

Ciencia de los Materiales

Apunte muy resumido (!)

Raúl Julián
Ing. Mecatrónica

U1

Ciencias e Ingeniería

- Ciencia: Nos hace razonar sobre:

Relación entre: • Estructura { Subatómica: electrones

Atómica: iones (cerámicos), átomos (metales), moléculas (polímeros)

Microscópica: visible por microscopio

Macroscópica: visible a simple vista

- Propiedades
- Procesamiento

- Ingeniería: Conocimientos de la ciencia aplicados para obtener productos útiles para la sociedad diseñando o proyectando la estructura del material para obtener propiedades de interés

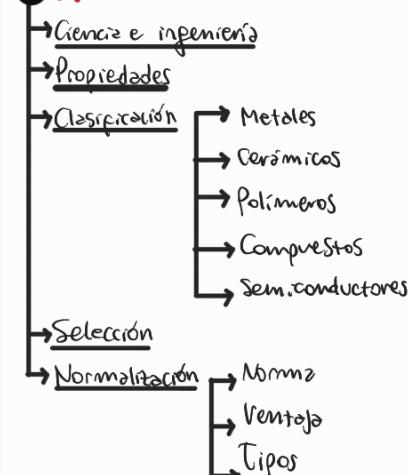
Propiedades

- Mecánicas: relación fuerza aplicada - deformación
- Térmicas: cap. calorífica y conductividad térmica
- Eléctricas: Comportamiento ante cpo eléctrico
- Magnéticas: Comportamiento ante cpo magnético
- Ópticas: comportamiento ante radiación electromagnética / lumínica
- Químicas: Reactividad (corrosión, desgaste, oxidación)

Clasificación de Materiales

- Según su
- Composición química
 - Estructura
 - Propiedades

U1



Metalos:

- Inorgánicos, generalmente elem. metálicos (Au, Fe, Al, Cr) y algunos no metálicos como C, N, O.
- Átomos ordenados simétricamente formando sólidos cristalinos
- Conductores del calor y electricidad y son opacos a la luz visible
Aunque pulidos son lustrosos
- Alta resistencia aún a elevadas temperaturas
- Gran ductilidad y maleabilidad
- Tendres con alto punto de fusión
- Se ven polimorfos al microscopio
- Aleaciones metálicas (comb. de 2 o más metales → metales + no metales)
(ferrosas: ac y fund ó no ferrosas: latón, bronce)
- En el caso de q' sean sensibles a la corrosión, se pueden galvanizar en un baño de sales q' contienen cinc

Cerámicos

- Inorgánicos, formados x elementos metálicos y no metálicos en forma de carbonos, óxidos y nitruros
- Pueden o no ser cristalinos
- Enlaces iónicos o predominantemente iónicos con algún carácter covalente
No hay mov. de e^- o iones. Estos enlaces dan lugar a dureza y resistencia aunque con fragilidad
- Buena aislante térmica y eléctrica
- Resisten altas T° (refractarios) y medios químicamente agresivos ya que "ya están ceramizados". Se encuentran en config. de menor E° libre
- Los vidrios son amorfos y en su mayoría silicatos. Su importancia en ingeniería radica en su capacidad para transmitir la luz visible

Aplicación: frenos-espacial (placas), frenos de automóviles, sistemas piezoelectrónicos

Polímeros

- **Órganicos** a base de C, H y otros elementos no metálicos
- largas cadenas con enlaces covalentes y de VDW. La mayoría son no cristalinos
- "ordenamiento de cadenas poliméricas → través de enlaces de VDW".
El ordenamiento aumenta {
 - el peso molecular
 - el largo de cadenas
 - densidad
 - mejora de prop. mecánicas
- En cuanto a microestructura hablamos de **esferulitas**
- No resisten al calor
- No se corroen, se **degradan** frente a radiación electromagnética UV
- Malos conductores de la elec. Algunos son **buenos aislantes** (baquelita, goma)
- Si son **termoestables** se endurecen al calentarse (epoxi, siliconas, fenólicos)
- **Termoplásticos** se ablandan al calentarse y se endurecen al enfriarse. (poliéster, polietileno)



Materiales Compuestos

- Mezcla de dos o más materiales insolubles entre sí.
 - ↳ **Material REFORZANTE** en fase dispersa
 - +
↳ **Resina compatible AGLOMERANTE** q' hace de matriz y brinda tenacidad
- Se fabrican p/ obtener caract. y prop. específicas deseadas.
- Predominan → **Fibrosos** (fibra de vidrio, C, aramida) en matriz epoxi
 - **Particulados** (como el hormigón)

En la fibra de vidrio, el vidrio otorga R. mecánica y el polímero la hace flexible

Ej: hormigón (arena en matriz de cemento de silicato)

Semiconductores

- Prop. eléctr. intermedias entre conduct. y aislantes
- formados x Silicio / germanio con pequeñas concentr. de impurezas.
- Usados en electrónica

Aplicación: Calculadoras, satélites, microproc., memorias, etc.

Selección de materiales

En la aplic. práctica hay que balancear entre prop. requeridas y costo.

Algunos son descartados x no cumplir las prop. y otros por su elevado costo

2 decisiones

- **Qué tipo de material**
- dentro del tipo, **qué material específico**

Normalización

Referida a **tipificar**, ajustar a un tipo o norma.

ISO: International Organization for Standardization

IRAM: Instituto Argentino de Normalización y Certificación

Se busca hacer las cosas de la misma forma, repetitiva.

Norma

- Especificación **técnica** (requisito x cumplir x un producto, proceso o servicio)
- **Colaboración y consenso** de las partes interesadas
- Promueve **beneficios** p/ la comunidad
- Debe ser **aprobada** x un organismo reconocido a nivel regional, nacional o internacional
- Busca conciliar intereses fabricante-consumidor **simplificando**

- **Simplificación**: reduce n° de modelos y normas. Se queda con lo imprescindible
- **Unificación**: intercambios y comparaciones de normas
- **Especificación**: evitar errores c/ lenguaje claro y preciso

Dentro de ISO: DIN y ASA y dentro de ASA, API, ASTM, SAE, AISI

Ventajas para:

- Industrial (org. de fabricación, mat. primas)
- Comerciente (reducción de stocks, relación con proveedores, Marketing)
- Consumidor (garantía de calidad)
- Economía nacional (mejora y aumenta producción, calidad, regulabilidad y concordancia entre oferta y demanda)

Tipos de normas

- **De productos** (especif. del material)
Hay tantos como productos haya
- **De sistemas** (modo de trabajo p/ lograr el producto)
 - ISO 9000 de sist. de gestión de calidad (req. mínimos a cumplir x una organiz.)
 - ISO 14000 medioambiente
 - ISO 22000 inc. alimentaria (únicamente p/ industria alimenticia)
 - ISO 11500 HyS en el trabajo

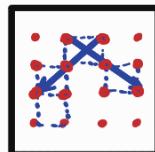
Salvo la 22000, todas pueden ser certif. x cualquier organización.

U2

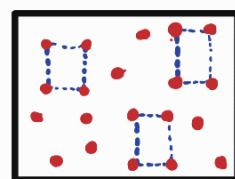
Redes espaciales y celdas unidad.

Según dist. de átomos (metales), iones (cerámicos) o moléculas (polím.)
se clasifican en:

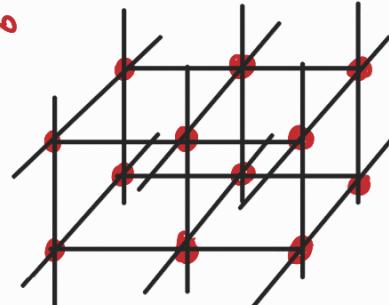
- **Cristalinos:** ord. repetitivo a largo alcance. (indefinidamente)
metales, aleaciones, algunos cerámicos.



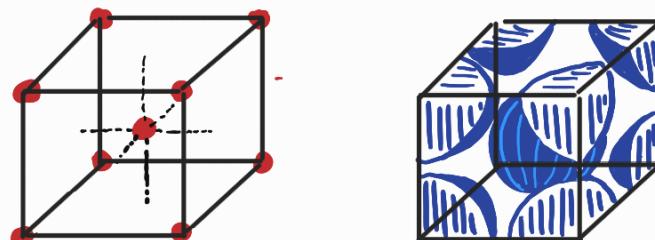
- **Amorfos:** No hay ord. a largo alcance
Puede haber orden a corto alcance.



Este ordenamiento se puede representar x líneas en 3D y, en las intersecciones, átomos. → **Reticulo cristalino**

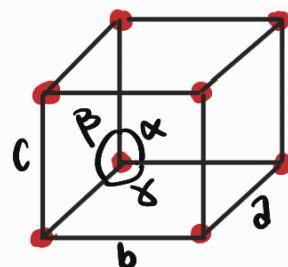


El menor grupo de at. representativo de una det. estructura es la **celda unidad**



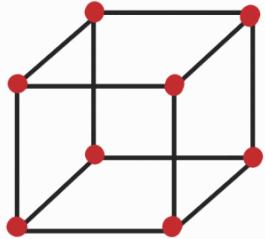
Su geometría se puede describir por 6 parámetros:

- Aristas a, b, c } parám. de red / ctos reticulares
- Ángulos α, β, γ

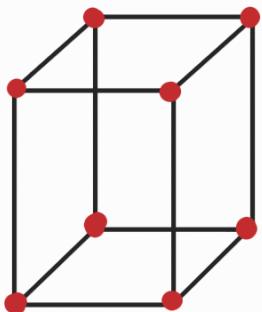


Sistemas cristalinos y Redes de Bravais

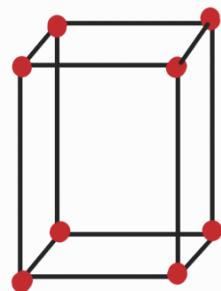
Sistemas cristalinos (7)



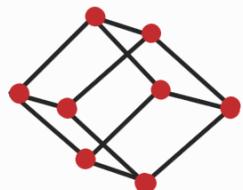
Cúbico
• $a = b = c$
• $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



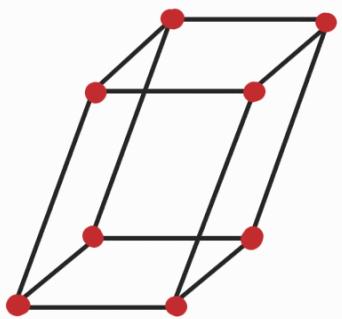
Tetragonal
• $a = b \neq c$
• $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



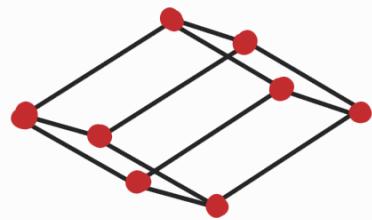
Ortorrombico
• $a \neq b \neq c$
• $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



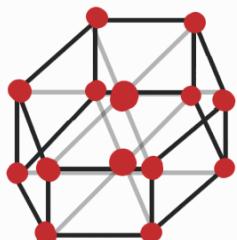
Romboédrico
• $a = b = c$
• $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$



Monoclínico
• $a = b \neq c$
• $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$



Triclinico
• $a \neq b \neq c$
• $\alpha \neq \beta \neq \gamma$



Hexagonal
• $a = b \neq c$
• $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma = 120^\circ$

Redes de Bravais

Bravais demostró que 14 celadas unitarias estandar podían describir todas las estructuras reticulares posibles.

