

Universidad Nacional de Cuyo
Facultad de Ingeniería

Unidad N°3:

ENSAYO DE MATERIALES

Dra. Ana María Furlani



Plan de la Exposición

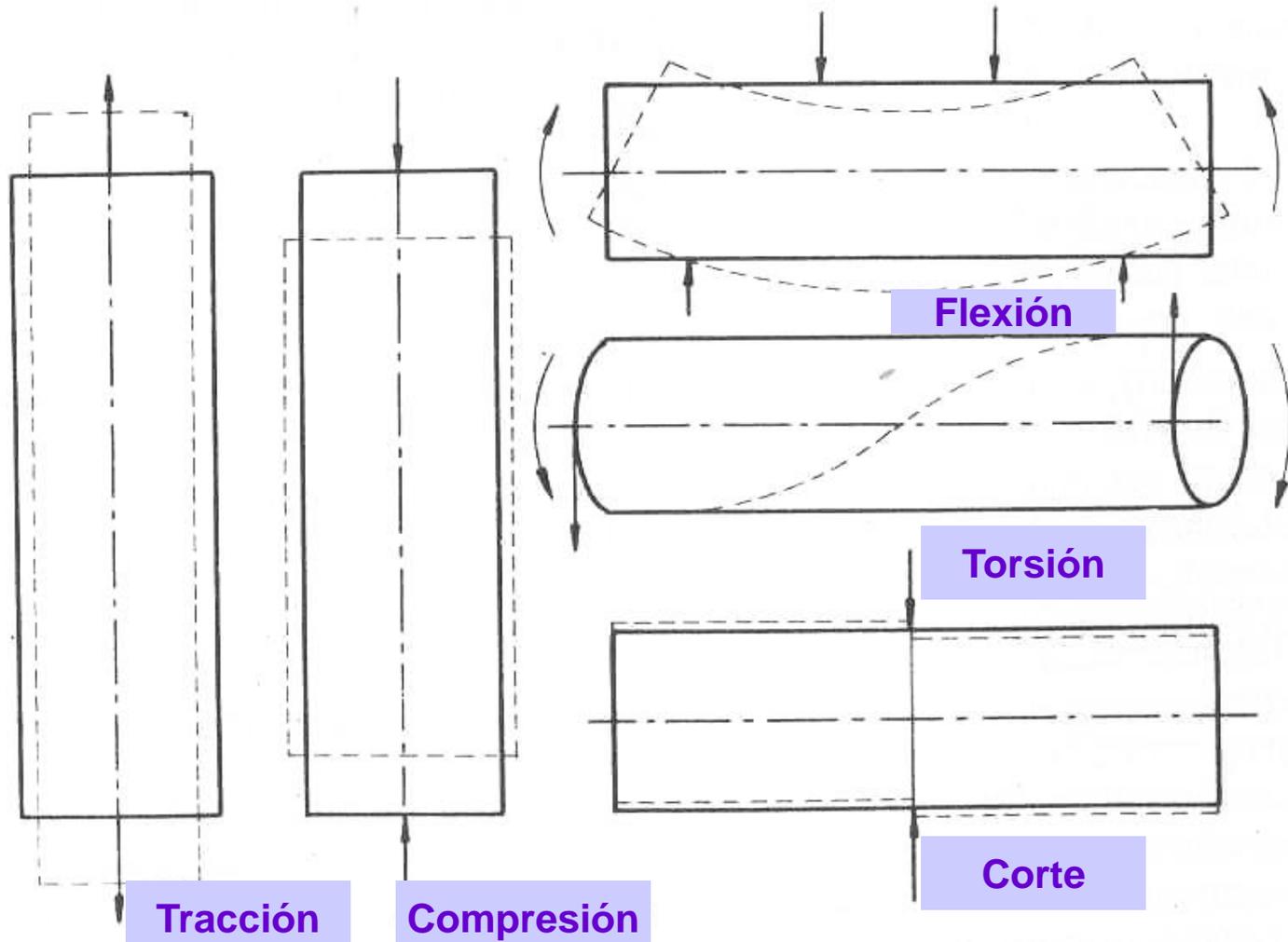
2.1. Propiedades Mecánicas

2.2. Ensayos Mecánicos

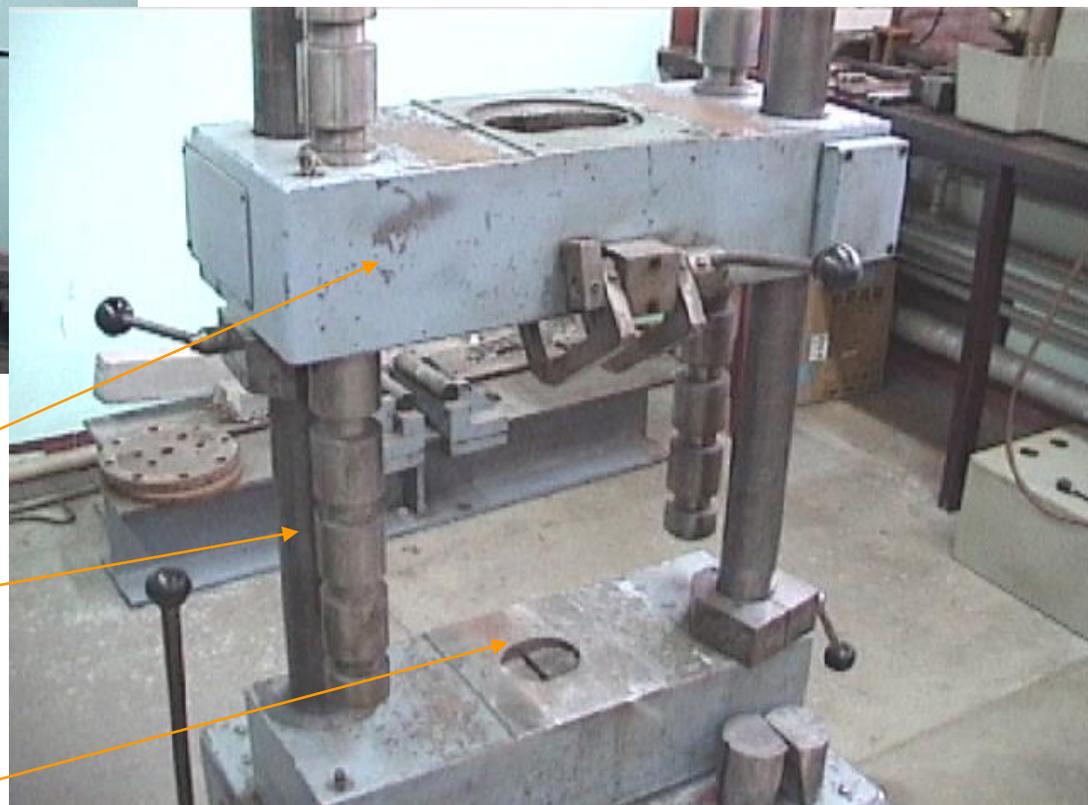
- Propiedades Mecánicas
- Ensayos Mecánicos
 - Ensayos Mecánicos
 - Ensayos No Destructivos (END)



Esfuerzos Simples



Máquina Universal de Ensayos



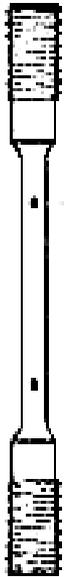
Mesa Móvil

Columna Fija

Cabezal Inferior



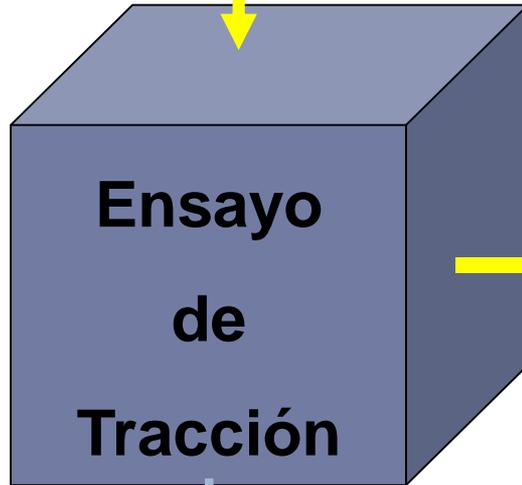
**Maquina
universal de
Ensayos**



Probeta



Normalizada



**Propiedades
Mecánicas**

- Elasticidad
- Plasticidad
- Ductilidad
- Tenacidad
- Fragilidad
- Rigidez

Modulo Elástico

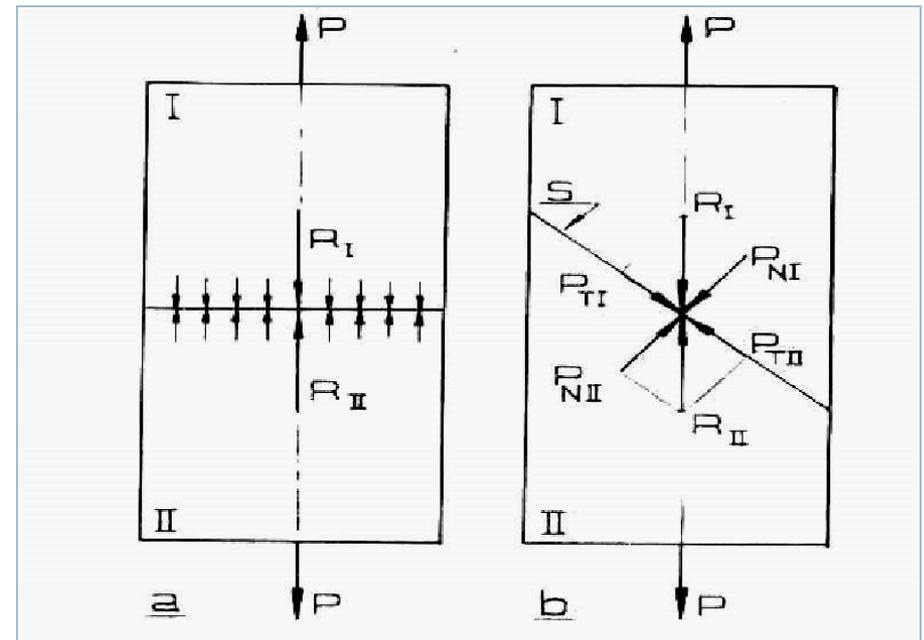
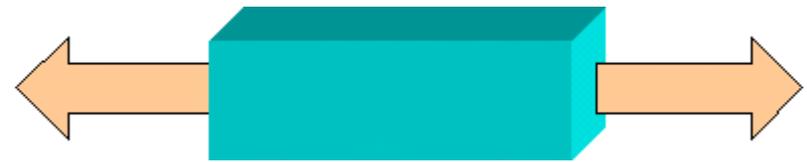
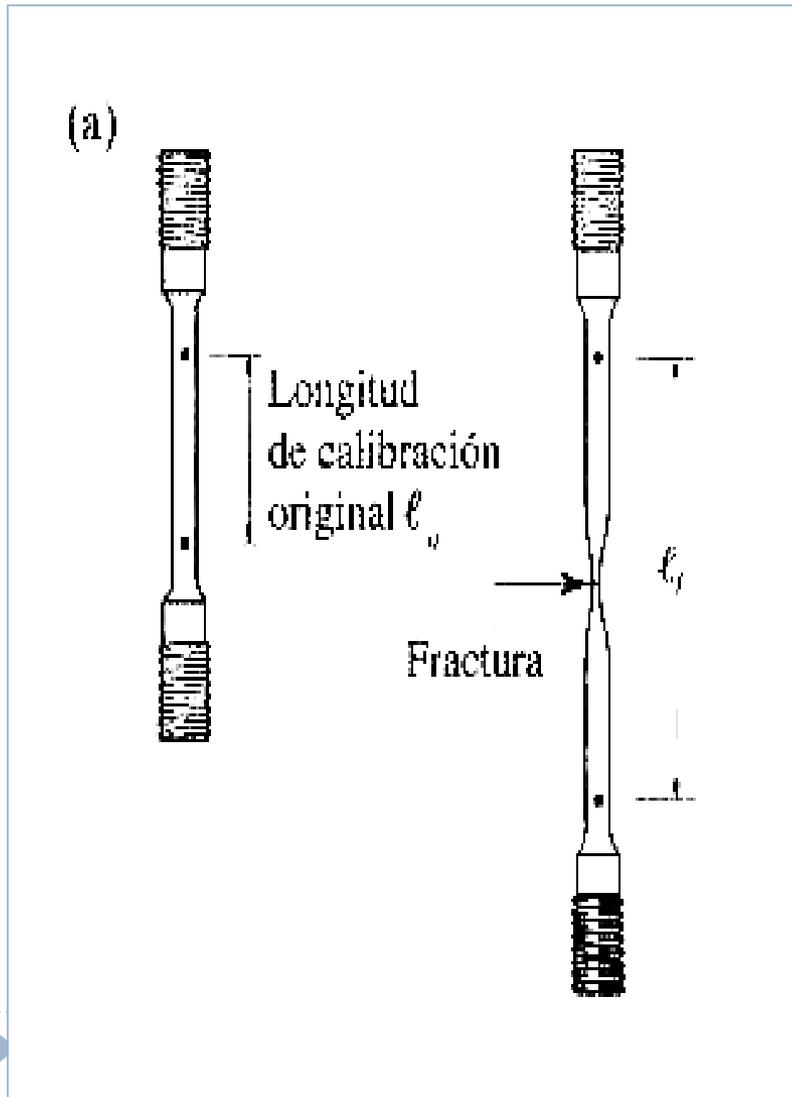
Tensión de Rotura

Tensión de Fluencia



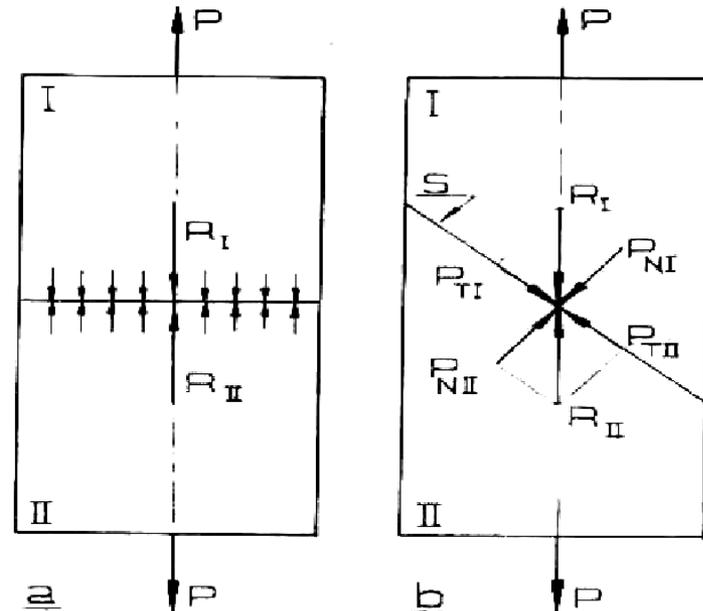
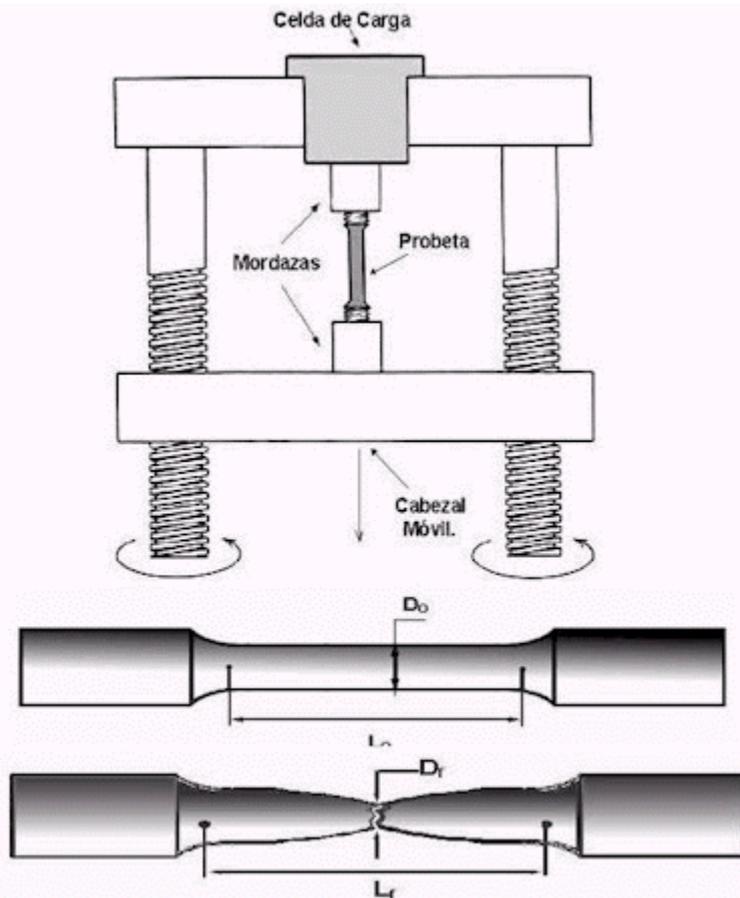
➤ Esfuerzos en Tracción Simple

- ✓ Utilizado para determinar propiedades mecánicas para diseño.

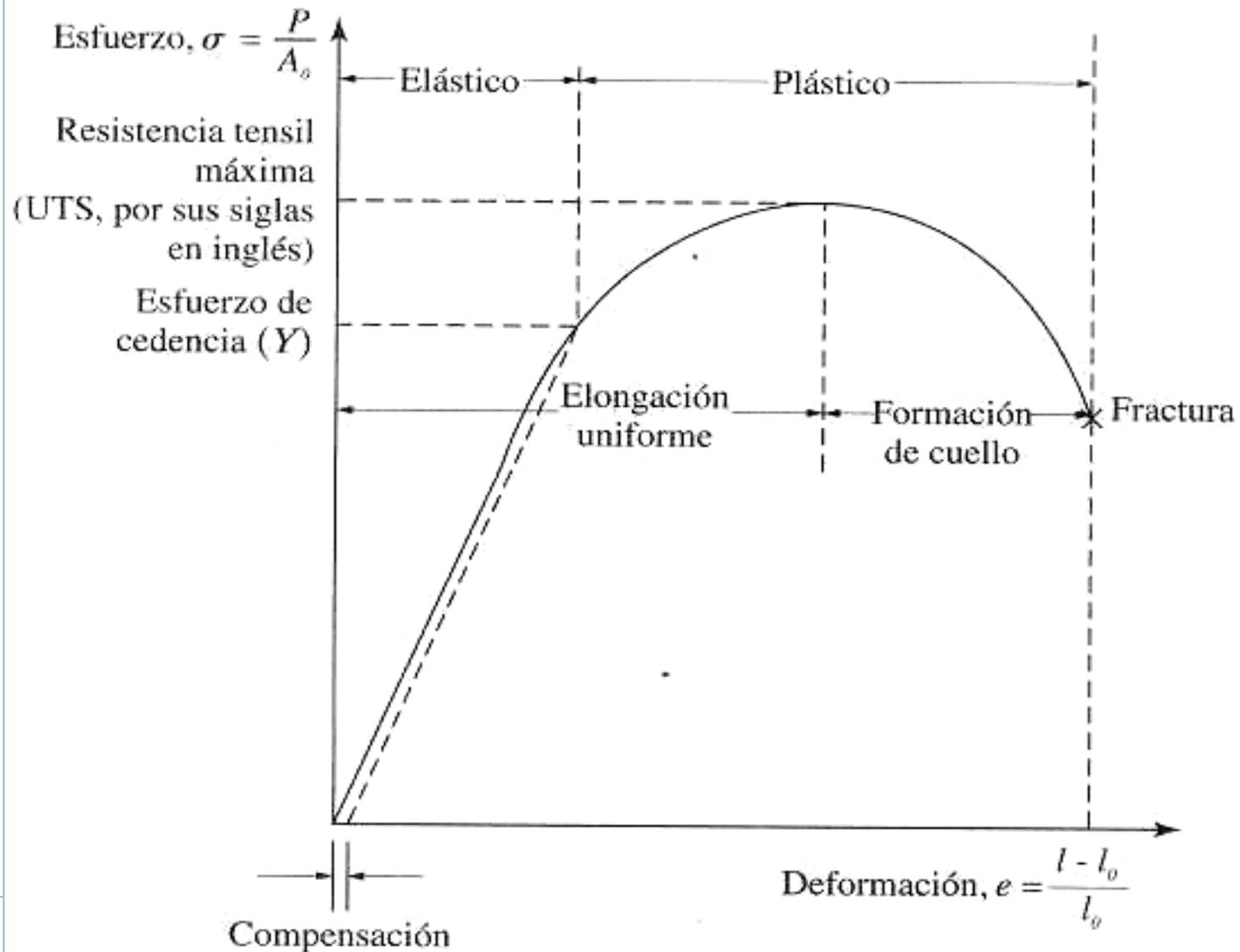


Esfuerzos en Tracción Simple

Utilizado para determinar propiedades mecánicas para diseño.



Curva Esfuerzo-Deformación Típica



► Esfuerzo Normal

$$\sigma = \frac{P}{S_0}$$

P = esfuerzo normal

S₀ = área transversal

σ = tensión normal

► Deformación convencional

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$

l₀ = longitud de referencia inicial

l = longitud final

► Módulo de Elasticidad longitudinal

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$



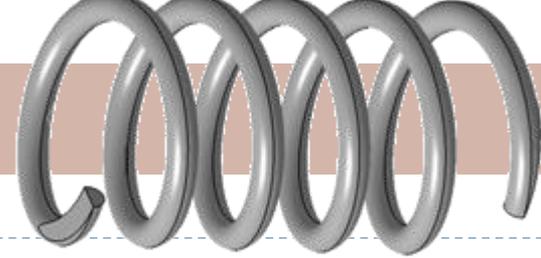
CÁLCULOS DE TRACCIÓN

- ▶ $\sigma_{ET} = P_{\text{máx}} / S_0$ Resistencia estática a la tracción
- ▶ $\sigma_{LE} = P_{LE} / S_0$ Tensión al límite elástico
- ▶ $\sigma_F = P_F / S_0$ Tensión de fluencia
- ▶ $\text{DELTA \%} = (\Delta l / l_0) \times 100$ Alargamiento de rotura
- ▶ Coeficiente de estricción

$$\Phi \% = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \times 100$$



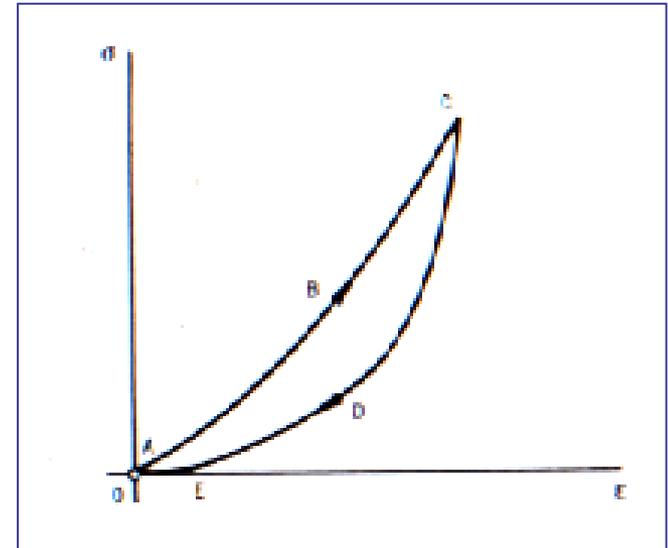
Elasticidad



Deformación Elástica:

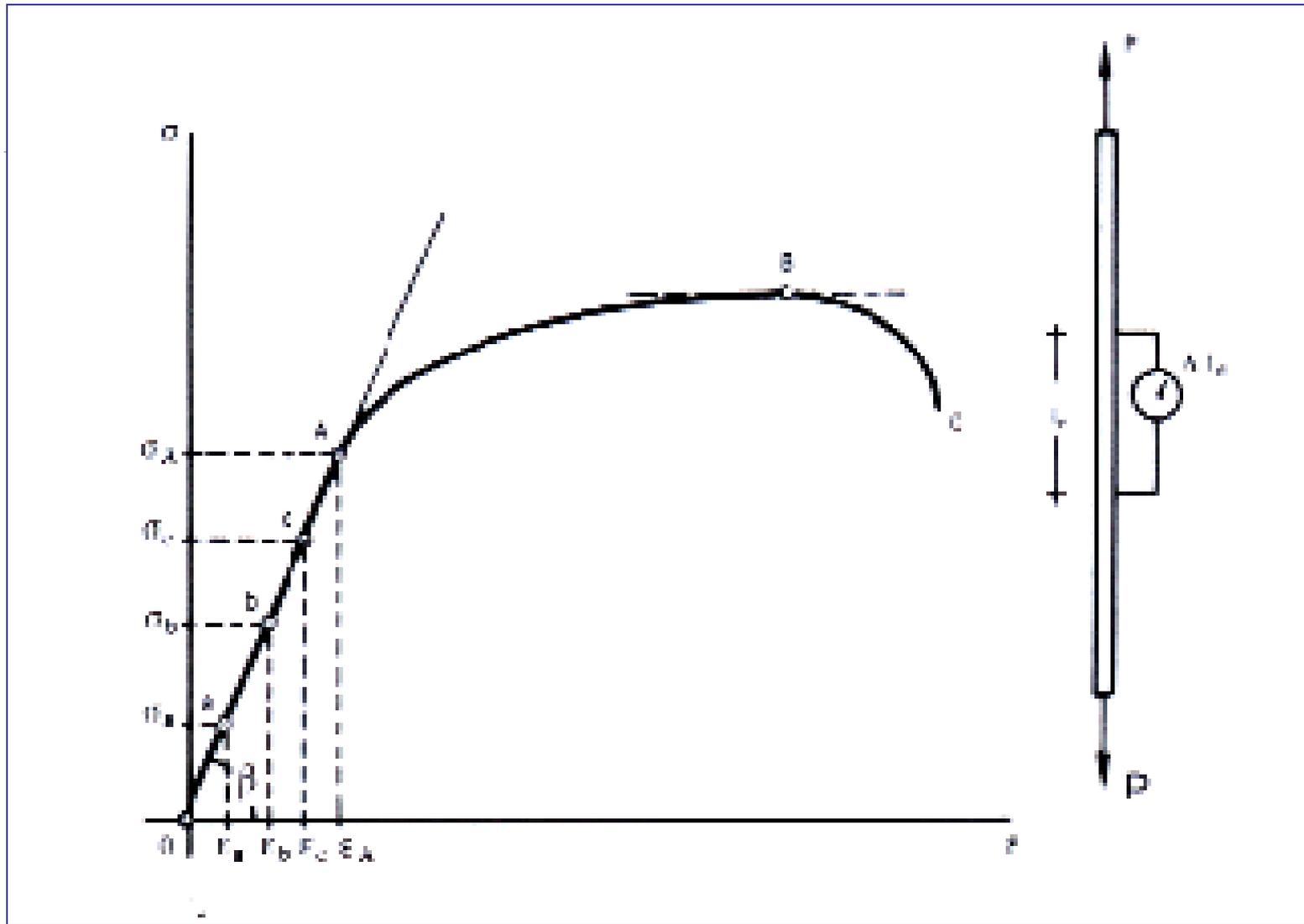
Desaparece al anular la causa que la produjo

