

Capítulo 5

Propiedades Mecánicas

1.5. Ensayos mecánicos

1.5.1. Prueba Tensil

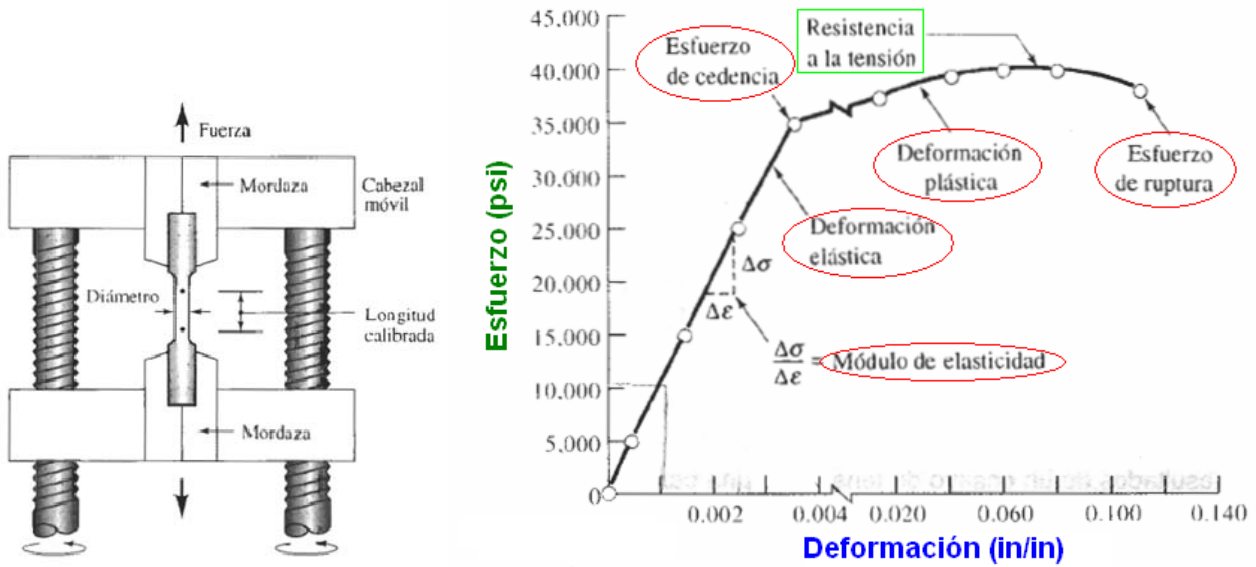


Figura 49 Curva esfuerzo – deformación obtenida a través de la prueba tensil. El esfuerzo de ingeniería y deformación de ingeniería se obtienen a través de las ecuaciones

$$\text{Esfuerzo de ingeniería} = \frac{F}{A_0}$$

$$\text{Deformación de ingeniería} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Donde F es la carga aplicada, Δl la deformación y A_0 y l_0 el área y longitud inicial de la probeta respectivamente

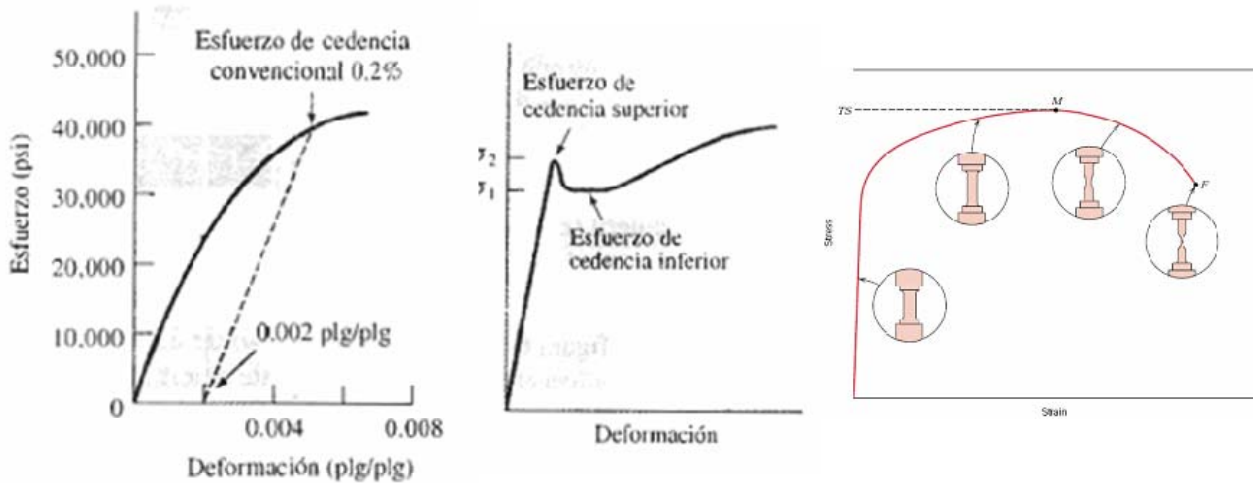


Figura 50 (a) Determinación del límite elástico convencional al 0,2% de deformación en el hierro fundido gris (b) esfuerzo de cedencia superior e inferior del acero al carbono (c) Fractura de un material debido al esfuerzo aplicado

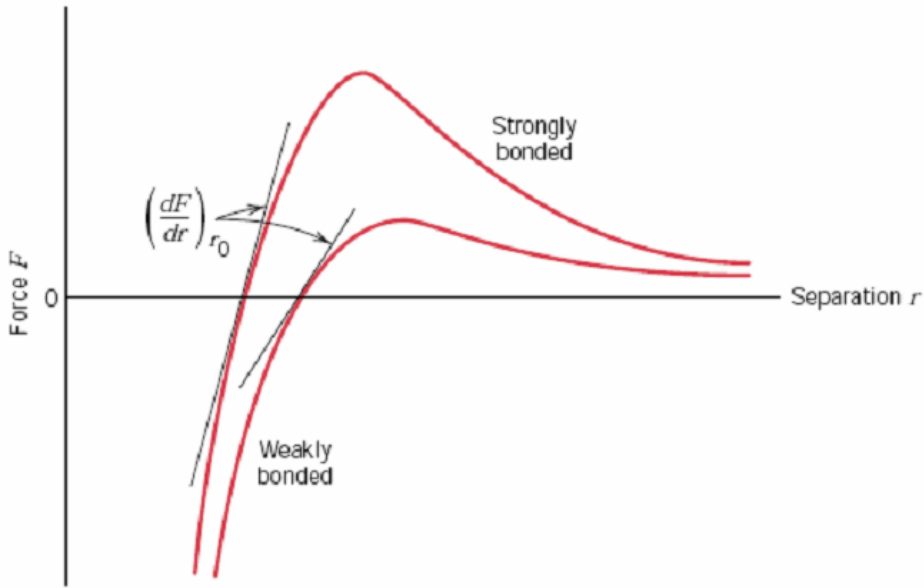


Figura 51 Fuerza versus separación interatómica para átomos con enlaces débiles y fuertes. La magnitud del módulo de elasticidad es proporcional a la pendiente de cada curva en la separación interatómica de equilibrio r_0 .