Cubica → simple



→ Centrada en el cuerpo BCC



→ Centrada en las caras FCC

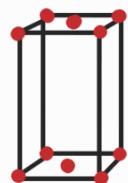


Ortorrómica

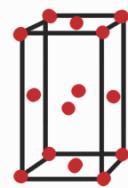
→ Simple



→ Centrada en bases



→ Centrada en caras

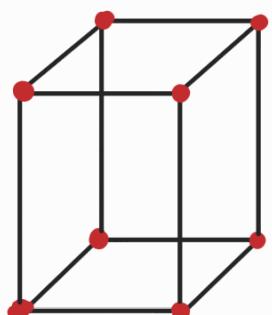


→ Centrada en cuerpo

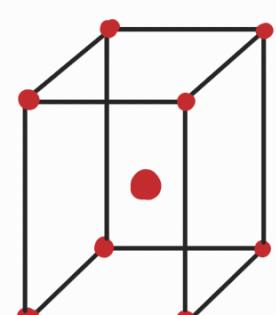


Tetragonal

→ Simple

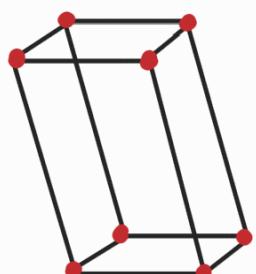


→ Centrada en el cuerpo

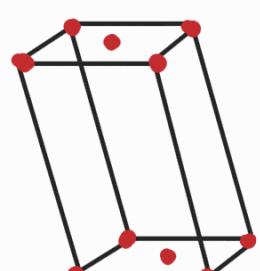


Monoclínica

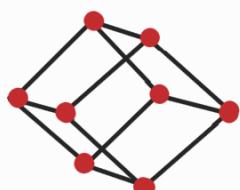
→ Simple



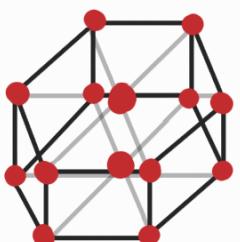
→ Centrada en las bases



Romboédrico

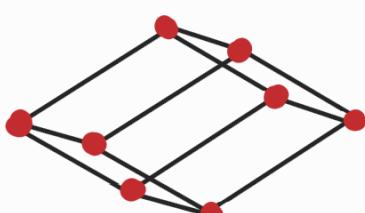


Hexagonal



+ compacto

Triclinica

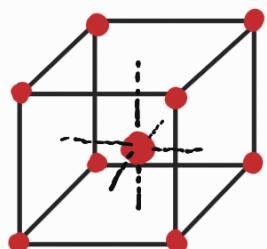


Principales Estructuras Cristalinas metálicas BCC FCC HCP

La mayor parte de los metales cristaliza en éstas estruct. densamente empacadas y se libera E° al aproximarse los át. y pasan a config. de menor E° libre (más estables)

Hipótesis: los át. se comportan como esp. rígidas

BCC (α, δ , Cr, Fe, Mb)



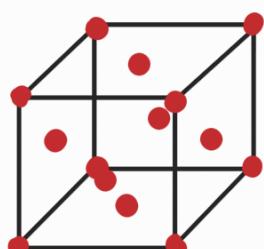
$$\text{Át/celd} : n = \frac{1}{8} n_V + \frac{1}{2} n_C + n_I = 2 \quad (2)$$

Coord: en base al central: 8

$$\text{Rel } a-R : \sqrt{3}a = 4R$$

$$\text{FEA: } \frac{\text{Vol. átomos}}{\text{vol celd.}} = \frac{2 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R^3}{a^3} = 0,68$$

FCC Al, Cu, Au, Ag, Fe γ



$$\text{Át/celd} : n = \frac{1}{8} n_V + \frac{1}{2} n_C + n_I = 4 \quad (4)$$

Coord: en base al de cara sup 12

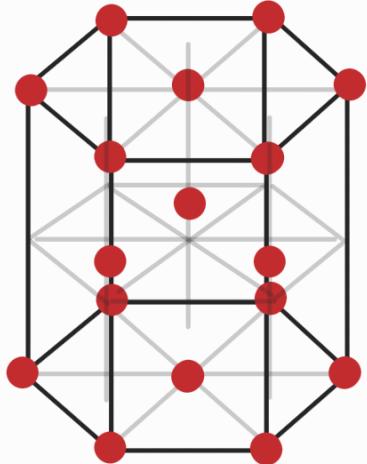
$$\text{Rel } a-R : \sqrt{2}a = 4R$$

$$\text{FEA: } \frac{\text{Vol. átomos}}{\text{vol celd.}} = \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R^3}{a^3} = 0,74 \quad 8 \text{ MAX posibles p/esp. rígidas}$$

↓
+ compacidad
+ ductilidad y blandos

menor E° para romper enlaces, desplazar át. y formar huecos

HCP Zn, Mg



$$\text{At/celd} : n = \frac{1}{6} n_V + \frac{1}{2} n_C + n_i = 6$$

Coord: en base al de cara sup: 12

$$\text{Rel } a-R : a = 2R$$

FEA:

$$\frac{\text{Vol. Atomas}}{\text{Vol celd.}} = \frac{6 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R^3}{3a^2 \operatorname{sen} 60^\circ} = 0,74$$

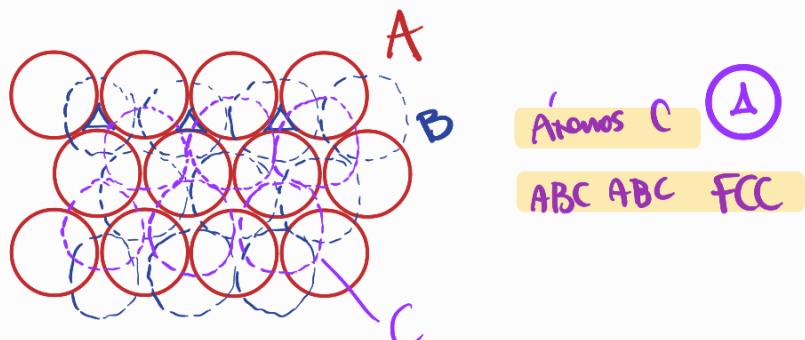
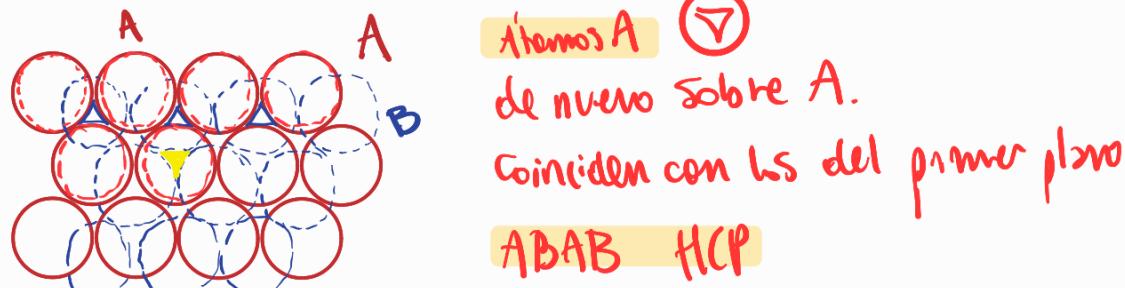
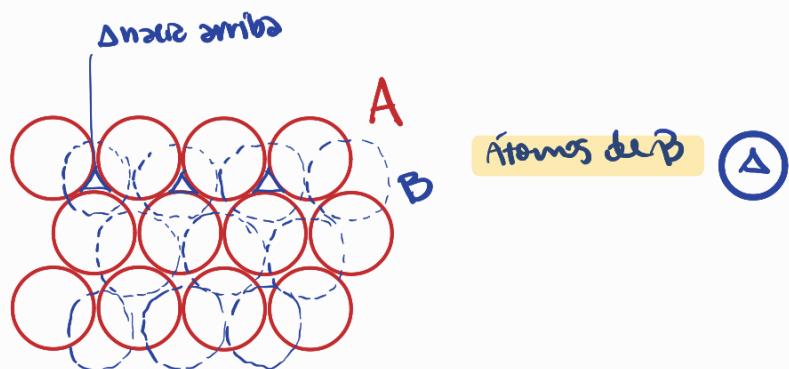
$$A = \frac{a \cdot h}{2} = \frac{1}{2} a \cdot a \cdot \operatorname{sen} 60^\circ = \frac{1}{2} a^2 \operatorname{sen} 60^\circ \quad (\times 6 \text{ xg son } 6\Delta) - 3a^2 \operatorname{sen} 60^\circ$$

\downarrow
 $c = \text{altura}$

$$\frac{c}{a} = 1,633 \text{ p/ esf. rígidas y difiere en los dist. metálicos}$$

FCC \rightarrow HCP, iguales FEA

Surgen de apilar iguales planos de máx. compacidad en 2 formas distintas.



Posiciones atómicas

Colocamos el origen de coord en un vértice de la Celd y marcamos la posición según sus coord (A, B, C) entre () y separados x ";"

Direcciones cristalográficas

Según un vector \vec{g} une 2 puntos de la red.

- 1) Trasladamos el vector al origen en un vértice
 - 2) Determinamos la proyección en términos de a, b, c (ctes reticulares) en caso de cúbicos, se hace unitaria "z"
 - 3) Multiplicar x un factor común llevando todos a enteros (menores posibles)
 - 4) Rep. dirección entre [] sin comas $[u v w]$
- Los vect. paralelos tienen iguales índices

Planos cristalográficos: Índices de Miller

- 1) Defino el plano, coloco el origen en un vértice, \Rightarrow no puede el plano pasar por el origen. Si pasa, muevo el origen
- 2) Busco intersecciones del plano con los ejes. (Si no corta, pongo " ∞ ")
- 3) Busco los recíprocos y coloco entre () sin comas $(u v w)$
(si alguna intersecc. es (-) coloco una raya arriba del índice, ej $(10\bar{1})$)

Planos más compactos

- FCC (111)
- HCP Basales
- BCC (110) (no es plano de máx compacidad pero sí el más compacto de la BCC)

Densidad volumétrica

$$f_V = \frac{\text{masa de la celdilla}}{\text{vol. de la celdilla}} = \frac{n^o \text{st/celd.} \times PM}{\text{vol. celd.} \times n^o \text{Avog.}}$$

Densidad planar

$$f_P = \frac{n^o \text{equiv. de sf cuyos centros están en el plano}}{\text{área planar}} \quad (\text{por unidad de área})$$

$$\text{FEP: } \frac{n^o \text{equiv. de sf cuyos centros están en el plano} \times \pi R^2}{\text{área planar}} \quad (\text{adimensional})$$

(factor de empaq. planar)

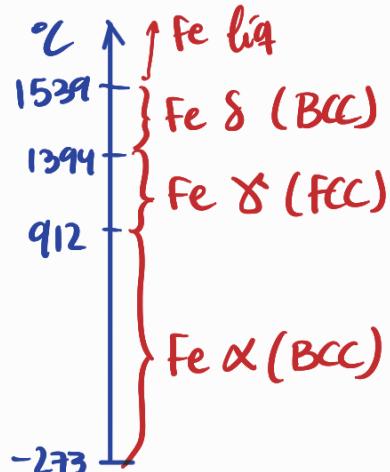
Densidad lineal

$$f_L = \frac{n^o \text{de diámetros equivalentes en la longitud}}{\text{longitud}} \quad (\text{por unidad de longitud})$$

$$\text{FEL: } \frac{n^o \text{de diámetros equivalentes en la longitud} \times 2R}{\text{longitud}} \quad (\text{adimm.})$$

Polimorfismo o Alotropía

Según condiciones de P y T° se pueden encontrar elementos y compuestos en más de una forma cristalina
Uno de ellos es el Fe



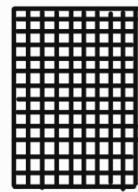
Mono cristales y polícrustales

Mono: • Misma estructura en toda su ext. Sin interrupciones

• Poco comunes, más bien ideales

• Se pueden conseguir en condiciones de lab.