Ej: Probeta de Goma



- Deformación elástica instantánea o ideal
- Deformación elástica retardada

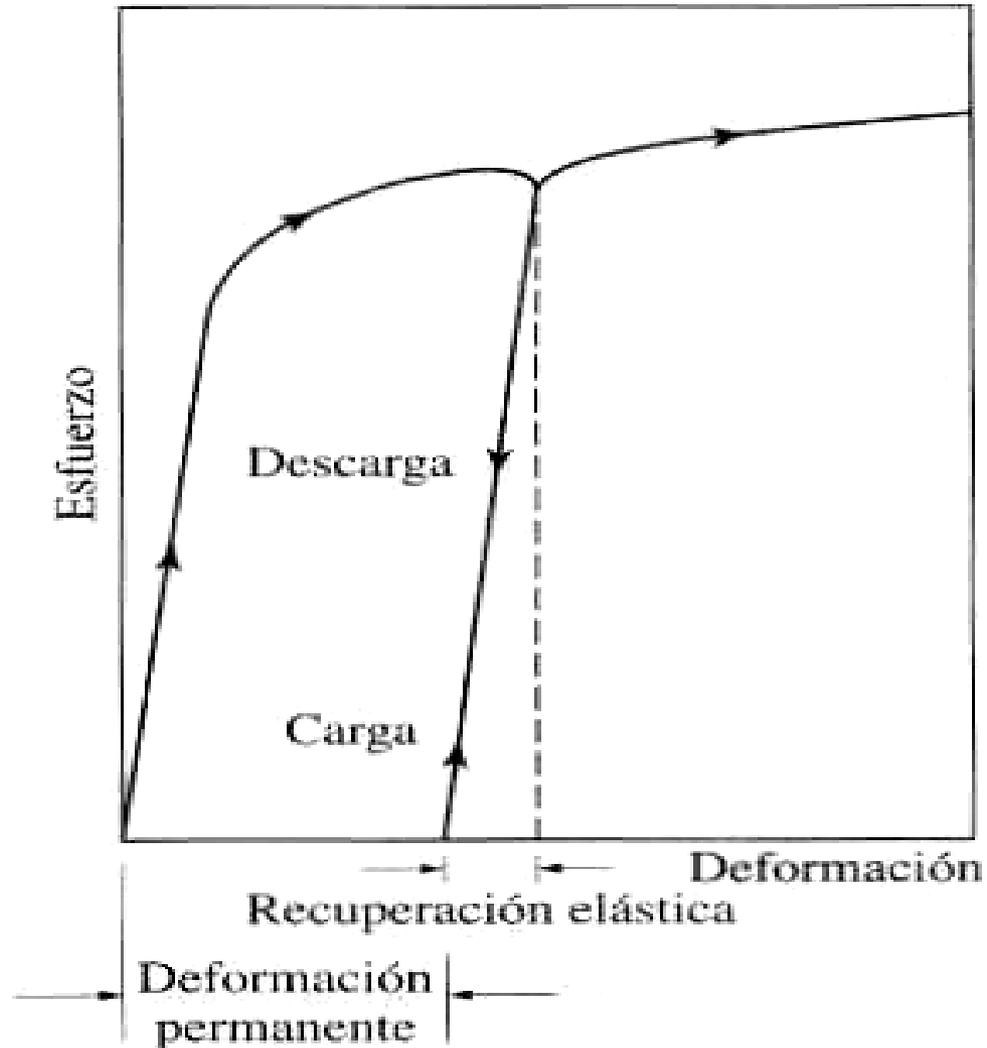




$$\frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B} = \frac{\sigma_C}{\varepsilon_C} = cte = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} = E$$

Deformación Plástica:

No desaparece al anular la causa que la produjo



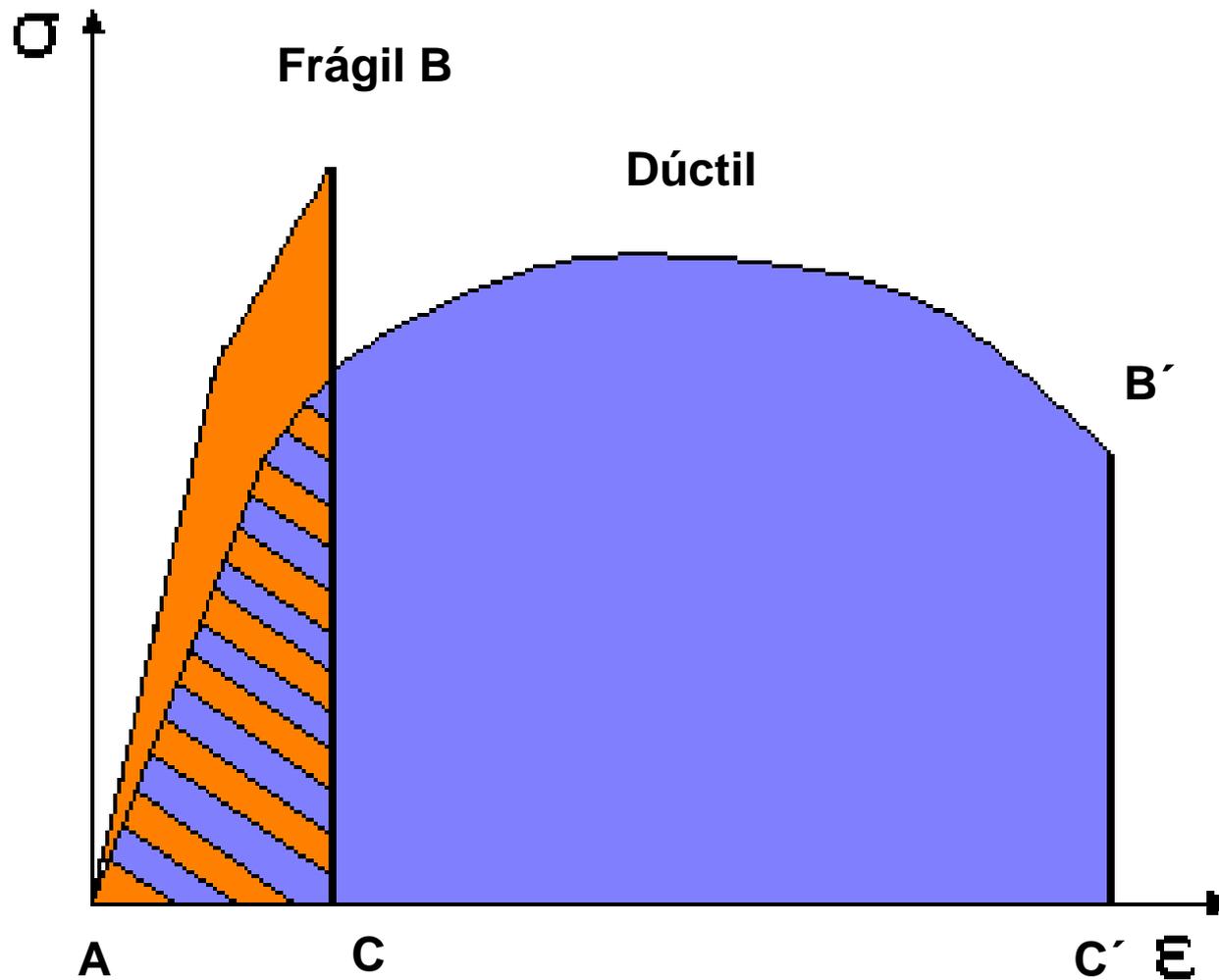
Ductilidad

“Cantidad de deformación PLÁSTICA que sufre un material antes de su fractura.”

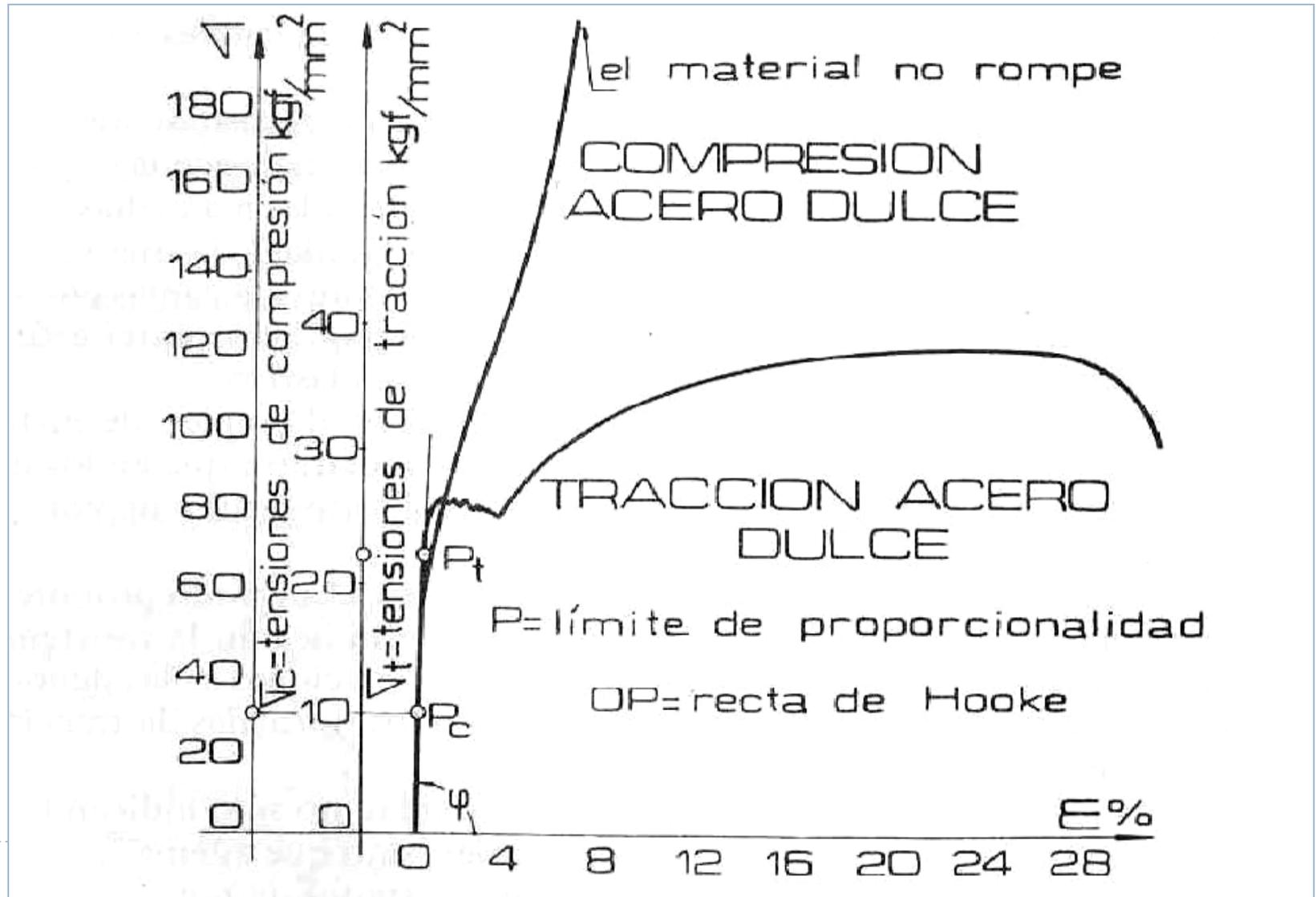
$$\text{Alargamiento de rotura} = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \times 100$$

$$\text{Coefic. estricción} = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \times 100$$

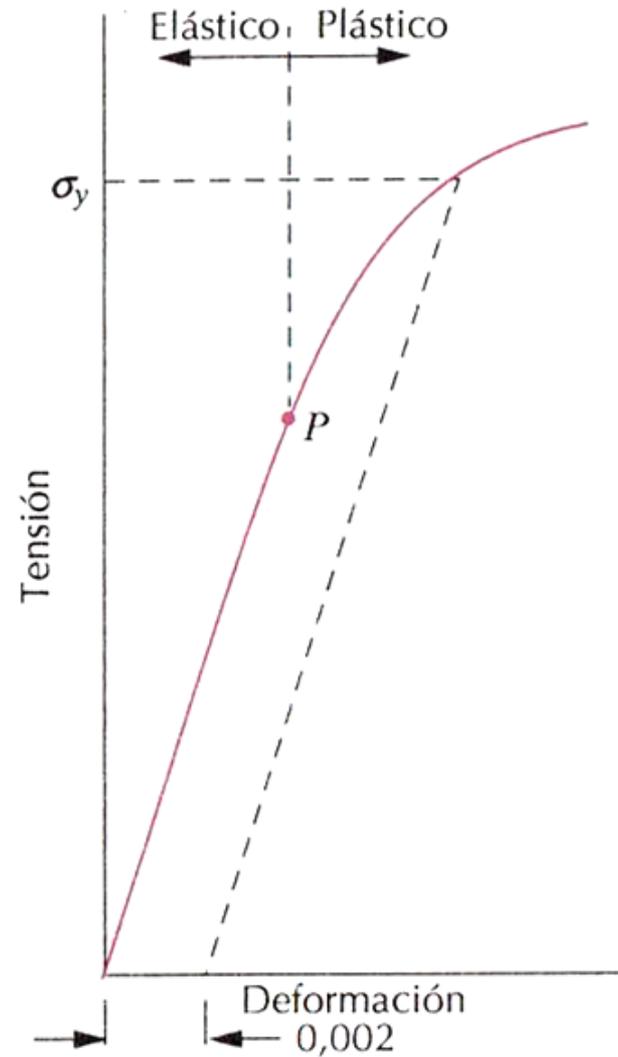
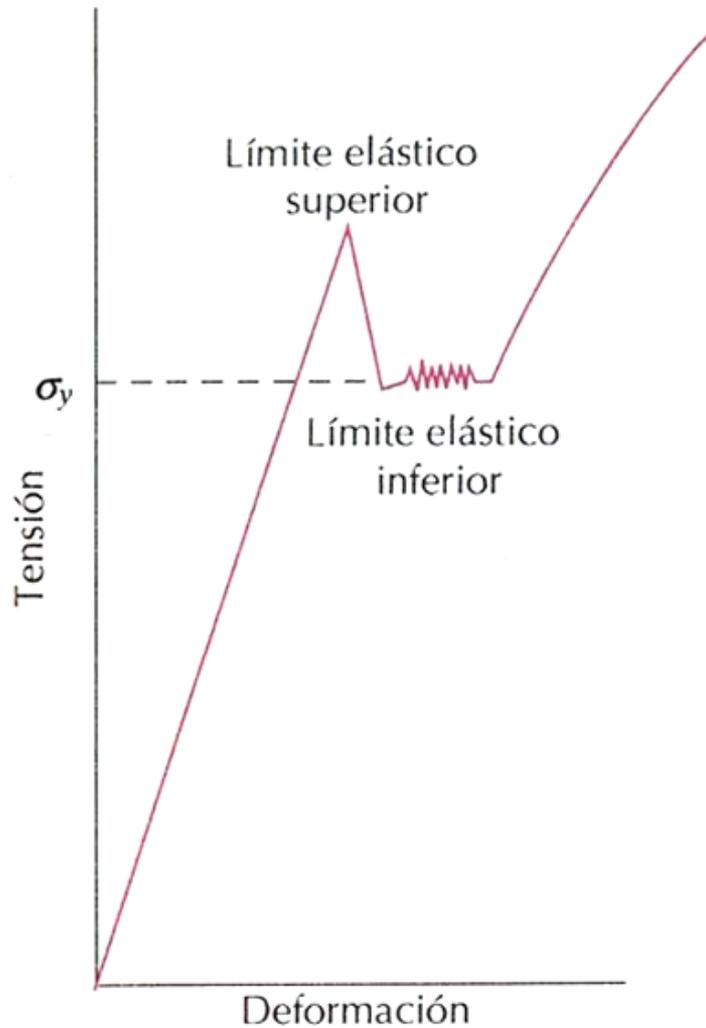
Ductilidad



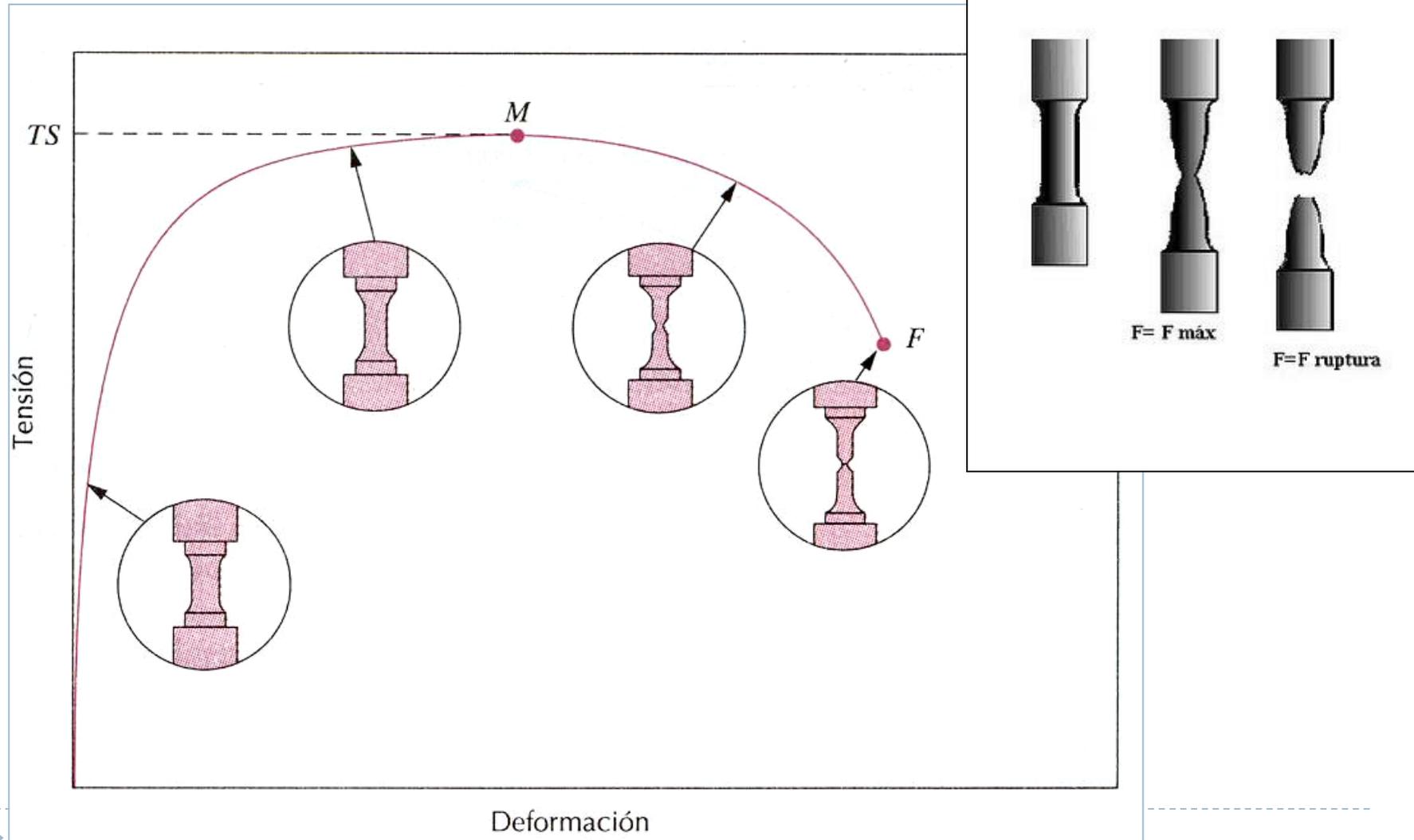
Comparación Diagrama Esfuerzo-Deformación para Ensayo de Tracción y Compresión



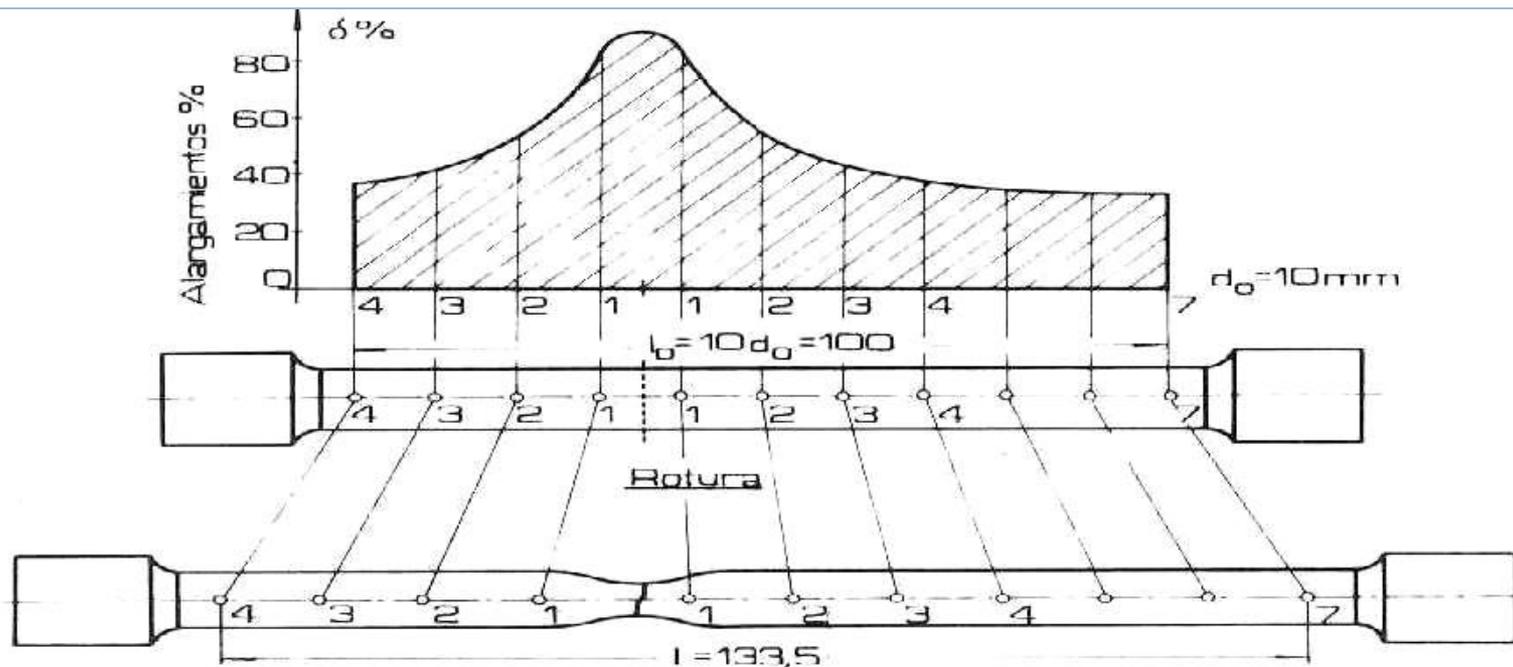
Límite Convencional



Evolución de la Probeta en el Diagrama Tensión-Deformación durante el Ensayo de Tracción



