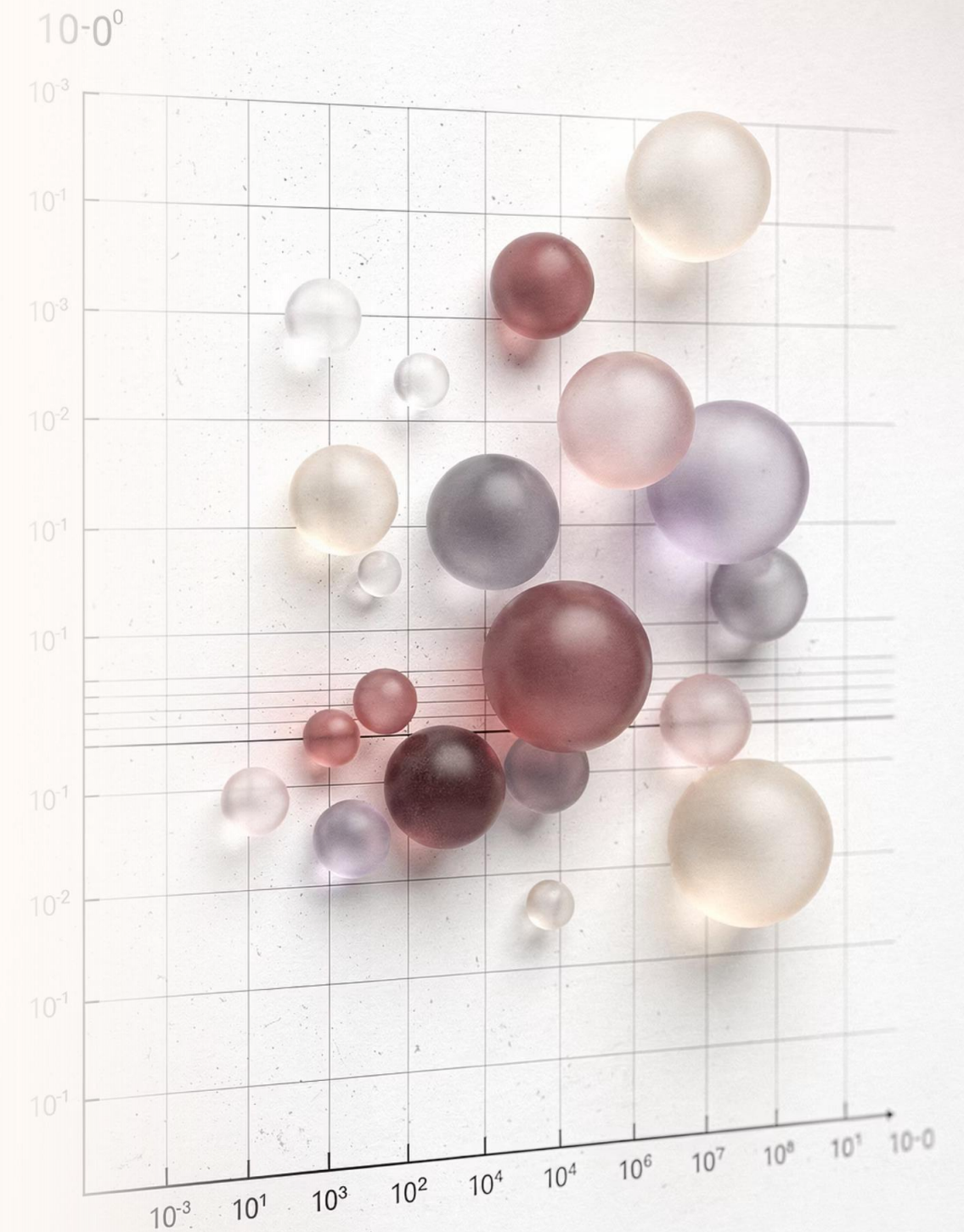
Permite evaluar la seguridad bajo esfuerzos fluctuantes con componente media no nula:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{tu}} = \frac{1}{n}$$

Donde  $\sigma_a$  es la amplitud de esfuerzo,  $\sigma_m$  el esfuerzo medio,  $S_e$  el límite de fatiga corregido,  $S_{tu}$  la resistencia última y  $n$  el factor de seguridad. Si el punto  $(\sigma_m, \sigma_a)$  cae por debajo de la línea de Goodman, el diseño es seguro.

