Caracterización de Materiales

Tema 1. Caracterización en tracción

Isidro Carrascal Vaquero

Soraya Diego Cavia

José Antonio Casado del Prado

Diego Ferreño Blanco

Jesús Setién Marquínez

DPTO. DE CIENCIA E INGENIERÍA
DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES

Este tema se publica bajo Licencia:
Creative Commons BY-NC-SA 4.0

Comportamiento Mecánico. Ensayo de tracción

Índice:

- Introducción
- Equipos
- Probetas
- Operaciones previas
- Ensayo
- Curva tensión-deformación
- Zona elástica
- Zona plástica
- Determinación de parámetros
- Diagrama de variables reales

ENSAYO DE TRACCIÓN: Introducción

- Forma sencilla de descubrir el comportamiento mecánico de un material
- Es uno de los ensayos más utilizado para la caracterización mecánica de un determinado material
- La información obtenida a partir de este ensayo es muy completa, siendo posible determinar:
  - parámetros elásticos (módulo de Young)
  - parámetros resistentes (límite elástico, resistencia mecánica)
  - parámetros de ductilidad (deformación bajo carga máxima, alargamiento en rotura, reducción de área).
- También es posible sacar información del aspecto que presentan las superficies de rotura tras el ensayo (análisis fractográfico)
- **OBJETIVO → RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN**

ENSAYO DE TRACCIÓN: Introducción

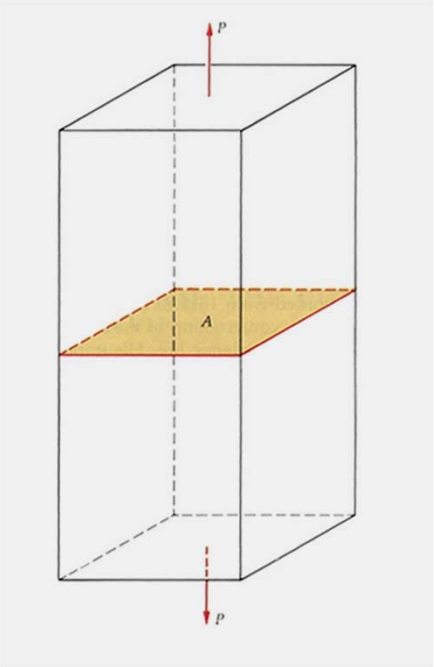
TENSIÓN - DEFORMACIÓN

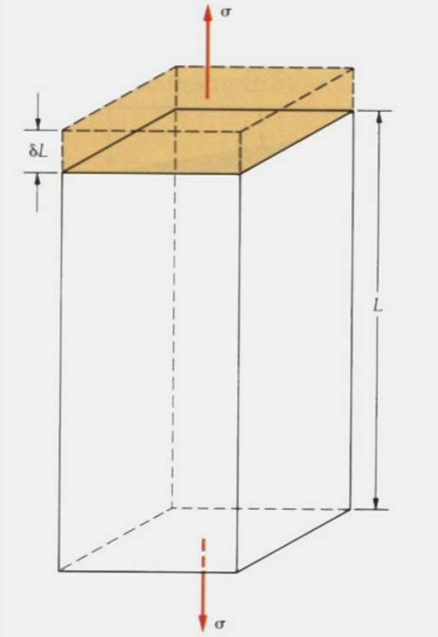
Varíables ingenieriles:

- Tensión: s
- Deformación: e

$$s = \frac{F}{A_0}$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$





ENSAYO DE TRACCIÓN: Equipos

- EQUIPOS: Máquina de ensayo + Equipos de medida (σ y ε)

Servohidraúlica

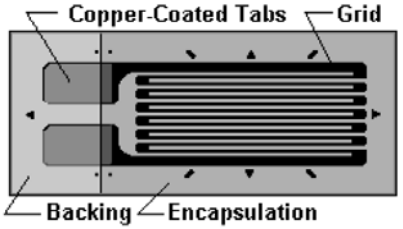
Electromecánica

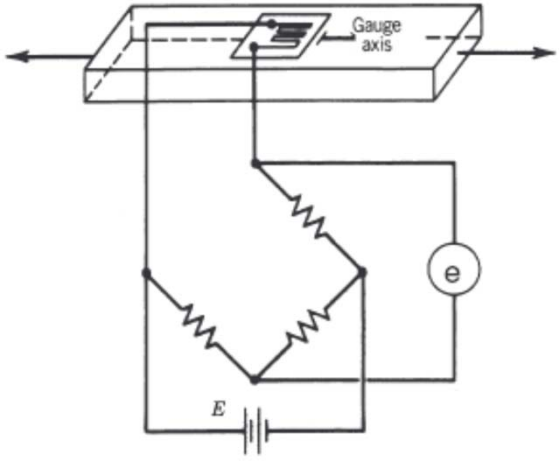
ENSAYO DE TRACCIÓN: equipos

- EQUIPOS: Medida de la deformación
  - Medida directa: **Banda extensométrica**.

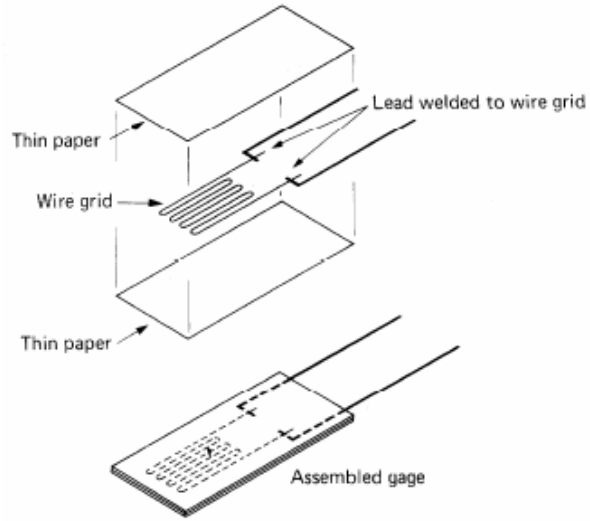
    La resistencia de un conductor eléctrico es función del diámetro, la longitud y la resistividad