Variación del Alargamiento de rotura con Longitud Inicial



ACERO : SAE 1010

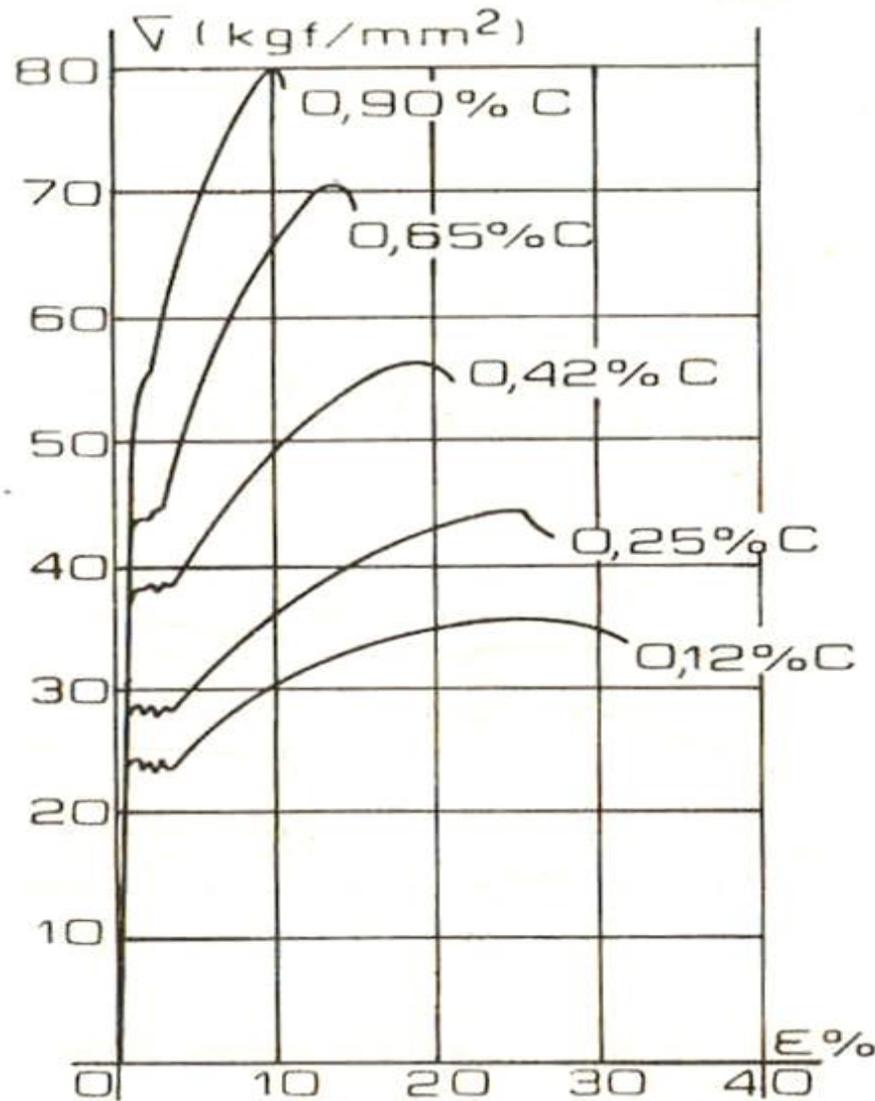
| Puntos | Antes del ensayo l_0 (mm) | Después de la rotura l (mm) | Alargamiento de rotura% $\delta\% = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100$ |
|--------|--------------------------------|----------------------------------|---|
| 1-1 | 10 | 18,3 | 83 |
| 2-2 | 30 | 45,6 | 52 |
| 3-3 | $5d_0 = 50$ | 70,9 | 41,8 |
| 4-4 | 70 | 96,2 | 37,4 |
| 4-7 | $10d_0 = 100$ | 133,5 | 33,5 |

Ley de semejanza

- ▶ $\Delta l_t = \Delta l_e + \Delta l_n$
 - ▶ $\Delta l_e = k_1 \sqrt{S_0}$
 - ▶ $\Delta l_n = k_2 l_0$
 - ▶ $\Delta l_t = k_1 \sqrt{S_0} + k_2 l_0$
 - ▶ Si dividimos por l_0
 - ▶ $\epsilon = k_1 \sqrt{S_0} / l_0 + k_2$
 - ▶ Para un mismo material y distintas probetas:
 - ▶ $\epsilon_1 = \epsilon_2$
 - ▶ $\sqrt{S_0} / l_0 = k$
 - ▶ Según valor de k , las probetas pueden ser cortas o largas.
 - ▶ Equivalencia entre normas.
-

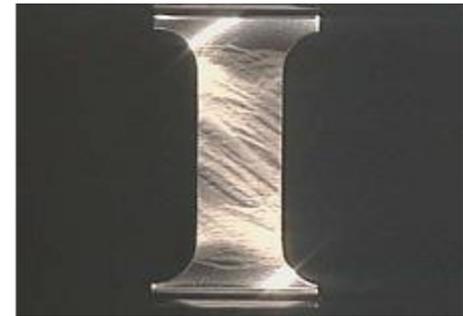
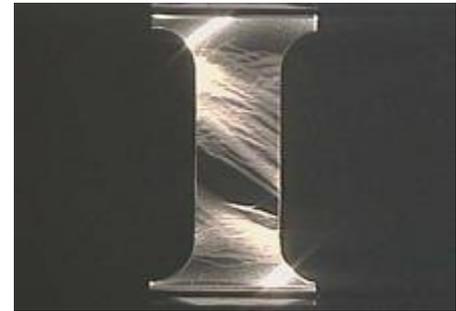
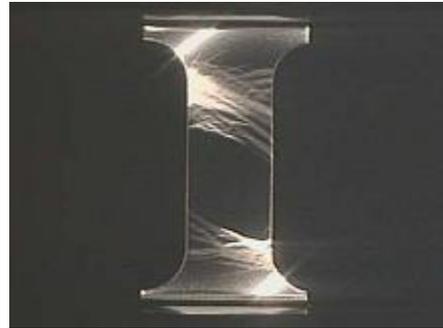
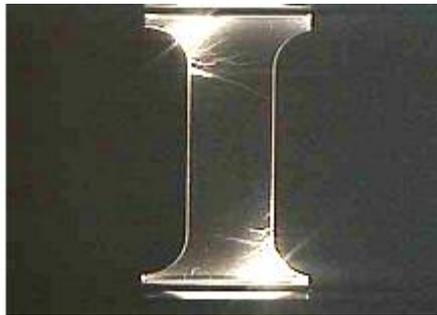


Diagramas de Tracción para distintos Aceros al Carbono

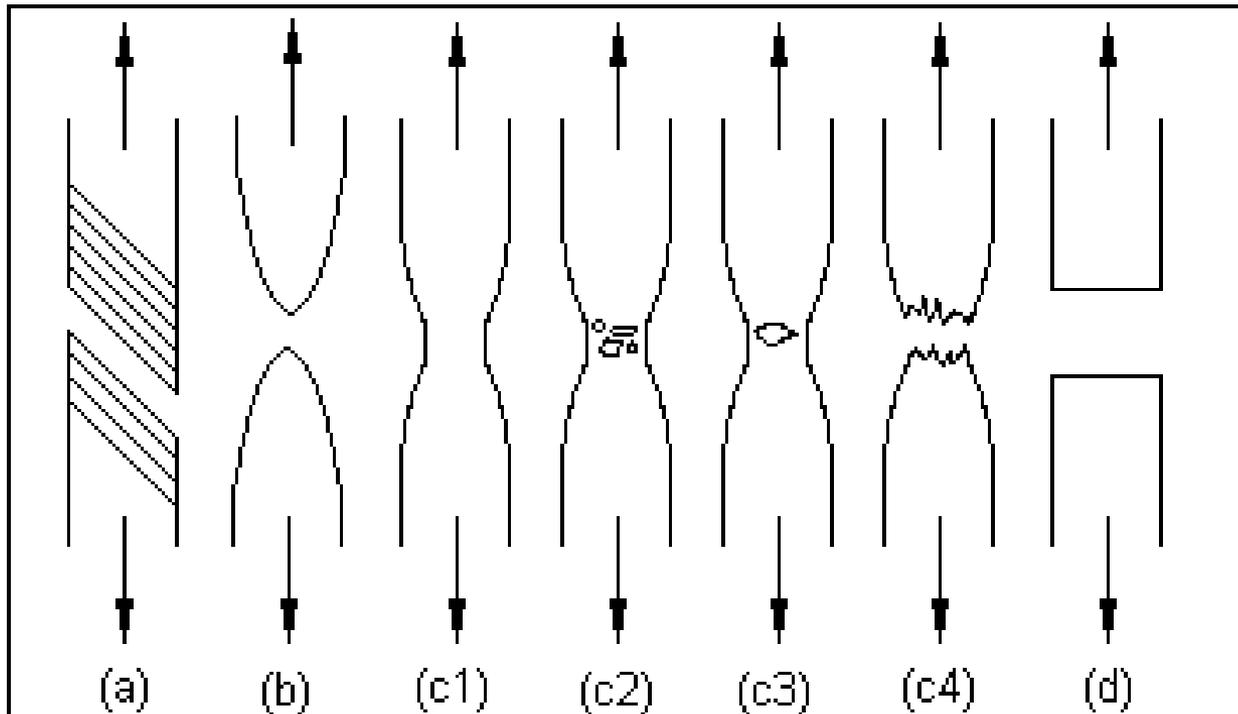


%C

Líneas de Lüder



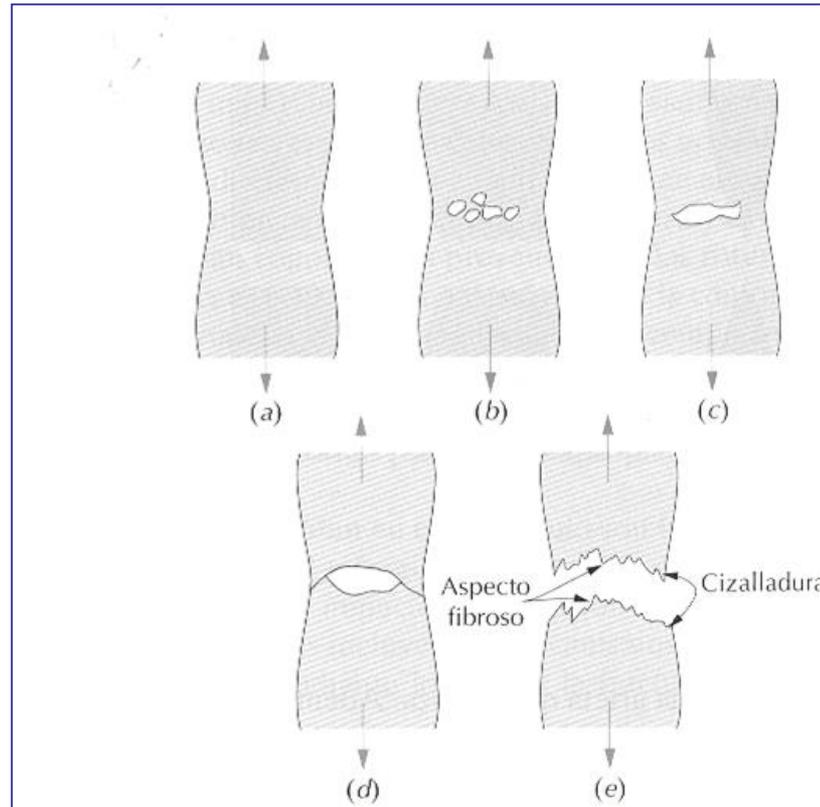
Fracturas



TIPOS DE FRACTURA

- (a) Fractura de cizallamiento en monocristales dúctiles
- (b) Fractura completamente dúctil en policristales
- (c) Etapas de la fractura copa - cono
- (d) Fractura frágil de monocristales y policristales

Etapas en la fractura copa-cono



Fuente: Callister, p.196

- Estricción inicial
- Formación de pequeñas cavidades
- La coalescencia de cavidades forma una grieta
- Propagación de la grieta
- Fractura final por cizallamiento a un ángulo de 45° respecto a la dirección de la tensión.

Esfuerzo Real y Deformación Real

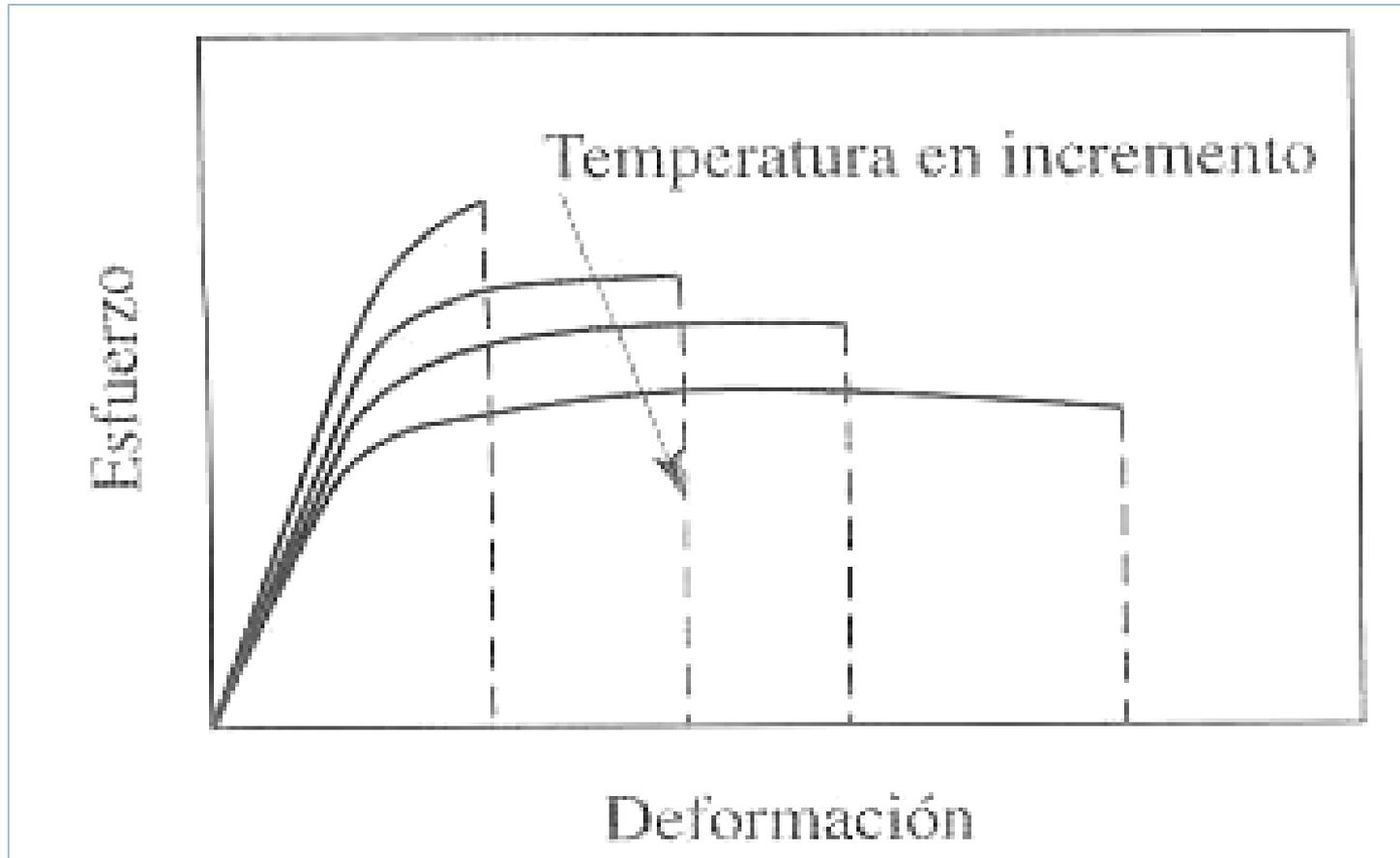
Esfuerzo Real: Relación de la carga P al área transversal real (instantánea).

Esfuerzo Real:
$$\sigma = \frac{P}{S}$$

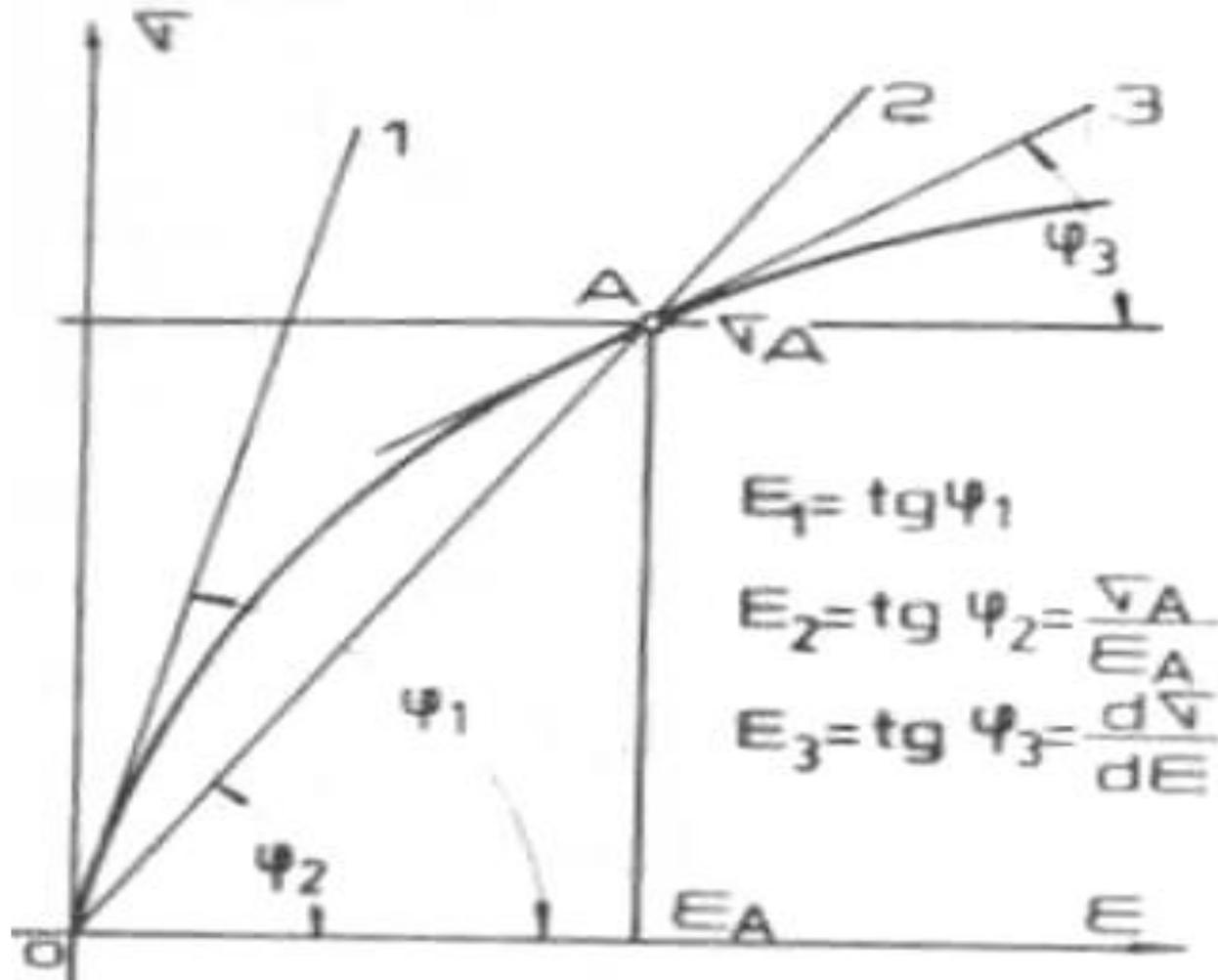
Deformación Real:
$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

Efecto de la Temperatura

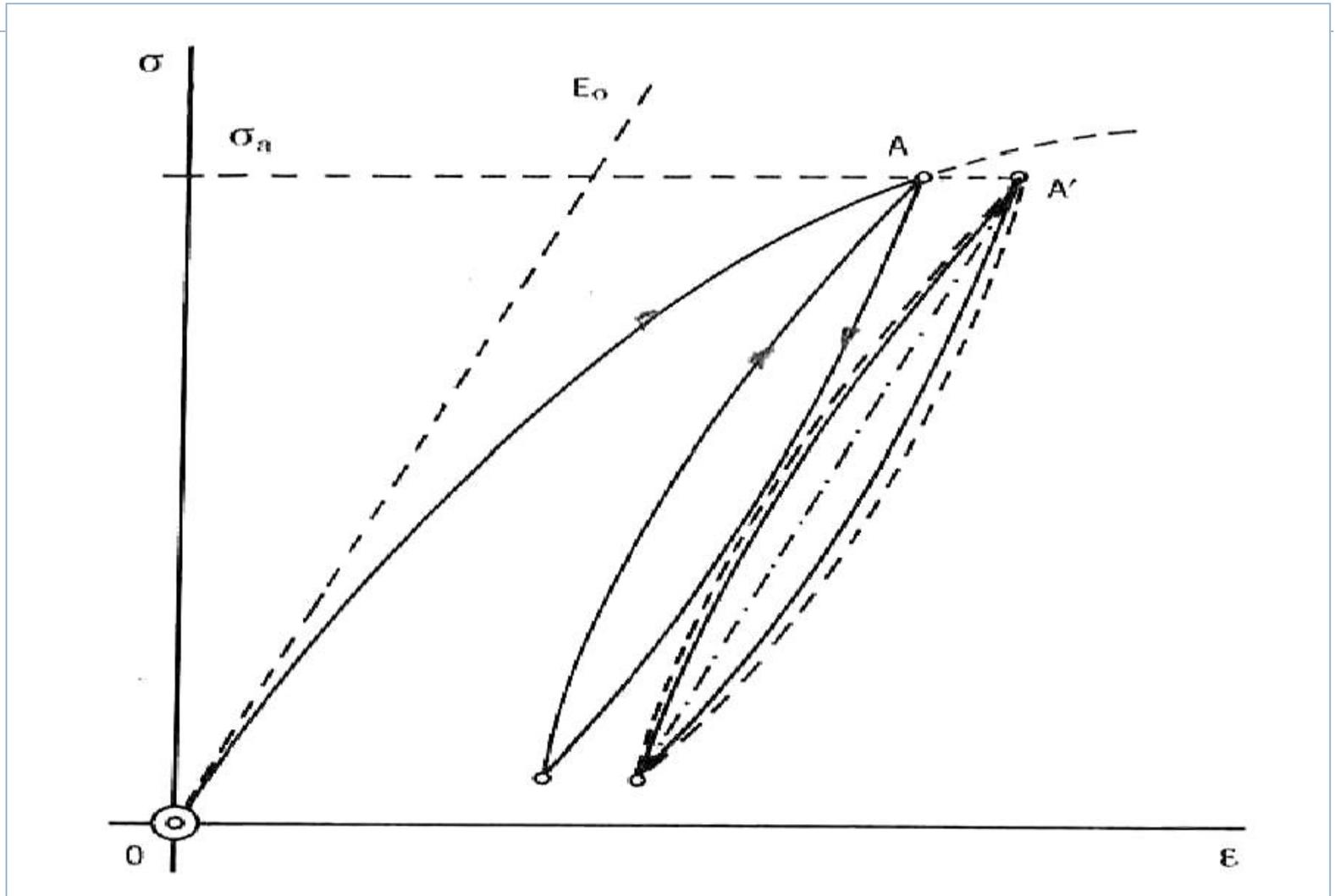
Efectos de la rapidez de deformación



TENSION-DEFORMACION DE METAL PLASTICO



Histéresis



ENSAYO DE COMPRESIÓN



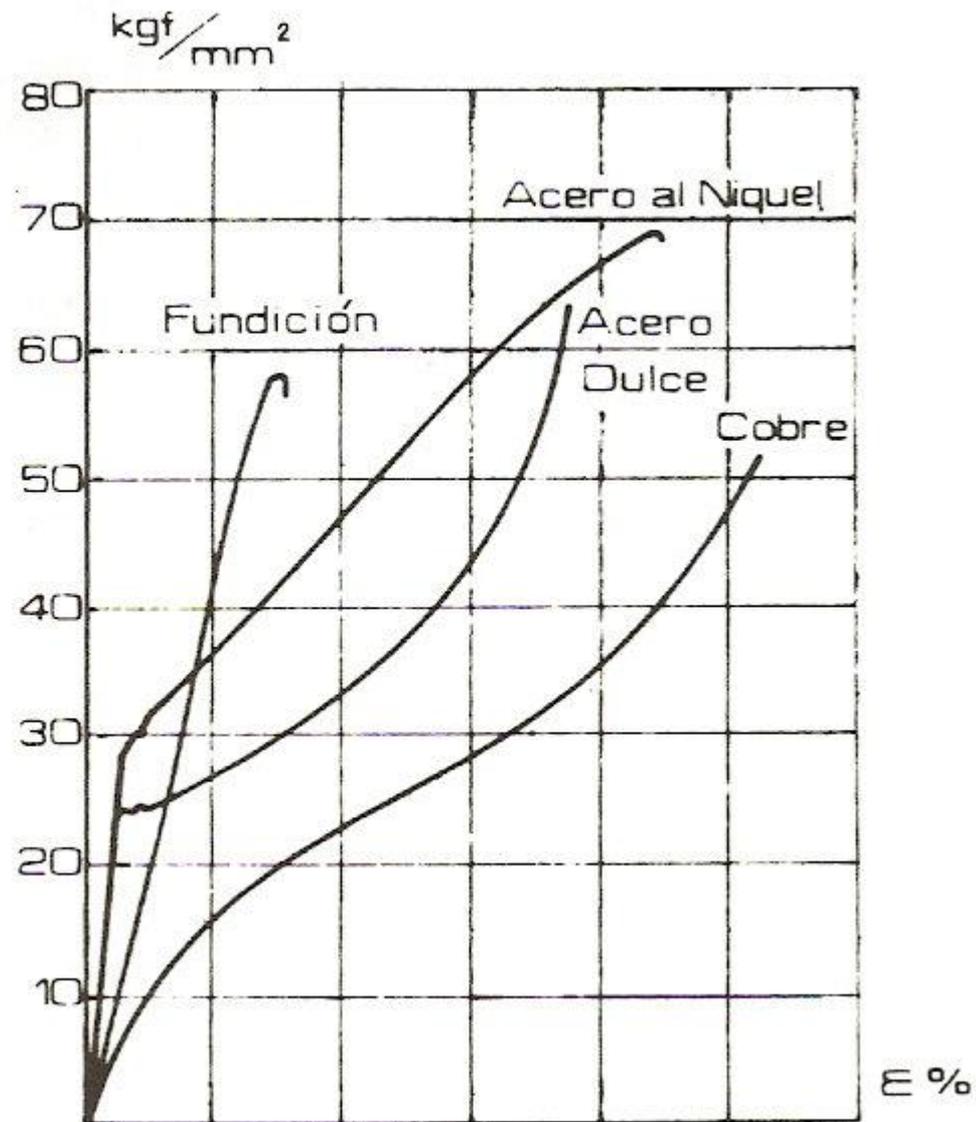
MAQUINA DE ENSAYO - ACCESORIOS



ACCESORIOS



Diagramas de Compresión



Probetas

Norma ASTM E9

Corta: $h=0,9D$

Mediana: $h=3D$

Larga: $h=(8 \text{ a } 10)D$

Utilización:

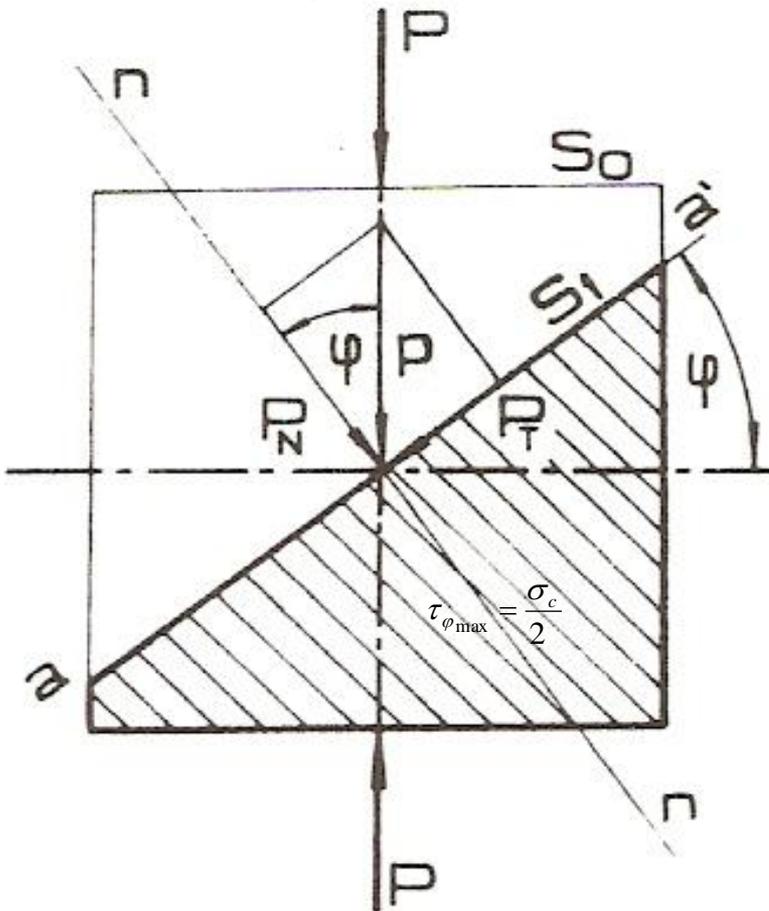
Cortas: para determinar la resistencia estática a la compresión en metales que soportaran cargas normales y en espesores reducidos.