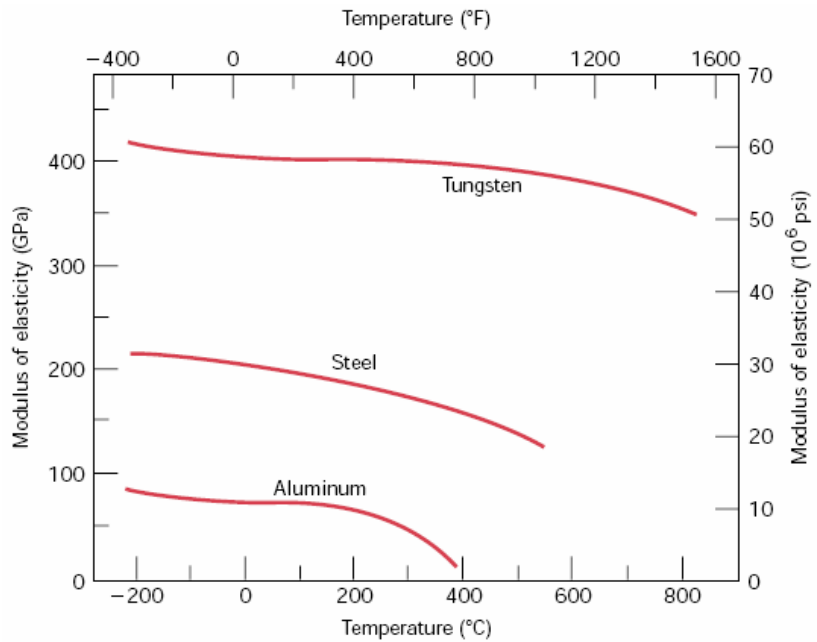


Figura 52 Gráfica del módulo de elasticidad versus la temperatura para el tungsteno, acero y aluminio.

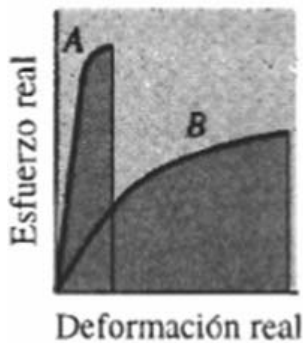


Figura 53 El área debajo de la curva esfuerzo real-deformación real está relacionada con la energía de impacto. A pesar de que el material B tiene un límite elástico inferior, absorbe más energía que el material A

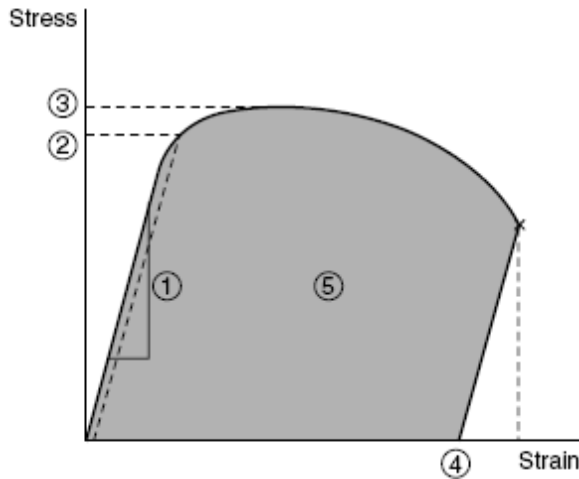


Figura 54 Diagrama Esfuerzo-Deformación mostrando
 (1) modulo de elasticidad,
 (2) Limite elástico,
 (3) Resistencia Tensil,
 (4) Ductilidad,
 (5) Tenacidad

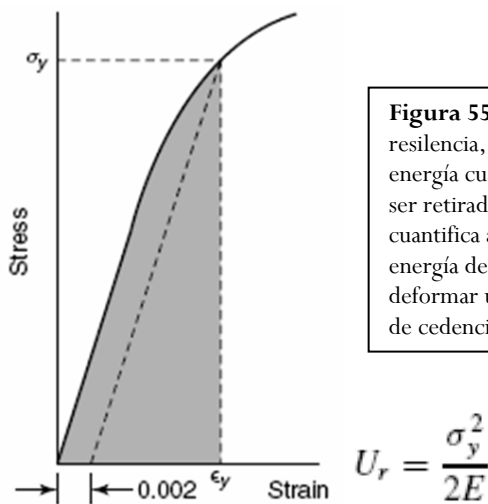


Figura 55 Una cantidad relacionada con la tenacidad es la resiliencia, la cual es la habilidad de un material de absorber energía cuando es deformado elásticamente, y luego, después de ser retirada la carga, recuperar la energía. La resiliencia se cuantifica a través del módulo de resiliencia, U_r , el cual es la energía de deformación por unidad de volumen requerida para deformar un material desde un estado de sin carga hasta el punto de cedencia.

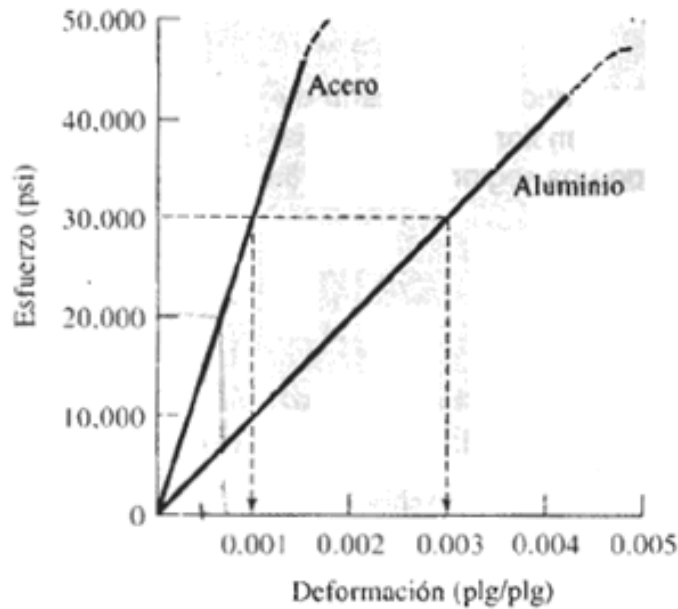


Figura 56 Comparación del comportamiento elástico del acero y del aluminio

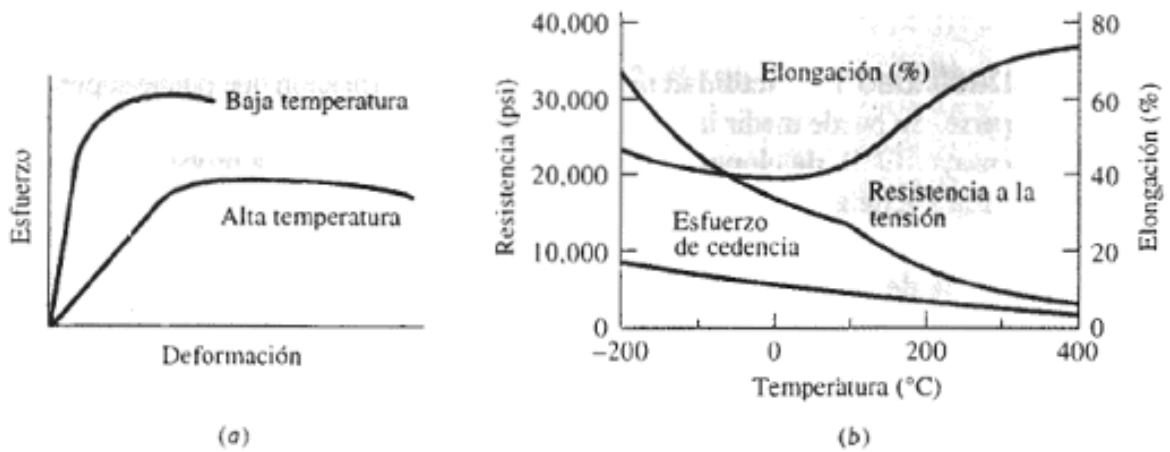


Figura 57 Efecto de la temperatura (a) en la curva esfuerzo deformación y (b) sobre las propiedades a tensión de una aleación de aluminio.