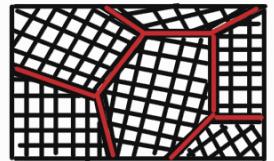
• **Anisótropos** (dep. de los planos de máx deslizamiento)



Poli: • Muchos cristales del mismo retículo en direcciones distintas.

• Los lím. de grano separan los cristales

• **Isotropos** ya que se compensan las orientaciones entre sí.



U3

Ensayos. (Destructivos / NO destructivos)

LAB: Control de calidad de piezas en condiciones de P, T^o , carga, ambiente, etc

a las q' se someten. → Ensayo adecuado para condiciones de servicio

En base a NORMATIVAS, Ing. en estructuras, Ing civiles, de mat, tecnólogos realizan ensayos

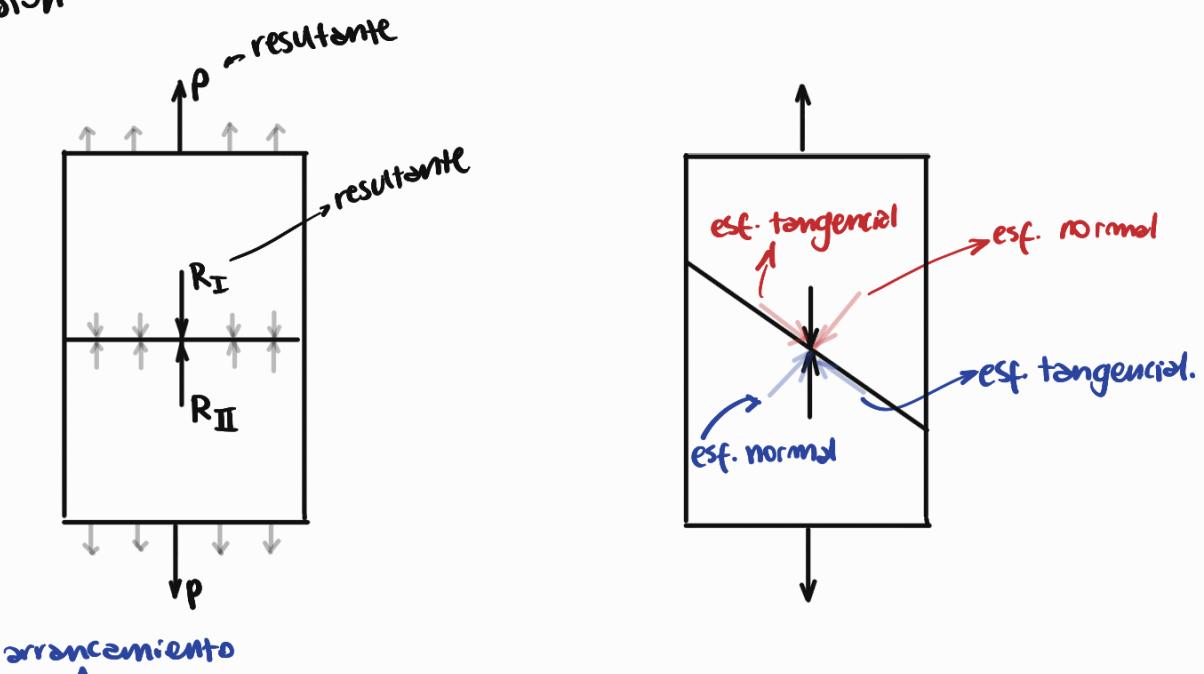
Conceptos

Esfuerzo

Materia → equilibrio entre fzas de atracción/repulsión de constituyentes (átomos, iones, moléculas) → COHESIÓN

Al aplicar una fuerza externa, se rompe el equilibrio y no se conservan ni la forma ni las dimensiones longitudinal en forma axial y \perp a la sección transv.

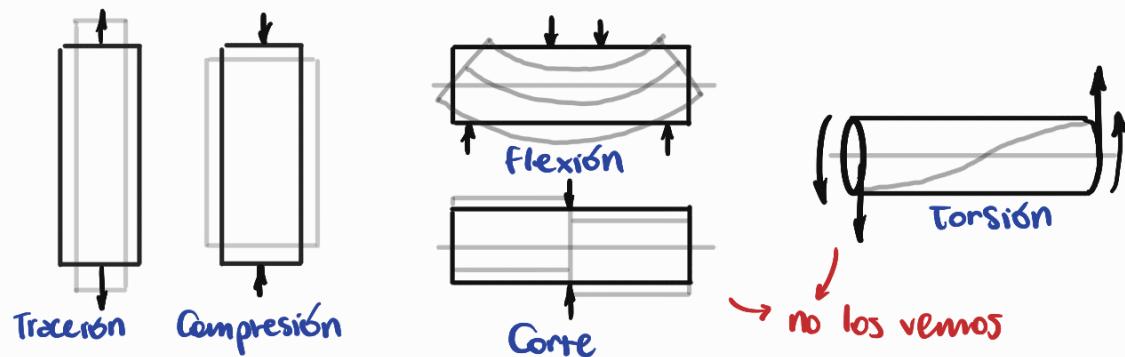
El material reacciona con esfuerzos internos, se opone al cambio, intenta mantener la cohesión



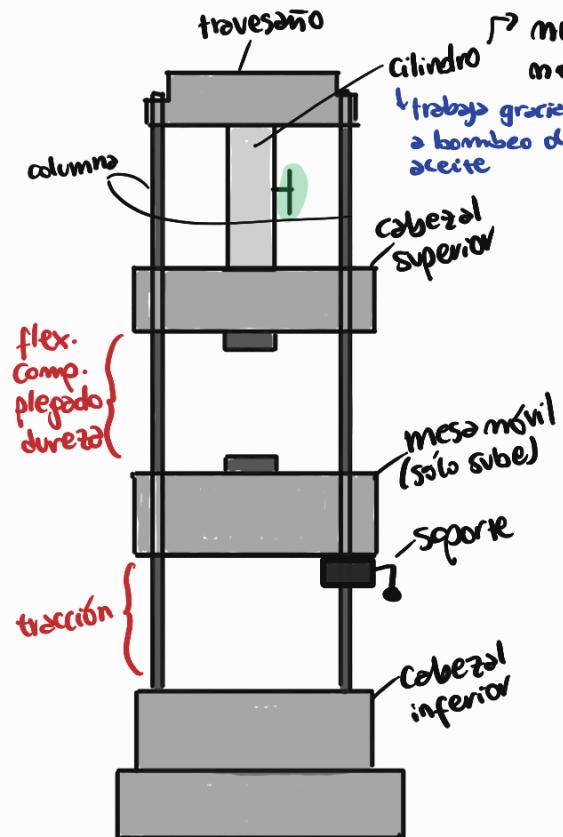
- T Esf. normal: Decohesión / fractura al superar un valor crítico casi sin deformac.
- T Esf. tangencial: Deslizamiento de microconstituyentes. Capacidad de deformación del material

Como no se pueden medir, se hace en función de la carga externa debida al equilibrio: $\text{Esfuerzo} = P$

Clasificación de esfuerzos



Se pueden realizar ensayos en la máquina universal de ensayos



La máquina funciona gracias a un motor conectado a poleas que accionan una bomba alternativa (tipo pistón)

También hay un palón amortiguador con un diafragma

Cuando la presión del aceite (P_{AC}) es mayor que la del diafragma (P_D) y el diaf. acumula aceite. Cuando $P_{AC} < P_D$ el aceite sale del diaf. Así se mantiene P_{cte} y vel. cte.

- Válvula de presión (fijo)
 - cerrada: como un cilindro chico (menos P)
 - abierta: como un cilindro grande (más P)

Centrapeso: al combinarlo con la válvula, aumenta o fija carga.

| Escala (Th) | Llave | Péndulo |
|-------------|---------|----------------|
| 0-3 | Cerrada | Sin contrapeso |
| 0-6 | Cerrada | Con contrapeso |
| 0-15 | Abierta | Sin contrapeso |
| 0-30 | Abierta | Con contrapeso |

Centrapeso móvil: poner a 0 la escala

Rele: Ante recorrido máximo, para la máq.

- T **Tensión:** Esf. normal. Cargas \perp a las secc. transv.
 Atap. longitudinal
 Contracción transversal
- T **Compresión:** idem. Acortamiento longitudinal y ensanch. transv.
- T **Flexión:** Carg. \perp al eje longitudinal. Compresión de fibras sup. + Tensión de fibras inf.
 Esf. normal. Las ST giran respecto de sus inmediatas
- T. **Torsión:** Esf. tangencial. Se aplica un par. Las ST giran en sus planos.
- T **Corte:** Esf. tangencial. Cargas \perp al eje longitudinal

Tensión y resistencia

- Tensión
 - normal $\sigma = \frac{\text{Esf. N}}{\text{Sección}} = \frac{P_N}{S}$
 - tangencial $\tau = \frac{\text{Esf. I}}{\text{Sección}} = \frac{P_T}{S}$

tracción, compresión, corte

- de flexión $\sigma = \frac{\text{Memento flector}}{\text{Módulo resistente}} = \frac{M_f}{W_x}$
- de torsión $\tau = \frac{\text{Memento torsor}}{\text{Módulo resist. polar}} = \frac{M_t}{W_p}$

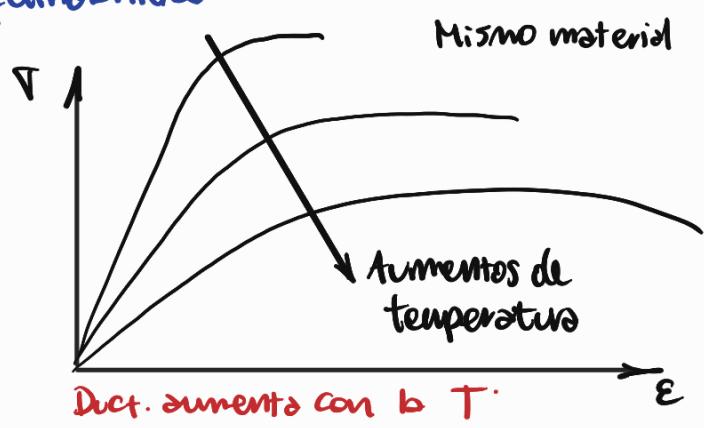
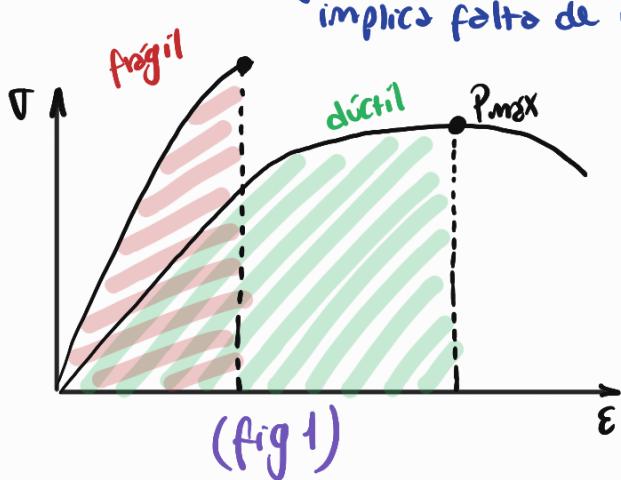
Si usamos P_{max} o M_{max} , hablamos de **Resistencia**.

Propiedades mecánicas

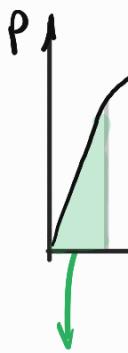
!Un elastómero no es dúctil aunque se deforme mucho ya que no es def. plástica.

► tracción. Si es compresión → maleabilidad

- Ductilidad:**
- Medida del grado de def. plástica soportada hasta fractura.
 - Los **frágiles** experimentan muy poca o ninguna def. plástica.
- ↳ implica falta de maquinabilidad



Resiliencia: Cap. de absorber energía elástica al deformarse y de cederla al cesar la carga.