$$R = \rho \frac{4l}{\pi D^2}$$





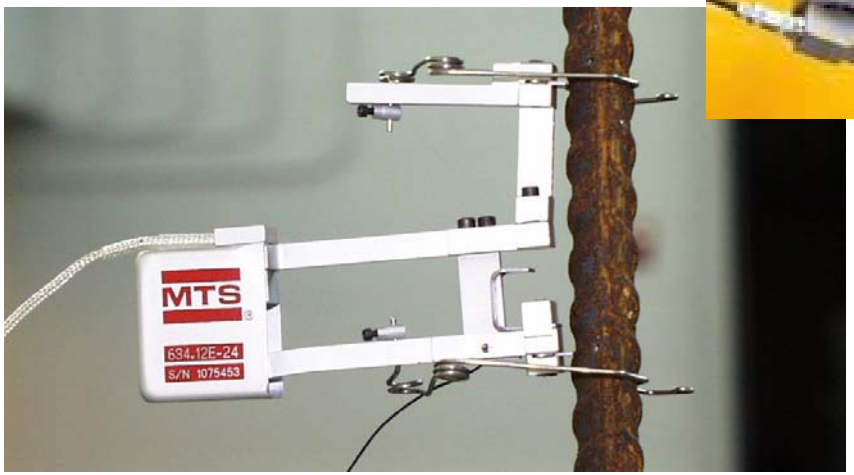
Puente de Wheatstone



Limitación a deformaciones en campo elástico

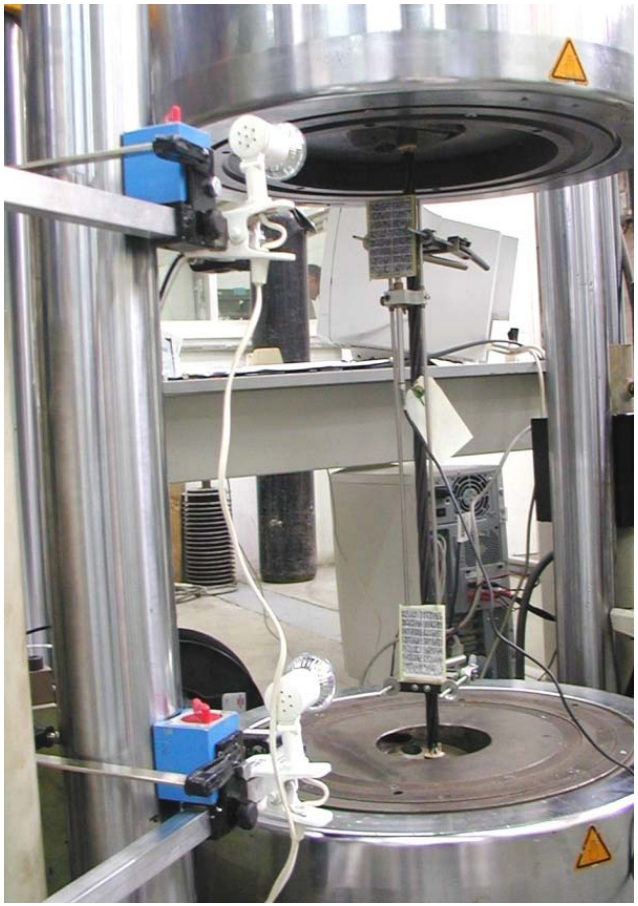
ENSAYO DE TRACCIÓN: equipos

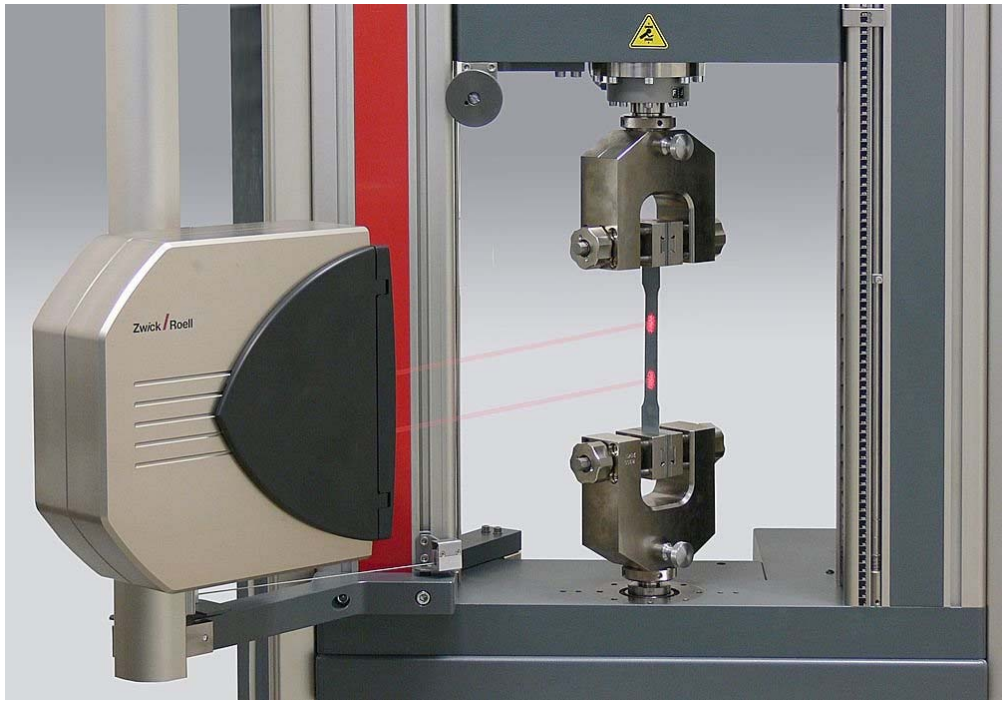
- EQUIPOS: Medida de la deformación → EXTENSOMETRÍA
  - Deformación: ($e = \Delta L/L$)
  - ΔL → **extensómetro**
  - L → calibre, micr…



ENSAYO DE TRACCIÓN: equipos

- EQUIPOS: Medida de la deformación
  - $\Delta L \rightarrow$ **extensómetro**



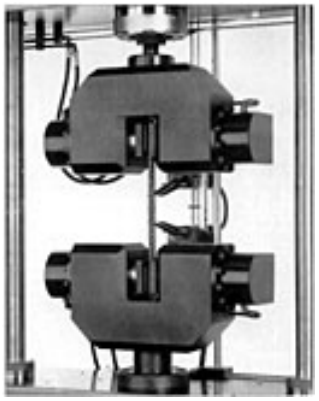


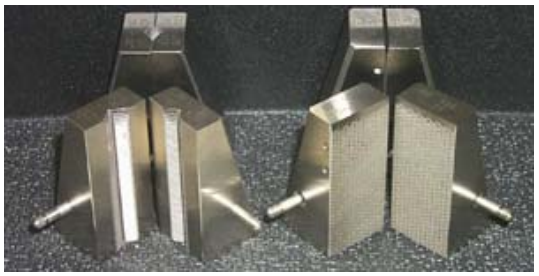
ENSAYO DE TRACCIÓN: equipos

- EQUIPOS: Medida de la tensión
  - Tensión: ($s = F/A_0$);
  - F → **célula de carga**;
  - A → calibre, micrómetro, norma…

ENSAYO DE TRACCIÓN: equipos

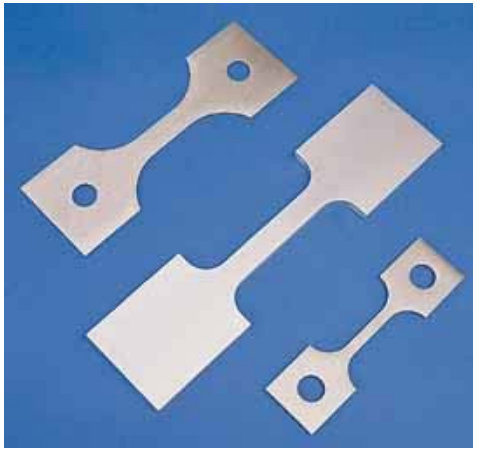
- Sujeción de la probeta a la máquina de ensayo → MORDAZA

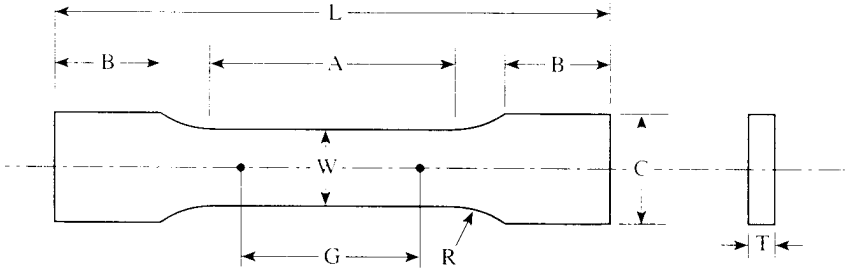




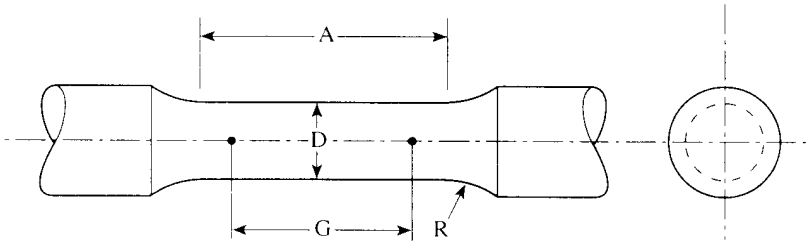
ENSAYO DE TRACCIÓN: muestras

- Mecanizadas: muestra proporcional $\rightarrow L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$ (k = 5.65)





A: FUSTE
B: LONGITUD DE SUJECIÓN EN MORDAZAS
C: ANCHURA DE SUJECIÓN EN MORDAZAS
L: LONGITUD TOTAL
G: BASE DE MEDIDA O LONGITUD CALIBRADA
R: RADIO DE ACUERDO
W: ANCHURA
T: ESPESOR



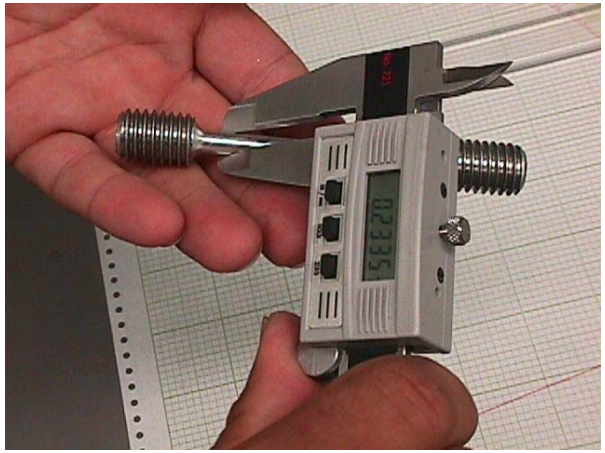
A: FUSTE
D: DIAMETRO
G: BASE DE MEDIDA O LONGITUD CALIBRADA
R: RADIO DE ACUERDO

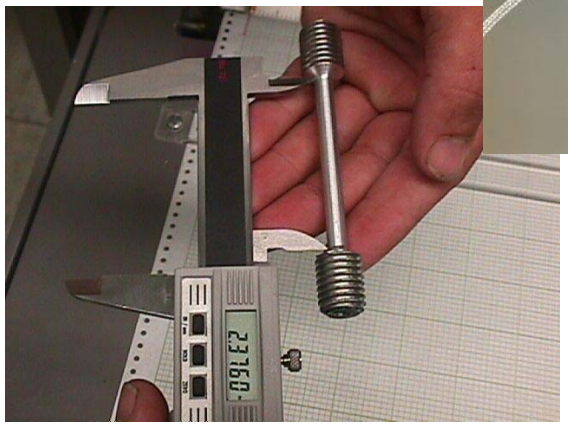
ENSAYO DE TRACCIÓN: muestras

- No mecanizadas (preparación de extremos)
- Tipos: Hilos, barras, secciones, tubos, láminas, planchas, placas…