1.5.1.1. Relación de Poisson

La relación de Poisson, ν se define como la relación entre la deformación lateral y la deformación axial inducida:

$$\nu = -\frac{\Delta d/d_0}{\Delta L/L_0}$$

1.5.1.2. Efecto del tamaño de grano sobre la resistencia de aleaciones

La relación de Hall-Petch muestra una dependencia del inverso de la raíz cuadrada del esfuerzo tensil con respecto al tamaño de grano

$\sigma_y = \sigma_0 + k d^{-1/2}$, donde σ_0 y k son constantes empíricas

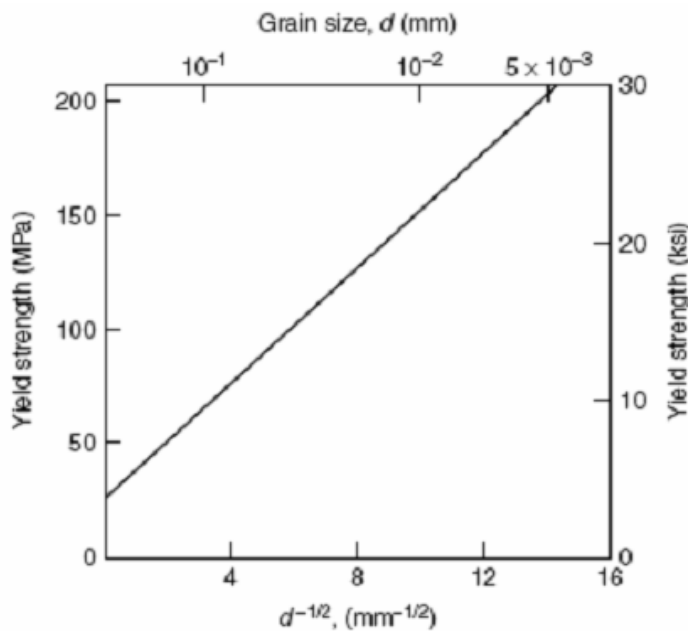


Figura 58 Influencia del tamaño de grano sobre el esfuerzo de cedencia para una aleación 70 – 30 Cu Zn

1.5.1.3. Relación entre ductilidad y fragilidad

La ductilidad se calcula como el porcentaje de variación de la longitud (%EL) o porcentaje de variación del área transversal (%RA):

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad \%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

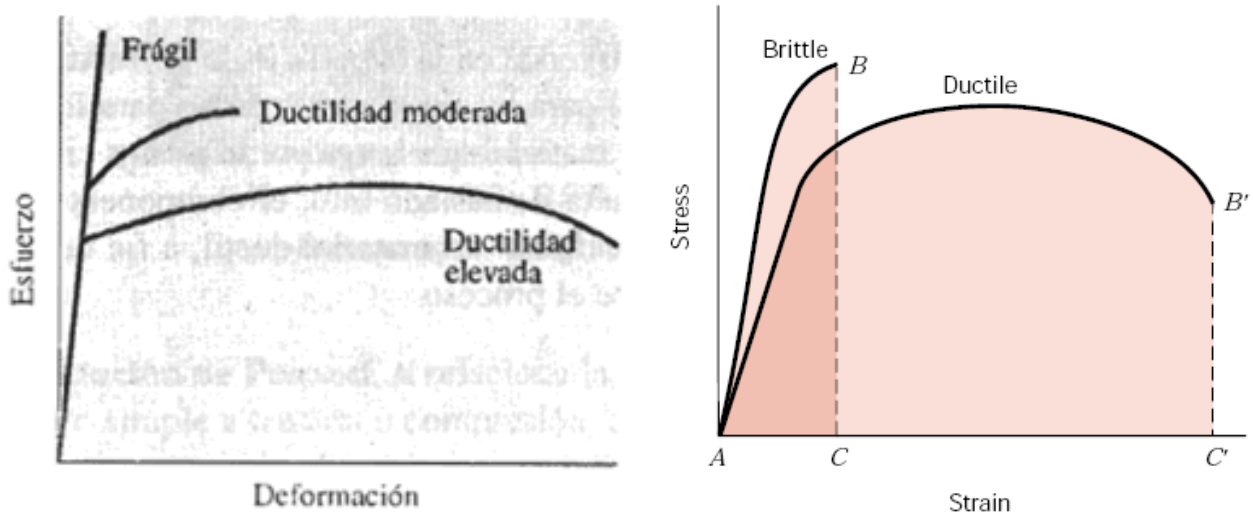


Figura 59 Comportamiento mecánico en el ensayo de tensión de materiales frágiles, en comparación con materiales más dúctiles

1.5.1.4. Relación entre resistencia y módulo de elasticidad

La relación entre resistencia tensil y elasticidad se puede expresar como:

$$\sigma_T = K\epsilon_T^n$$

Donde K y n son constantes que se muestran a continuación para algunos materiales:

Material	n	K	
		MPa	psi
Low-carbon steel (annealed)	0.26	530	77,000
Alloy steel (Type 4340, annealed)	0.15	640	93,000
Stainless steel (Type 304, annealed)	0.45	1275	185,000
Aluminum (annealed)	0.20	180	26,000
Aluminum alloy (Type 2024, heat treated)	0.16	690	100,000
Copper (annealed)	0.54	315	46,000
Brass (70Cu-30Zn, annealed)	0.49	895	130,000

Tabla 13 Propiedades mecánicas de materiales: Esfuerzo de cadencia, Esfuerzo tensil y ductilidad.