Medianas: para uso general.

Largas: para definir el módulo de elasticidad.



Tensiones de rotura



$$\tau_\phi = \frac{P_T}{S_1} = \frac{P \cdot \text{sen}\phi}{S_0 / \text{cos}\phi} =$$

$$= \frac{P}{S_0} \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{cos}\phi = \frac{\sigma_c}{2} \cdot \text{sen}2\phi$$

Máximo para

$\Phi=45$

Determinaciones del Ensayo de Compresión

Resistencia Estática a la Compresión

$$\sigma_{EC} = \frac{P_{Max}}{S_0}$$

Tensión al límite de Proporcionalidad

$$\sigma_p = \frac{P_p}{S_0}$$

Tensión al límite de Aplastamiento

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

Acortamiento de rotura

$$\delta\% = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100$$

Ensanchamiento Transversal o Recalcadura

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



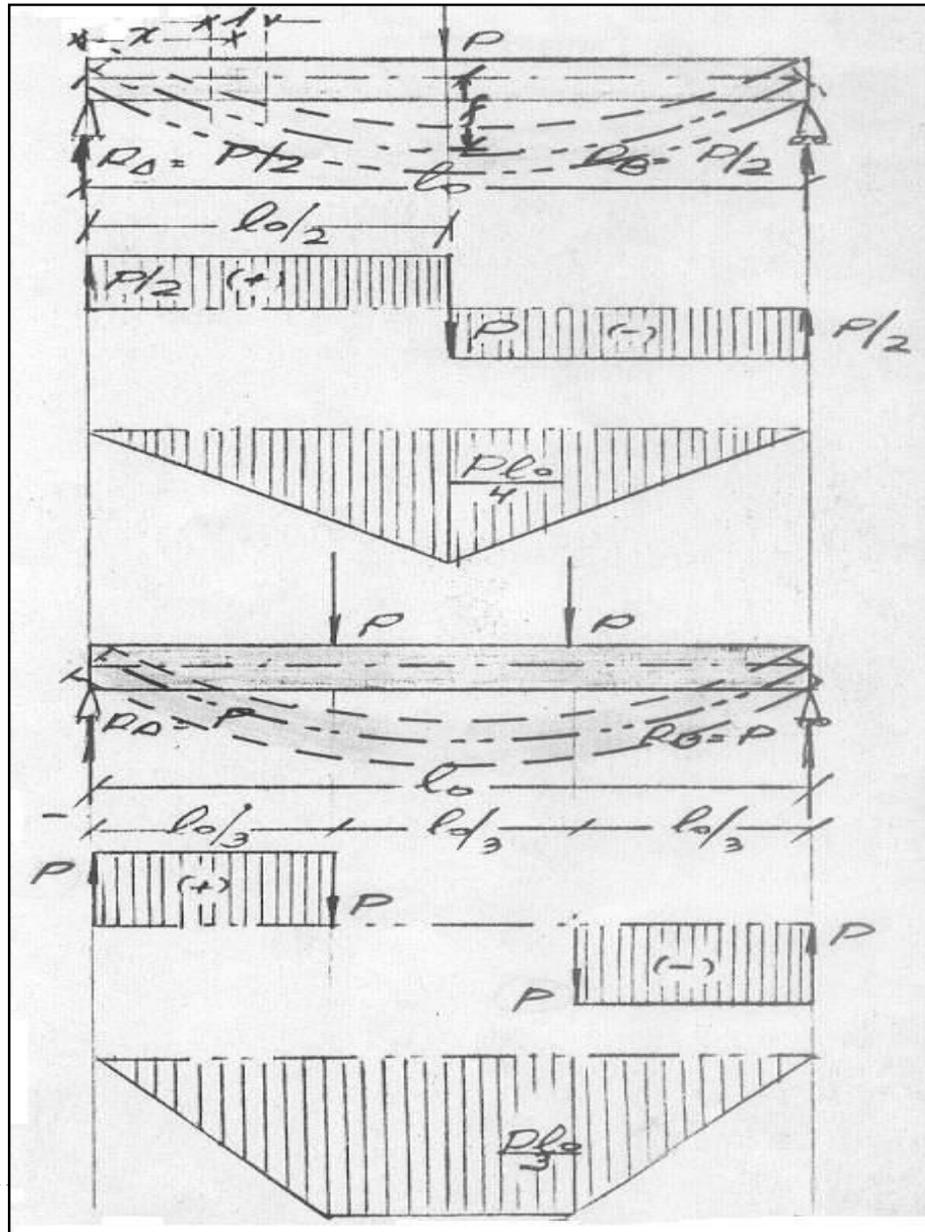
ENSAYO DE FLEXIÓN



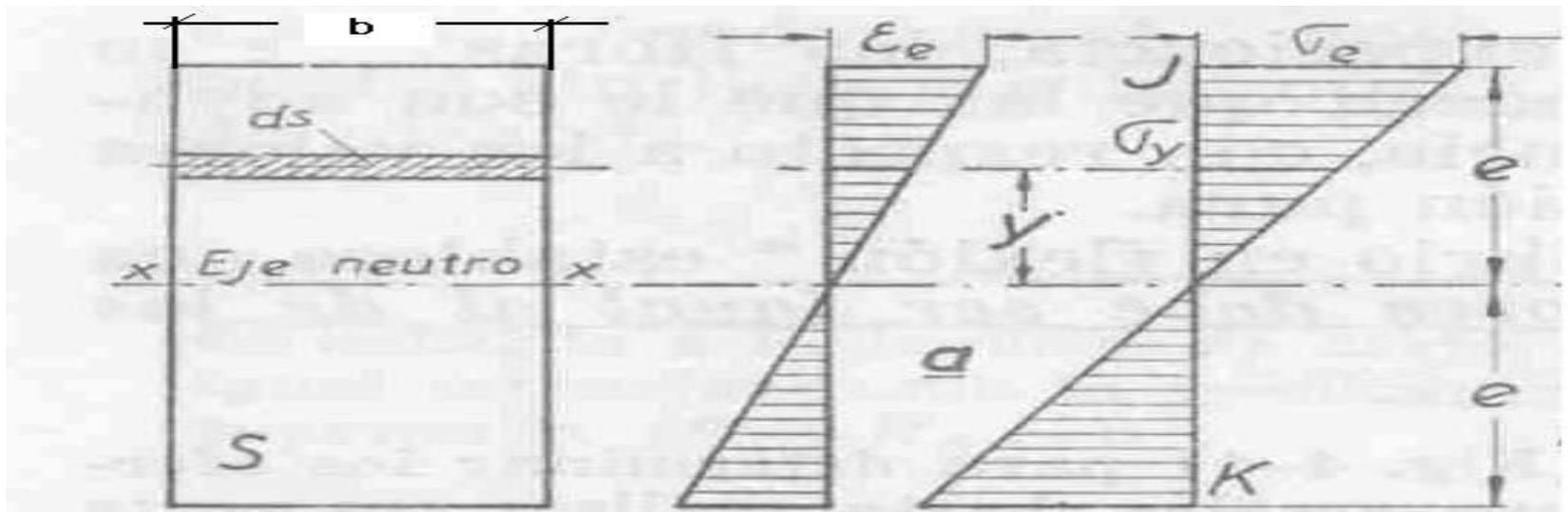
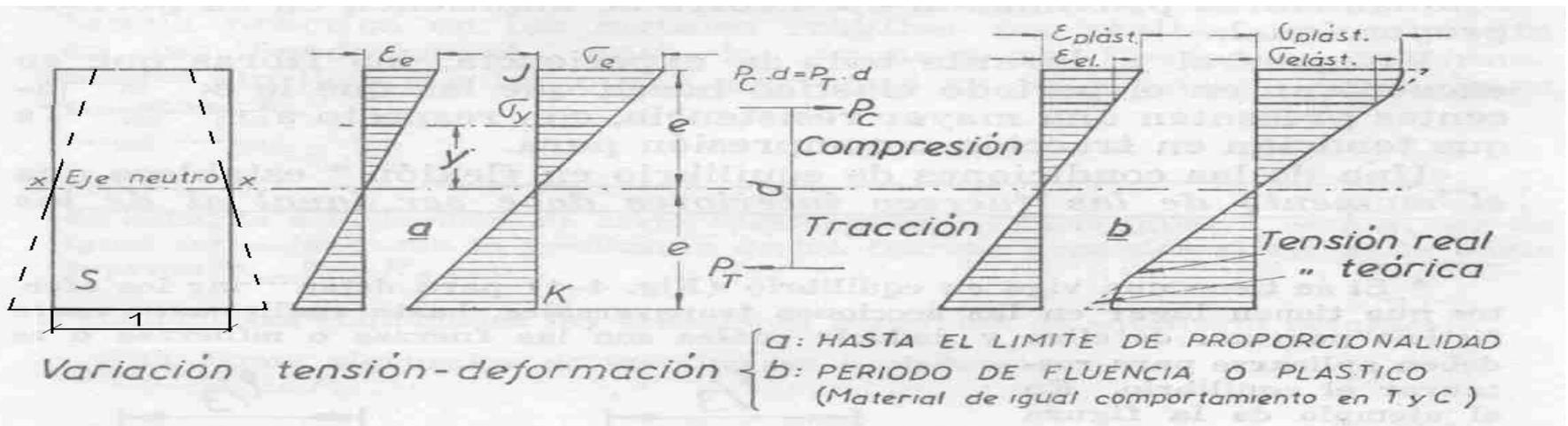
ENSAYO DE FLEXIÓN

FLEXIÓN
PRÁCTICA

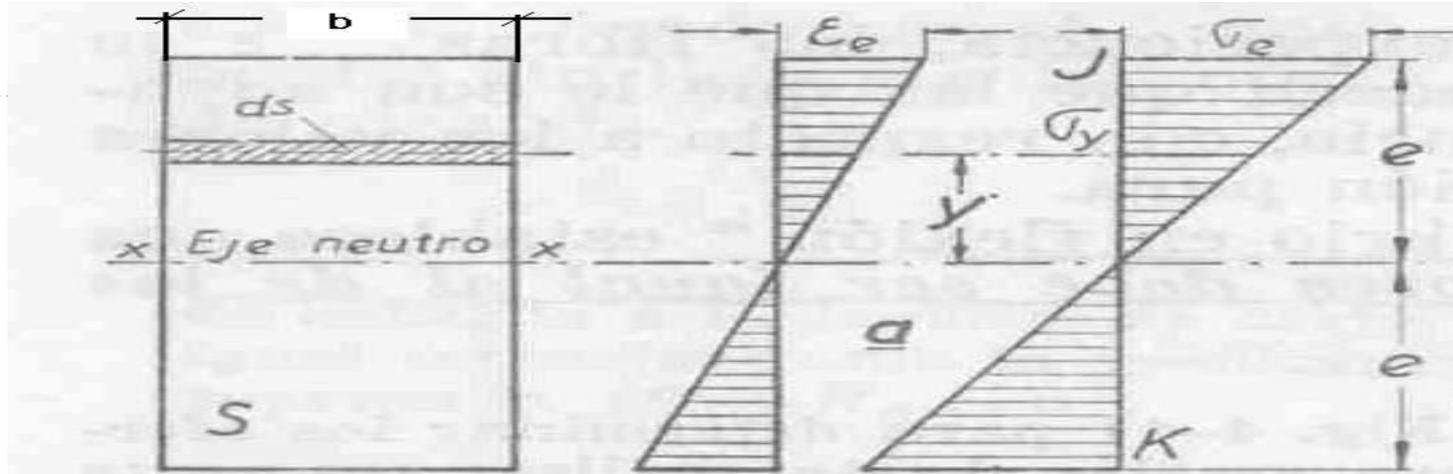
FLEXIÓN
PURA



DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES



Cálculo de la resistencia a la flexión



$$dp = \sigma y * ds$$

$$dM = dP * y = \sigma y * ds * y$$

$$\sigma y / \sigma e = y / e \therefore \sigma y = (y * \sigma e / e) \therefore dM = (\sigma e / e) * y^2 * ds$$

$$M_{int} = \int_{-e}^e \frac{\sigma_e}{e} * y^2 * ds$$

$$M_{int} = \frac{\sigma_e}{e} \int_{-e}^e y^2 * ds$$

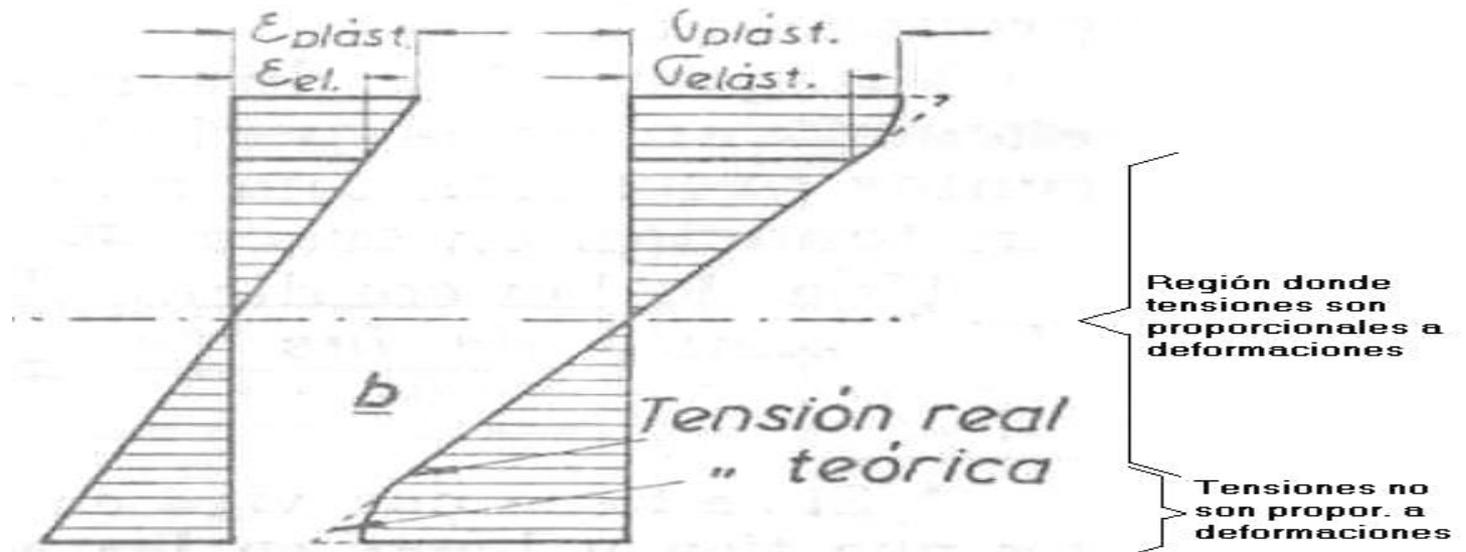
$$M_{INT} = (\sigma e / e) * Jx$$

$$\sigma e = e * Mf / Jx$$

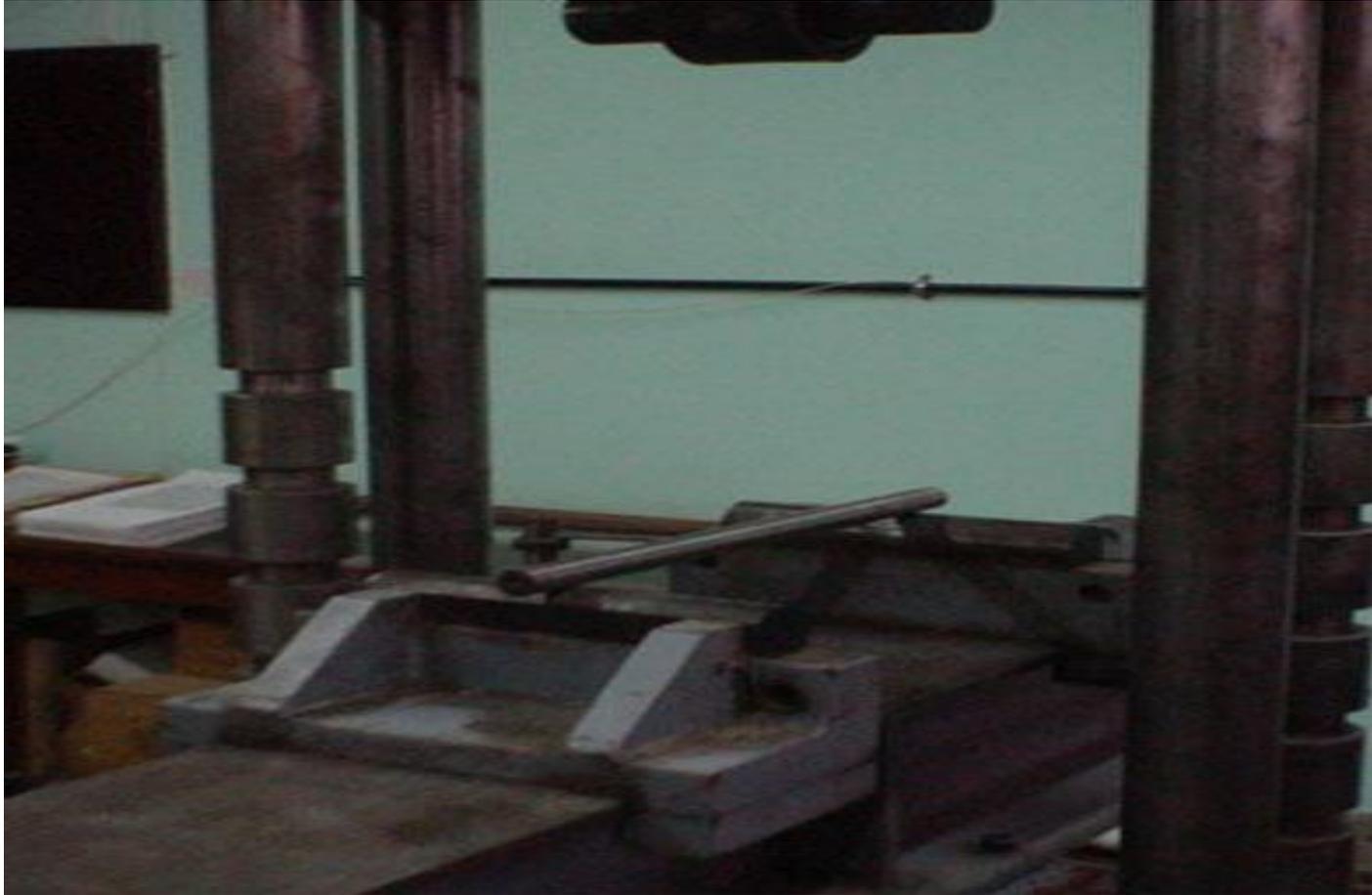
$$\sigma_e = M_f / W_x$$

PROBETAS

| TIPO | $d_o(\text{mm})$ | $l_o(\text{mm})$ | $l_t(\text{mm})$ |
|------|------------------|------------------|------------------|
| A | $22 \pm 1,5$ | 300 | 375 |
| B | $30 \pm 2,5$ | 450 | 525 |
| C | $50 \pm 2,5$ | 600 | 675 |



MAQUINA DE ENSAYO - ACCESORIOS



ENSAYO DE CHOQUE

✓ Objeto:

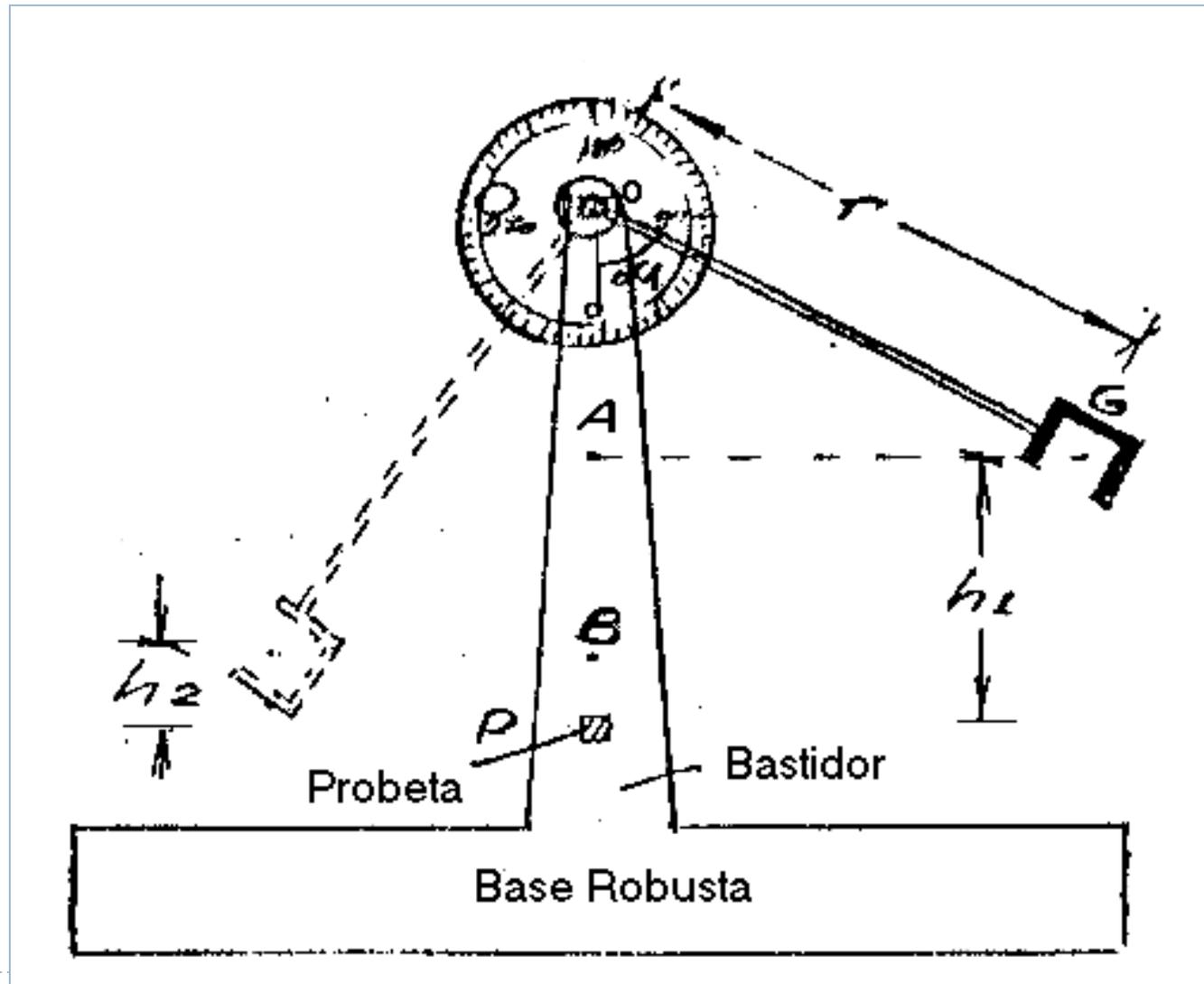
Determinar la capacidad del material para absorber y disipar la energía generada por el choque, buscando conocer qué valor es necesario para romper el material en condiciones definidas.