ENSAYO DE TRACCIÓN: operaciones previas

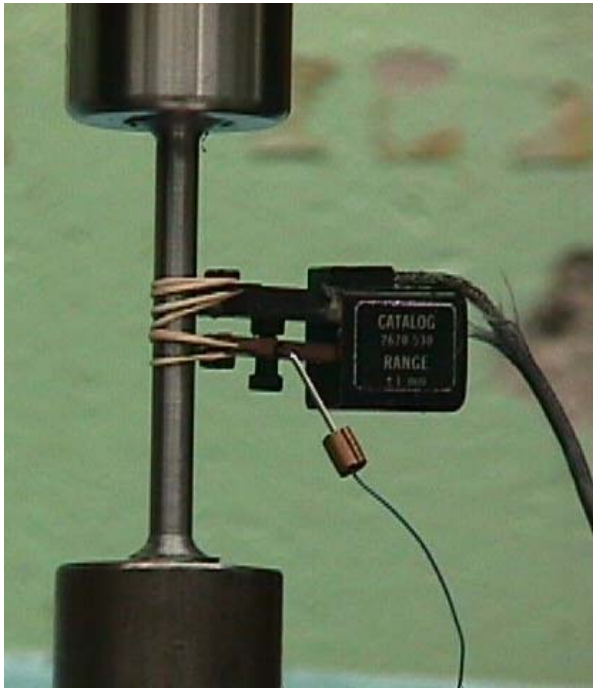
- Parámetros necesarios antes de comenzar el ensayo:
  - Area inicial de la probeta (A_0)
  - Base de medida del extensómetro (L_e)
  - Longitud de calibración inical (L_0)
  - Longitud paralela (L_C)

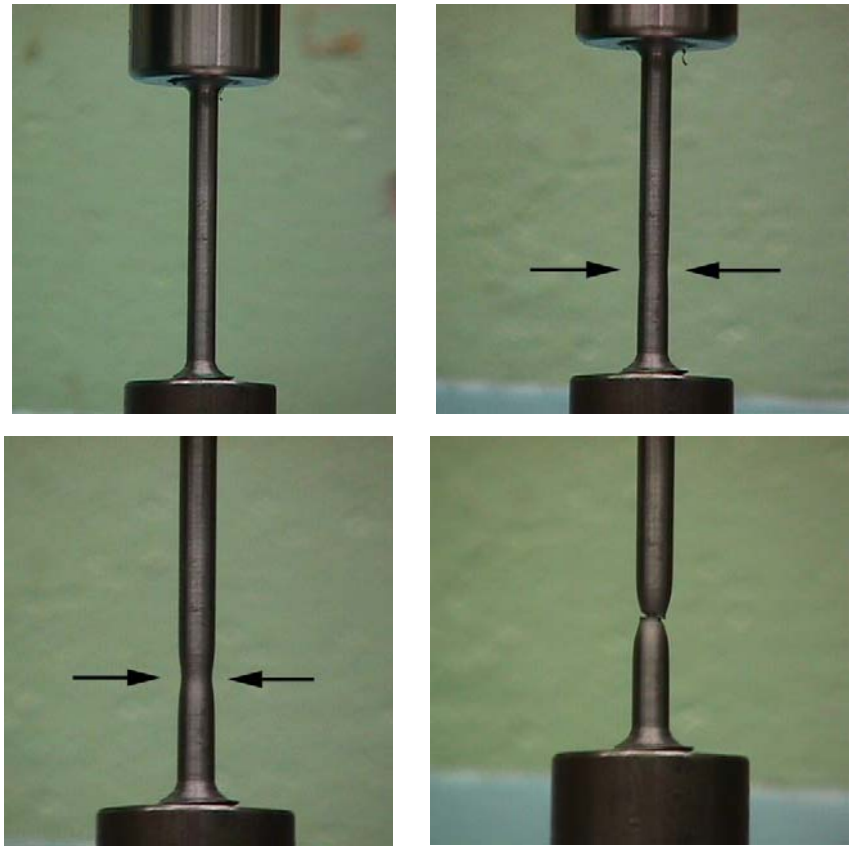




ENSAYO DE TRACCIÓN

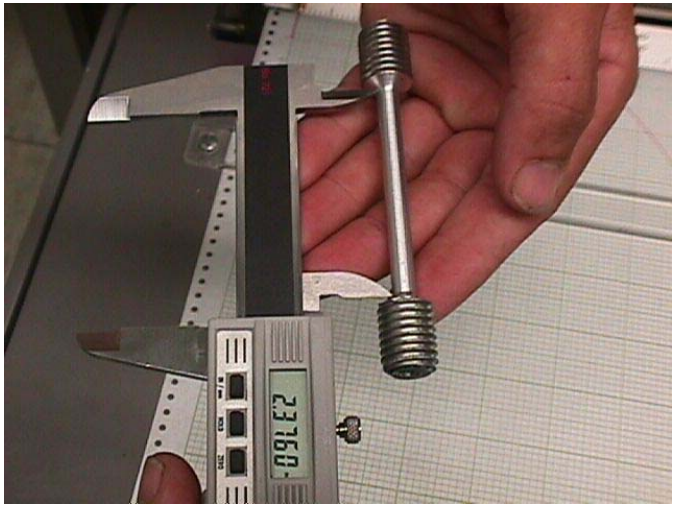
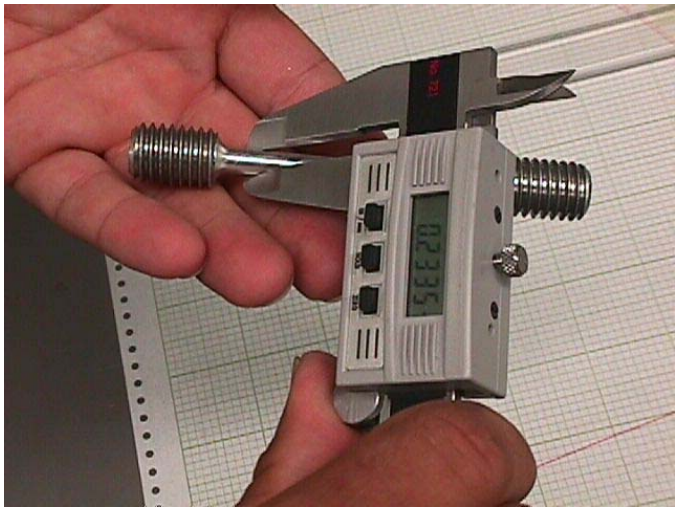
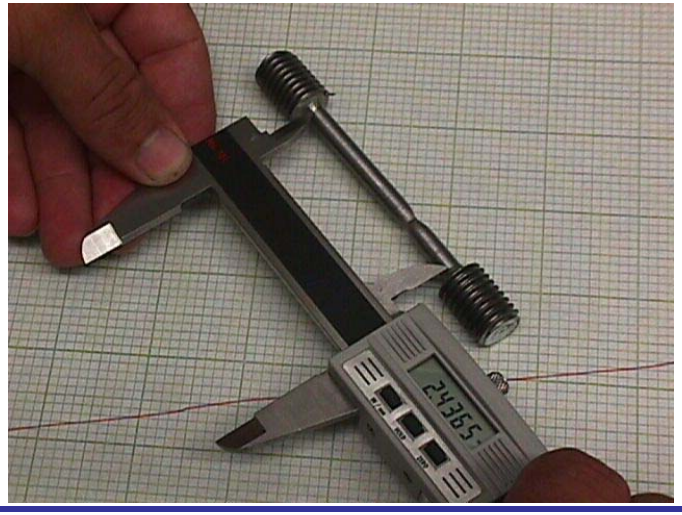
- Realización