# Metodología de Selección Cuantitativa: El Método Ashby

El método Ashby transforma la selección de materiales de un arte empírico a una **optimización matemática rigurosa**. Mediante índices de rendimiento, relaciona las propiedades funcionales del material (rigidez, resistencia, densidad) con el objetivo de diseño (mínima masa, mínimo costo) bajo restricciones geométricas y de servicio específicas.



# Índices de Rendimiento para Diseño Ligero

Para un componente tipo voladizo (*cantilever*), el objetivo es minimizar la masa manteniendo la funcionalidad. El índice varía según el criterio de diseño dominante:

## Diseño por Rigidez

Maximizar el índice:

$$M_1 = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

Materiales como el CFRP y la madera de balsa ofrecen los índices más altos, superando al aluminio estructural.

## Diseño por Resistencia

Maximizar el índice:

$$M_2 = \frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$$

El titanio y los compuestos de fibra de carbono son los mejores materiales bajo este criterio de peso mínimo.

## Diseño por Costo

Incluir el precio por kg en el denominador del índice para obtener la **solución más económica** por unidad de rendimiento. El aluminio de la serie 6xxx supera al titanio en este análisis para la mayoría de aplicaciones terrestres.

# Los Mapas de Ashby: Visualizando el Rendimiento

## ¿Qué son?

Los mapas de Ashby son **herramientas gráficas en escala log-log** que trazan simultáneamente dos propiedades del material (ej. Módulo de Young vs. Densidad) para todas las familias de materiales de ingeniería.

Al trazar líneas de **pendiente específica** correspondiente al índice de rendimiento relevante (ej. pendiente 1/2 para rigidez en voladizo), el ingeniero puede:

- Identificar qué materiales quedan por encima de la línea de rendimiento deseada
- Descartar opciones ineficientes o costosas de forma visual e inmediata
- Comparar familias completas de materiales (metales, polímeros, cerámicos, compuestos) en un solo gráfico
- Incorporar restricciones adicionales como temperatura máxima o conductividad

## Interpretación Práctica

Para una viga de voladizo cargada en el extremo con deflexión máxima especificada, el **mejor material** es aquel con mayor entre las opciones que cumplen todas las restricciones adicionales (temperatura, corrosión, costo, regulatorias).

---

Los mapas son la herramienta de cribado (*screening*) más poderosa disponible. Una vez identificada la familia de materiales óptima mediante el mapa, se procede a la selección específica de aleación y condición de suministro.



CAPÍTULO 4 — ELEMENTOS DE MÁQUINAS

# Aplicaciones Específicas en Elementos de Máquinas

La selección de material para cada elemento de máquina responde a un conjunto específico de requerimientos de servicio que deben jerarquizarse correctamente. No existe un "mejor material universal"; la óptima elección siempre es contextual y multivariable.

# Ejes, Cigüeñales y Engranajes



## Ejes y Cigüeñales

**Requerimientos:** Resistencia a torsión, flexión cíclica y fatiga superficial bajo cargas rotativas.

**Materiales:** Aceros aleados **AISI 4140** y **4340** son el estándar industrial. La fundición nodular se utiliza cuando la amortiguación de vibraciones es prioritaria (ej. cigüeñales de motores diesel de baja velocidad).



## Engranajes de Potencia

**Requerimientos:** Dureza superficial contra el *pitting* (picado por fatiga de contacto) y núcleo tenaz para resistir impacto sin fractura.