Material	Yield Strength		Tensile Strength		Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]
	MPa	ksi	MPa	ksi	
Metal Alloys^b					
Molybdenum	565	82	655	95	35
Titanium	450	65	520	75	25
Steel (1020)	180	26	380	55	25
Nickel	138	20	480	70	40
Iron	130	19	262	38	45
Brass (70 Cu–30 Zn)	75	11	300	44	68
Copper	69	10	200	29	45
Aluminum	35	5	90	13	40
Ceramic Materials^c					
Zirconia (ZrO ₂) ^d	—	—	800–1500	115–215	—
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	—	—	250–1000	35–145	—
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	—	—	275–700	40–100	—
Silicon carbide (SiC)	—	—	100–820	15–120	—
Glass–ceramic (Pyroceram)	—	—	247	36	—
Mullite (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	—	—	185	27	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	—	—	110–245	16–36	—
Fused silica (SiO ₂)	—	—	110	16	—
Magnesium oxide (MgO) ^e	—	—	105	15	—
Soda–lime glass	—	—	69	10	—
Polymers					
Nylon 6,6	44.8–82.8	6.5–12	75.9–94.5	11.0–13.7	15–300
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	62.8–72.4	9.1–10.5	110–150
Polyester (PET)	59.3	8.6	48.3–72.4	7.0–10.5	30–300
Polymethyl methacrylate (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	48.3–72.4	7.0–10.5	2.0–5.5
Polyvinyl chloride (PVC)	40.7–44.8	5.9–6.5	40.7–51.7	5.9–7.5	40–80
Phenol-formaldehyde	—	—	34.5–62.1	5.0–9.0	1.5–2.0
Polystyrene (PS)	—	—	35.9–51.7	5.2–7.5	1.2–2.5
Polypropylene (PP)	31.0–37.2	4.5–5.4	31.0–41.4	4.5–6.0	100–600
Polyethylene—high density (HDPE)	26.2–33.1	3.8–4.8	22.1–31.0	3.2–4.5	10–1200
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	—	—	20.7–34.5	3.0–5.0	200–400
Polyethylene—low density (LDPE)	9.0–14.5	1.3–2.1	8.3–31.4	1.2–4.55	100–650

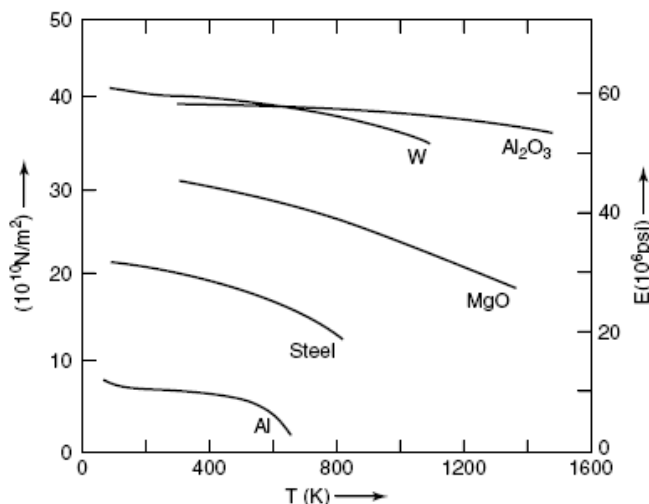


Figura 60 Comparación del módulo de elasticidad (E) entre Al₂O₃ policristalino y algunos metales comunes en función de la temperatura

Tabla 13 Módulo de elasticidad, esfuerzo tensil y relación de Poisson para varios materiales

Material	Modulus of Elasticity		Shear Modulus		Poisson's Ratio
	GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi	
Metal Alloys					
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.35
Ceramic Materials					
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	393	57	—	—	0.22
Silicon carbide (SiC)	345	50	—	—	0.17
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	304	44	—	—	0.30
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	260	38	—	—	—
Magnesium oxide (MgO)	225	33	—	—	0.18
Zirconia ^a	205	30	—	—	0.31
Mullite (3Al ₂ O ₃ -2SiO ₂)	145	21	—	—	0.24
Glass-ceramic (Pyroceram)	120	17	—	—	0.25
Fused silica (SiO ₂)	73	11	—	—	0.17
Soda-lime glass	69	10	—	—	0.23
Polymers^b					
Phenol-formaldehyde	2.76-4.83	0.40-0.70	—	—	—
Polyvinyl chloride (PVC)	2.41-4.14	0.35-0.60	—	—	0.38
Polyester (PET)	2.76-4.14	0.40-0.60	—	—	—
Polystyrene (PS)	2.28-3.28	0.33-0.48	—	—	0.33
Polymethyl methacrylate (PMMA)	2.24-3.24	0.33-0.47	—	—	—
Polycarbonate (PC)	2.38	0.35	—	—	0.36
Nylon 6,6	1.58-3.80	0.23-0.55	—	—	0.39
Polypropylene (PP)	1.14-1.55	0.17-0.23	—	—	—
Polyethylene—high density (HDPE)	1.08	0.16	—	—	—
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.40-0.55	0.058-0.080	—	—	0.46
Polyethylene—low density (LDPE)	0.17-0.28	0.025-0.041	—	—	—

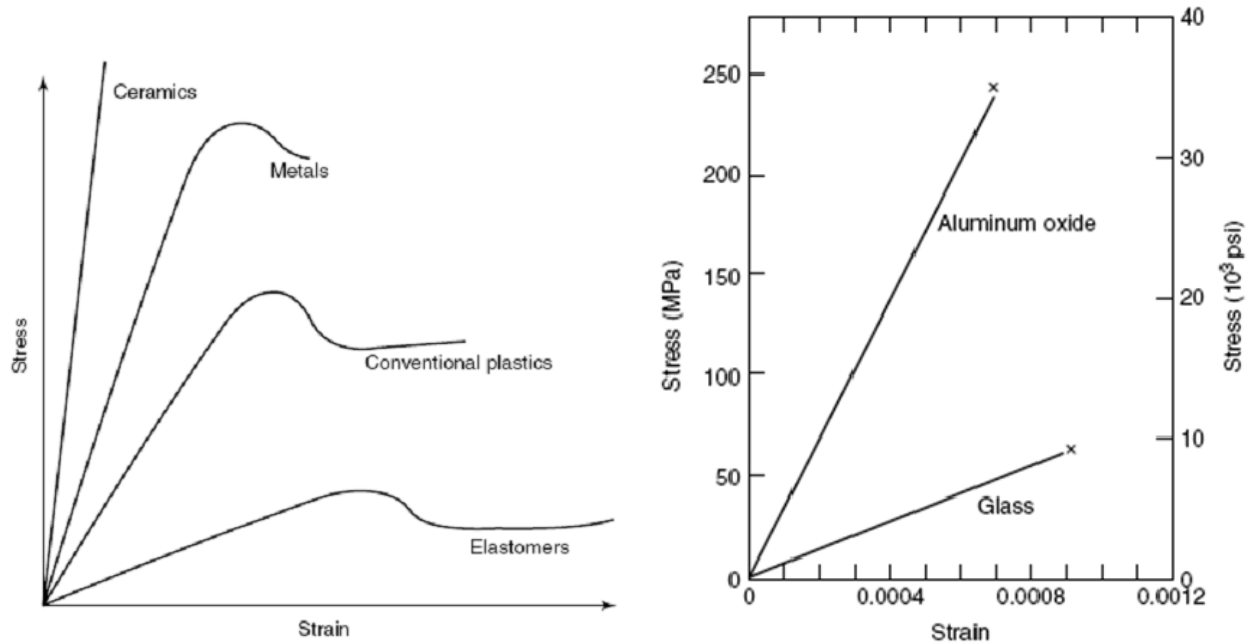


Figura 61 Comparación del diagrama esfuerzo-deformación para cerámicas, metales, polímeros amorfos, elastómeros y vidrios.