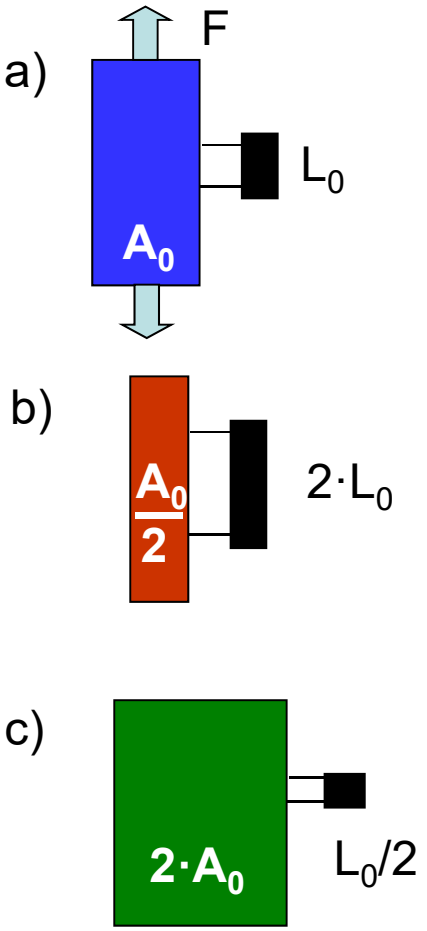
ENSAYO DE TRACCIÓN

- Medidas sobre la probeta rota → Parámetros de ductilidad

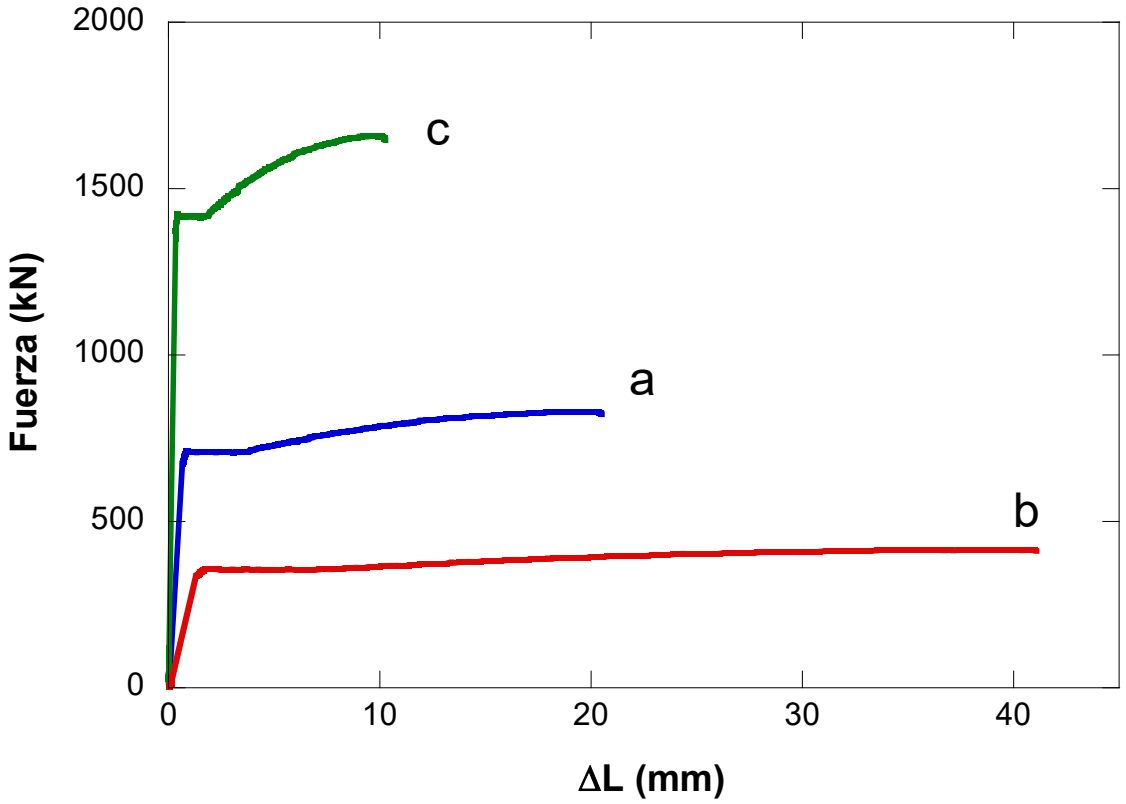




ENSAYO DE TRACCIÓN

Curva F-ΔL



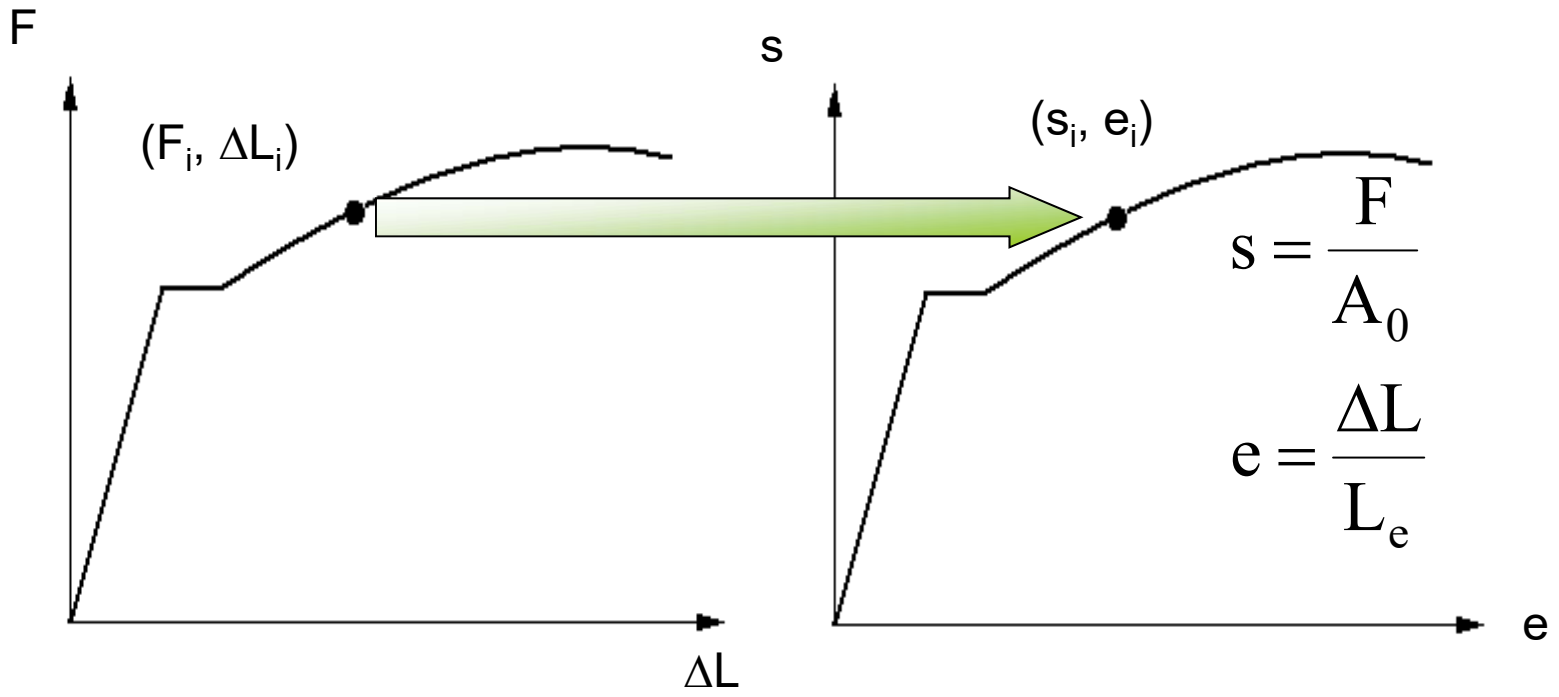
Mismo material



No es una propiedad del material, depende de la geometría y configuración

ENSAYO DE TRACCIÓN

Curva tensión-deformación (ingenieril)



Comportamiento macroestructural.

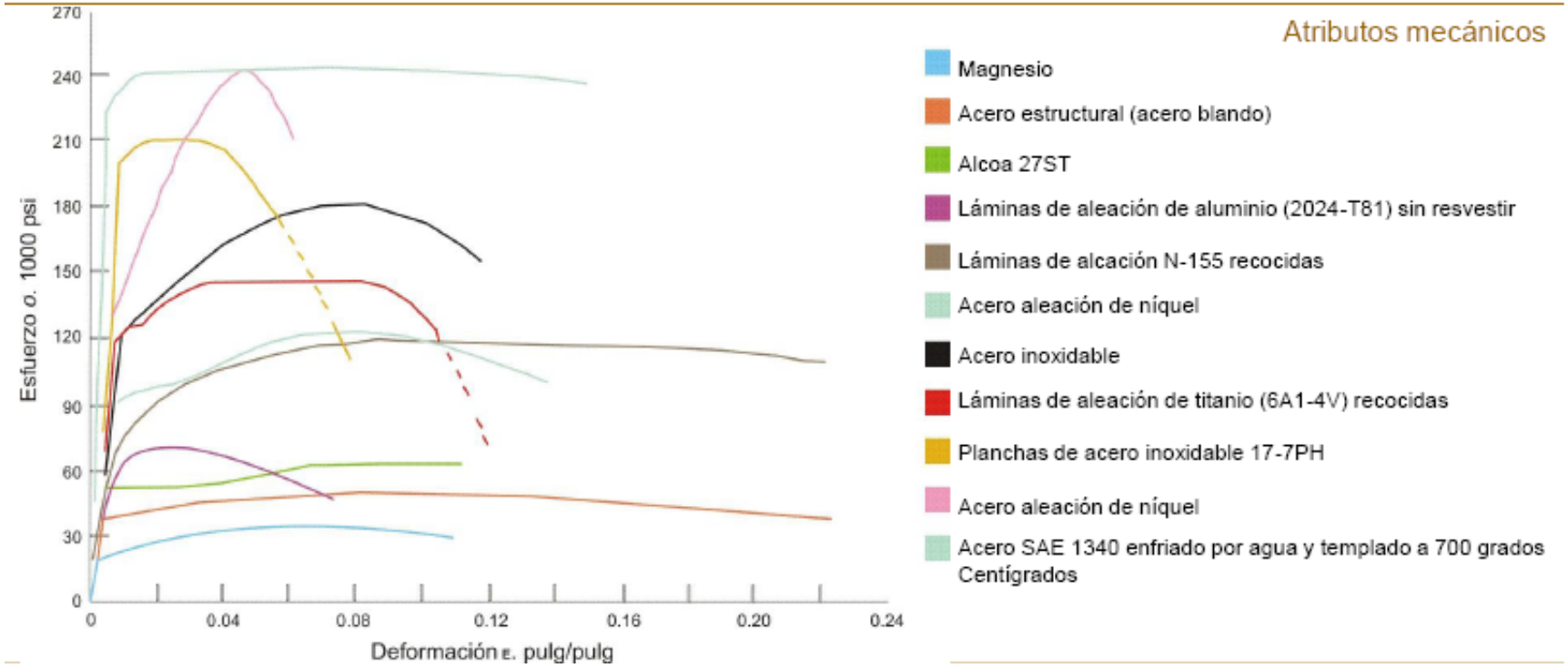
Depende de la forma y del material

Propiedad del material. (hasta la tensión más alta)