- Los mat. resilientes tienen un Vm. elástico muy alto y mód. de elasticidad bajo.

- A mayor E más rigidez → más resist. a la def. elástica y menos resiliencia.

$$\text{Área triángulo: } \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \rightarrow R = \frac{1}{2} \frac{\Delta \text{le} \cdot P_{\text{le}}}{V_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E \cdot l_0}{S_0} \cdot \frac{P_{\text{le}} \cdot S_0}{l_0} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} T_{\text{le}} E_{\text{le}} \\ \frac{1}{2} T_{\text{le}} \left(\frac{V_{\text{le}}}{E} \right) = \frac{T_{\text{le}}^2}{2E} \end{array} \right.$$

Cinr. prop. a la rigidez (E)

Tenacidad (fig 1) (Se relaciona con la resist. dinámica.)

- Es la capacidad de absorber Eº antes de la fractura.
- En estricción el trabajo se pierde en calor x roz. de cristales. Por eso medimos la tenacidad hasta P_{max}
- A mayor resistencia y ductilidad, más tenacidad.
- Duros más tenaces que frágiles. (Para igual \sqrt{ET})

$$T = \frac{\int P \cdot d\Delta L}{V_0} \quad T = \frac{P}{S_0} \rightarrow P = S_0 T ; \frac{\Delta L}{l_0} = \varepsilon \rightarrow \Delta L = E \cdot l_0 \text{ y } V_0 = S_0 l_0$$

$$T = \frac{\int S_0 T d\varepsilon \cdot l_0}{S_0 l_0} = \int_0^E T d\varepsilon \quad \text{módulo de tenacidad}$$

Resistencia mecánica: Tensión máxima que admite el material antes de romperse.

Rigidez: ligado al módulo elástico $E = \frac{T}{\varepsilon}$.

Si E es mayor, para igual carga, menos deformación → **MÁS RÍGIDO**

Dureza: Resistencia a la def. plástica **localizada**.

Si sufre def. plástica localizada (abollado, rayado) es blando.

Se analiza en la superficie.

Puede ser más duro en la sup. y más blando en el núcleo (Ej: templado, revestido)

"Resistencia a ser penetrado por otro material"

ENSAYO DE TRACCIÓN

Es el que mejor determina las prop. mecánicas del material.

Los cálculos que haremos serán:

Cálculos de tracción:

Tensión de fluencia

$$\sigma_f = \frac{P_f}{S_0}$$

entre cabezal inf y mesa móvil

Tensión al lím. elástico

$$\sigma_{LE} = \sigma_y = \frac{P_{LE}}{S_0}$$

Resistencia estática a la tracción

$$\sigma_{ET} = \frac{P_{máx}}{S_0}$$

Alargamiento de rotura

$$\delta \% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \cdot 100$$

Definen la capacidad de deformación del material

Coefficiente de estricción

$$\psi \% = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100$$

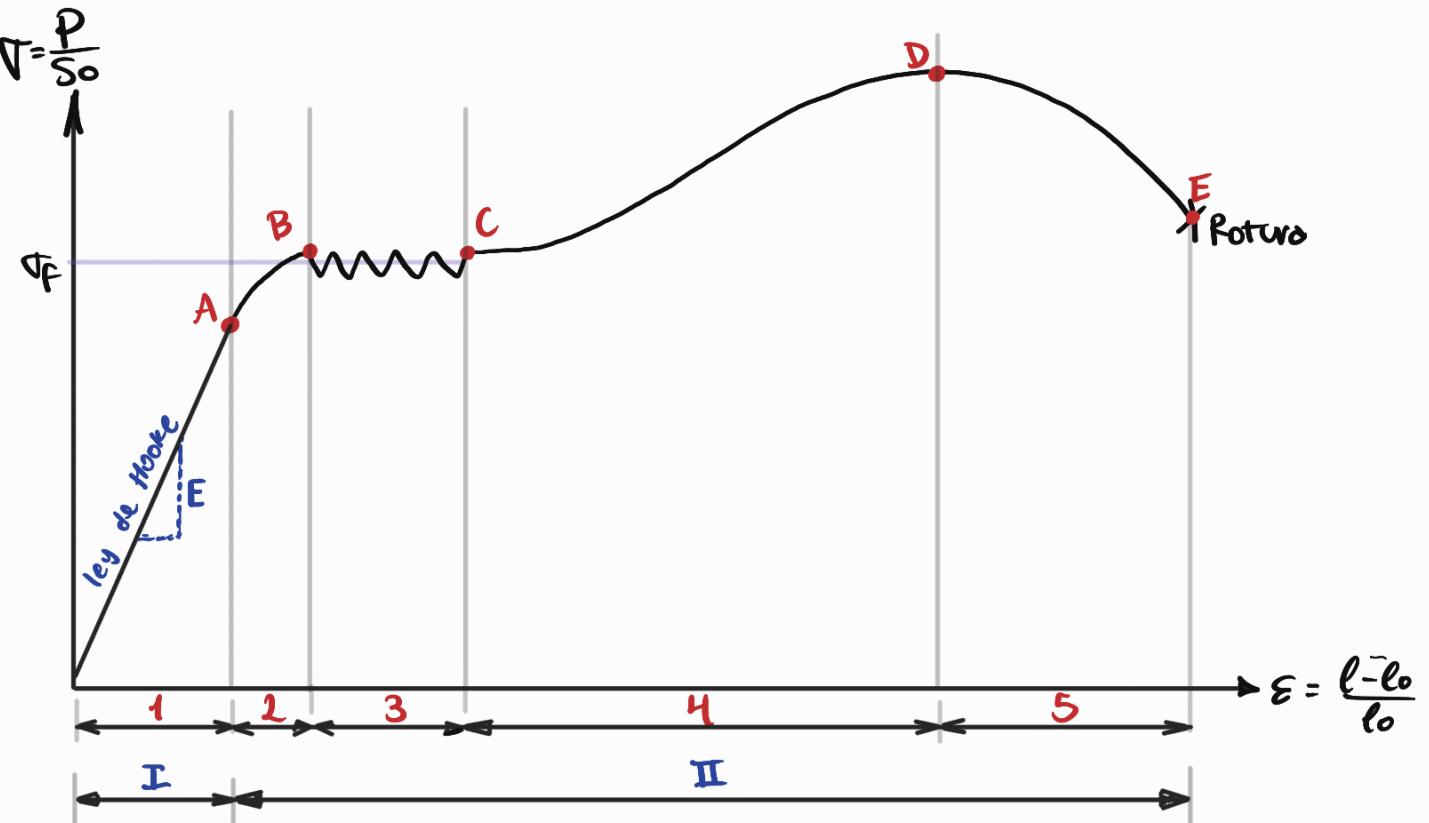
Ensayo

- Cargas uniformemente repartidas, longitudinales y † a las sec. transv (ST)
- Carga lenta y progresivamente a vol. cte.

Diagrama convencional

- Colocamos la probeta en anillos partida y en la maq.
- Carga con la llave de carga. La maq. tiene un registro dinamométrico y un contrapeso. El conjunto dibuja el diagrama en papel milimetrado con un lápiz
- Conocemos la fuerza aplicada. (leyendo lo q' indica la aguja en la escala) y se van registrando los alargamientos
- Si registramos P vs ΔL depende de las dimensiones del material. Por eso hacemos $P/S_0 = \sigma_{conv.}$ vs. $\frac{\Delta L}{l_0} = E_{conv}$ referidos a valores fijos

Pesistencia
Dureza
Ductilidad / fragilidad
Rigidez



\rightarrow Rigididad = Pendiente

- A) límite de proporcionalidad (Ley de Hooke = $\tau = E\epsilon$)
- B) límite elástico aparente o lím. sup. de fluencia (se puede considerar como el fin de la Z.E)
- C) límite inferior de fluencia
- D) Carga máxima
- E) Ruptura

I) Período proporcional

- 1) Zona elástica \rightarrow retiro la carga \rightarrow condiciones iniciales

II) Período plástico

- 2) Zona de alargamientos pseudoelásticos
- 3) fluencia (plásticas + elásticas)
- 4) Alargamiento homogéneo plástico en toda la probeta.
- 5) Estriccion

Fluencia: ($c - d$)

Se deforma casi sin cambiar la carga, variando τ entre un máx y un mín.

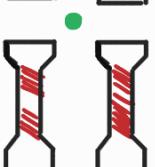
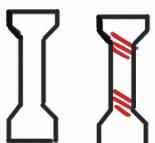
la tensión de fluencia se toma como el promedio de los máx y mín. τ_F

¿Por qué hay oscilación?

1º Razón) • Las IMPUREZAS como C y N tratan las dislocaciones

- Por ésto, aumenta τ para seguir deformando.
 - Al desatrabarse, se facilita la def. y baja τ
- } OSCILA

2º razón) • Los cristales se orientan en dirección de los máx $\tau \approx 45^\circ$ y 135°



- Al activar las τ , el material se deforma
- Al final de fluencia, los crist. ya se orientaron a 45° y 135°
- Aparecen las **BANDAS DE LÜDERS**: líneas // a 45° y 135° que **marcan la fluencia**. Se ven si la probeta está pulida
- En las bandas hay def. plástica
- En el resto de la probeta sigue la def. elástica.

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_T}{S_1} = \frac{P \operatorname{sen} \alpha}{S_0 / \cos \alpha} = \frac{P}{S_0} \operatorname{sen} \alpha \\ &= \frac{P}{2S_0} \operatorname{sen} 2\alpha \\ &\quad \boxed{\begin{array}{l} \alpha = 45^\circ \\ \alpha = 135^\circ \end{array}} \end{aligned}$$

Deformación homogénea

- Especie de endurecimiento mecánico en donde se limita la capacidad de deformación, adquiriendo capacidad de carga debido al fenómeno de **ACRITUD**
- Se deforma → se crean **nuevas dislocaciones**
- Nuevas dislocaciones → **interactúan** con las que ya habían → dificulta el movimiento
- Se dificulta mov de dislocaciones → **Pierde cap de deformación**
→ **Adquiere cap. de Carga** → "endurecimiento mecánico"

Estricción

- Luego de P_{max} → comienza a disminuir S_f
- Aparecen tensiones que se oponen a la disminución de S_f
- Complejo estado de tensiones **ESTADO TRIAXIAL DE TENSIONES**
- Se pasa de un estado uniaxial a un ↑
- Luego S_f se achira hasta romper
- Rápida disminución de sección, admite menos carga.