✓ Aplicaciones:

Aceptación o rechazo de materiales por ejemplo aceros, cuando se sospecha la presencia de elementos fragilizantes, como el fósforo y el azufre, una vez establecidas las relaciones con el comportamiento confiable en servicio.



Máquina de Ensayo



Trabajo de Rotura

1) $E_1 = E'_1 = G \cdot h_1 = G \cdot h'_1$

2) $E_0 = (E_1 - E_2); E_1 = G \cdot h_1; E_2 = G \cdot h_2$

$$h_1 = OP - OA; OP = r; OA = r \cdot \cos\alpha_1; h_1 = r - r \cdot \cos\alpha_1 = r \cdot (1 - \cos\alpha_1)$$

$$h_2 = OP - OB; OP = r; OB = r \cdot \cos\alpha_2; h_2 = r - r \cdot \cos\alpha_2 = r \cdot (1 - \cos\alpha_2)$$

$$E_0 = G \cdot r \cdot (1 - \cos\alpha_1) - G \cdot r \cdot (1 - \cos\alpha_2)$$

3) $E_0 = G \cdot r \cdot (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)$



Método de Charpy

Es un método para determinar la resistencia a la flexión por choque en probetas entalladas de materiales metálicos, que reciben el impacto en la cara opuesta de la entalladura.

■ Condiciones de Ensayo (Norma IRAM 106)

- Temperatura de ensayo: en (20 ± 1) °C
- Probetas extraídas del material a ensayar
- Dimensiones de las probetas:
Longitud: (55 ± 1) mm; ancho = altura = $(10 \pm 0,1)$ mm

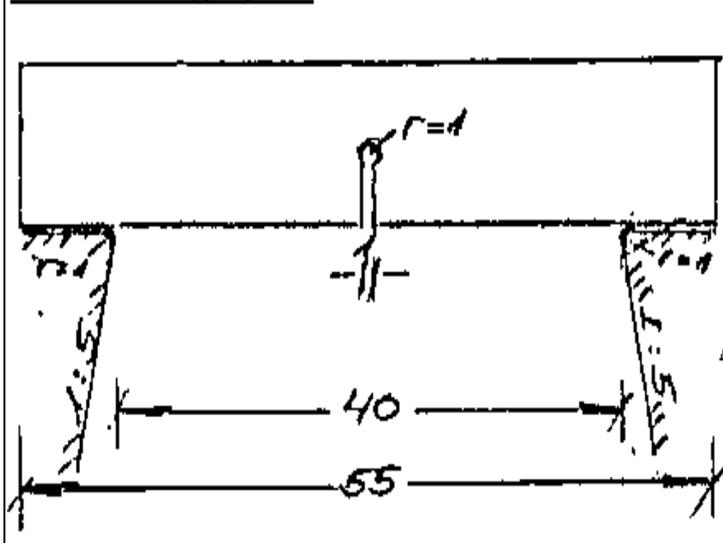
•Tipos de Probetas



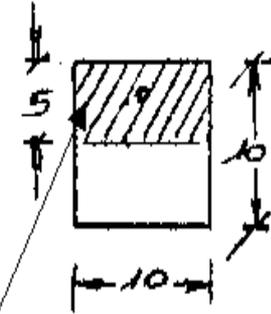
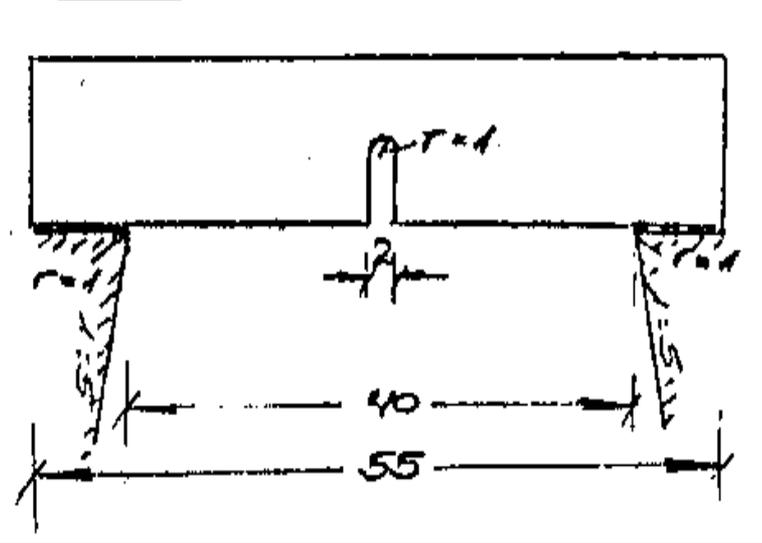
- Francesas
- Alemanas

Francesas

TIPO CHARPY, pequeña



TIPO U.F.



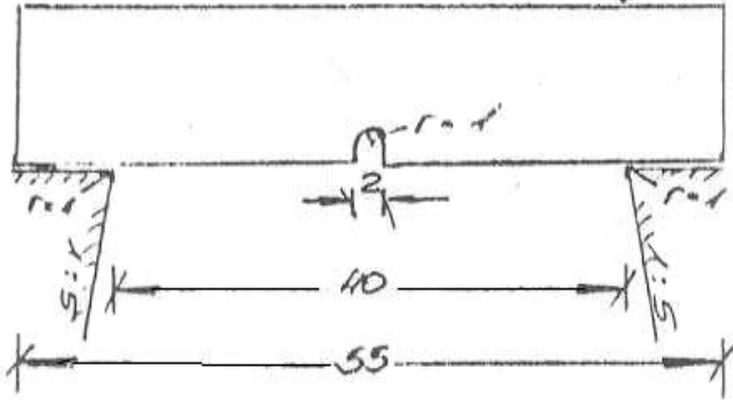
Sección útil o inalterada, a la que se refiere la energía consumida



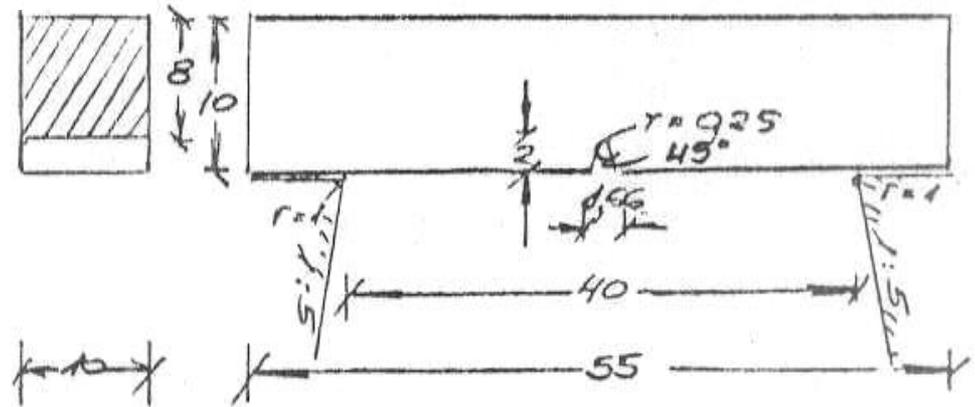


Alemanas

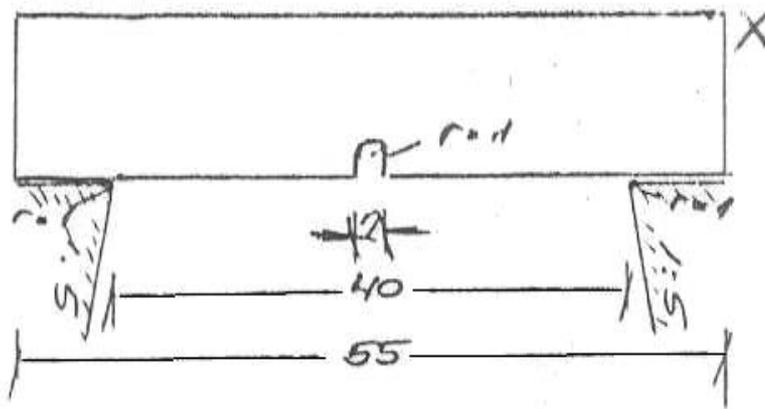
Entalladura Mesneger



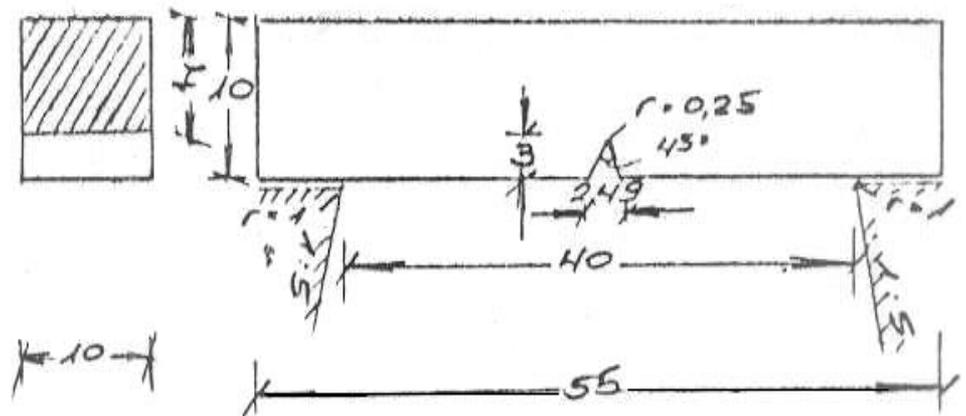
Entalladura Izod



Entalladura Tipo "U"



Entalladura Izod modificada



■ Condiciones del Ensayo

- Velocidad del martillo en el impacto: (5~6) m/seg
- El trabajo realizado no podrá exceder los 30 kgfm.

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha)}$$

$$E = G \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha)$$

$$\cos \alpha_2 = 1 \text{ para } \alpha_2 = 0^\circ$$

Siendo:

g: aceleración de la gravedad (m/seg²)

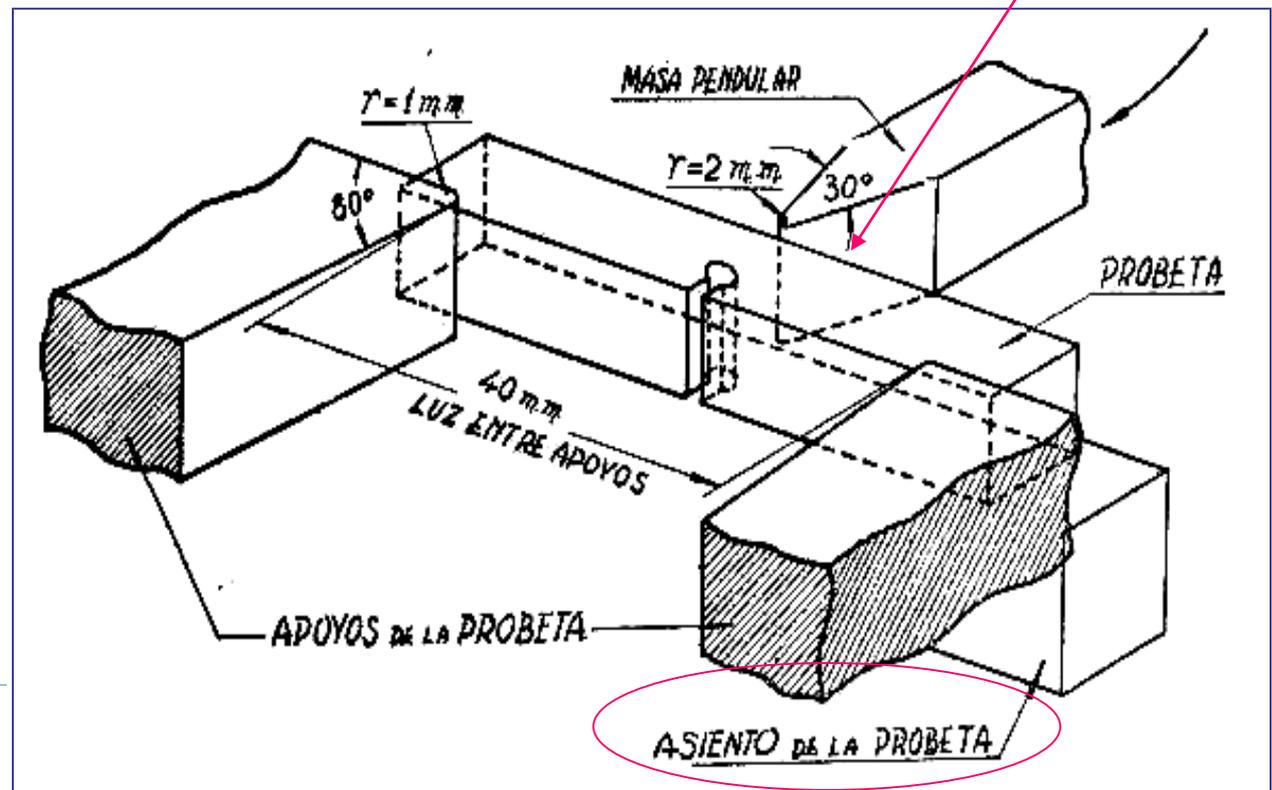
r: distancia eje rotación al centro de la cuchilla (m).

G: peso actuante (kgf)

■ Procedimiento

- 1) Colocar la probeta sobre los apoyos
- 2) El centro de la entalladura debe estar en el mismo plano vertical que recorre el centro del martillo
- 3) El martillo golpeará la probeta en la cara opuesta de la entalladura
- 4) La probeta deberá romperse de un solo golpe de martillo
- 5) El trabajo para su rotura será:

$$E_0 = (E_1 - E_2) = G \cdot r \cdot (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1).$$



■ Resultados del Ensayo

La resistencia a la flexión por choque o resiliencia dinámica K está dada por:

$$R = \frac{E_0}{S}$$

E_0 : trabajo de impacto para rotura de la probeta de un solo golpe

S : sección útil de la probeta, medida en el plano de simetría de la entalladura



Método Izod

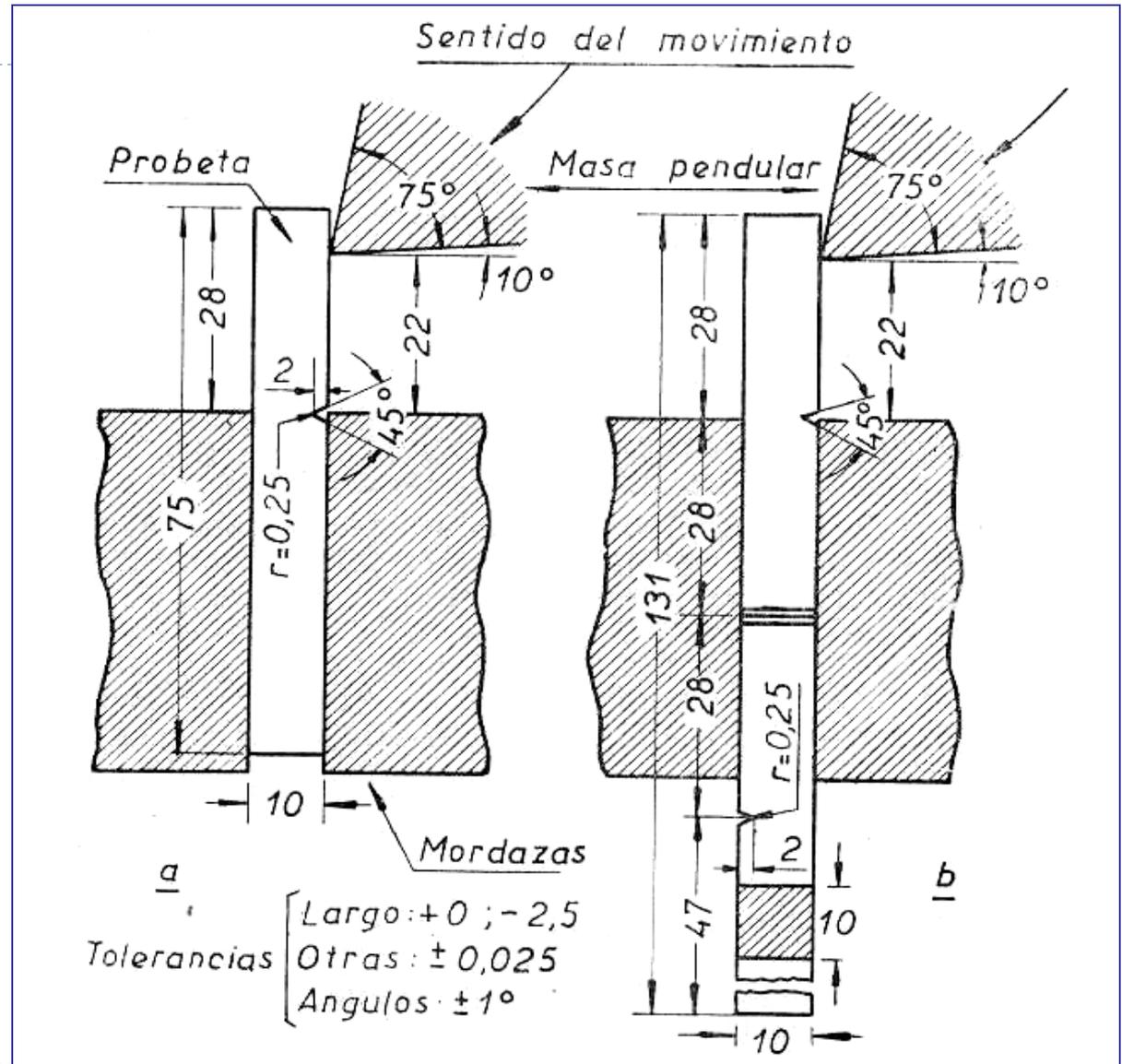
*Es un método para determinar la resistencia a la flexión por choque en probetas entalladas de materiales metálicos, **empotradas**, que reciben el impacto en la **misma cara** de la entalladura.*

■ Condiciones de Ensayo (Norma IRAM 106)

- Temperatura de ensayo: en (20 ± 1) °C
- Probetas extraídas del material a ensayar
- ✓ Barra prismática cuadrangular:
 - $L=130$ mm ; $S= 10$ mm de lado
 - Tres entalladuras, separadas 25 mm entre sí
- ✓ Cilíndricas:
 - $\phi=11,3$ mm; $L=130$ mm
 - Entalladuras de 3,3 mm de profundidad, ubicadas en tres planos desfasados 120° entre sí

■ Resultado del Ensayo

$$R = E_0$$



■ Síntesis para Ensayos

Antes del ensayo:

Norma a consultar.

Material.

Dimensiones de la probeta, con forma de entalladura y croquis de la misma.

Características de la máquina de ensayo (“G” – “r” – “α” – “h” – “E₁” – “V”).

Durante el ensayo:

Energía de impacto absorbido. (“E₀”).

Tipo de fractura con croquis de la misma.

Después del ensayo:

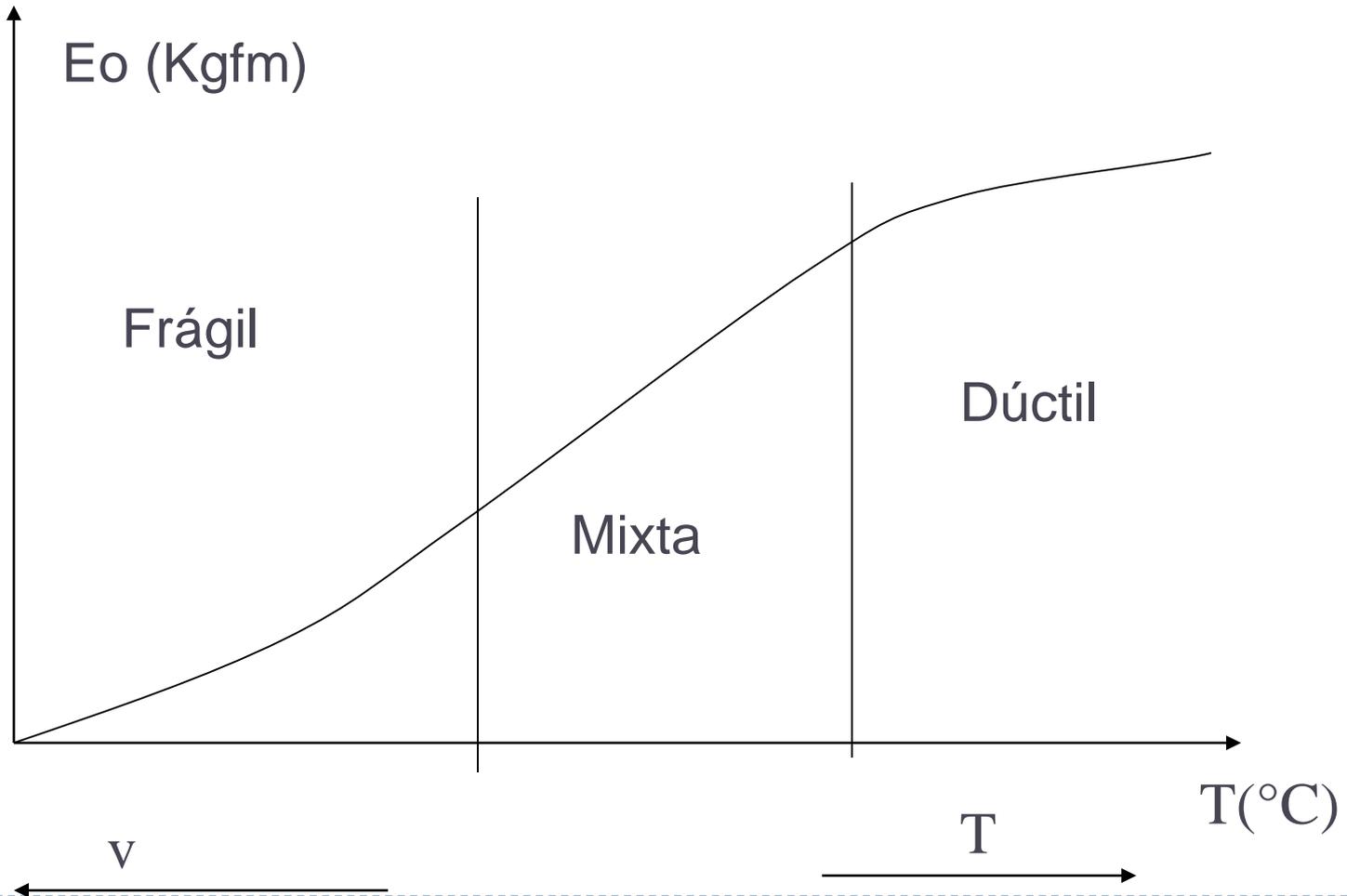
Cálculo de la resiliencia dinámica (Si $K < 10 \text{ Kgfm/cm}^2$ se expresa con una cifra decimal, si $K \geq 10 \text{ Kgfm/cm}^2$ se indica en números enteros.)

Comparación con valores normales.



Influencia de Variables

✓ Temperatura



Ejemplo del Titanic

¿Acero frágil o remaches débiles?

Analizando acero recuperado del *Titanic* en la expedición de 1991 y sometiéndolo al [ensayo Charpy de impacto](#), un sistema que permite estudiar el comportamiento mecánico de los materiales, un equipo de científicos del DREA (Defence Research Establishment Atlantic) y el CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology) descubrió que a la temperatura a la que estaba el agua cuando el *Titanic* chocó con el iceberg (unos dos grados bajo cero), el acero se volvía frágil.

Los resultados mostraron que la temperatura de transición dúctil-frágil, es decir, la temperatura en la que un material deja de ser maleable para volverse frágil estaba por encima de los 0 °C.