Depende solamente del material

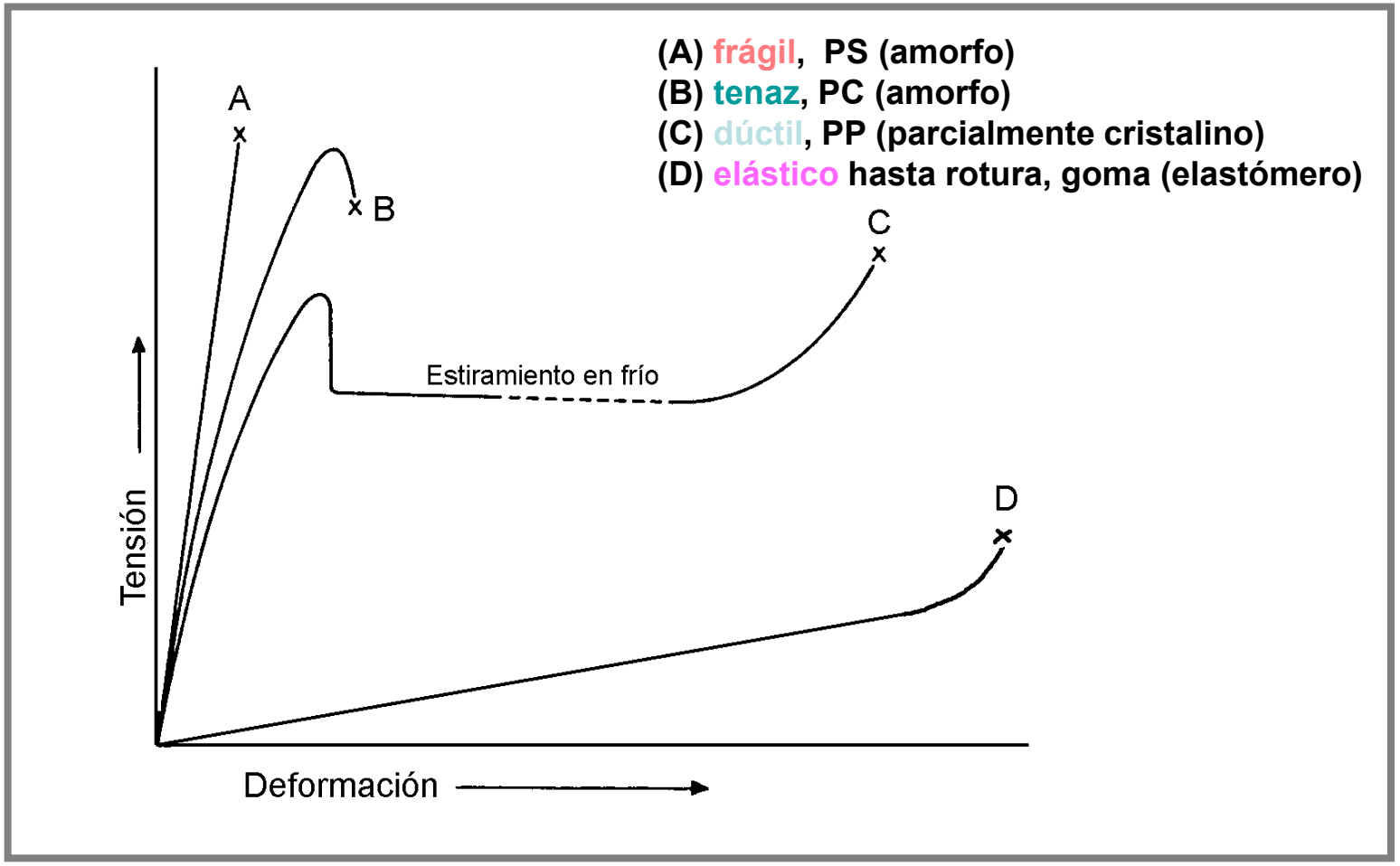
ENSAYO DE TRACCIÓN

- Forma de la curva tensión-deformación (metales)



ENSAYO DE TRACCIÓN

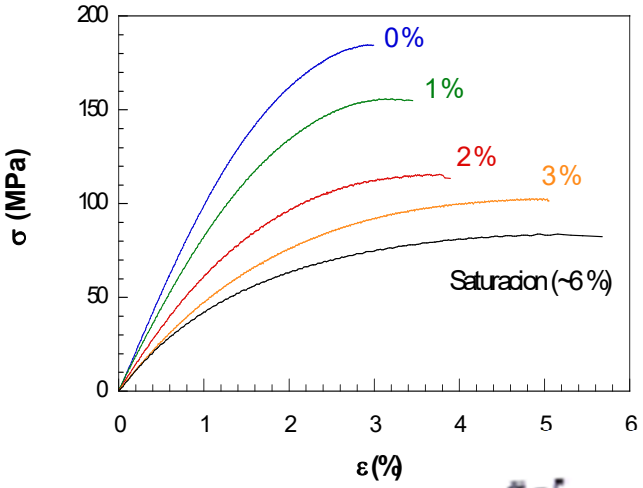
- Forma de la curva tensión-deformación (Polímeros)



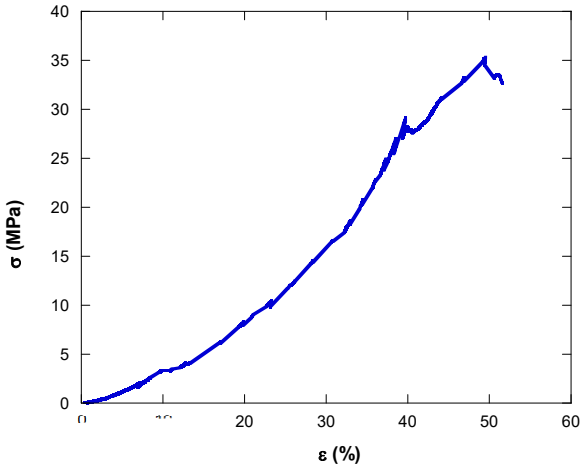
ENSAYO DE TRACCIÓN

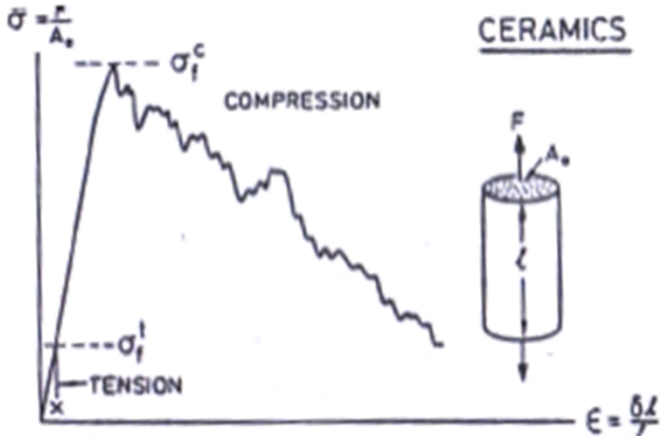
- Forma de la curva tensión-deformación (Otros)