**Materiales:** Aceros de bajo carbono **AISI 8620** cementados y templados (caso carburizado). Para engranajes livianos o de baja lubricación: **PEEK**, **POM** o **PA66**.

# Rodamientos y Cojinetes de Deslizamiento

## Rodamientos de Contacto Rodante

Sometidos a **fatiga de rodadura subsuperficial** (contacto hertziano repetitivo) y requisitos de tolerancias dimensionales extremadamente estrictas ( $<1 \mu\text{m}$ ).

### Aceros 52100 (AISI)

El estándar histórico. Dureza superficial  $\sim 62$  HRC tras temple. Resistencia a la fatiga de contacto excepcional. Sensible a la corrosión: requiere sellado.

### Nitruro de Silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Para rodamientos de ultra-alta velocidad (turbinas, husillos de máquinas CNC). Baja densidad  $\rightarrow$  menor fuerza centrífuga  $\rightarrow$  mayor velocidad límite.

## Cojinetes y Bujes de Deslizamiento

Operan bajo el principio de **película de lubricante** o autolubricación, requiriendo bajo coeficiente de fricción y buena conductividad térmica para evacuar el calor generado.

### Bronce al Estaño (CuSn)

El material clásico. Retiene lubricante en su porosidad. Resistente al desgaste adhesivo en par con acero.

### PTFE (Teflón) Compuesto

Operación en seco sin lubricación externa. Ideal en entornos alimentarios, médicos o donde la contaminación por aceite es inaceptable.

### Metal Blanco (Babbitt)

Aleación de estaño-plomo-antimonio. Estándar en cojinetes de turbinas y motores de gran potencia por su conformidad y resistencia al agarre.

# Pernos, Tornillos y Uniones Atornilladas

Los elementos de unión atornillada son piezas críticas que operan bajo **precarga axial controlada** (tensión inducida por apriete) simultáneamente con cargas externas de corte o tracción, en condiciones frecuentemente cíclicas que los hacen susceptibles a fatiga.

## Acero Grado 5 (SAE)

Resistencia a tracción: 830 MPa. El estándar más común para aplicaciones estructurales generales. Identificable por 3 rayas en la cabeza.

## Acero Grado 8 (SAE)

Resistencia a tracción: 1040 MPa. Para juntas de alta carga. Más susceptible a fragilización por hidrógeno. 6 rayas en cabeza.

## Titanio Grado 5 (Ti-6Al-4V)

Resistencia similar al Grado 8 con 45% menos de peso. Estándar en aeronáutica, defensa y aplicaciones donde cada gramo cuenta.

## Acero Inoxidable A2/A4

Para entornos corrosivos (marina, alimentario, químico). A4-80 ofrece resistencia a la corrosión por cloruros (acero 316L).

## Tabla Resumen: Elementos de Máquinas

Elemento	Requerimientos Críticos	Materiales Recomendados	Alternativa
Ejes y Cigüeñales	Torsión, flexión cíclica, fatiga	AISI 4140, 4340	Fundición nodular (vibraciones)
Engranajes de Potencia	Dureza superficial (pitting), tenacidad	AISI 8620 cementado	PEEK, POM (cargas bajas)
Rodamientos	Fatiga hertziana, tolerancias estrictas	Acero 52100 (AISI)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (alta velocidad)
Cojinetes / Bujes	Bajo coeficiente de fricción	Bronce CuSn, Babbitt	PTFE compuesto (seco)
Pernos y Uniones	Tracción, precarga, fatiga	Acero Grado 5 o Grado 8	Ti Grado 5 (aeroespacial)

CAPÍTULO 5 — RESTRICCIONES PRÁCTICAS

# Restricciones Prácticas y Manufacturabilidad

La elección del material no puede ser puramente teórica. Debe considerar la **realidad de la planta de producción**: capacidad de maquinado, disponibilidad de equipos de tratamiento térmico, costos de proceso y el entorno regulatorio global en el que opera la empresa.