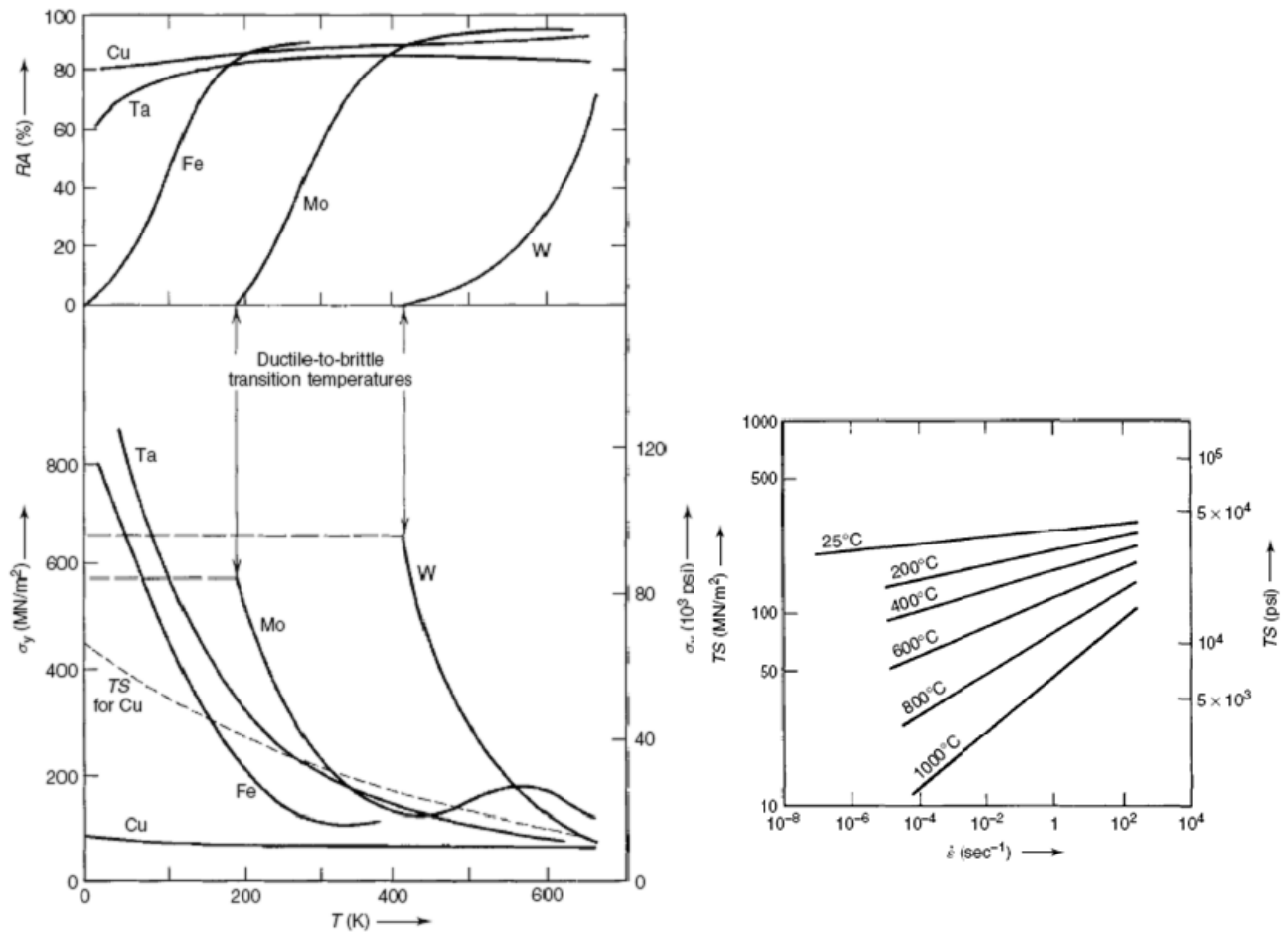


Figura 62 Izq. Variación del porcentaje de reducción en área (%RA gráfico superior) y esfuerzo de cedencia (gráfico inferior) con la temperatura para materiales seleccionados. Der. Variación de la resistencia tensil con respecto al tiempo.

1.5.1.5. Curva esfuerzo real – deformación real

El Esfuerzo y la deformación real se calculan a través de las ecuaciones:

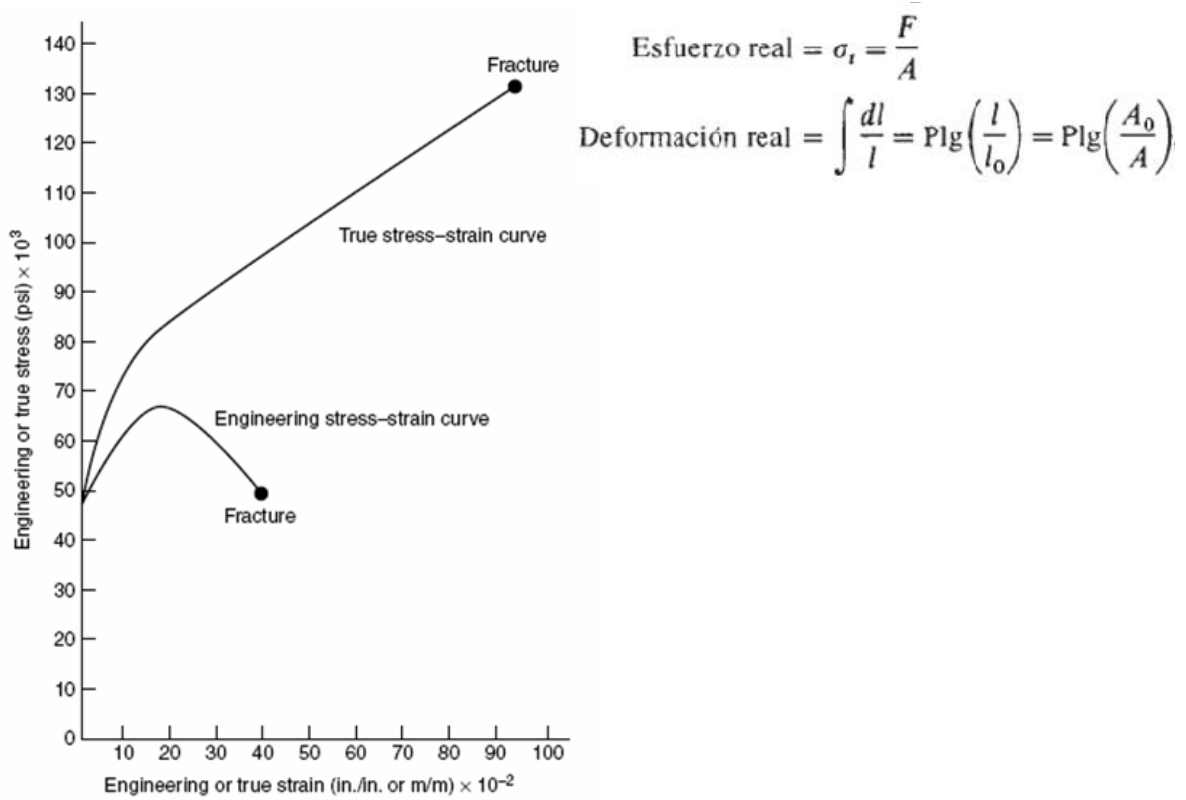


Figura 63 Relación entre el diagrama esfuerzo real – deformación real y el diagrama esfuerzo – deformación ingenieril