Material compuesto



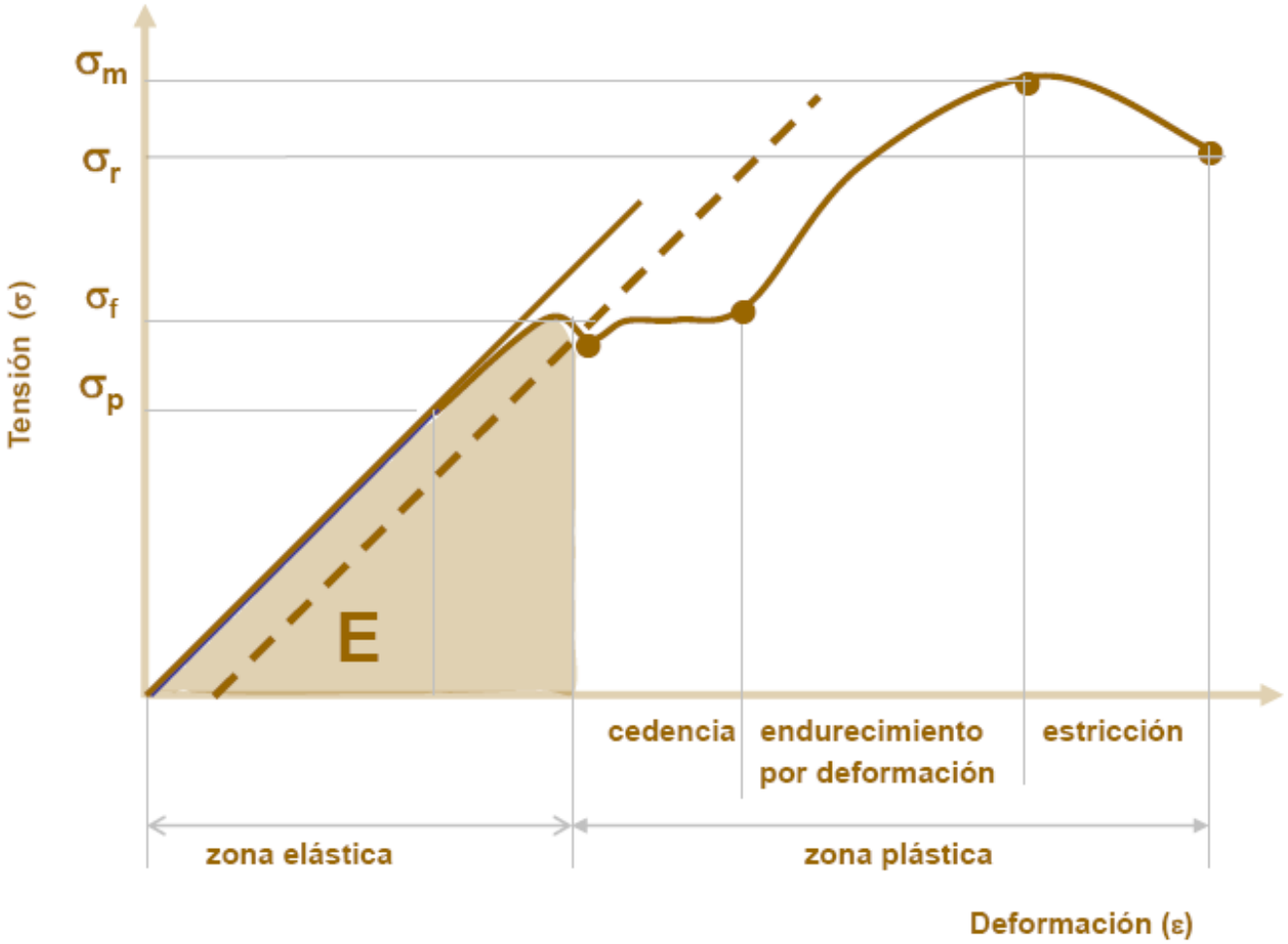
Material biológico





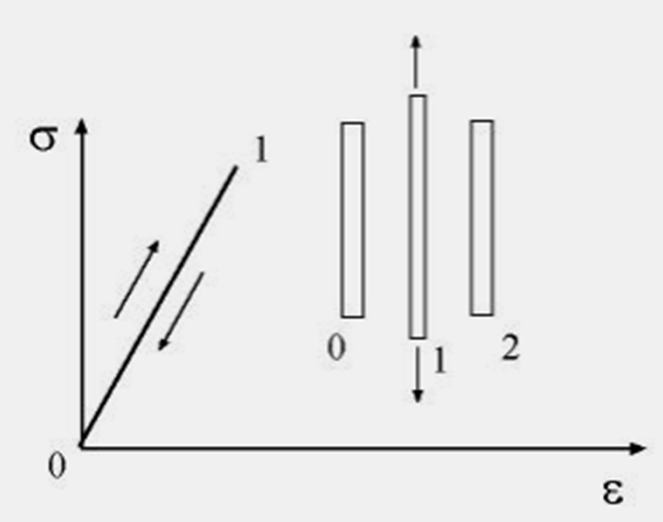
ENSAYO DE TRACCIÓN

- Forma de la curva tensión-deformación (genérica)



ENSAYO DE TRACCIÓN

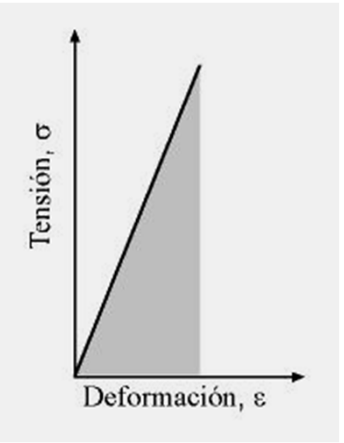
ZONA ELÁSTICA



- El material recupera su forma original al cesar el esfuerzo externo
- **NO SE CONSERVA EL VOLUMEN**

$$V_0 = V_2;\ V_0 \neq V_1$$

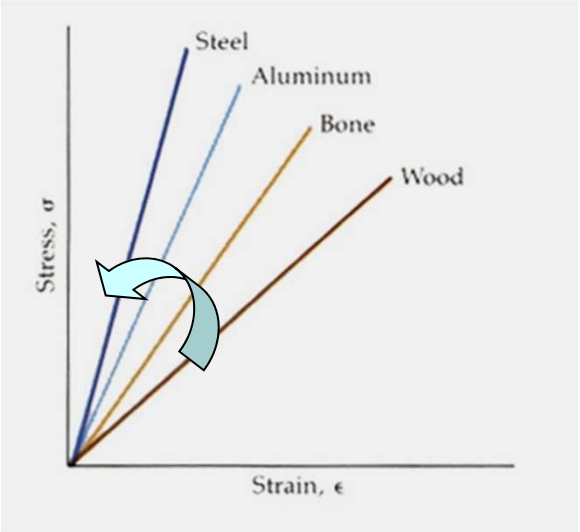
- La energía almacenada por unidad de volumen también es recuperable
- $E_g = \int \sigma \cdot d\varepsilon$ (área encerrada bajo la curva)
- $[E_g]$ = MPa = MN/m^2 = $MN \cdot m/m^3$ = MJ/m^3



ENSAYO DE TRACCIÓN

ZONA ELÁSTICA: Comportamiento elástico lineal

- Relación entre σ-ε → **línea recta**
- Ley de Hooke: **$\sigma = E \cdot \varepsilon$**
- **E** → **Módulo de Young ó de Elasticidad**
- **E** = tg α (pendiente de la recta)
- **E**: Propiedad del material (**rigidez**), el acero es más rígido que la madera



- Enegía: $E_g = \int \sigma \cdot d\varepsilon = \int E \cdot \boldsymbol{\varepsilon}\, d\varepsilon = E \int \varepsilon\, d\varepsilon = E \cdot \varepsilon^2/2 = \sigma \cdot \varepsilon/2$ (triángulo)
- **Coeficiente de Poisson (ν):** relaciona las deformaciones longitudinales con las transversales
- **$\nu = - \varepsilon_t/\varepsilon_l$** → [0-0,5] (No hay conservación de volumen)

ENSAYO DE TRACCIÓN

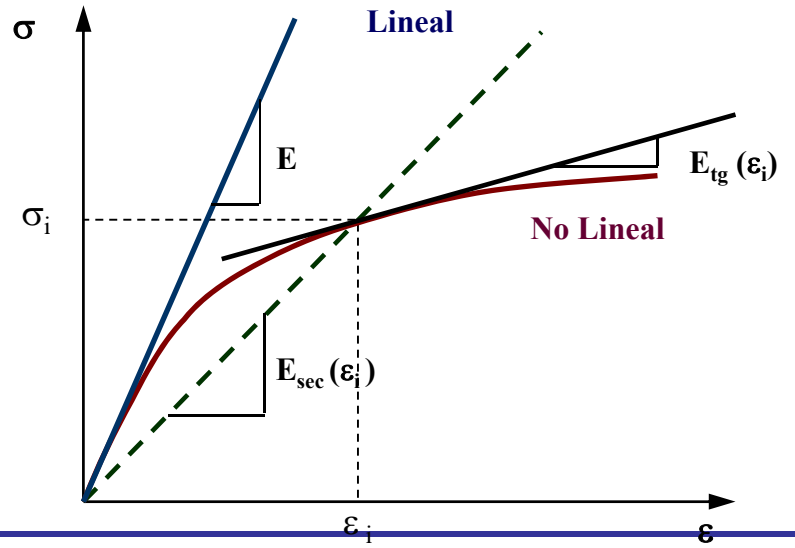
ZONA ELASTICA: Comportamiento elástico no lineal

- Relación entre σ-ε → **línea curva**
- La carga y la descarga se realizan por el mismo camino
- No se generan deformaciones remanentes (elástico)
- Parámetros de caracterización diferentes:
  - Módulo tangente (definidos para un pto concreto de la curva)

    $E_{tg}(\varepsilon_i)=(\sigma_1-\sigma_2)/(\varepsilon_1-\varepsilon_2)$
  - Módulo secante (en un pto.)