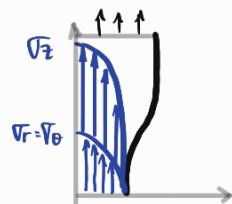
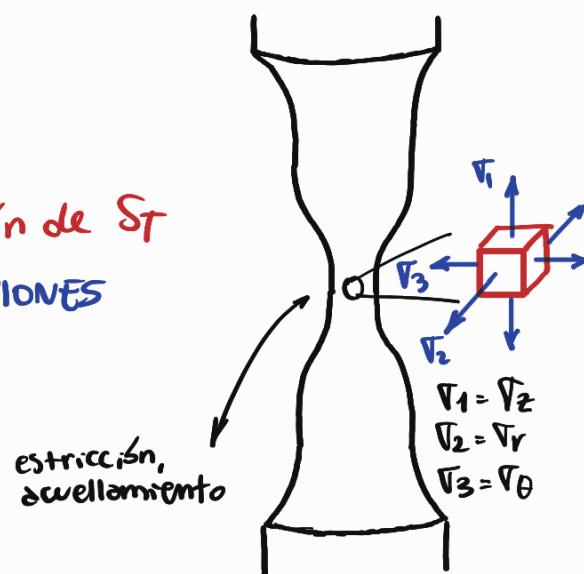
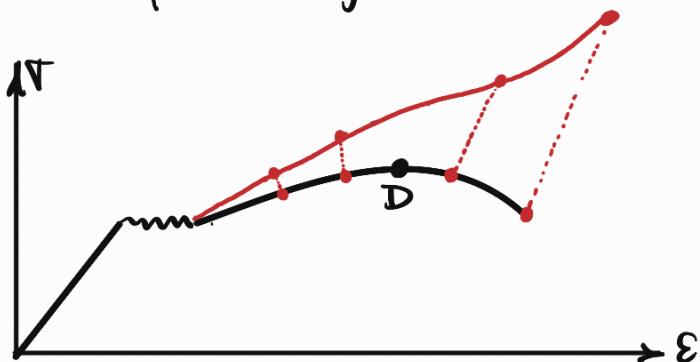


Diagrama convencional vs. real

La rotura en el diag. convencional se produce para una $\sigma < \sigma_{\text{máx}}$ porque se mide respecto a σ_0 y no a $\sigma_{\text{instantánea}}$



Usamos el convencional x su facilidad y xf en ingeniería en gal trabajamos hasta la zona elástica

El problema es la disminución de "d" y por ende de "S"

Desde el lím final de fluencia

Deducimos ecuaciones pl relazadas convencional-real HASTA LA CARGA MÁX(D) ya que no interviene el diámetro "d", muy importante en estricción.

$$\text{Def. real: } \epsilon_{\text{real}} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} + \dots + \frac{l_n - l_{n-1}}{l_{n-1}} = \sum \frac{\Delta l_i}{l_i \text{ final}} \rightarrow \frac{\ln}{\text{el lím:}} \quad d\epsilon_r = \frac{dl}{L}$$

$$(\text{Integro: } \epsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{L} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \rightarrow \epsilon_{\text{real}} = \ln(\epsilon+1) \quad (\text{hasta } \sigma_{\text{máx convencional}})$$

$$\text{Como } \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \rightarrow \frac{l}{l_0} = \underset{\text{convencional}}{\epsilon + 1}$$

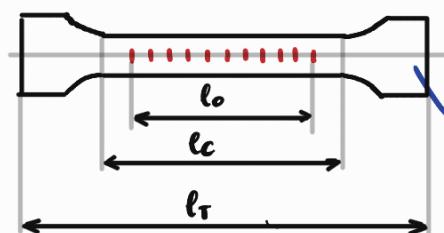
$$\sigma_{\text{real}} = \frac{P}{S} \quad \text{Suponemos que el } V = \alpha E \quad \text{Solo } l_0 = S \cdot l \rightarrow S = \frac{S_0 \cdot l_0}{l}$$

$$\sigma_{\text{real}} = \frac{P}{S_0} \frac{\frac{l}{l_0}}{\frac{l_0}{l_0}} \overset{\epsilon+1}{\Rightarrow} \sigma_{\text{real}} = \sigma(\epsilon+1)$$

$\sigma_{\text{conv}} = \sigma$

$$\frac{\sigma_{\text{rotura}}}{\sigma_{\text{rotura}}} = \frac{\text{Protura}}{\text{Srotura}}$$

Probetas para tracción



- industriales:
 - sin normalizar, barras/perfiles
 - verificación
 - se toma una sección promedio
- calibradas:
 - normalizadas
 - permiten obtener prop. mecánicas y ctes elásticas

extremos ensanchados: sujeción + asegurar rotura en zona de S_{cte}

NORMA IRAM LAS U500-102

Algunas tienen roscas para sujeción, en nuestro lab. no.

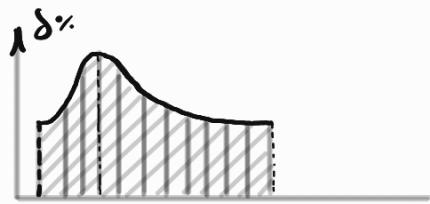
l_T : toda la probeta

l_c : zona de S_{cte}

l_0 : generalmente 100 mm entre 11 marcas delimitando 10 div de 10mm c/u

→ con un punto
marcas suaves para no provocar gran concentración de tensiones y si el mat. es susceptible a entallos, se marcan con tiza

• Tanto entallos, orificios o cambios bruscos de sección concentran tensiones.



no me salió en el $\frac{1}{3}$ medio pero ponete !!

Para normalizar se usa la Ley de Semejanza

- 2 probetas ≠ dimensiones, = material, se
- 1) Supone que sus E serán iguales.
- 2) Supone f' rompe dentro del tercio medio

La variación Δl_{total} es igual a Δl de restricción + Δl del resto de zonas

$$\Delta l_t = \Delta l_e + \Delta l_m \rightarrow \text{directamente prop. a } l_0$$

↓ directamente prop a $d_0 \rightarrow \propto$ la raíz de S_0

$$\text{Luego: } \Delta l_t = K_1 \cdot \sqrt{S_0} + K_2 l_0$$

$$\text{Divido por } l_0 \rightarrow E = K_1 \sqrt{\frac{S_0}{l_0}} + K_2$$

$$\text{Como supusimos } E_1 = E_2 \rightarrow K_1 \sqrt{\frac{S_{01}}{l_{01}}} + K_2 = K_1 \sqrt{\frac{S_{02}}{l_{02}}} + K_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{S_{01}}}{l_{01}} = \frac{\sqrt{S_{02}}}{l_{02}} \Rightarrow \frac{\sqrt{S_0}}{l_0} = \text{cte} \\ \text{DIN, IRAM: } \begin{cases} l_0 = 5,6 \sqrt{S_0} & \text{prob. cortas} \\ l_0 = 11,3 \sqrt{S_0} & \text{prob. largas} \end{cases} \end{array} \right\}$$

Modo y tiempo de aplicación de las cargas

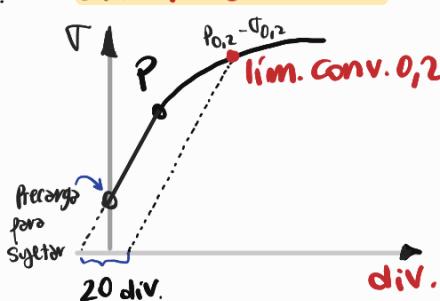
- Uniformemente distribuidas sobre la sección transversal del material
- La carga se incrementa muy lentamente (ensayo estático)
 $\sim 0,1 \frac{\text{kgt}}{\text{mm}^2 \text{s}}$ en Z.E y hasta $50 \frac{\text{kf}}{\text{mm}^2 \text{min}}$ en Z.P

{ • Incremento de velocidad \rightarrow retraso en aparición de def. plásticas
• Vel. muy bajas \rightarrow disminución del lím. de fluencia
Respetar los lím. normalizados de velocidad

Determinaciones del ensayo

Prop. mecánicas.

Límite elástico



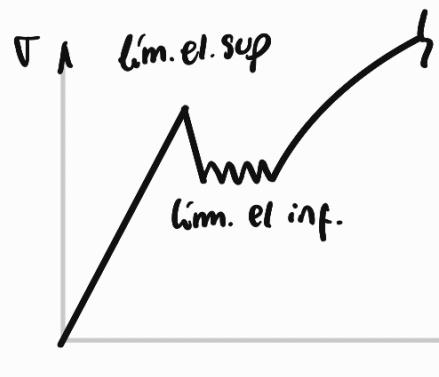
- Transición elastoplástica sin fluencia

- Puede ser donde se desvía la linealidad (P)
- Si f no se puede det. precisamente, se traza \parallel a la zona prop. una linea para una def. del 0,2%
($\varepsilon = 0,002$)

0,2% de una prob. de 100 mm \rightarrow 0,2 mm = 20 div. del extensómetro

Para un extensómetro con apreciación 0,01 mm/div

⚠ Si la región elástica no es lineal \rightarrow se usa el 0,5% (50 div.)



- Transición elastoplástica bien definida
- Promedio de las T asociadas al lím. inferior, ya que es más preciso que el superior, fue esto afectado por efectos de inercia

Tensión de fluencia

$$T_f = \frac{P_f}{\delta_0} \quad \text{promedio entre máx y min}$$

Resistencia estática a la tracción

$$T_{ET} = \frac{P_{max}}{\delta_0} \quad \text{la leemos en la aguja de máxima}$$

$P_{max} \rightarrow$ la que va a estar sometido el material por unidad de sup.

→ indican la ductilidad

Prop. de deformabilidad

Alargamiento de rotura

$$\delta \% = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100$$

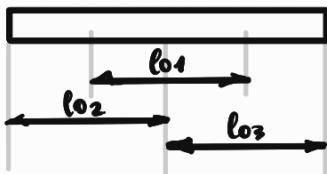
Para medir l_{final} :

1) Si la probeta rompe dentro del tercio medio:

juntamos los trozos y medimos entre marcas

2) Si rompe fuera del tercio medio:

En prob. industriales: Se miden 3 l_0 antes del ensayo para f' en caso de romper fuera del tercio medio, se refiere a otra l_0 en la que sí esté dentro.

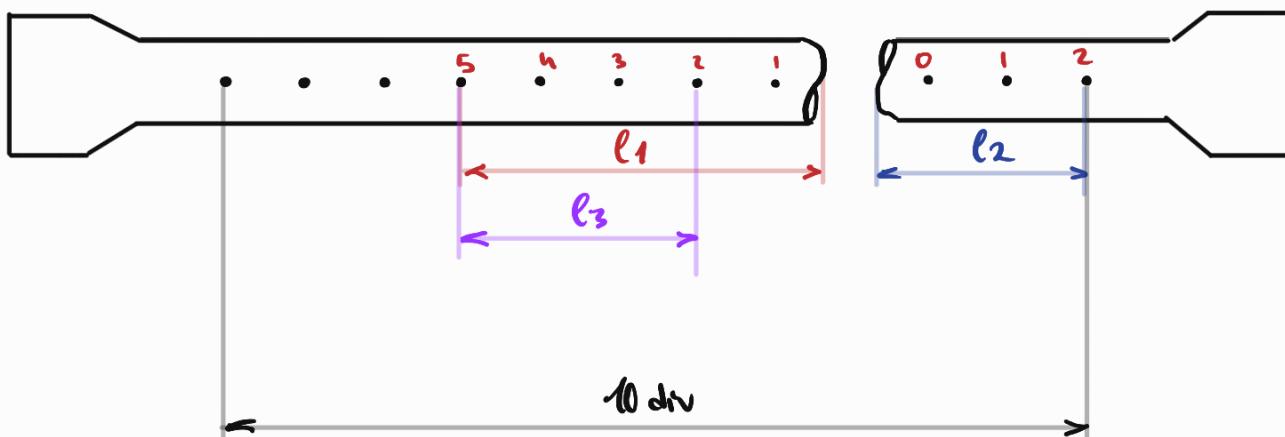


En prob. calibrados, como tiene extremos ensanchados, l_0 anterior no se puede.