En el *Titanic* se emplearon remaches de acero dulce y de hierro forjado. Los primeros se colocaron mediante remachadoras hidráulicas en un 60% del casco, en la zona media donde se consideraba que se darían las mayores tensiones y las placas estaban unidas entre sí por tres o cuatro filas de remaches. Los de hierro forjado los coloraron manualmente cuadrillas de remachadores en el restante 40%, en las secciones de proa y popa, demasiado estrechas para las voluminosas remachadoras de la época



Influencia de Variables

✓ **Tamaño de la Probeta o de su sección transversal**

✓ **Entalladura**



ENSAYO DE PLEGADO

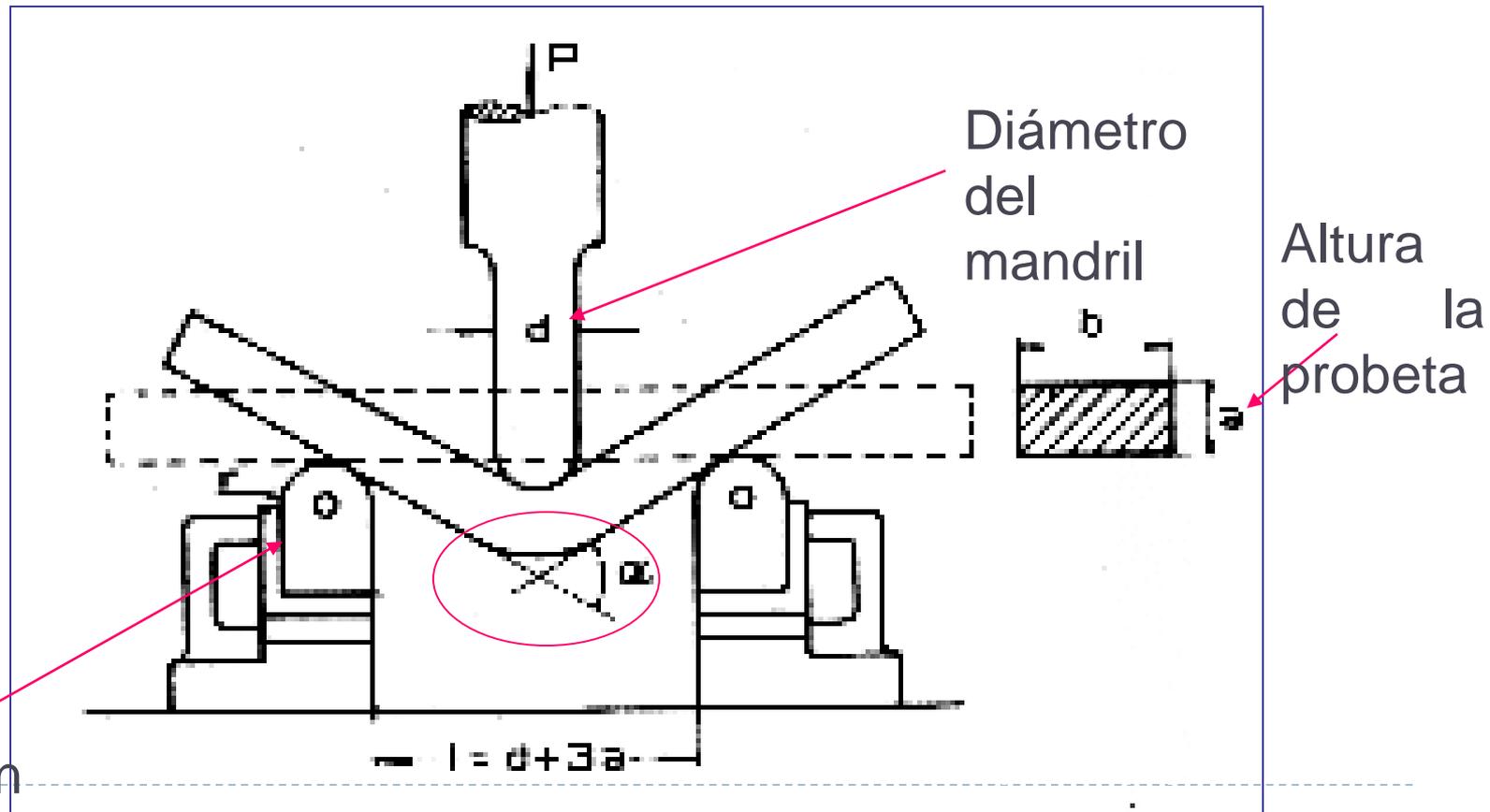
✓ Objeto:

Determinar la tenacidad del material en su estado de entrega comercial, o también después de efectuarle un tratamiento térmico de recocido.



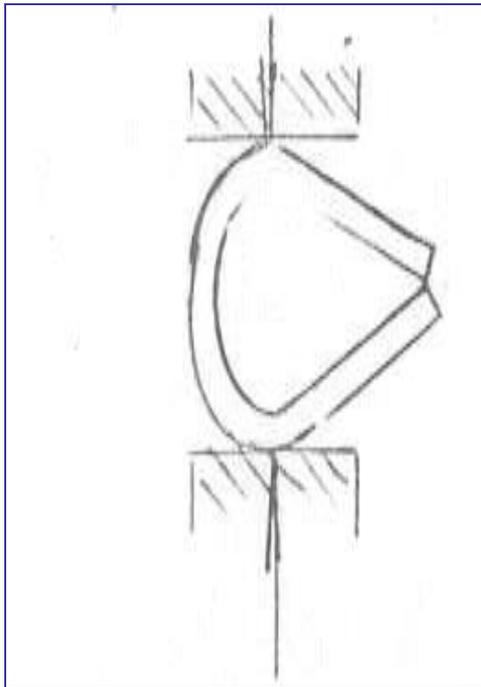
Método de Ensayo

- 1) Plegar la probeta hasta que una de las ramas forme con la prolongación de la otra el ángulo " α " especificado en cada caso.

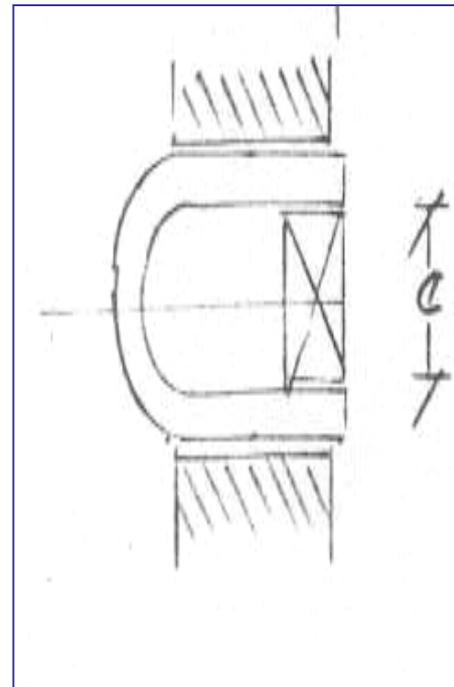


Tipos de Plegado

A Fondo



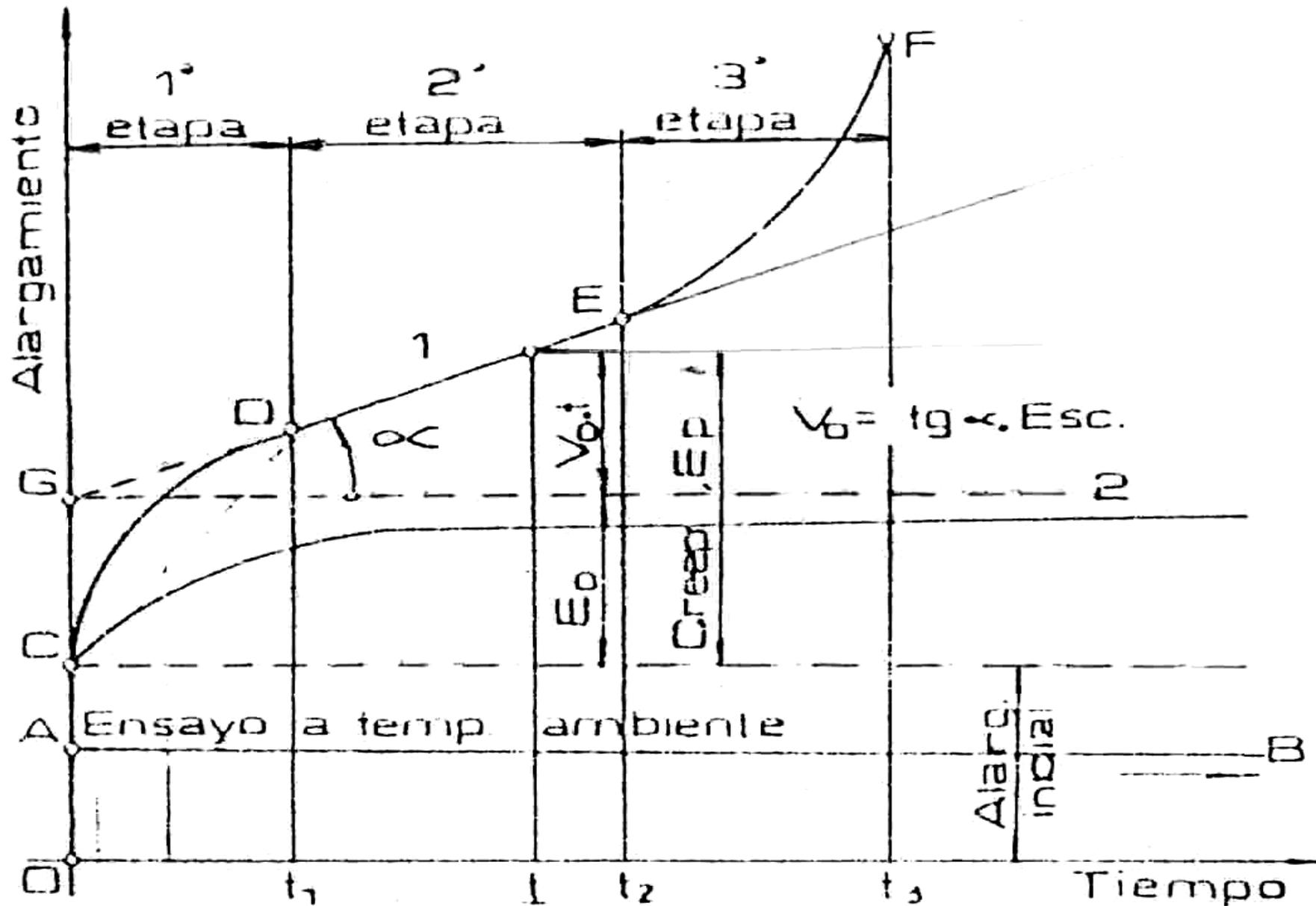
Sobre Calza
o Cuña

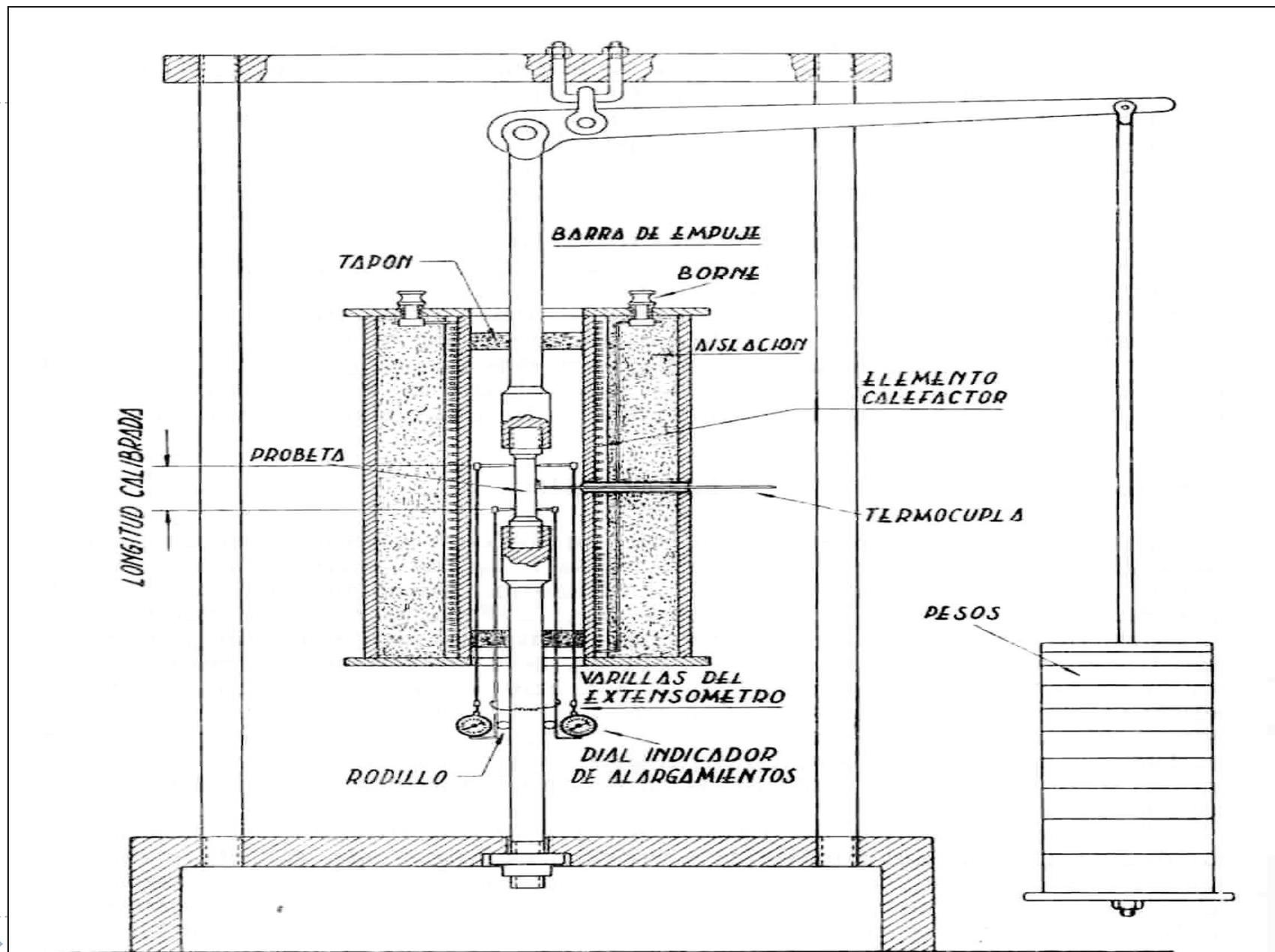


ENSAYO DE FLUENCIA LENTA o CREEP

✓ Objeto:

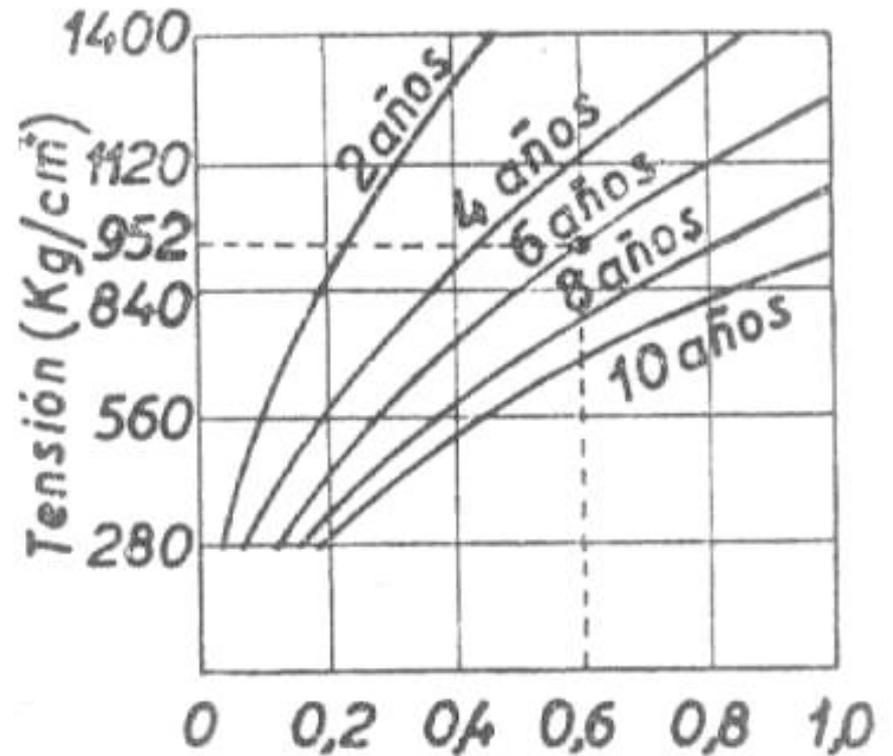
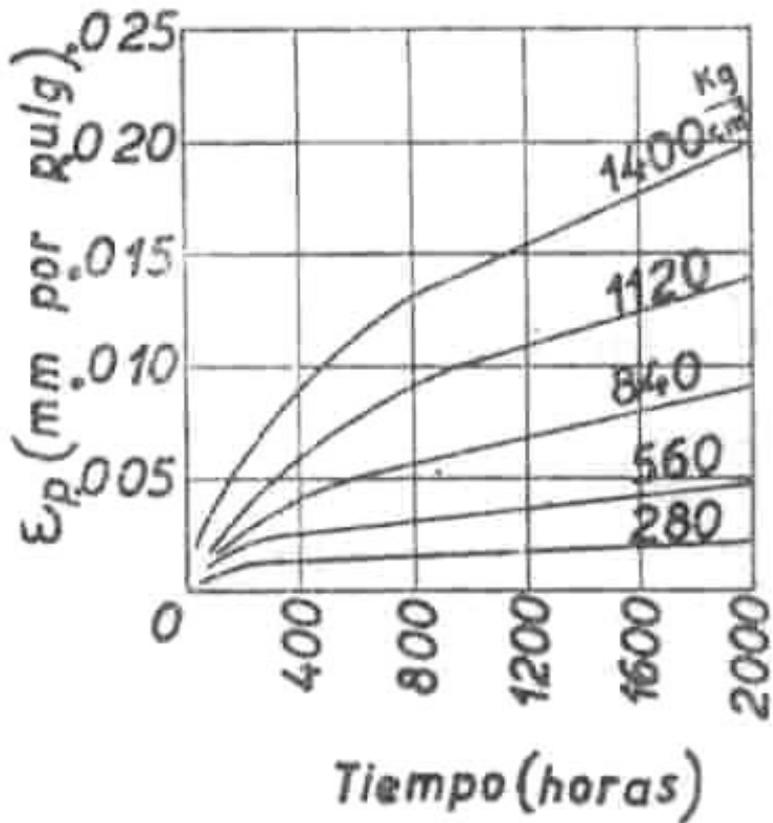
Gráfico Ensayo de Creep



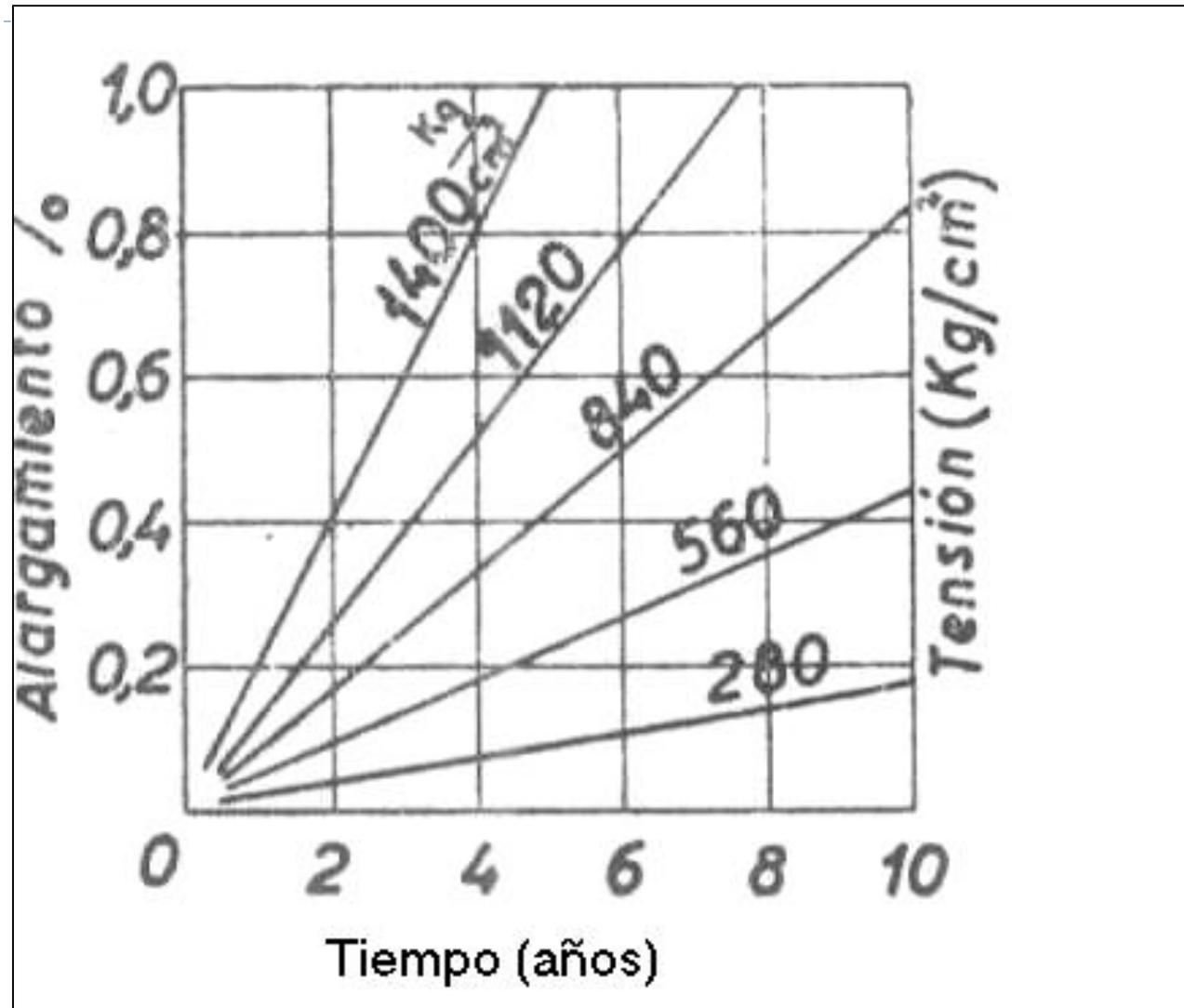


CURVAS DE ENSAYO

TEMP: 450 °C



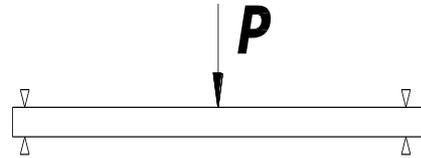
TEMP: 450 °C



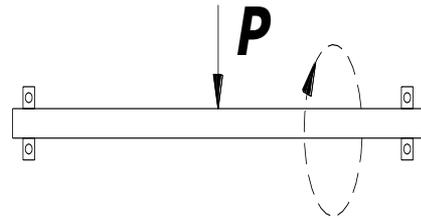
ENSAYO DE FATIGA

✓ Objeto:

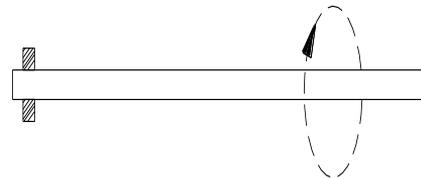
Clasificación de los esfuerzos de fatiga



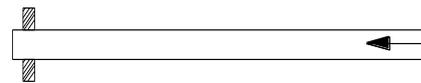
Flexión lateral



Flexión rotativa



Torsión



Tracción-compresión



Tipos de Solicitaciones

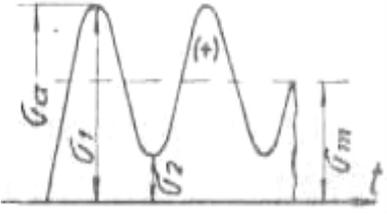
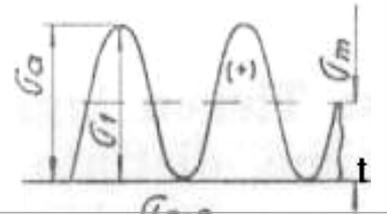
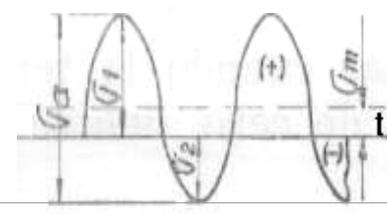
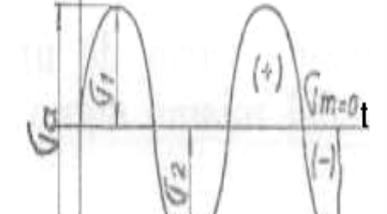
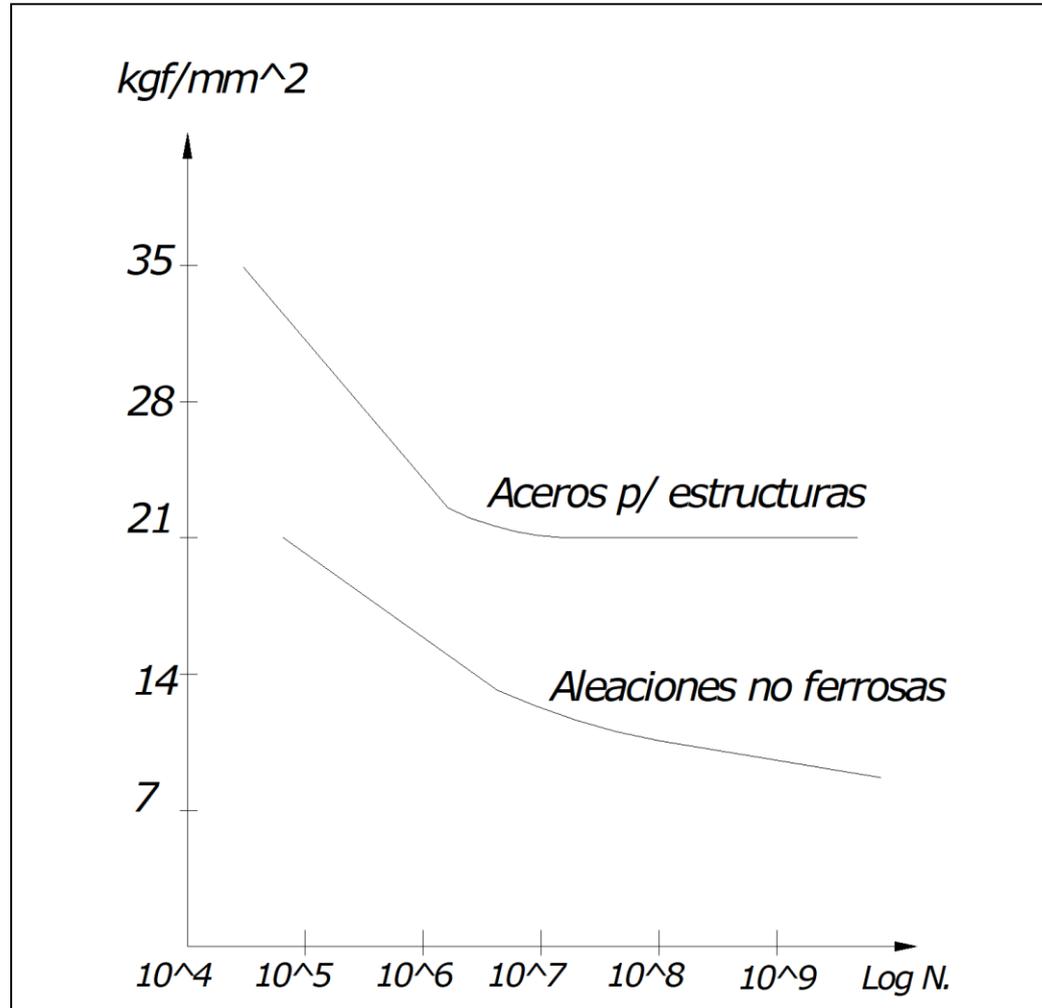
| Solicitaciones | Diagrama | Tensión media | Amplitud | Semiampplitud |
|---|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Pulsatorio entre σ_1 y σ_2 |  | $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ | $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ | $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ |
| Pulsatorio entre 0 y σ_2 (intermitente) |  | $\sigma_1/2$ | σ_1 | $\sigma_1/2$ |
| Alternativo Asimétrico entre σ_1 y σ_2 $ \sigma_1 > \sigma_2 $ |  | $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ | $(\sigma_1 + \sigma_2)$ | $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ |
| Alternativo simétrico $ \sigma_1 > \sigma_2 $ |  | 0 | $2 \cdot \sigma_1$ | σ_1 |