1.5.2. Prueba Flexural

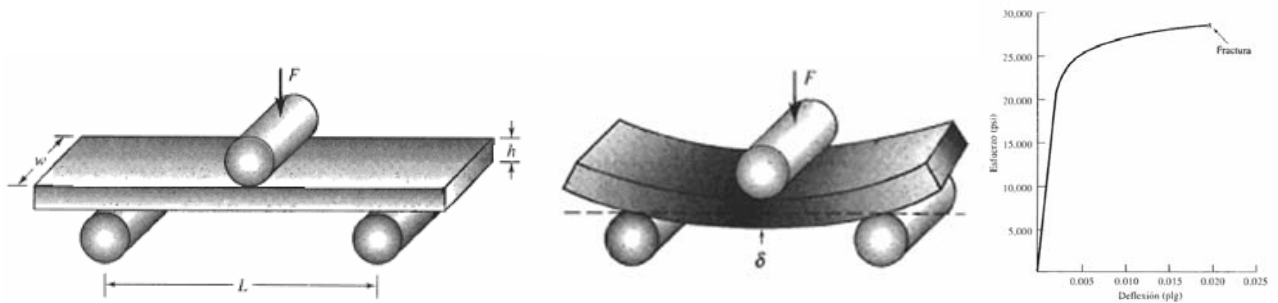


Figura 64 (a) Ensayo de flexión utilizado para medir la resistencia de materiales frágiles, y (b) deflexión δ obtenida durante la flexión de la probeta (c) curva esfuerzo (psi) – deflexión (pulg) para el MgO

La resistencia a la flexión y el módulo de flexión se calcula a través de las ecuaciones:

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

$$\text{Módulo en flexión} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta}$$

Algunas aleaciones de aluminio y de titanio presentan superplasticidad, lo que permite que posean ductilidades mayores a las de los compuestos puros

Tabla 14 Propiedades de aleaciones que presentan superplasticidad

Alloy Composition	Temperature of Applicability (°C)	Superplasticity (% Elongation)	<i>m</i>
<i>Al-Based Alloys (Balance Al)</i>			
6%Cu-0.4%Zr-0.3%Mg	400-480	1800	0.45-0.7
5.5%Zn-2.0%Mg-1.5%Cu-0.2%Cr	510-530	1400	0.5-0.8
2.7%Cu-2.2%Li-0.7%Mg-0.12%Zr	510-530	800	0.4-0.6
4.8%Cu-1.3%Li-0.4%Mg-0.4%Ag-0.14%Zr	470-530	1000	0.45
5%Ca-5%Zn	450-550	600	0.4-0.5
4.7%Mg-0.7%Mn-0.15%Cr	480-550	670	0.4-0.65
2.5%Li-1.2%Cu-0.6%Mg-0.1%Zr	500-540	1000	0.4-0.6
<i>Ti-Based Alloys (Balance Ti)</i>			
6%Al-4%V	790-940	1400	0.6-0.8
5.8%Al-4%Sn-3.5%Zr-0.5%Mo-0.3%Si-0.05%C	950-990	400	0.35-0.65
4%Al-4%Mo-2%Sn-0.5%Si	810-930	1600	0.48-0.65
4.5%Al-3%V-2%Fe-2%Mo	750-830	700	0.5-0.55
14%Al-20%Nb-3%V-2%Mo	940-980	1350	0.4-0.6
6%Al-2%Sn-4%Zr-2%Mo	880-970	900	0.5-0.7

1.5.3. Prueba de Impacto

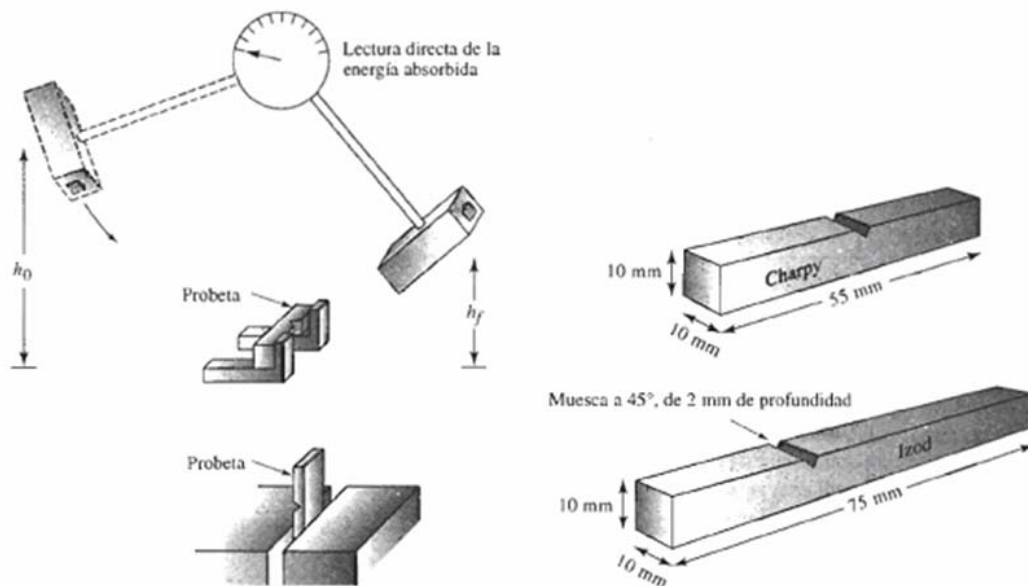


Figura 65 Izq. Ensayos de Charpy y de Izod. Der. Dimensiones de las probetas típicas

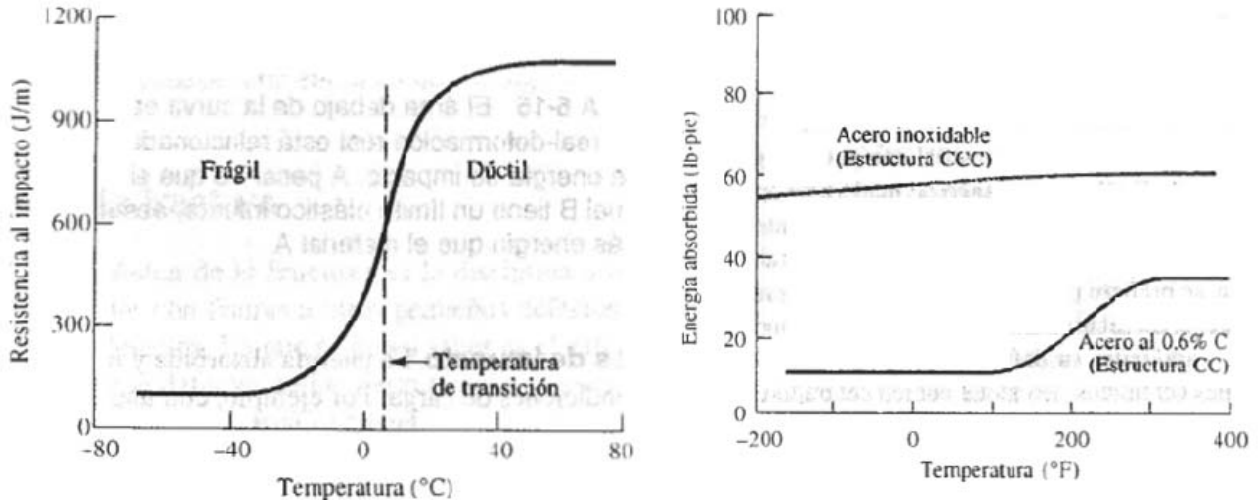


Figura 66 Izq. Resultado de una serie de ensayos de impacto Izod para un polímero termoplástico de nylon super tenaz. Der. Resultados de pruebas de Charpy con muestra en V para un acero al carbono BCC y un acero inoxidable FCC. La estructura cristalina FCC generalmente absorbe más energía y no tiene temperatura de transición dúctil-frágil.