    $E_{sec}(\varepsilon_i)=\sigma_i/\varepsilon_i$
  - Módulo tangente en el origen:

    E_{tg} (0) equivale a E en el. lineal

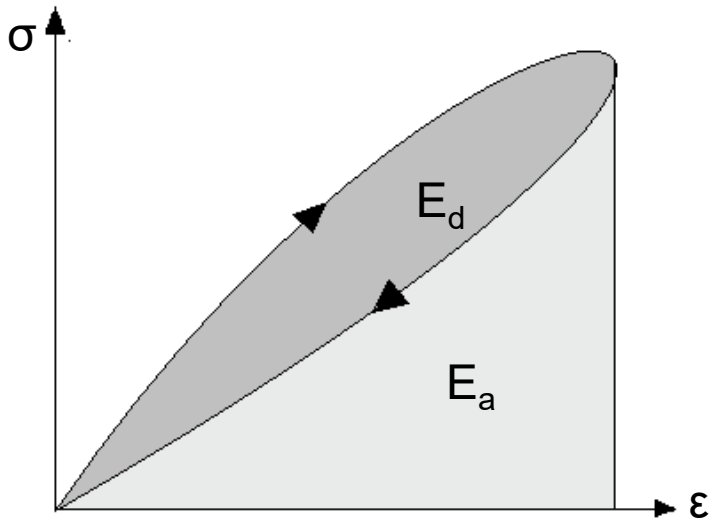


ENSAYO DE TRACCIÓN

ZONA ELASTICA: Comportamiento anelástico

- Relación entre σ-ε → **línea recta o curva**
- La carga y la descarga no se realizan por el mismo camino
- No se generan deformaciones remanentes (elástico)
- La energía aplicada externamente para conseguir una determinada deformación, no se recupera en su totalidad

- Al cesar el esfuerzo solo se recupera E_a (Almacenada)
- El resto (E_d, disipada) se pierde generalmente en forma de calor incrementando la temperatura interna del material



ENSAYO DE TRACCIÓN

ZONA ELASTICA: Límite del comportamiento elástico

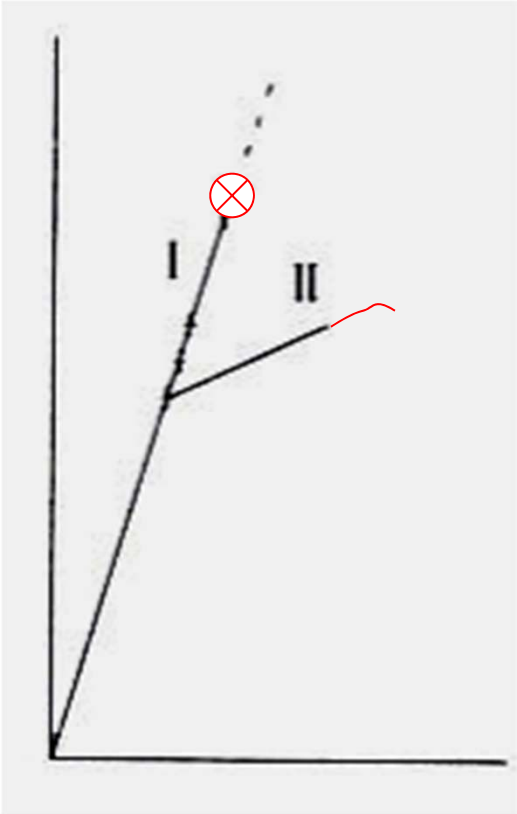
- **Rotura frágil (I):**

  Por discontinuidades en el material.

  Inherentes al mismo ¿comportamiento frágil?

- **Comportamiento Plástico (II):**

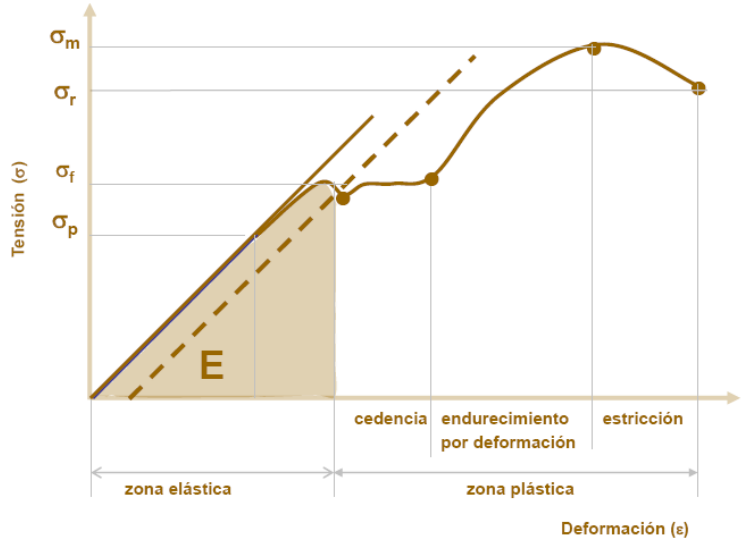
  Algunos materiales fluyen a partir de un determinado nivel tensional (límite elástico, s_y) estableciendo deformaciones permanentes previas a su rotura (comportamiento dúctil).



ENSAYO DE TRACCIÓN

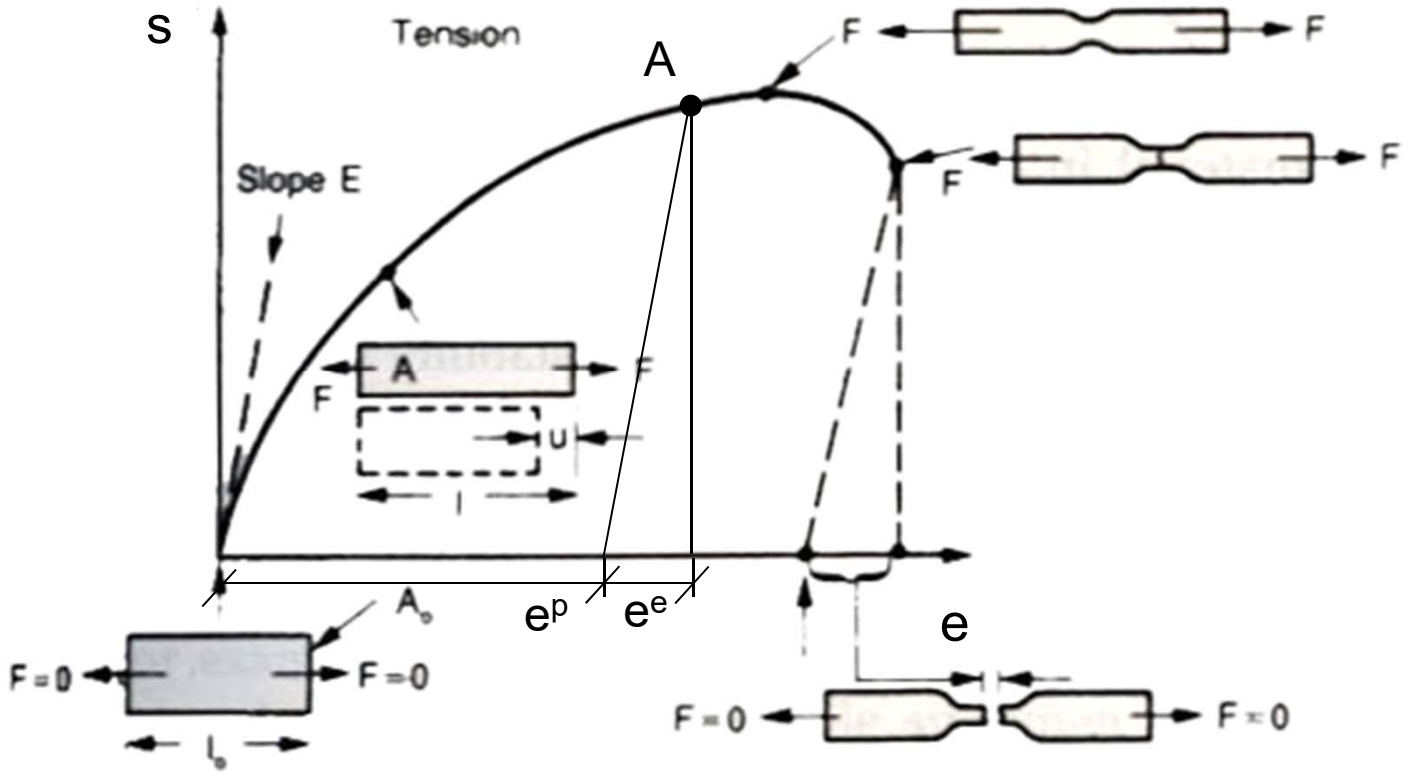
ZONA PLÁSTICA

- Se caracteriza por la existencia de deformaciones permanentes.
- Se define por:
  ISOVOLUMEN hasta la estricción
  Nivel Tensional: **Límite elástico** y **Tensión de rotura**,
  Nivel Deformacional: **Ductilidad (**Agt, Alargamiento en Rot. y RA)
- Justifica:
  La capacidad de deformación de materiales y componentes.
  Posibilidad de conformado. [Cualquier forma es alcanzable]