Diagrama de Wohler



Máquina de ensayo/Probetas

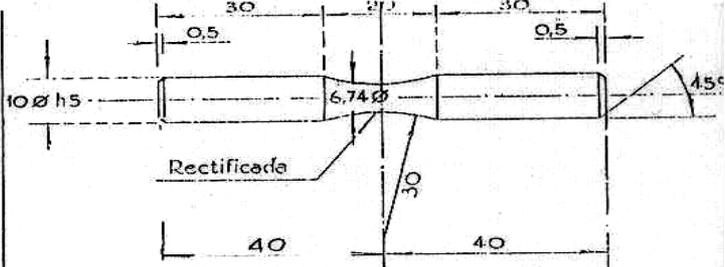
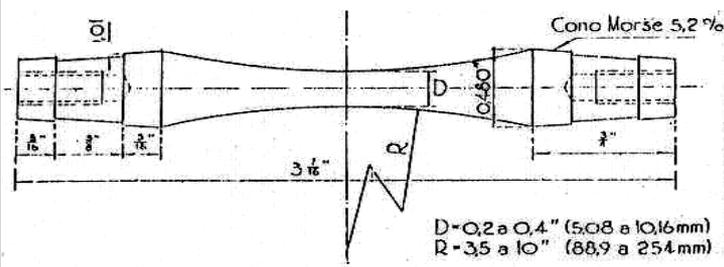
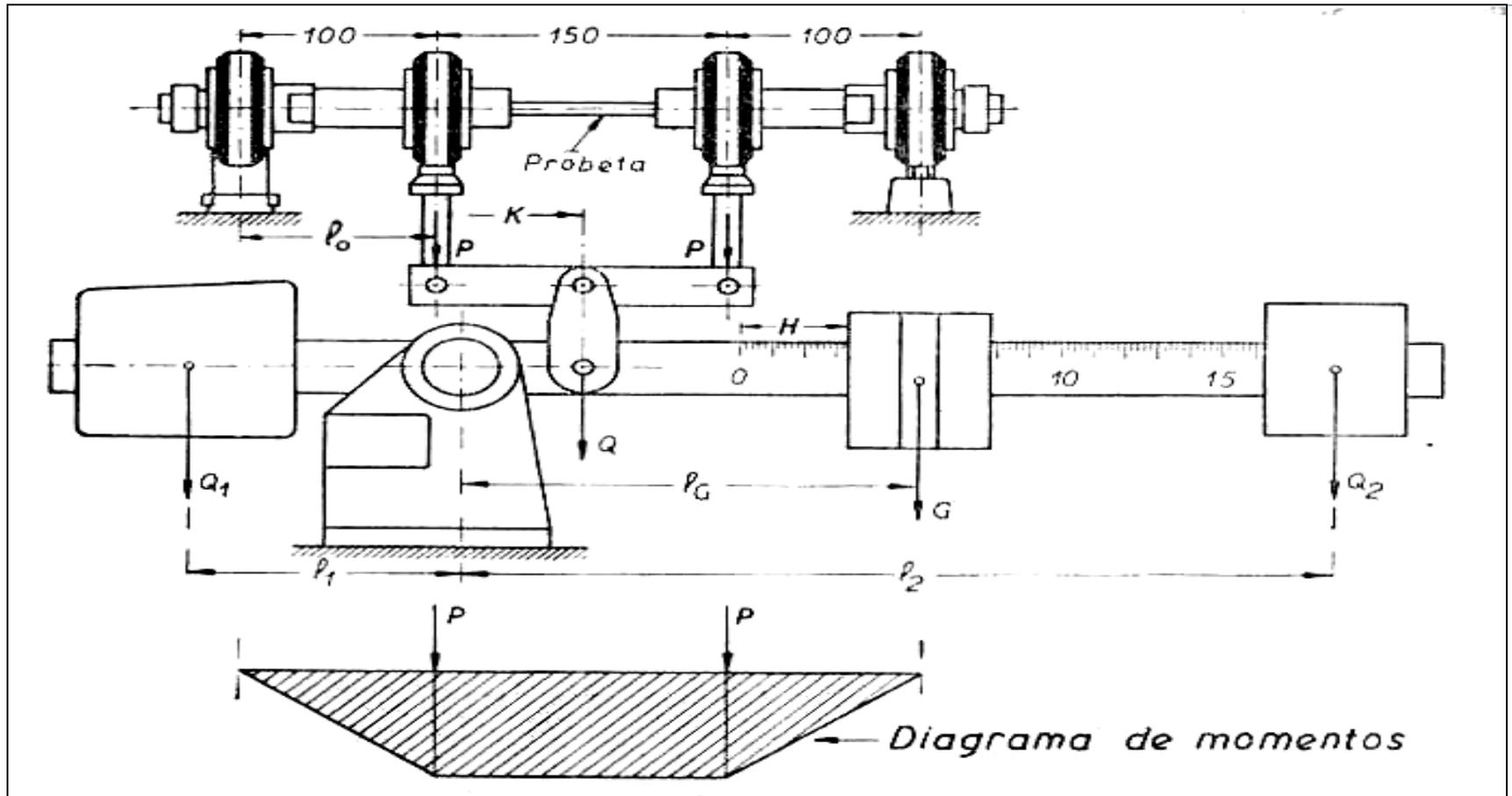
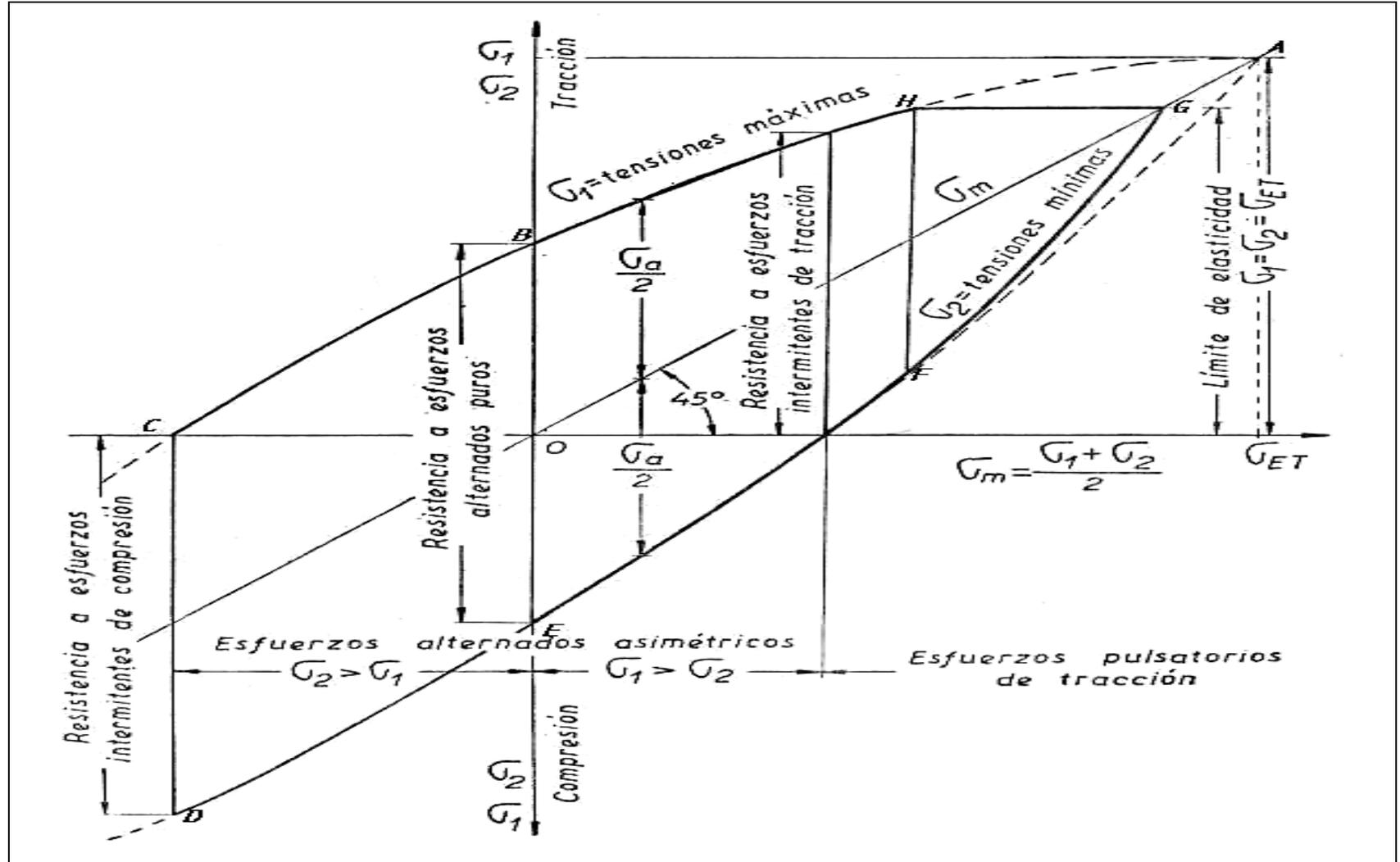
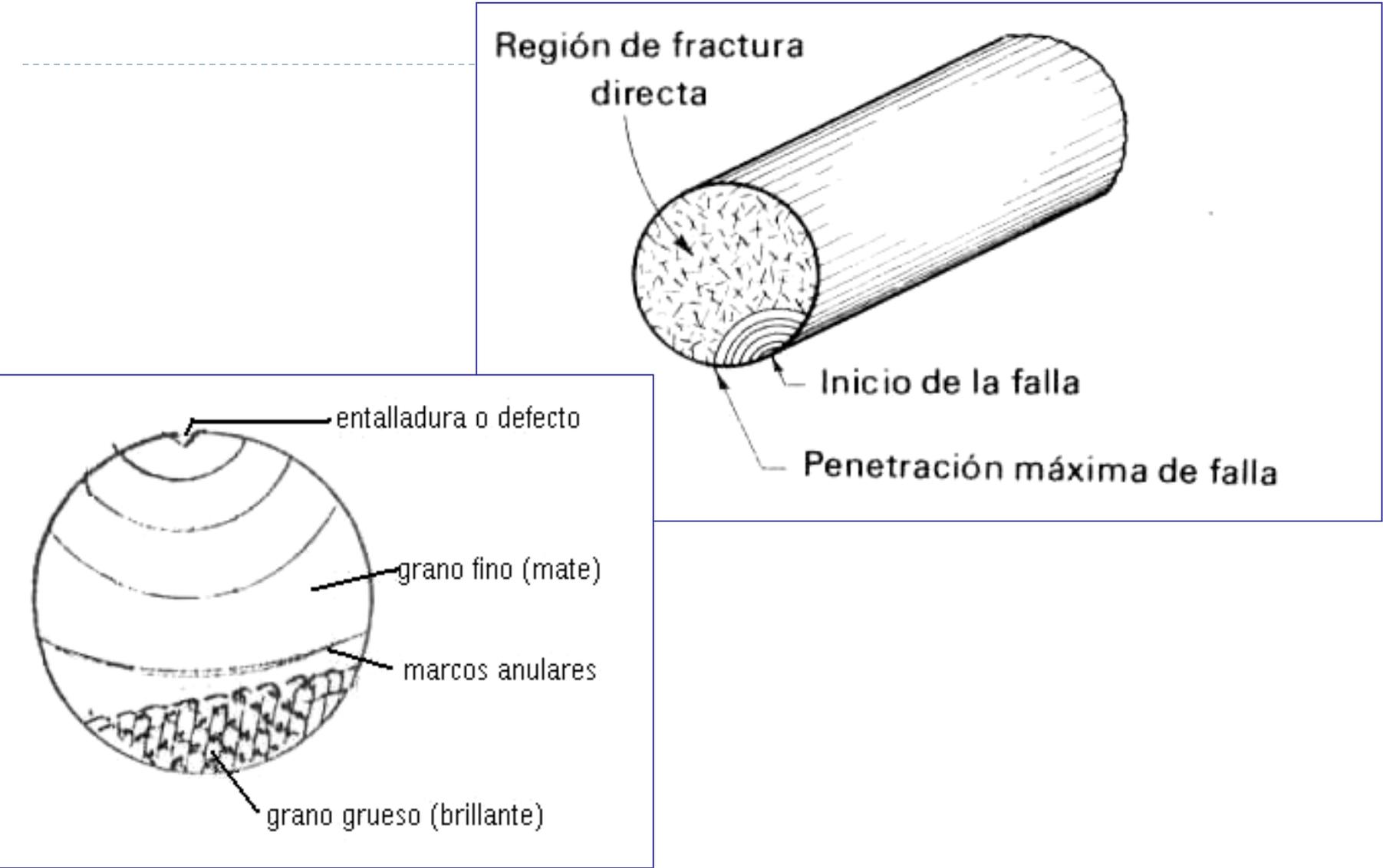


Diagrama de Smith



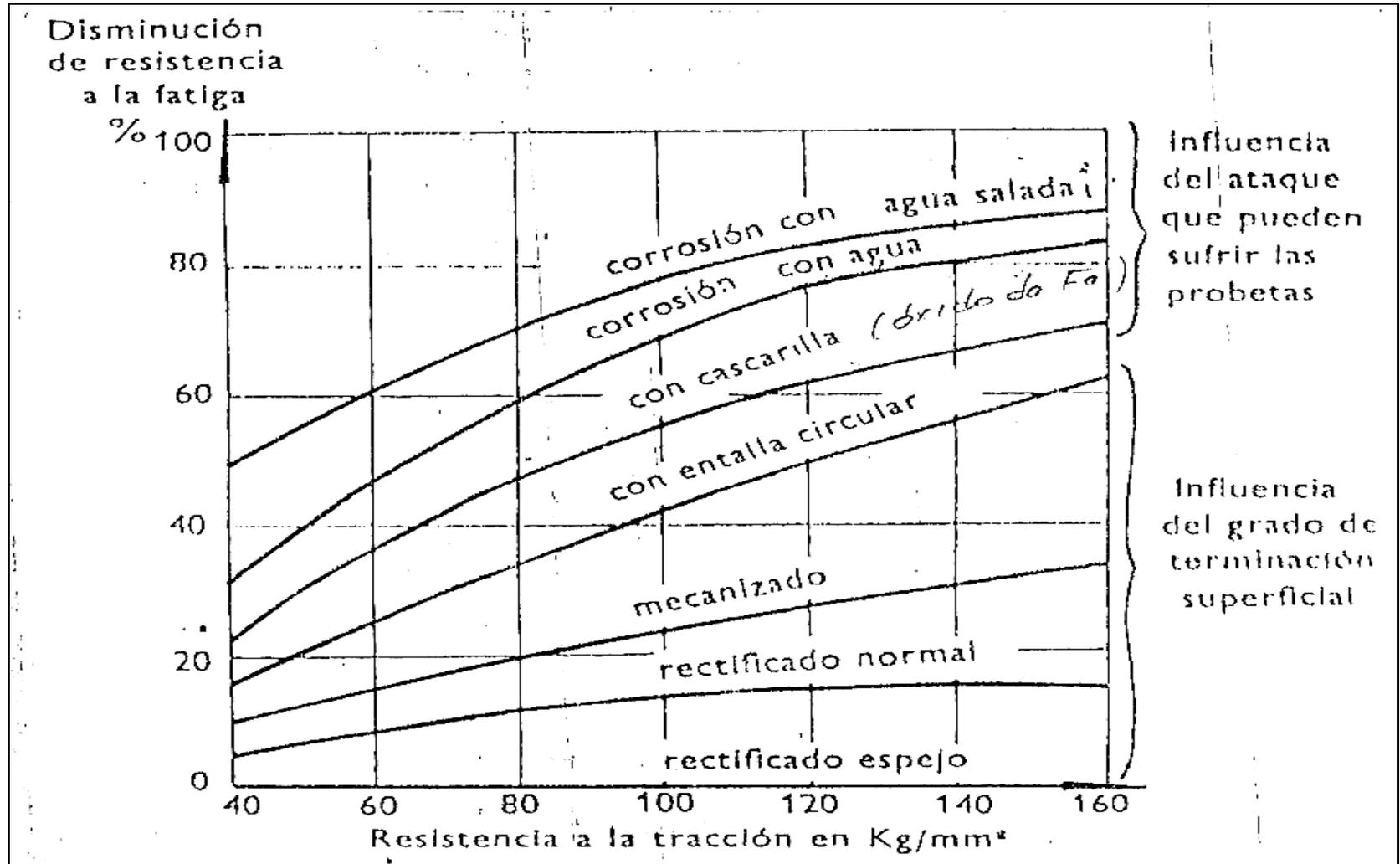
Aspecto de la fractura por fatiga



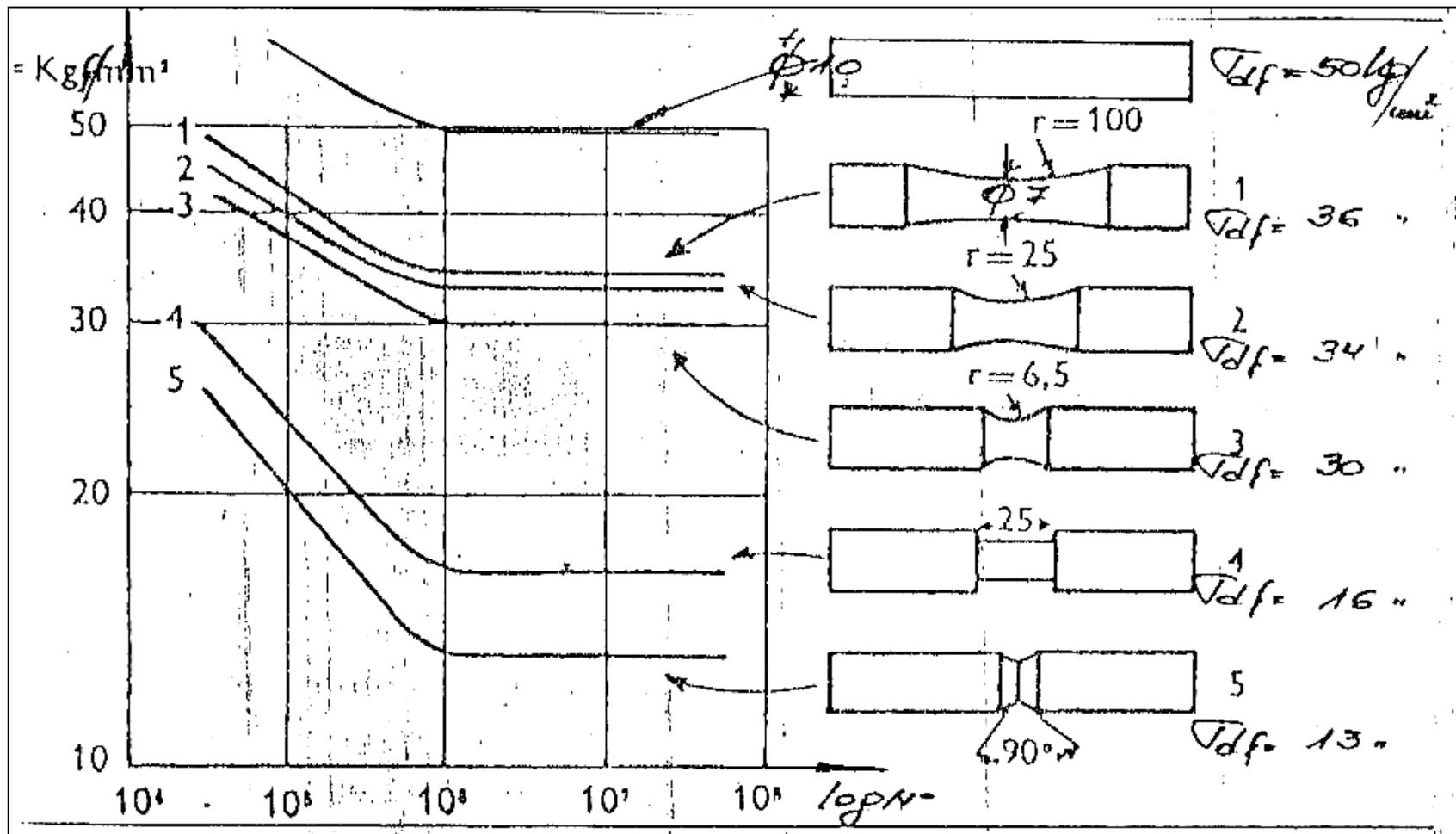
Efectos que varían la resistencia de Fatiga

- ✚ Tratamiento térmico
- ✚ Acabado superficial
- ✚ Trabajado previo
- ✚ Tamaño
- ✚ Entalladuras
- ✚ Corrosión

Corrosión



Entalladuras



DUREZA

✓ Objeto:

Determinar la resistencia de un material a la deformación plástica localizada.

Determinación

✚ Escala de Mohs: MÉTODO CUALITATIVO

| <i>Número de la escala de Mohs</i> | <i>Material</i> |
|------------------------------------|-----------------|
| 1 | talco |
| 2 | sal gema, yeso |
| 3 | calcita |
| 4 | fluorita |
| 5 | apatita |
| 6 | feldespato |
| 7 | cuarzo |
| 8 | topacio |
| 9 | corindón |
| 10 | diamante |



✚ TÉCNICAS CUANTITATIVAS

- ✓ ~~Basadas en un pequeño penetrador forzado sobre una superficie del material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga.~~
- ✓ **Se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, lo cual se relaciona con un número de dureza:**

“Cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella, y menor es el número de dureza.”