1.5.4. Prueba de Escurrimiento (Termofluencia)

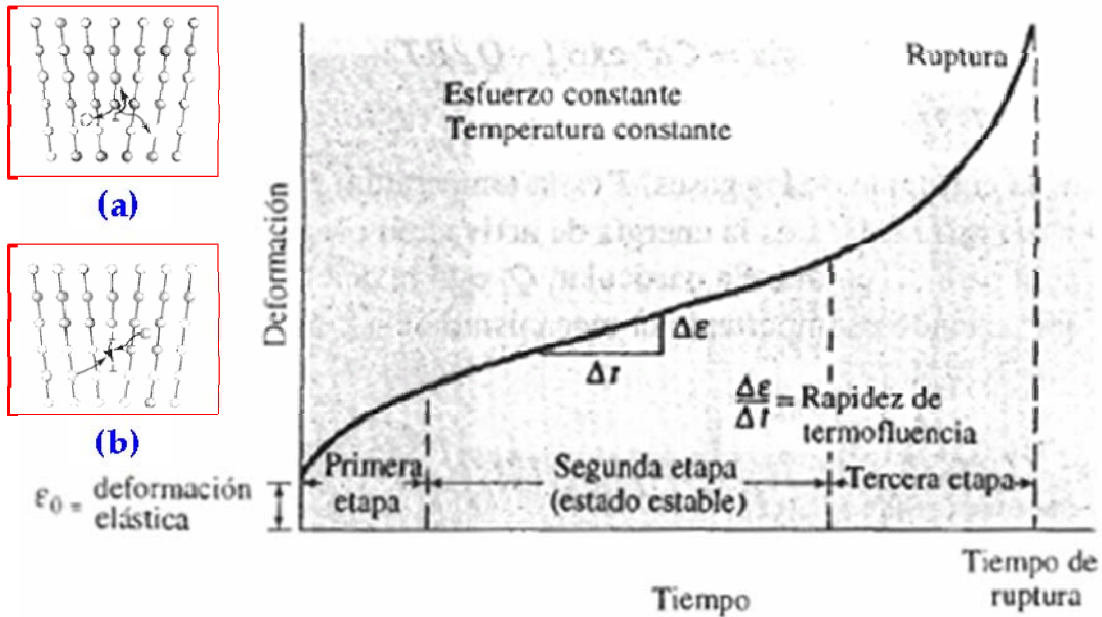


Figura 67 Curva típica de termofluencia mostrando la deformación producida en función del tiempo para un esfuerzo y una temperatura constante. Los átomos pueden alejarse de las dislocaciones para llenar vacancias o intersticios (a) o acercarse para generar vacancias (b)

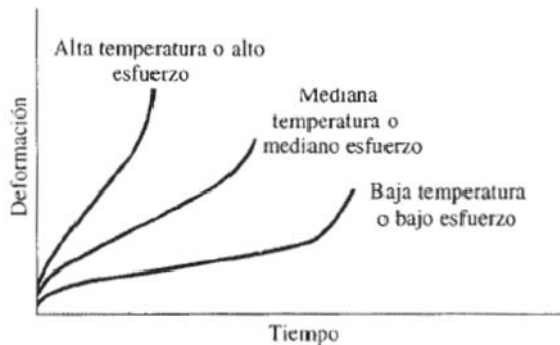


Figura 68 Efecto de la temperatura sobre la curva de termofluencia

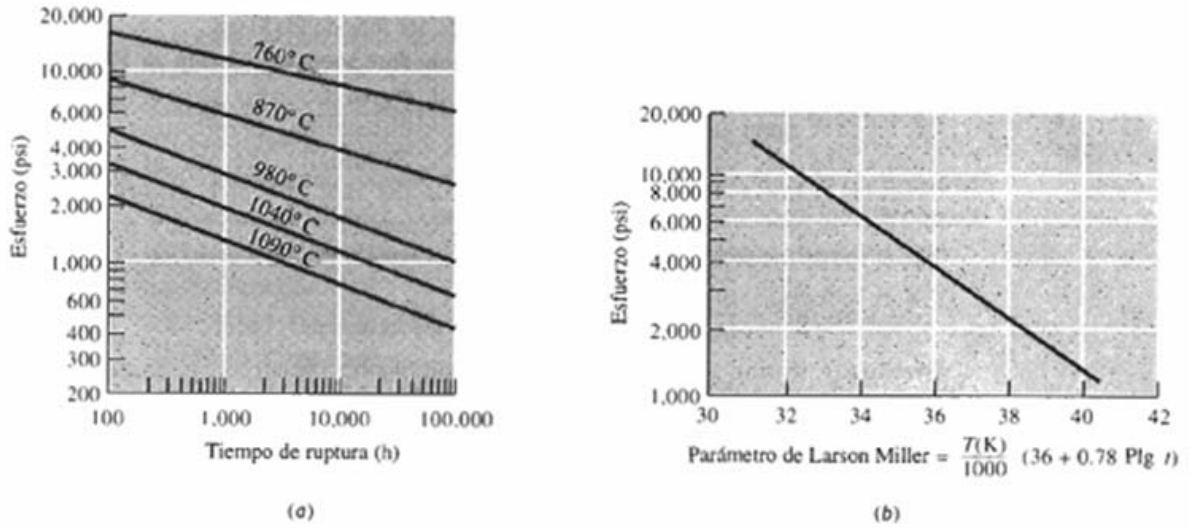
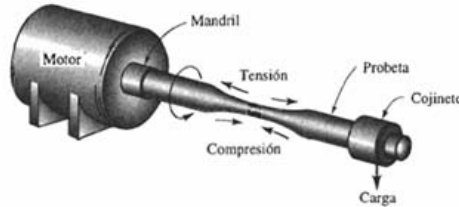


Figura 68 Resultados de una serie de ensayos de termofluencia: (a) Curvas de esfuerzo-tiempo de ruptura para una aleación de Fe-Cr-Ni; (b) Parámetro de Larson-Miller para una función dúctil de hierro.

1.5.5. Prueba de Fatiga



El esfuerzo aplicado en la prueba de fatiga se calcula como:

$$\sigma = \frac{10.18lF}{d^3},$$

donde l es la longitud de la barra, F la carga y d el diámetro.