Entonces:

Producida la fractura, se adosa con cero a la 1º div. del trozo más corto
Si la probeta tiene 10 div., se cuentan 5 en el lado más largo (l_1)
en el corto medimos las que hayan (l_2) en este caso 2.

los 3 f' faltan para 10 div., los medimos desde la que llamamos 5 desde
la fractura en el lado largo



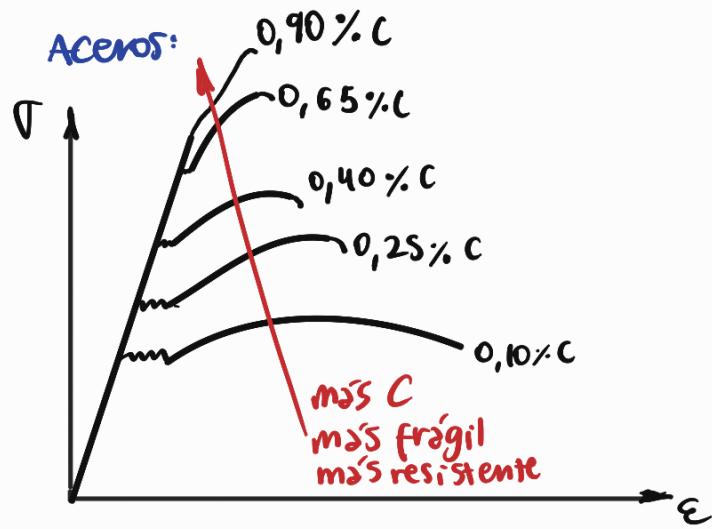
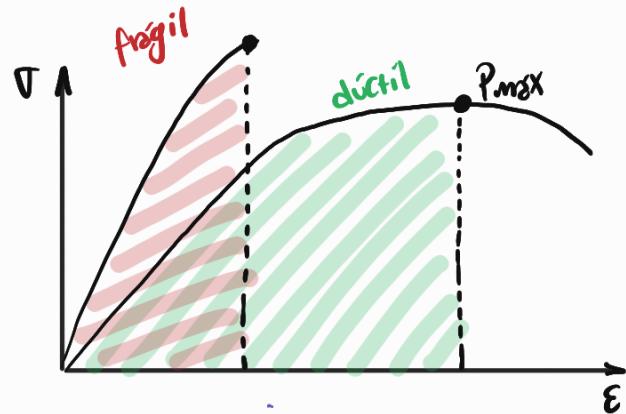
$$l_f = l_1 + l_2 + l_3$$

δ frágiles: $\delta\%$ menor al 5%

Coefficiente de estricción

$$\Psi \% = \frac{\delta_0 - \delta}{\delta_0} \cdot 100$$

Diagrama dúctil vs. frágil



Frágil:

- Caso sin fluencia
- más rígido (mayor E)
- menor cap. de def. plástica
- Caso sin estricción
- más resistente (alta σ_{UT})
- frágil por su baja tenacidad

Dúctil:

- más área bajo la curva
- más tensión
- mayor def. plástica
- Sí hay estricción
- en general menos resistente
- dúctil x su alta tenacidad

Para los aceros, aumentar el %C

↗ Aumenta dureza + resist. mecánica
↘ Sacrifica capacidad de def.

Fractura por tracción

- forma de fractura depende de:

mat frágil o dúctil

estructura

FCC: más planos de desliz.

BCC: pocos planos de desliz.

HCP: solo los planos basales

Aceros muy resistentes:

- Rompen en secciones transversales
- Aspecto sedoso y rebabas periféricas

Aceros resistentes y tenaces:

- ranuras radiales
- pequeñas rebabas

Aceros poco resistentes:

- Núcleo granular brillante
- Borde $\approx 45^\circ$, fibroso y opaco

No ferrosos:

- Diversas formas, incluso en planos oblicuos entre 45° a 55°

Hay muchos casos intermedios entre fractura dúctil y frágil "espectro"

Fractura dúctil



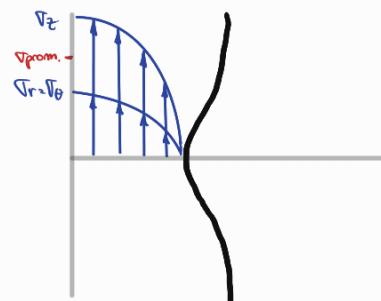
! Deslizamiento, T

1) Estrictión inicial:
• La T más grande del est. triaxial es la longitudinal T_z
• La rotura es del centro hacia afuera

2) Pequeñas cavidades

3) Se unen al aumentar T \rightarrow grieta

4) Propagación de grieta



5) Rotura final:
• Bordes $\approx 45^\circ$ y 135° debido al deslizamiento, ya q'
x cristallamiento
los cristales se orientaron a orientar con esos ángulos, en
dirección de máx. T. y es más sencillo romper en esa dir.

Forma final: copa y cono:



Núcleo: granular brillante

Bordes: $\approx 45^\circ$, fibroso y opaco

Avancamiento

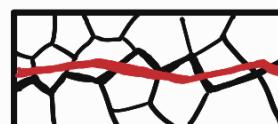
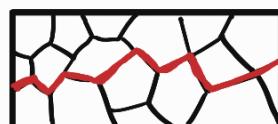
↓

Fractura frágil por resistencia al deslizamiento.

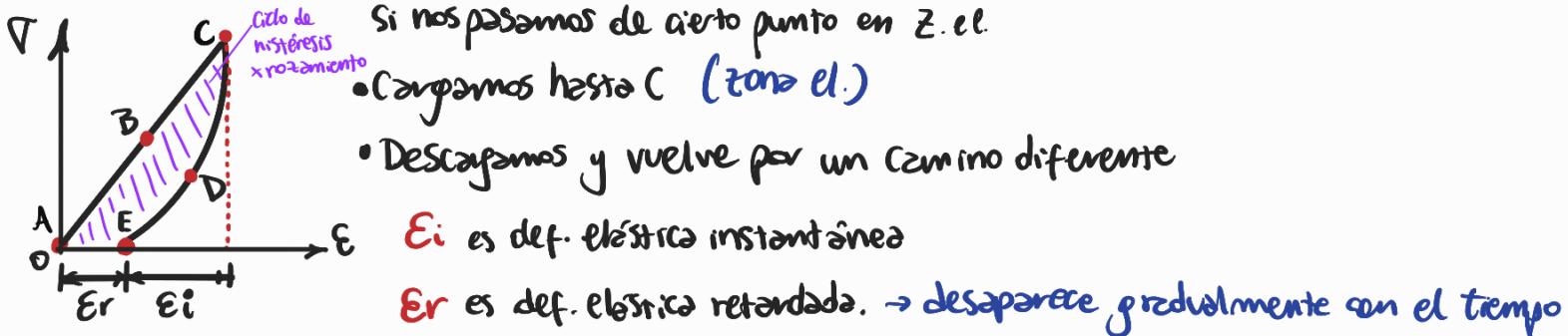
- Aplico carga → • Movimiento de dislocaciones (poco, pero hay def. plástica) ↓ se acumulan sobre los planos de deslizamiento y en los obstáculos que las trapan.
- Se acumula el esf. de corte en esos lugares.
- Se generan micro fisuras ↓
- Rompen abruptamente por acumulación de energía de la def. elástica.

Ruptura típica: Por borde de grano

tampoco también puede ser intergranular
(por imperfecciones)



Elasticidad y plasticidad



Así, la def. el. total $E_{el} = E_i + E_r \rightarrow$ Anelasticidad

Definimos elásticamente un cuerpo en función de σ y tiempo

• Def. elástica: desaparece completamente independientemente del tiempo

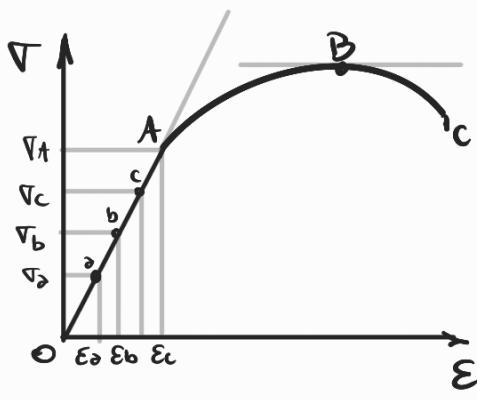
En gen siempre hay E_r aunque sea despreciable

↓
excepto cuarzo, ya que sufre oscilaciones de muy alta frecuencia, con def. pequeñas y sólo E_i

Histeresis: razones:

- estructura poco compacta
- imperfecciones cristalinas

Elasticidad

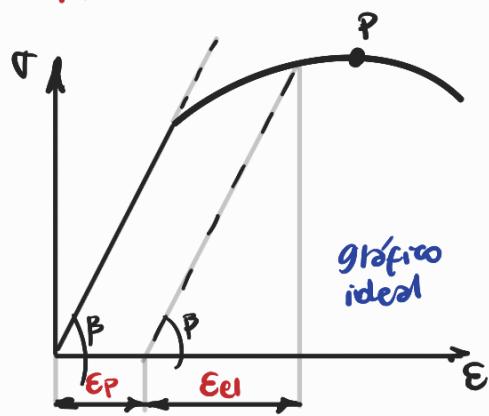


módulo elástico o de Young $\rightarrow \Gamma = E$
HOOKE

$$\overline{OA}: \text{Cumple } \frac{\Gamma_A}{\epsilon_A} = \frac{\Gamma_B}{\epsilon_B} = \frac{\Gamma_C}{\epsilon_C} = E \Rightarrow \frac{\Gamma_A}{\epsilon_A} = \text{cte}$$

Si suprimimos carga en OA vuelve a su estado inicial \Rightarrow luego de cargarlo pasa a un estado energético inestable \rightarrow átomos vuelven al estado de menor e° libre (siempre que no se supere carga límite)

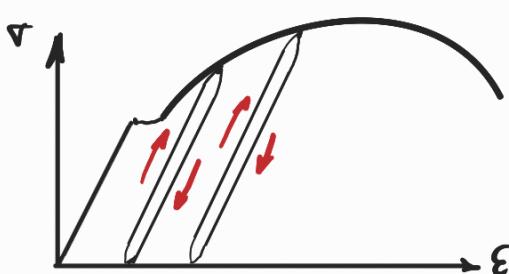
Plasticidad



- Cargamos hasta la Z.P en un punto anterior a P
- Descargamos y vuelve paralelo a la recta de Hooke
- Queda una def. el. y otra plast. $E = E_{el} + E_p$
- En la Ep. se rompen enlaces y se forman nuevos por desp. de átomos.
- Se distorsiona el retículo cristalográfico

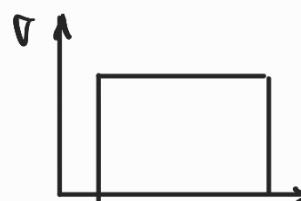
• Se trapan los planos de deslizamiento \rightarrow def. permanente

• Realidad:



- Camino descarga \neq Camino de carga
- Descarga: Siempre tiene un tramo recto paralelo a la recta prop. \rightarrow mejor para determinar E

Anelasticidad

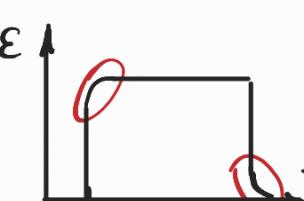


• Componente de la elasticidad "retardada"

• La E_{el} continúa aumentando luego de aplicada la carga

• Al retirar carga se requiere tiempo p/ la recuperación

• Dependencia del tiempo de los mecanismos microscópicos



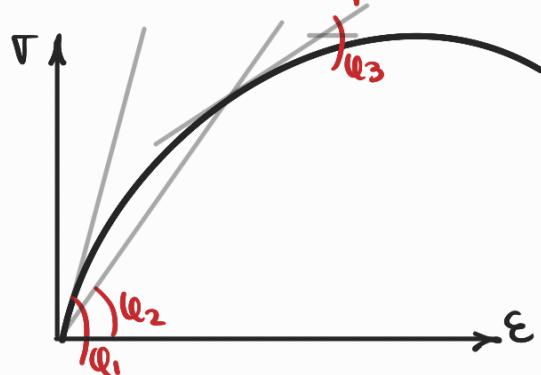
Metales: anelast. despreciable

Polímeros: anelast. importante

Determinación de E

Si hay Z.E. marcada, es la pendiente de la zona recta

Si no hay zona proporcional:



E_1 : módulo elást. inicial.