Métodos

Ensayo de Dureza Rockwell

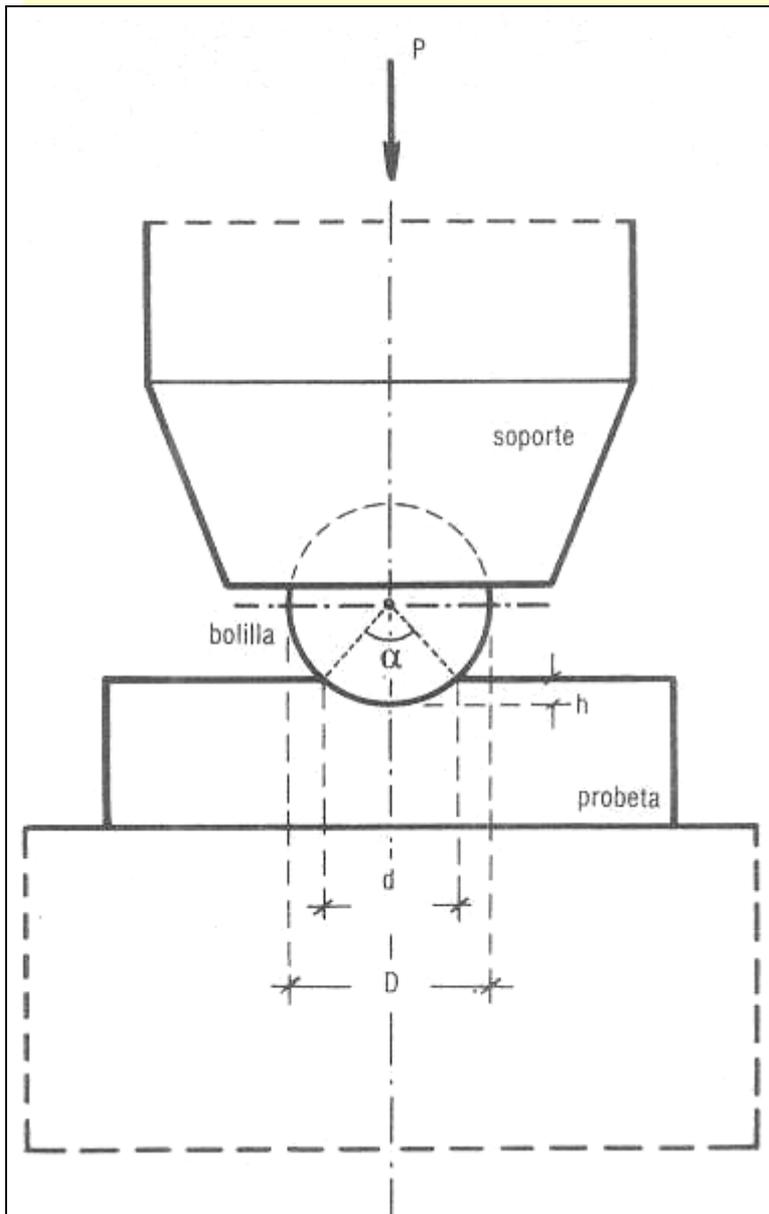
Ensayo de Dureza Brinell

Ensayo de Dureza Vickers

Ensayo de Dureza Knoop



✚ MÉTODO DE ENSAYO DE DUREZA BRINELL



| Diámetro de la bolilla D (mm) | Carga F (kg) | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|----------|---------|-----------|------------|-----------|
| | $30 D^2$ | $10 D^2$ | $5 D^2$ | $2,5 D^2$ | $1,25 D^2$ | $0,5 D^2$ |
| 10 | 3 000 | 1 000 | 500 | 250 | 250 | 125 |
| 5 | 750 | 250 | 125 | 62,5 | 31,2 | 12,5 |
| 2,5 | 187,5 | 62,5 | 31,2 | 15,6 | 7,8 | 3,1 |

| Materiales metálicos | Carga (kg) |
|---|----------------------|
| Aceros y fundiciones | $30 D^2$ |
| Aleaciones de cobre o de aluminio | $10 D^2$ |
| Cobre y aluminio | $5 D^2$ |
| Plomo, estaño y aleaciones | $2,5; 1,25; 0,5 D^2$ |

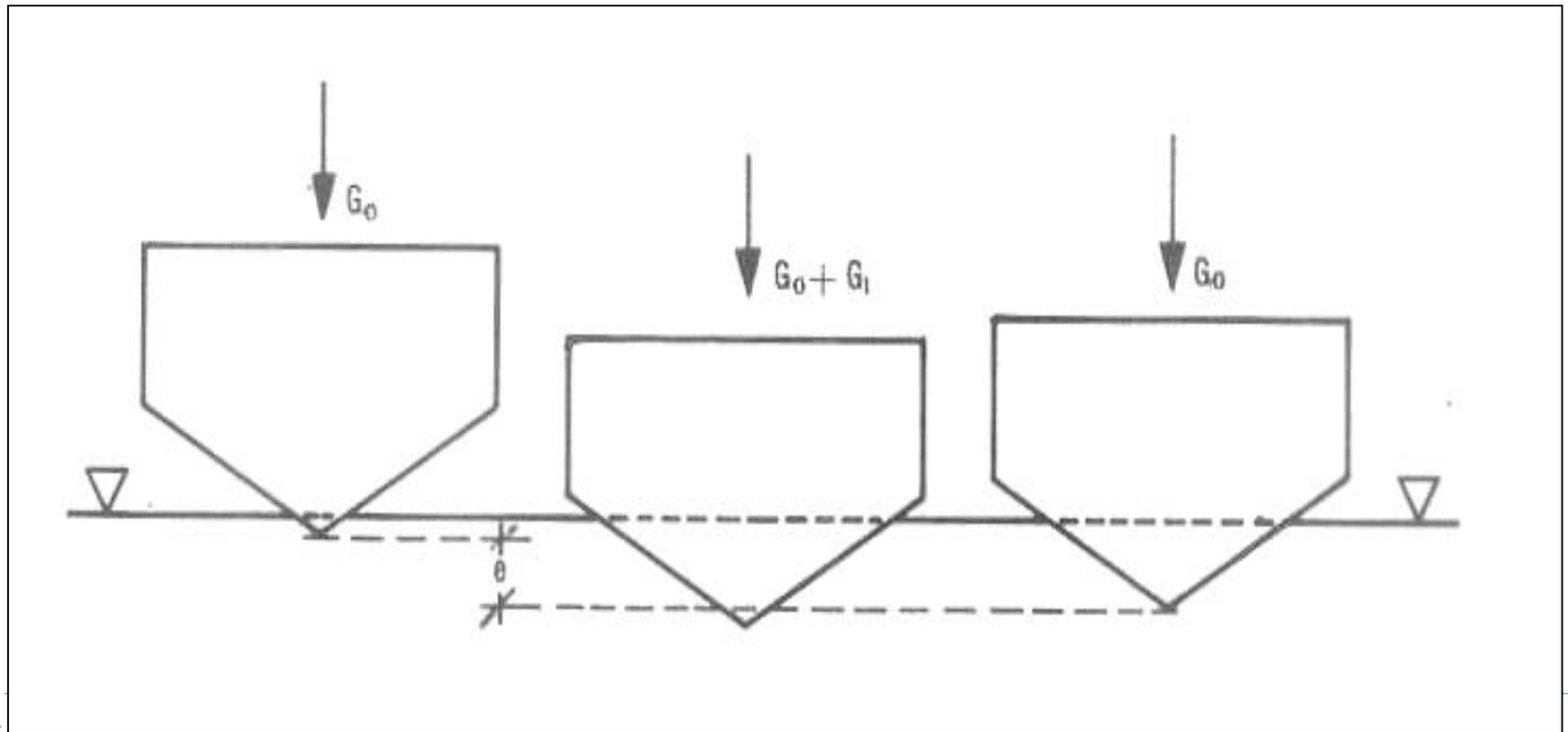
$$HB = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi D h}$$

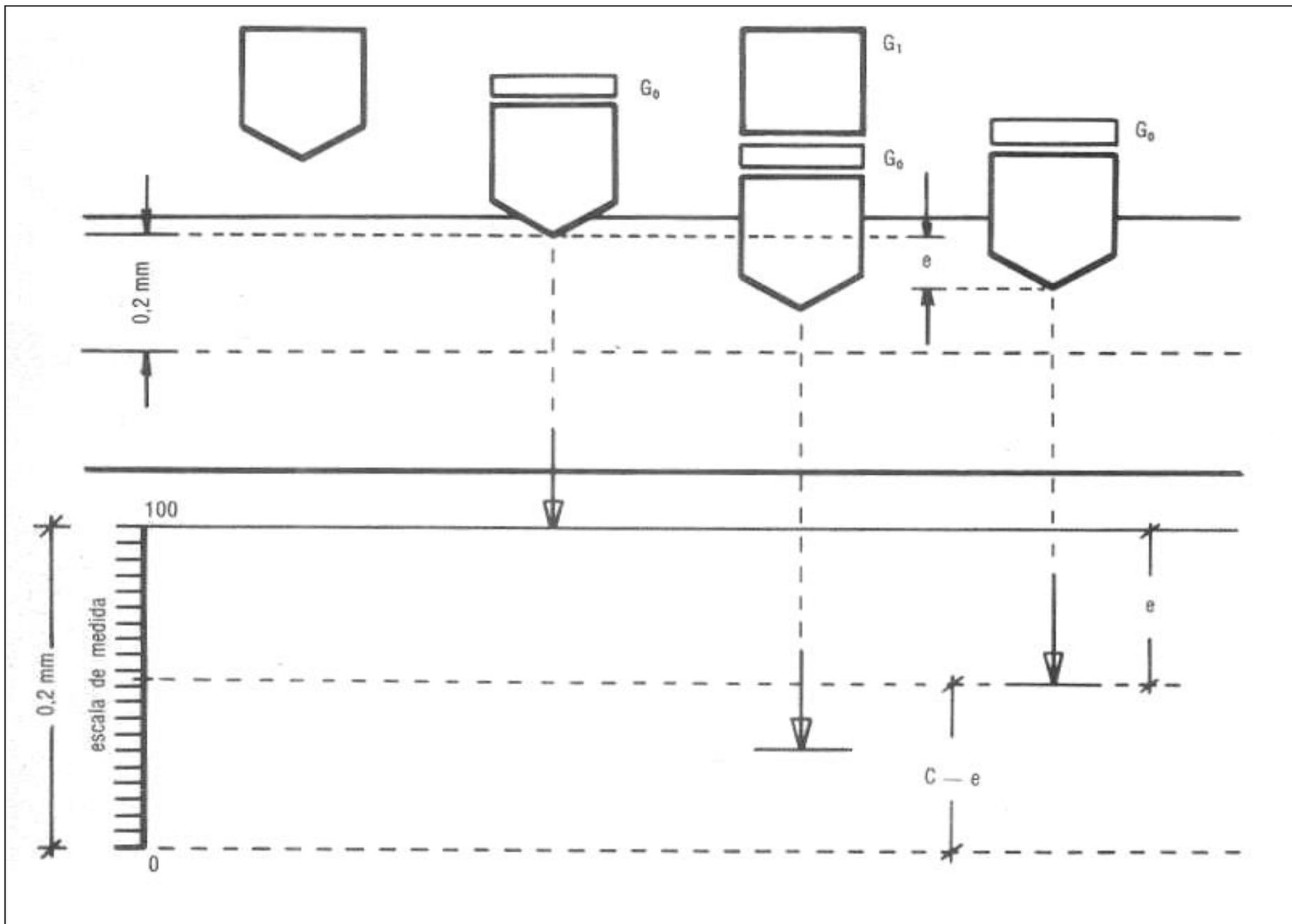
$$h = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

+ MÉTODO DE ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL

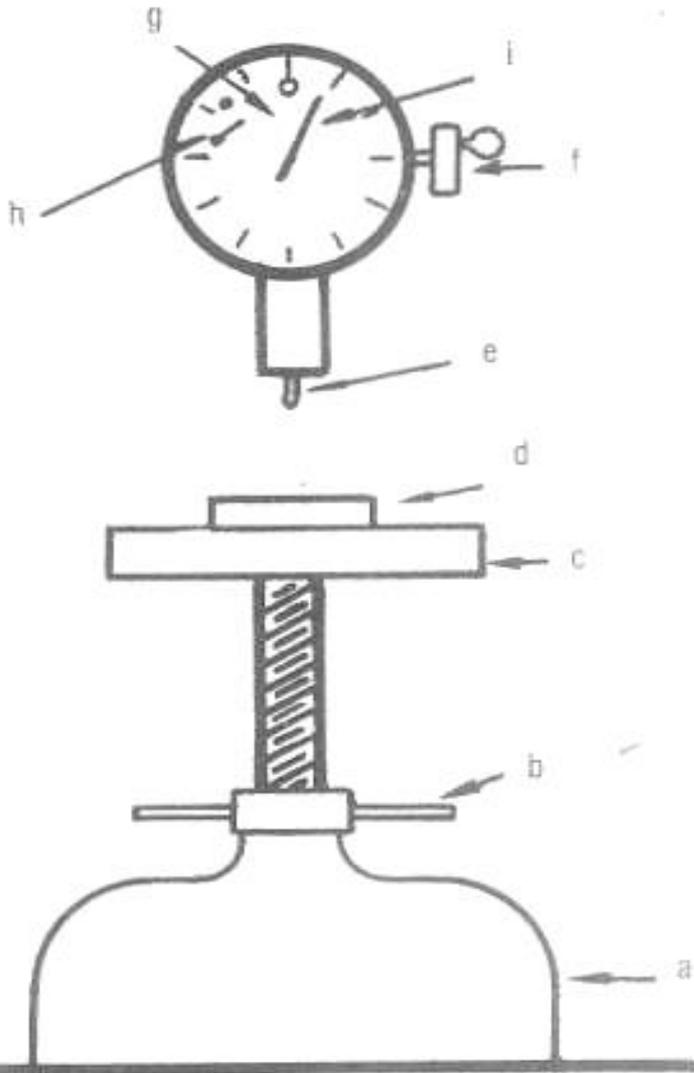
Rockwell Normal: Escalas A, B, C, D, E, F, H. Unidad del incremento de penetración $e = 0,002 \text{ mm}$

Rockwell Superficial: Escalas N, T, W, X e Y. Unidad del incremento de penetración $e = 0,001 \text{ mm}$. Pad. 12-27-42kg



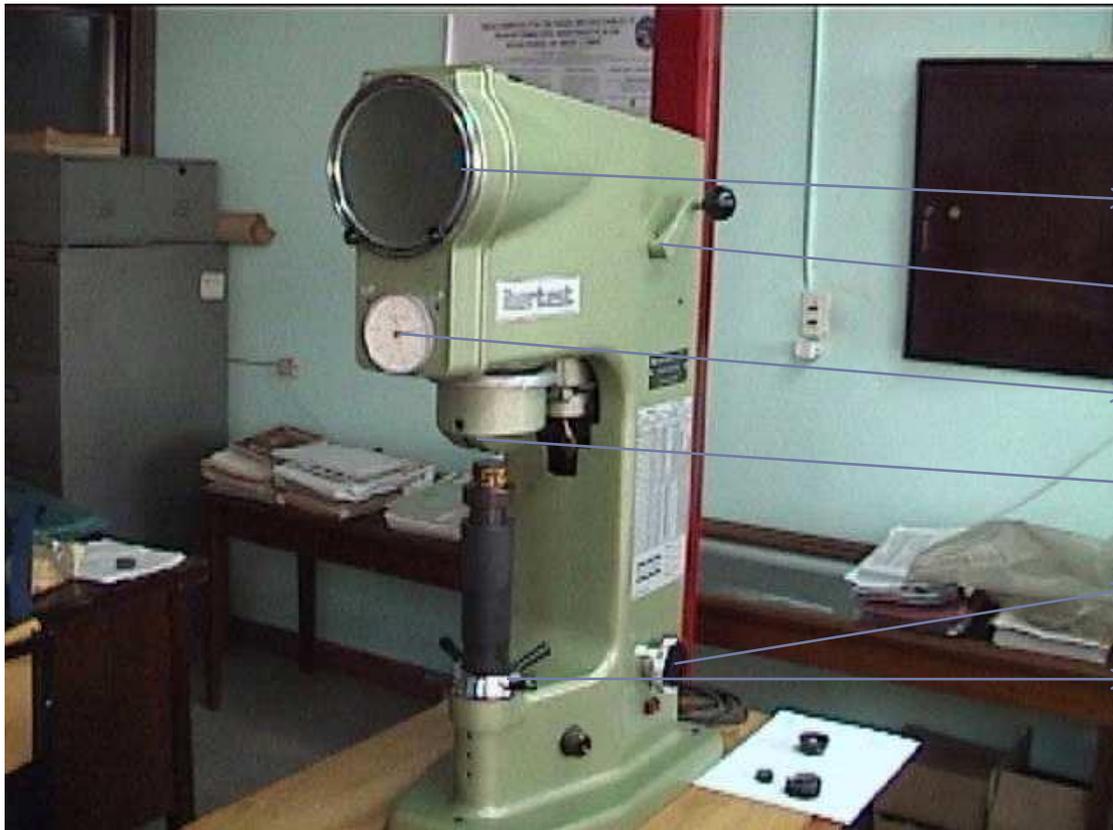


Máquinas para el ensayo Rockwell



- a) base,
- b) volante para subir el plato,
- c) apoyo de la probeta,
- d) probeta,
- e) penetrador,
- f) manivela para aplicar la carga,
- g) dial que indica directamente la cifra de dureza,
- h) aguja que marca la carga inicial,
- i) aguja que indica la dureza.

Durómetro



→ Visor Dureza Brinell y Vickers

→ Palanca de Carga

→ Indicador de Dureza

→ Penetrador

→ Selección de carga

→ Tornillo de elevación





Caja con accesorios para determinación de Dureza:
Penetradores, placas patrones, llaves y destornillador
y plato para probetas cilíndricas.

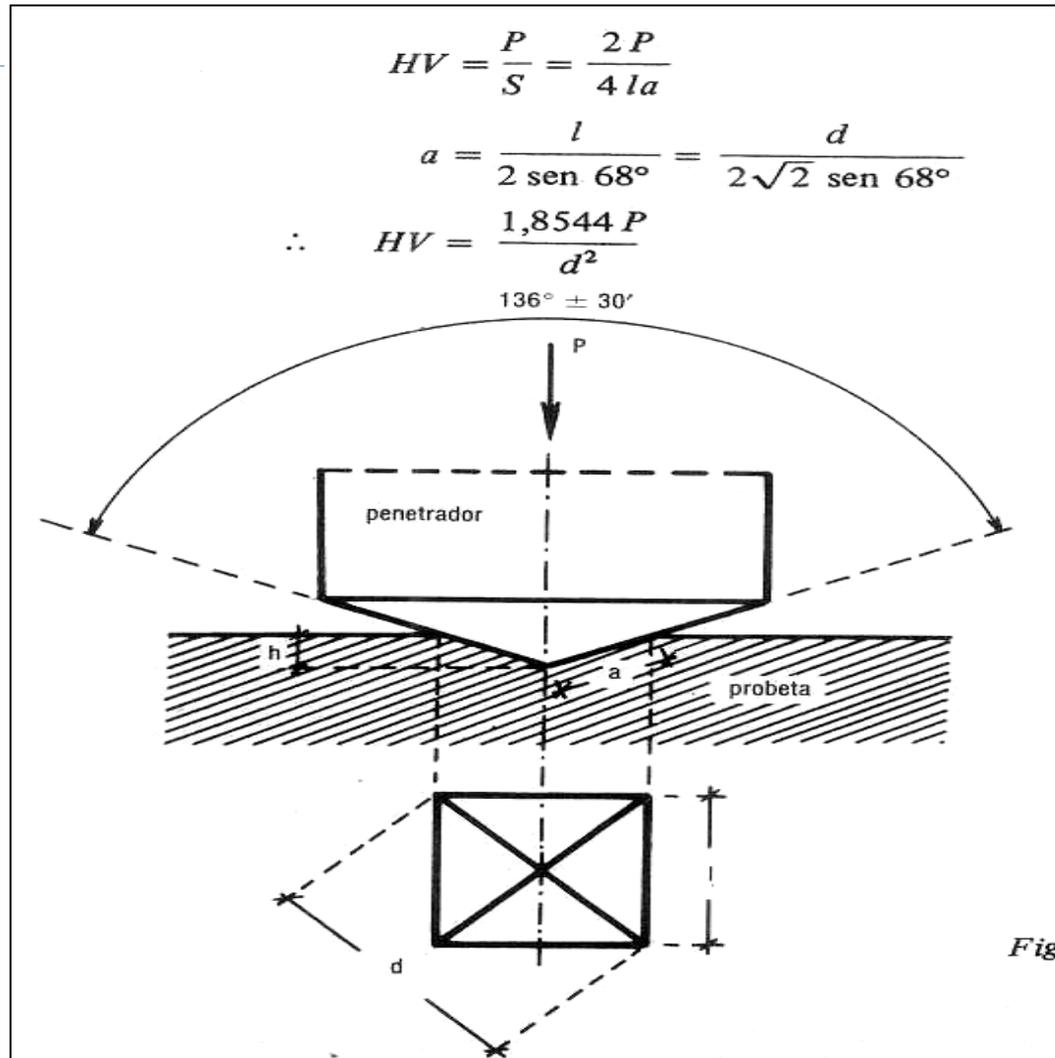
CUADRO 7.11. Dureza Rockwell A B C D E F G H
Dureza normal

| Tipo | Penetrador | Carga (daN) | | | Material |
|------|------------------|-------------|-----|-------|---|
| | | G_0 | G | G_1 | |
| A | cónico | 10 | 50 | 60 | aceros duros de poco espesor y extremadamente duros |
| B | esférico (1/16") | 10 | 90 | 100 | aceros de bajo carbono, bronces en general para $HR_B < 100$ |
| C | cónico | 10 | 140 | 150 | acero duro, acero templado, acero de aleación, en general $HR_C > 20$ |
| D | cónico | 10 | 90 | 100 | acero duro, acero templado, acero de aleación, materiales con $HR_C > 20$ |
| E | esférico (1/8") | 10 | 90 | 100 | metales blandos, metales antifricción |
| F | esférico (1/16") | 10 | 50 | 60 | chapas de metales blandos |
| G | esférico (1/16") | 10 | 140 | 150 | aceros de bajo % carbono, bronces fosforosos, etc. |
| H | esférico (1/8") | 10 | 50 | 60 | materiales blandos |

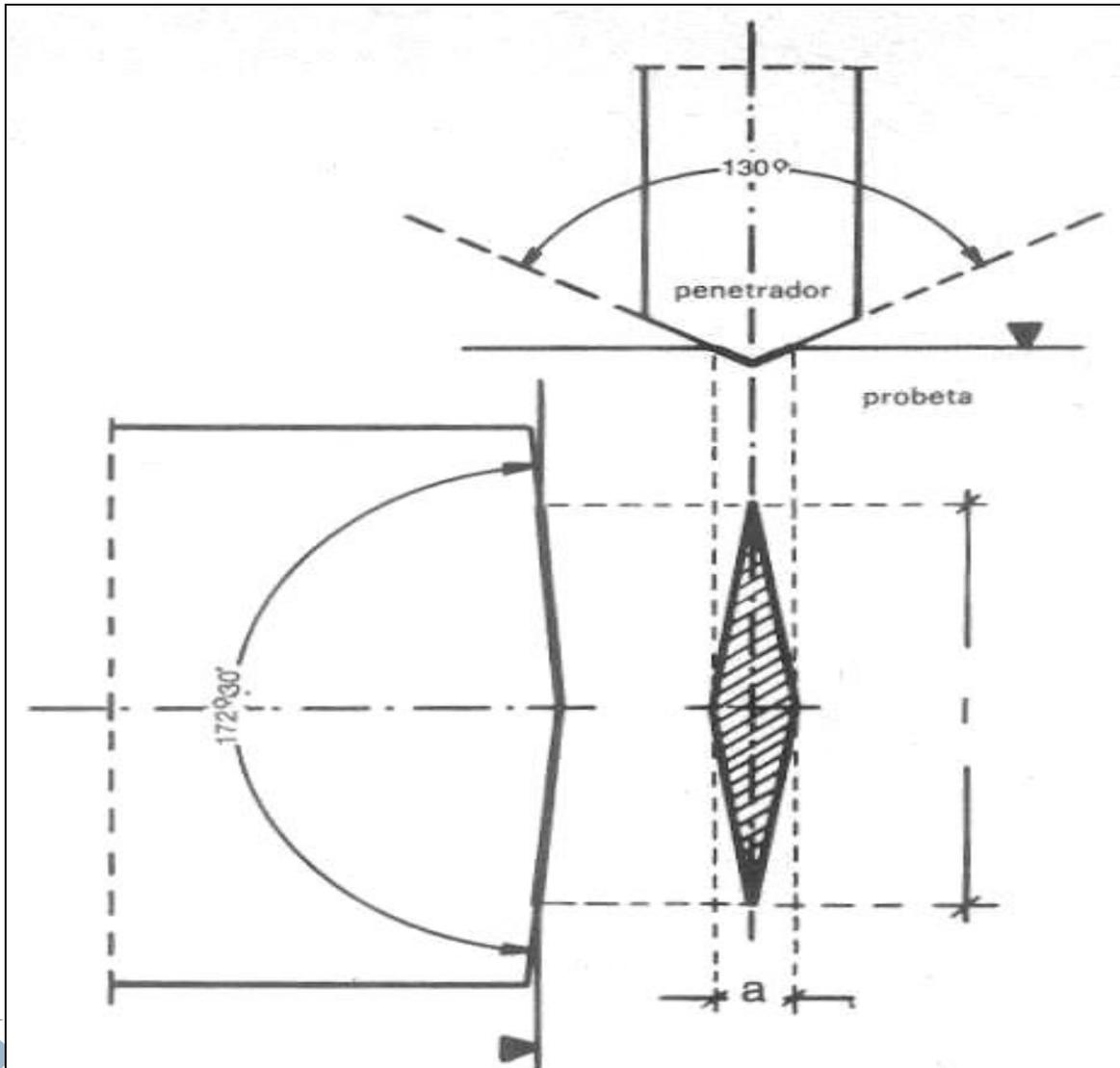
Dureza Rockwell N T W X y
Dureza superficial

| | | | | | |
|---|----------|---|----------|----------|---|
| N | cónico | 3 | 12.27.42 | 15.30.45 | } acero endurecido, carburo de tungsteno u otras aleaciones duras } materiales relativamente blandos, latones, bronces, aceros blandos, u otros materiales similares |
| T | esférico | 3 | 12.27.42 | 15.30.45 | |
| W | esférico | 3 | 12.27.42 | 15.30.45 | |
| X | esférico | 3 | 12.27.42 | 15.30.45 | |
| Y | esférico | 3 | 12.27.42 | 15.30.45 | |

+ MÉTODO DE ENSAYO DE DUREZA VICKERS



+ MÉTODO DE ENSAYO DE DUREZA KNOOP



$$F = a \cdot l/2 = 0,07028$$

$$HK = 14,230 \ P/l^2$$

Conversion de la dureza