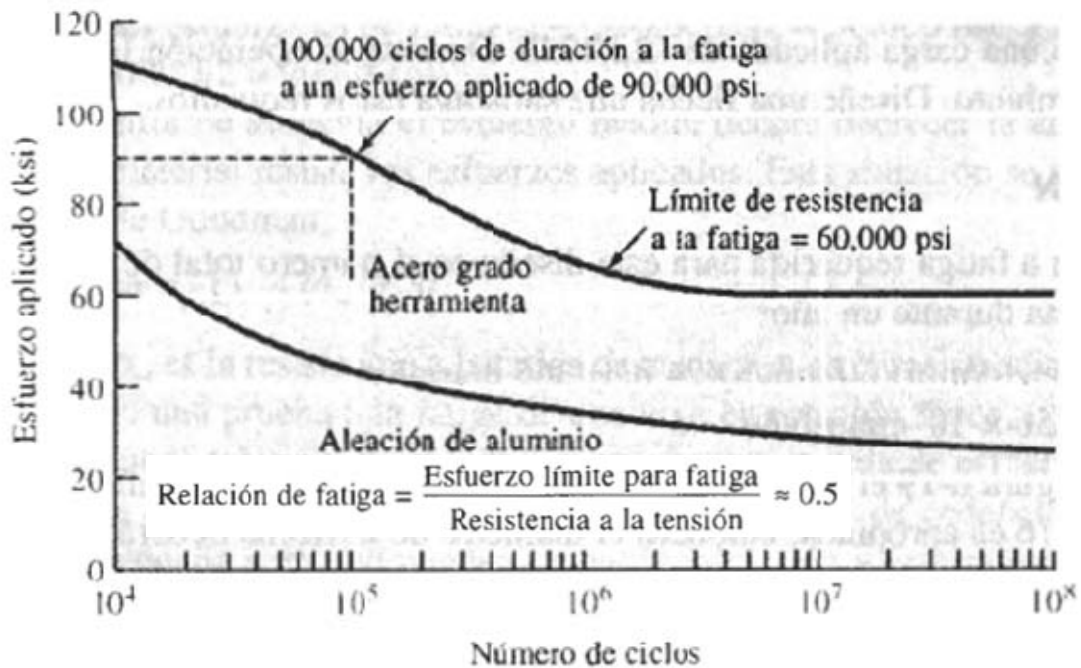
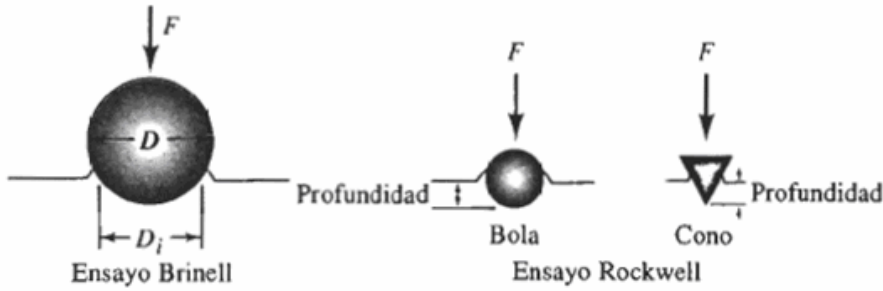


Figura 69 Curva Esfuerzo vs. Número de ciclos de una prueba de fatiga para una aleación de aluminio y un acero

1.5.6. Prueba de dureza



Dureza Brinell: $HB = \frac{F}{(\pi/2)D(D - \sqrt{D^2 - D_i^2})}$

Tabla 15 Tipos de ensayos de dureza y condiciones de aplicación

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	{ <ul style="list-style-type: none"> Diamond cone 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres 		 	60 kg } 100 kg } Rockwell 150 kg } 15 kg } 30 kg } Superficial Rockwell 45 kg }	

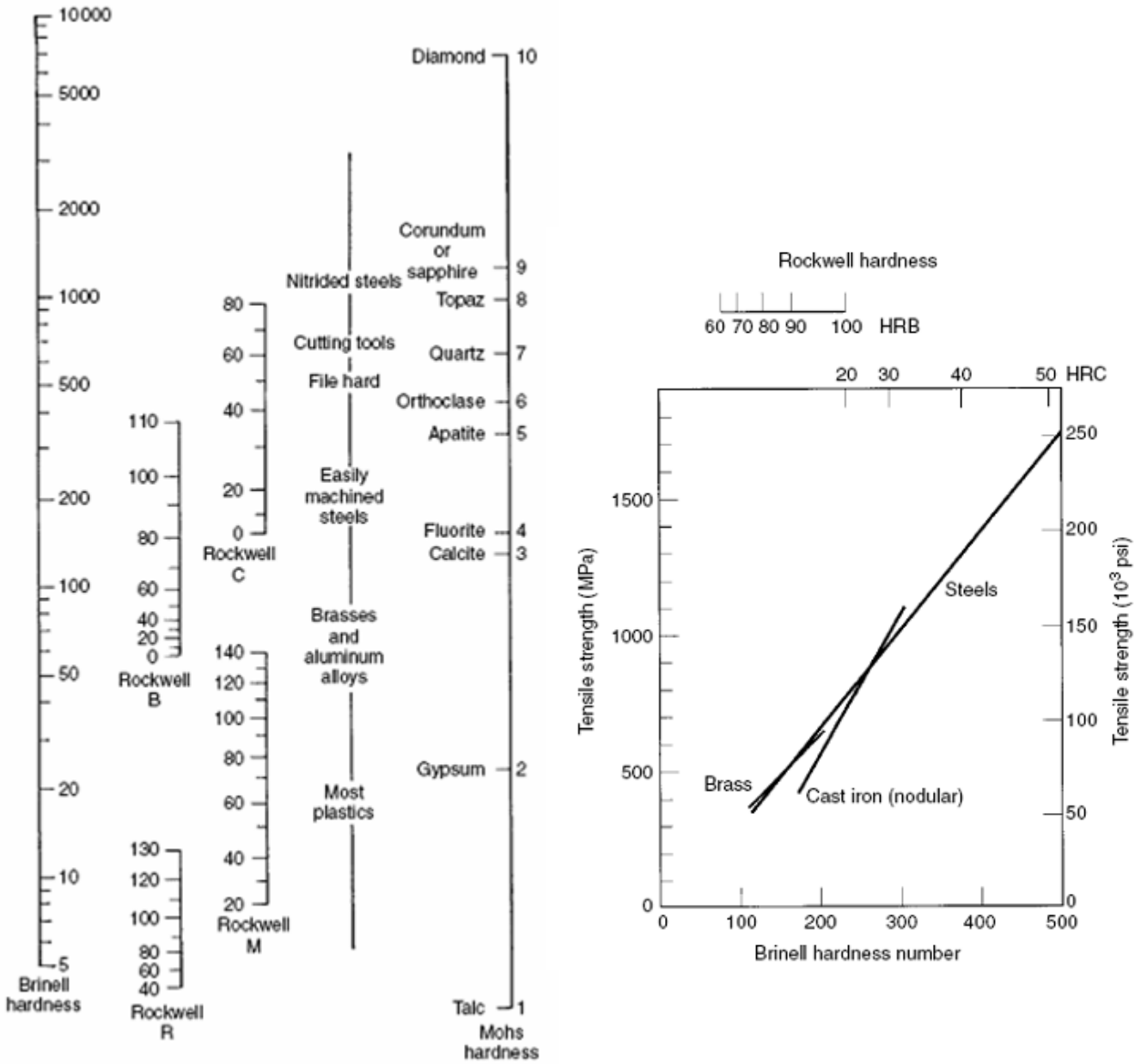


Figura 70 Izq. Comparación entre algunas escalas de dureza. Der. Relación entre la dureza y la resistencia tensil para el acero, bronce Cu-Zn y una fundición

La resistencia tensil puede ser calculada con la siguiente relación:

$$\text{Resistencia a la tensión (psi)} = 500 HB$$