- pendiente de la tang. al origen $E_1 = \tan(\alpha_1)$

E_2 : mód. elást. secante

- pendiente de la recta que une el origen con un punto A arbitrario (dificultad) $E_2 = \tan(\alpha_2)$

E_3 : mód. elást. tang.: • tangente a la curva en A $E_3 = \tan(\alpha_3)$

Se verifica $E_1 > E_2 > E_3$

Lo más fiel en este caso es la recta de descarga

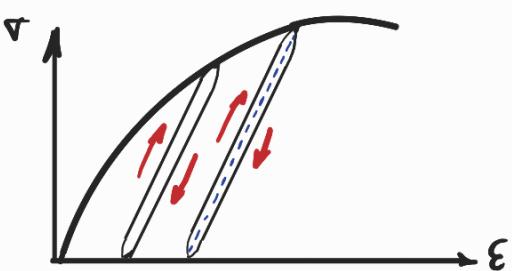
- Para cierta τ cargo y descarga

• Repito cíclicamente → endurecimiento por fatiga

se angosta el ciclo de histéresis → Recta

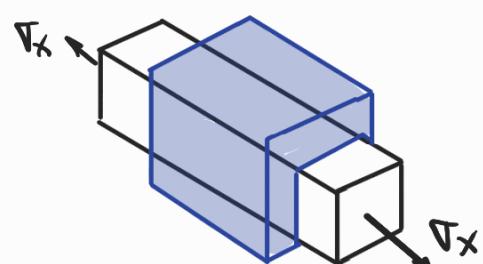
La pendiente de la recta es $E_{dinámico} = E_d$

Se verifica $E_d = E_0$



Coeficiente de Poisson

Al traccionar un material, se produce ϵ_x en la dir de la carga



En estricción aparecen ϵ_y , ϵ_z (contracc. lateral)

$$\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$

Se define el coef. de Poisson $\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$

$$\text{Luego: } \epsilon_x = \frac{T_x}{E}$$

$$\epsilon_y = -\nu \frac{T_x}{E}$$

$$\epsilon_z = -\nu \frac{T_x}{E}$$

las 3 ϵ en función de T_x

contracción

en sólidos isotrópicos aprox. $\frac{1}{4}$

ENSAYO DE COMPRESIÓN

Fuerza axial sobre el eje longitudinal, contiene a tracción de modo de provocar el acortamiento longitudinal y ensanchamiento transversal.

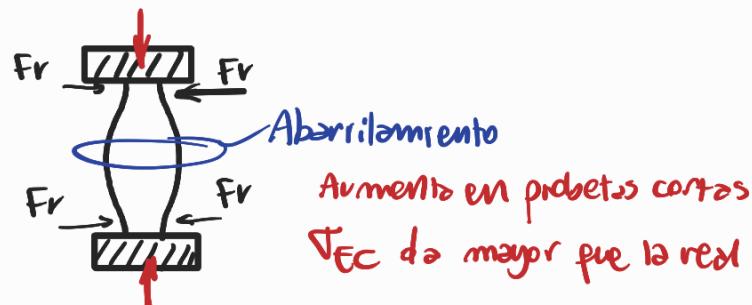
Su aplicación es para materiales que estarán sometidos a compresión como hierro estructural (columnas), mat. frágiles q' no resisten a la tracción o materiales f' se deforman plásticamente (malleables)

Pruebas para ensayo de compresión

A tener en cuenta

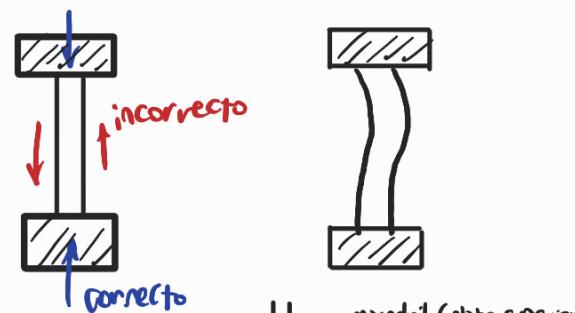
1) Rozamiento: entre extremos y platos

↓
la probeta no se ensancha en la zona en contacto con los platos

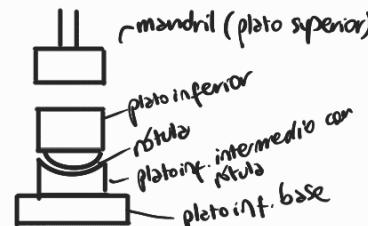


2º) Pandeo: por falta de axialidad, se produce un momento q' se padea.

(TEC menor a la real) Afecta más a las cortas



3º) falta de paralelismo de caras → Solución: Rótula



Norma ASTM E-9

$h = 0,9 \geq 2 \phi$ cortas TEC (no sufren pandeo)

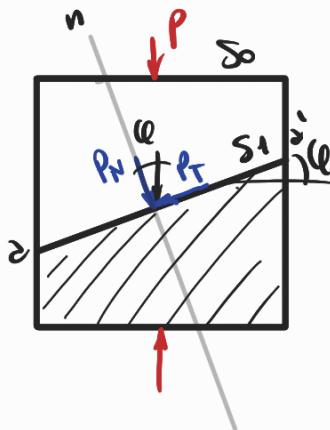
$h = 3\phi$ medianas uso general

$h = 8 \geq 10 \phi$ largas E

Fractura

los malleables no se fracturan

Demostraremos fracturas pl/ mat. frágiles:

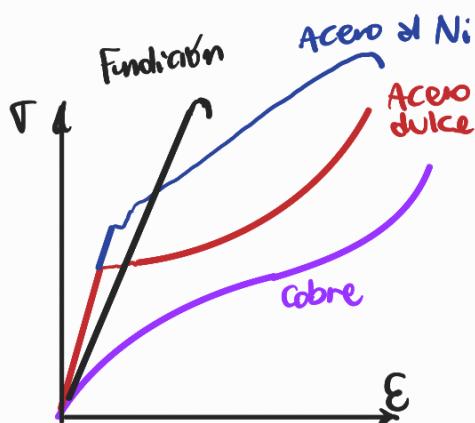


$$\sigma_r = \frac{P_r}{S_0} = \frac{P \sin \phi}{S_0 / \cos \phi} = \frac{P}{S_0} \sin \phi \cos \phi = \sigma_c \cdot \frac{\sin 2\phi}{2}$$

Su módulo es más para $\rightarrow 45^\circ$ Teórico: rompe a 45°
En la realidad rompe entre 50 y 60° debido a que hay rozamiento y esf. de corte

Ensayo y diagrama

- Medimos h y ϕ
- Seleccionamos el rayo de carga (debemos tener algo de idea)
Se recomienda colocar una pequeña precarga antes de poner en cero la máquina para que se acomode la rotula



También es un diag. convencional.

Determinaciones

$$\sigma_{EC} = \frac{P_{max}}{S_0} \quad \left\{ \text{solo pl. mat. frágiles que rompen en el ensayo} \right.$$

$$\sigma_{LP} = \frac{P_f}{S_0} \quad \left\{ \text{único valor } f' \text{ puede obtener en los maleables} \right.$$

Tensión al lím. de aplastamiento

$$\sigma_f = \frac{P_f}{S_0} \quad \left\{ \text{equivalente a fuerza, se observa en maleables. En otros no aparece}$$

$$\text{Acartamiento de rotura} \quad \delta \% = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100$$

Ensanchamiento transversal

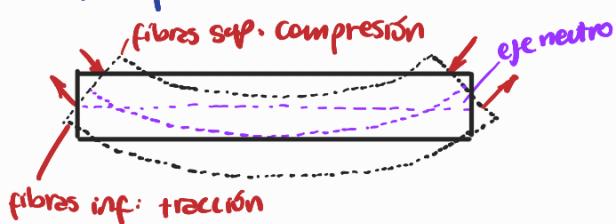
$$P \% = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100$$

Módulo elástico E } en el periodo prof. Deberá coincidir con el de tracción

ENSAYO DE FLEXIÓN

fundamental: determinar TEF (fórmula de Navier)
tmb. se puede det E con algún error

Carga perpendicular al eje longitudinal aplicada sobre el eje de simetría para evitar flexotorsión



Mat. homogéneos: (como aceros): experimentalmente su eje neutro está en la mitad de la ST

Mat. heterogéneos: (compuestos, maderas): el eje neutro se encuentra en la zona de mayor resistencia

IMPORTANTE: Dibujar apoyos así:

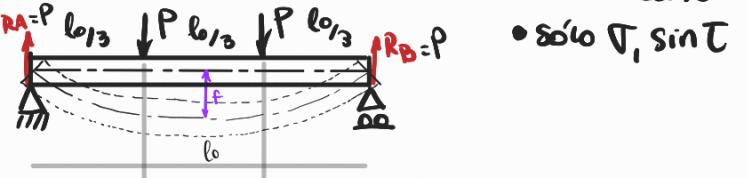


VIGA SIMPLEMENTE APYADA

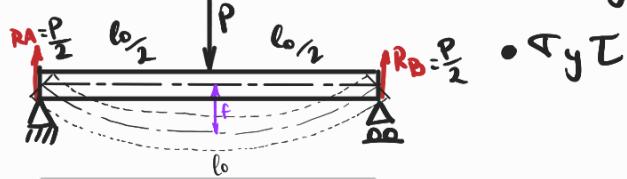
Hay 2 tipos de flexión: pura y práctica

!le distancia desde la posición original del eje neutro a las sucesivas pos. q' va tomando al flexionarse se denomina flecha f

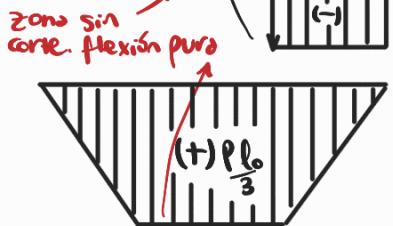
Flexión pura • más exacto, sin influencia del corte



Flexión práctica suficiente a fines ingenieriles



corte recto y > f' no hay cargas distribuidas.



Existen máquinas de flexión pura

$$f = \frac{23 P l_0^3}{648 E J_x}$$

$$f = \frac{l \cdot P \cdot l_0^3}{48 E J_x}$$

Máquina universal de ensayos

y> que normalmente hay corte → Se busca evitarlo

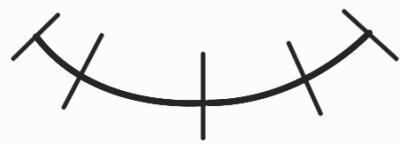
→ se busca disminuir su influencia

Regla general: → vigas cortas → predomina el corte

→ vigas largas → predomina la flexión → probeta larga: $l_0 \geq 10 h$

Teoría de flexión

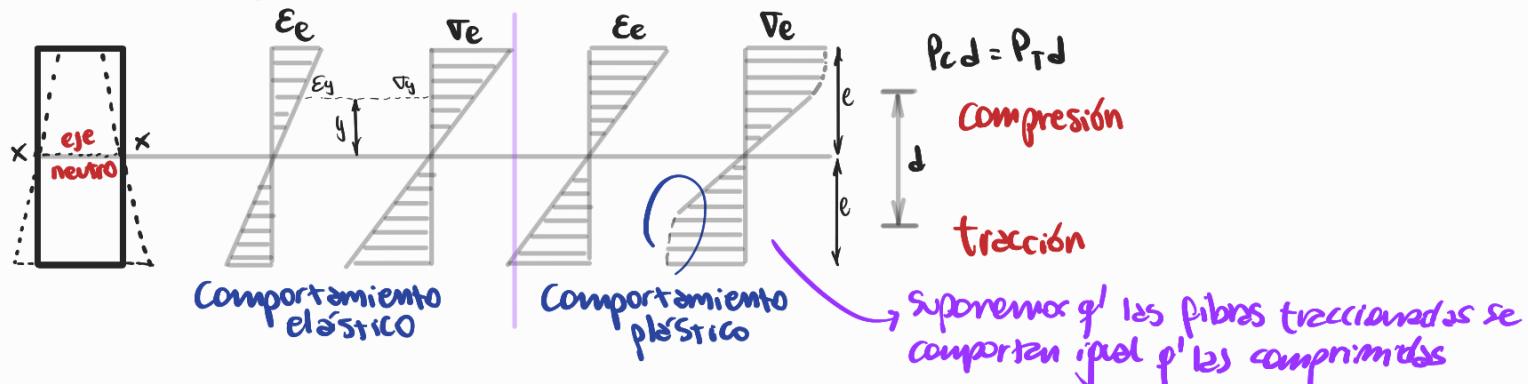
Usamos teoría de flexión válida para el caso elástico