# Maquinabilidad: El Costo Oculto del Material

## El Problema del Titanio

El titanio posee una **conductividad térmica extremadamente baja** (~6 W/m·K, frente a los 50 W/m·K del acero), lo que concentra el calor generado por el corte directamente en el filo de la herramienta, acelerando su desgaste de forma exponencial.

Consecuencias directas en producción:

- El maquinado en seco es prácticamente imposible
- Se requieren refrigerantes de alta presión ( $\geq 70$  bar)
- Las velocidades de corte se reducen al 20-30% de las usadas con acero
- El costo de maquinado puede ser hasta 300% mayor que el acero equivalente

## Índice de Maquinabilidad Comparativo

Referencia: Acero AISI 1212 = 100%



# Tratamientos Térmicos y Superficiales Clave

01

---

## Temple y Revenido

Secuencia de austenización, enfriamiento rápido (temple) y recalentamiento controlado (revenido). Produce la **microestructura martensítica revenida**, maximizando el equilibrio entre dureza y tenacidad en aceros aleados como el AISI 4140 y 4340.

03

---

## Nitruración

Difusión de nitrógeno en la superficie a temperaturas moderadas (500-550°C). La ventaja clave: **no requiere temple posterior**, por lo que las dimensiones del componente permanecen estables. Ideal para piezas de precisión como cigüeñales y ejes de alta tolerancia.

02

---

## Cementación (Case Hardening)

Difusión de carbono en la superficie del componente a alta temperatura. Permite obtener una **superficie dura (>60 HRC) con núcleo tenaz**, ideal para engranajes cementados AISI 8620. La profundidad de caso controla el perfil de dureza.

04

---

## Endurecimiento por Inducción

Calentamiento selectivo de zonas específicas mediante campo electromagnético. Permite endurecer solo las zonas de contacto (pistas de engranajes, muñones) sin afectar el resto de la pieza, combinando rendimiento superficial con economía de proceso.

# Sostenibilidad y Normativa Internacional

Las regulaciones internacionales han evolucionado de recomendaciones voluntarias a **limitantes técnicas y comerciales ineludibles**. El incumplimiento no solo implica sanciones legales, sino la imposibilidad de comercializar productos en los principales mercados mundiales.

## RoHS (Restriction of Hazardous Substances)

Directiva europea (y adoptada globalmente) que **prohíbe sustancias peligrosas** en equipos eléctricos y electrónicos: plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo hexavalente (Cr<sup>6+</sup>), PBB y PBDE. Impacta directamente la selección de recubrimientos, soldaduras y tratamientos superficiales.

## REACH (Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals)

Reglamento europeo que obliga a la **evaluación completa del ciclo de vida (LCA)** y al registro de sustancias químicas desde su origen minero hasta el fin de vida del producto. Afecta a disolventes, lubricantes, recubrimientos y cualquier material procesado con sustancias de muy alta preocupación (SVHC).

## Impacto en Selección de Materiales

Estas normativas eliminan de facto opciones históricamente usadas: **cadmiado** para protección anticorrosiva de pernos, **pinturas con cromato** para aluminio aeronáutico, y **soldaduras con plomo** para electrónica embarcada. Obligan a buscar alternativas de rendimiento equivalente.

# Comportamiento en Ambientes Extremos

## Ambientes Criogénicos ( $<-40^{\circ}\text{C}$ )

Los aceros ferríticos y martensíticos sufren la **transición dúctil-frágil** al cruzar la temperatura de transición ( $T_{DBT}$ ). Por debajo de esta temperatura, la tenacidad cae abruptamente y el material se fractura como el vidrio sin deformación previa visible.

### Materiales seguros en criogénico:

- Aceros inoxidables austeníticos (304, 316, 310): sin transición DBT
- Aleaciones de aluminio de las series 2xxx y 5xxx
- Titanio y sus aleaciones (Ti-6Al-4V)
- Polímeros PEEK y PTFE hasta  $-200^{\circ}\text{C}$

## Ambientes de Alta Temperatura ( $>300^{\circ}\text{C}$ )

A alta temperatura, los metales sufren **fluencia (creep)**: deformación plástica lenta y continua bajo carga constante, incluso por debajo del límite de fluencia a temperatura ambiente.

### Materiales para alta temperatura:

- Superaleaciones Inconel 718 y Hastelloy: hasta  $800^{\circ}\text{C}+$
- Aceros inoxidables 310S y 321: hasta  $900^{\circ}\text{C}$
- Cerámicos técnicos ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): hasta  $1400^{\circ}\text{C}$
- PEEK: límite práctico  $\sim 250^{\circ}\text{C}$  continuo

# Proceso Integral de Selección de Materiales

Cribado con mapas  
Ashby

Índices de rendimiento y  
eliminación.

Clasificar y comparar

Costo, manufacturabilidad y  
disponibilidad.

Definir requisitos

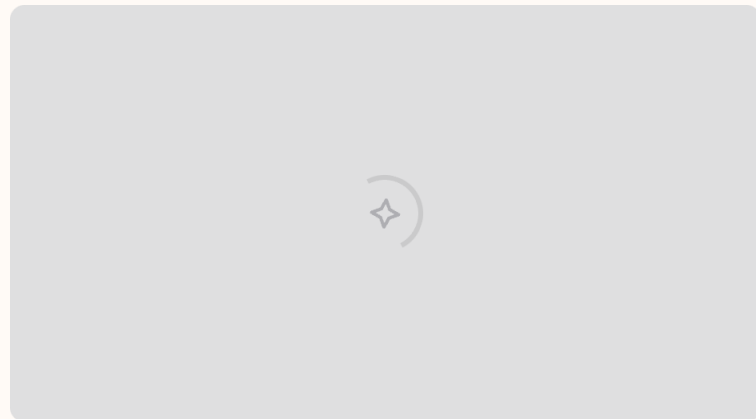
Cargas, entorno, geometría y  
normativas.

Diseño detallado y  
validar

Prototipos, ensayos y  
certificación.

Este proceso iterativo asegura que ningún factor crítico sea ignorado. La selección no termina en el diseño: el rendimiento en servicio retroalimenta futuras elecciones de material, creando un ciclo de mejora continua basado en evidencia empírica real.

# Síntesis de Índices de Rendimiento por Aplicación



Ninguna familia de materiales domina en todas las dimensiones. La selección óptima requiere jerarquizar los requerimientos de cada aplicación específica y aceptar compromisos (*trade-offs*) fundamentados en criterios técnicos y económicos cuantificables.

# Conclusiones y Próximos Pasos

## 1 La fatiga es el criterio de diseño dominante

El 90% de los fallos catastróficos son por fatiga. Todo diseño de elementos de máquinas debe incluir análisis de Goodman y verificación del límite de resistencia corregido  $S_e$  con todos sus factores modificadores ( $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$ ,  $K_d$ ,  $K_e$ ).

## 3 Manufacturabilidad y normativa como restricciones duras

Un material óptimo en teoría que no puede fabricarse en la planta disponible, o que incumple RoHS/REACH, no es una opción válida. La selección debe integrar estos factores desde el inicio del proceso, no como revisión final.

## 2 Aplicar los índices de Ashby desde el concepto

La selección de material debe iniciarse en la fase conceptual del diseño, no después de que la geometría esté fijada. Los mapas de Ashby permiten identificar la familia óptima antes de entrar en detalles de aleación específica.

## 4 El material correcto para cada función

Maximizar el rendimiento no siempre significa usar el material más avanzado. El acero AISI 1045 bien diseñado puede superar en valor total a una superaleación sobre-especificada. La ingeniería es el arte del compromiso fundamentado en datos.