- las ST se mantienen planas
- rotan respecto de los adyacentes alrededor del eje neutro

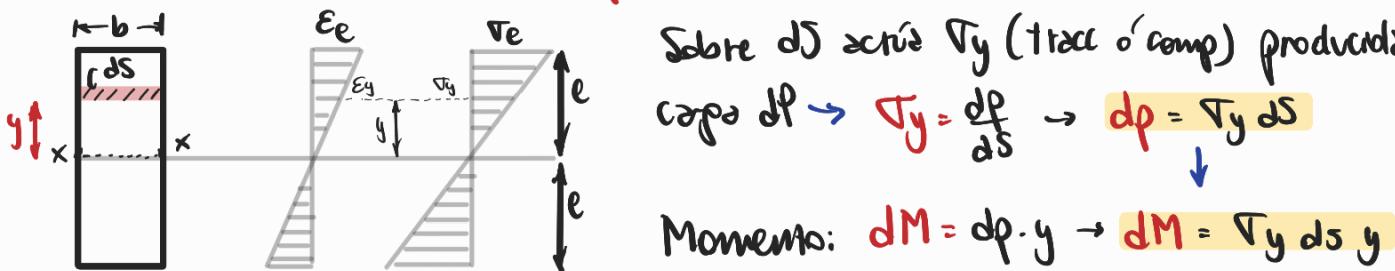
Sirve a fines prácticos.

Esfuerzos y deformación en una sección



- Condiciones de equilibrio:
- $P_T - P_c = 0$ F. longitudinales
 - $R_A - P + R_B = 0$ F. verticales
 - $R_A \cdot x - P_T d = 0$ Momentos ($M_{int} = M_{ext}$)

Demonstración Resistencia a la flexión Pla de Navier



$$\text{Semejanza de triángulos: } \frac{\sigma_y}{y} = \frac{\sigma_e}{e} \rightarrow \sigma_y = \frac{\sigma_e}{e} y \rightarrow dM = \frac{\sigma_e}{e} y^2 ds$$

$$\text{Integro: } M_{int} = \int_{-e}^e \frac{\sigma_e}{e} y^2 ds = \frac{\sigma_e}{e} \int_{-e}^e y^2 ds = M_{int} = \frac{\sigma_e}{e} J_x$$

M. inercia respecto al eje x J_x

Debe ser igual al M flexionar (equilibrio)

$$MF = \frac{\sigma_e}{e} \cdot J_x$$

en la fibra externa:

$$\sigma_e = \frac{MF \cdot e}{J_x} \quad \left. \right\} \text{Asociando } \frac{J_x}{e} = W_x : \text{módulo resistente}$$

(1)

$$\begin{aligned} \rightarrow J_x &: r/\text{eje x} : \frac{bh^3}{12} \\ \rightarrow J_y &: r/\text{eje y} : \frac{b^3h}{12} \\ \rightarrow J_p &: \frac{bh}{12}(b^2+h^2) \quad \text{secc. } \square \\ &: \frac{\pi D^4}{32} \rightarrow J_x = \frac{J_p}{2} = \frac{\pi D^4}{64} \quad \text{secc. } \circ \end{aligned}$$

Fórmulo de Navier: $T_e = \frac{MF}{Wx}$ fibra exterior Resistencia a la flexión

Podemos usar (1) pl curvaf. fibra: $T_y = \frac{MF \cdot y}{Jx}$ se verifica cuando $y=0 \rightarrow T_y=0$
Tres max en $y=e$

Cálculo del Módulo de Young. E

Primero obtenemos la flecha f derivando ecuaciones de M. flector (estática)

flex. práctica $f = \frac{l \cdot P \cdot l_0^3}{48 E J_x}$ flex. puro $f = \frac{23 \cdot P \cdot l_0^3}{648 E J_x}$
 \downarrow l_0 : dist. entre apoyos
 l : longitud total

Despegando $E = \frac{l \cdot P_{\text{prom}} \cdot l_0^3}{48 f_{\text{prom}} J_x}$ Medimos no menos de 5 veces $\rightarrow f$ y P
 en periodo elástico } prom.

Carga: máf. universal

Flecha: flexímetro (comparador) sobre la viga, mecanismo de comparador

Probetas \rightarrow extraídas de la preza \rightarrow mecanizadas
 \hookrightarrow fundidas para el ensayo \hookrightarrow sin mecanizar diámetros de 22-30-50 mm

circulares o rectangulares

$l_0 \geq 12 \geq 15$ do (ASTM); 20 (DIN) circulares tiempos de rotura de

$l_0 \geq 12 \geq 15$ ho (ASTM); 20 (DIN) rectangulares 15-45 s

$\hookrightarrow P/P'$ implica menor Tcorte

! h no debe ser muy grande respecto de σ_w Si pl/evitar flexión lateral



! Existe algo llamado factor de flex. $\frac{T_{EF}}{T_{ET}} = 1,8 \sim 2,2$
 rigidez de flexión $\frac{T_{EF}}{f_{\text{max}}} = 6 \sim 9$

Determinaciones

Antes del ensayo

- Consultar IRAM 510
- Accesorios (mandril de flexión) y mspuña a escala
- Material entre mesa móvil y cabezal sup
- Tener dimensiones y anchuras de los probetas

Durante el ensayo

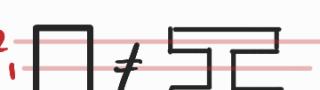
- 5 valores de $P_y f$ y los val. máximos
- arreglos de la fractura → **frágil**: rotura típica del frágil
ductil: especie de plegado

Después del ensayo:

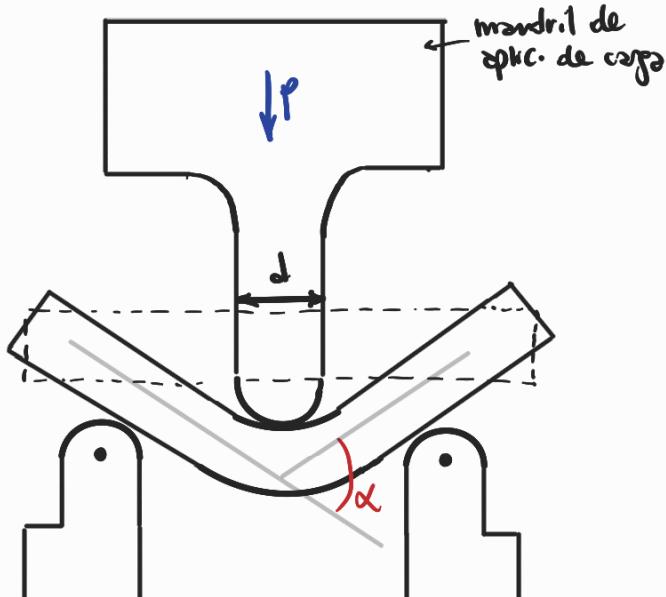
$$E = \frac{l P_{\text{prom}} b^3}{18 f_{\text{prom}} J_x} ; \quad TEF = \frac{M_{\text{max}}}{W_x} = \frac{\frac{P_{\text{max}} \cdot l_0}{\pi}}{\frac{\pi d_0^3}{32}} \approx 2,5465 \frac{P_{\text{max}} l_0}{d_0^3}$$

o W_p si es \odot

Deducciones

- $E_{\text{flexión}} < E_{\text{tracción}}$ debido a no tener en cuenta el T_{corte} en Z.E a fines prácticos se desprecia
- La deducción de la fta de Navier no tiene en cuenta la interacción de fibras entre sí, en las pl. cada fibra impide la libre def. de la adyacente, depende de la forma de la sección } 2, 
- No todos los mat. son frágiles y ntrz teoría sólo vale p/ rango elástico
- El rotamiento en los apoyos influye → Debe poder deslizarse libremente

ENSAYO DE PLEGADO



- Ensayo de recepción, verificación, cualitativo. Sólo mido las dimensiones de las fisuras en el caso q ocurran.

- Ensayo ESTÁTICO para determinar la TENACIDAD del material en su estado comercial o dsp de un recocido.

- Se usa en perfiles/chapas y p/ verificar la ductilidad de soldaduras.

- Caso particular del ensayo de Flexión ya q entra al rango plástico, determinando ductilidad para ser trabajado en frío sin fisuras/alteraciones Ej: armaduras de acero en estructuras de hormigón

Consiste en:

- Doblar una barra a un ángulo alfa X
- Ver si ocurre agrietamiento en la sup contraria a la aplicacion de P
- En ciertos casos se indica el alfa donde empieza el agrietamiento



Método

Probetas

-Se ensayarán probetas con la sección de su **forma comercial** si el diametro de la sección circular/polygonal regular con circulo inscripto no sobrepasan los 30mm

-Probetas rectangulares con **ancho (30-50mm)** con **aristas redondeadas** con un **radio del 10% del espesor**.

-**Longitud** depende de las condiciones del ensayo pero será **>250mm**

Espesor:

- Sin mecanizar/forjadas: 20mm
- Probetas de barra/perfil/chapa $\leq 30\text{mm}$ y si es mayor se reduce a eso, conservando una cara original que será la exterior

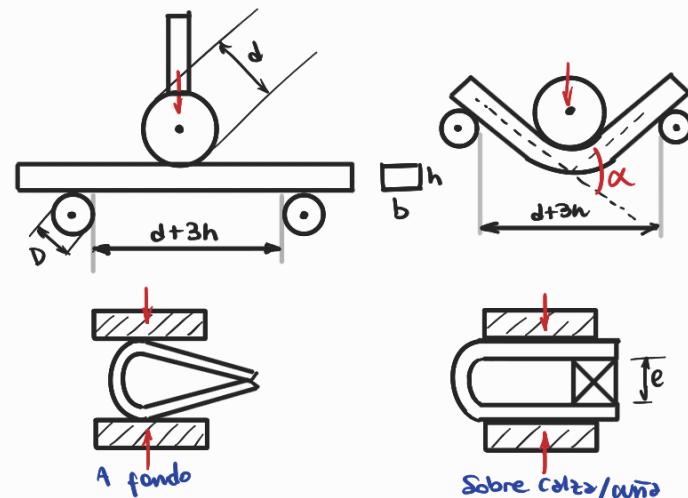
Ensayo

-Plegar la probeta hasta formar el **ángulo alfa** X

-Si $\alpha=180$ se puede:

- Plegar a fondo
- Plegar sobre calza o cuña a distanciaa "e"
- Para esto primero se pliega y luego se aplica compresión.

-La cara exterior debe ser **visible** durante el ensayo



La probeta debe poder girar libremente sobre los rodillos de apoyo y diametro D

La carga se aplica lenta y gradualmente con un mandril de diametro d hasta alcanzar el ángulo alfa

Existe otro método en el q se coloca un extremo en una morsa y se dobla el otro con una herramienta o a golpes con martillo hasta alcanzar alfa.

Aceros comunes: $d=2h$ o 2ϕ

Aceros especiales: $d=5h$ o 5ϕ

$D= 50\text{mm}$ si $h < 12\text{mm}$

$D= 100\text{m}$ si $h \geq 12\text{mm}$

Interpretación:

Se considera **positivo** si la plegada hasta alfa no presenta grietas visibles. Si aparec una grieta antes de alfa, se interrumpe y se considera **negativo**.

Máquinas

Modernamente se utiliza la máquina de Olsen