ENSAYO DE TRACCIÓN

ZONA PLÁSTICA



$$e_A^T = e_A^e + e_A^p$$

e^e = def. elástica o proporcional

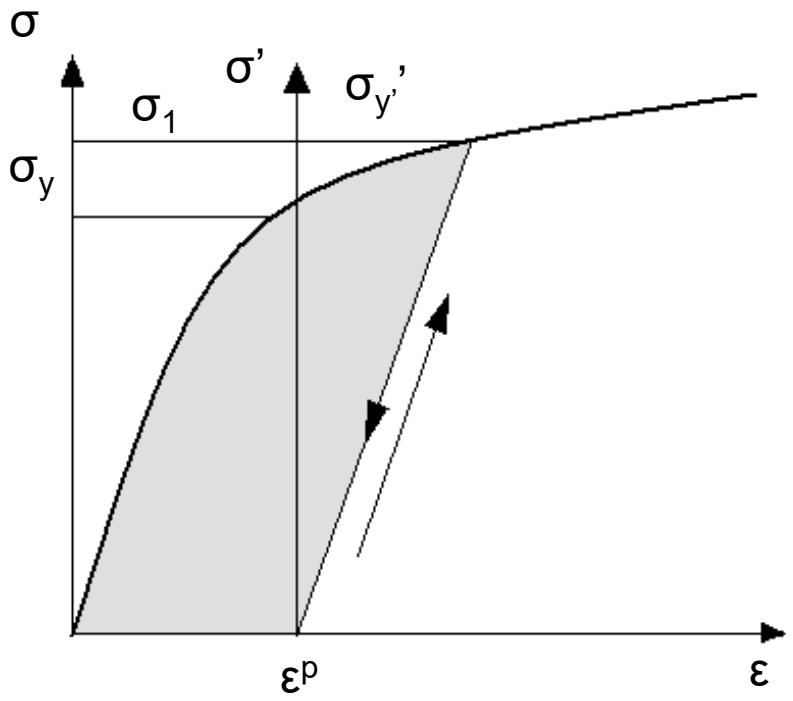
e^p = def. plástica o no proporcional

ENSAYO DE TRACCIÓN

ZONA PLÁSTICA: Endurecimiento por deformación

- Se aplica una carga hasta $\sigma_1 > \sigma_y$ (zona plástica) y se descarga
- El material adquiere una deformación permanente (ε^p)
- Si se vuelve a cargar el material surge la nueva curva σ'-ε

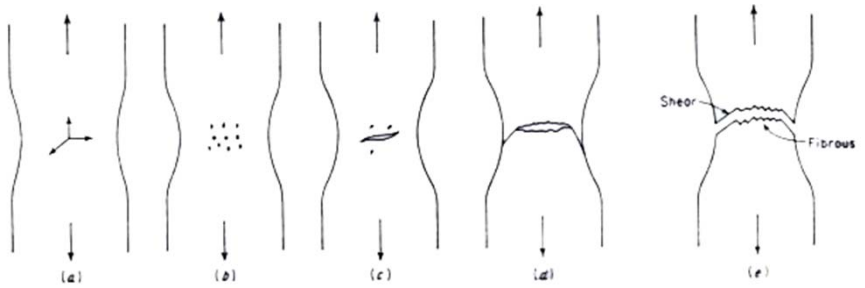
- El límite elástico del material deformado (σ'_y) se incrementa desde σ_y hasta σ_1
- El área sombreada representa el trabajo plástico empleado por unidad de volumen para provocar una deformación plástica ε^p



ENSAYO DE TRACCIÓN

ZONA PLÁSTICA: Límite del comportamiento plástico

- Material no homogéneo
- Defectos volumétricos locales (zona inestabilidad)
- Deformación local crítica → INESTABILIDAD/COLAPSO LOCAL



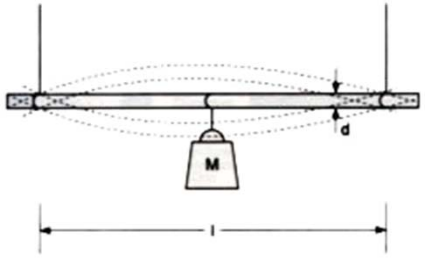
- La sección disminuye rápidamente en el cuello de estricción, por lo que la fuerza necesaria para seguir incrementando la tensión en esa zona es decreciente (curva σ-ε)
- Al final se produce la rotura del material por el cuello de estricción
- El tipo de rotura dependerá de la naturaleza del material (coalescencia de huecos, clivaje,…)

ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de parámetros: Módulo de elasticidad

- Del ensayo de tracción: poca precisión, los valores de deformación medidos en el tramo elástico son muy pequeños y se pueden cometer errores en su apreciación.
  - El procedimiento consiste en realizar un ajuste lineal en el tramo elástico entre valores de tensión del 10 al 90% de σ_y
  - Método reducido: a partir de dos puntos $\rightarrow E=(\sigma_1-\sigma_2)/(\varepsilon_1-\varepsilon_2)$
  - Para mejorar: carga y descargas y medida en la descarga

- Frecuencia natural de vibración



$$f=\frac{1}{2\pi}\left\{\frac{3\pi Ed^4}{4l^3M}\right\}^{1/2} \qquad E=\frac{16\pi Ml^3f^2}{3d^4}$$

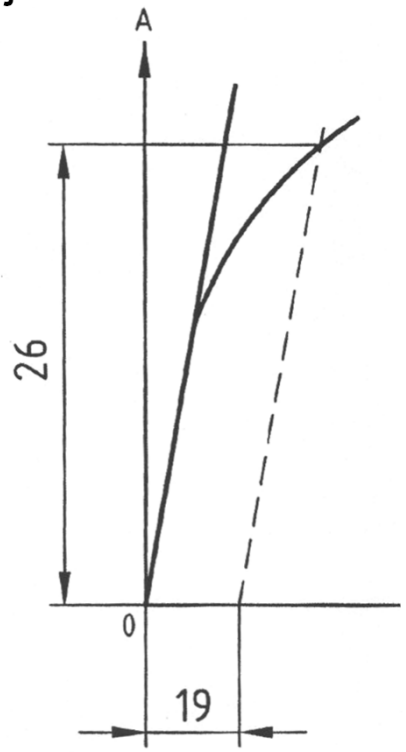
- Velocidad de propagación del sonido

$$v_l=\left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$$

ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de parámetros: Límite elástico (s_y)

- **Limite elástico convencional**: tensión a la que se produce una extensión no proporcional (plástica) determinada (R_p)
- Sobre el diagrama σ-ε se traza una línea paralela a la parte recta de la curva y a una distancia de ésta equivalente al porcentaje no proporcional prescrito
- Habitual es el 0.2% (LIMITE ELÁSTICO: $R_{P0.2}$ ó s_y)
- El punto de intersección de la recta con la curva representa el $R_{P0.2}$



19. Extensión no proporcional (0.2%)

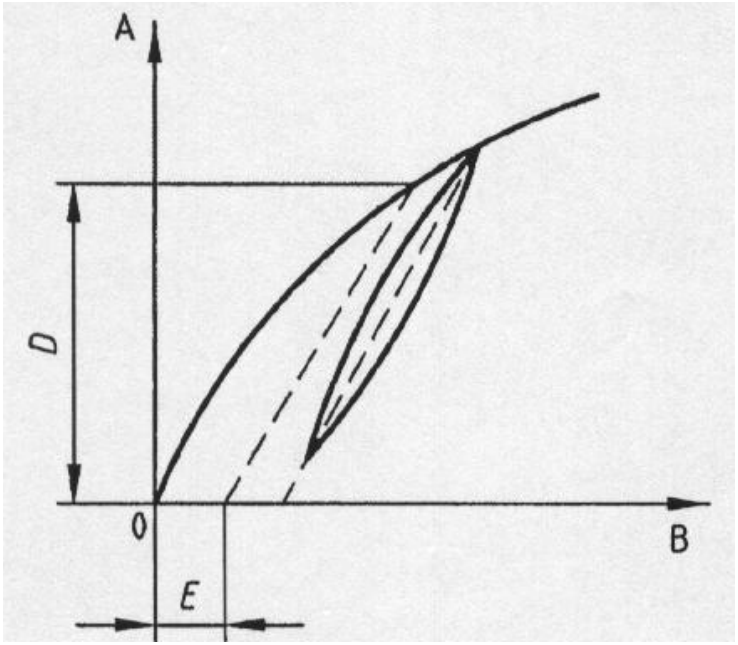
26. Límite elástico convencional

ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de parámetros: Límite elástico (s_y)

- Si la parte recta del diagrama no se define claramente, impidiendo dibujar la línea paralela con precisión, al superar la R_p, la carga se reduce un 10 % aprox.

  Se dibuja una línea a través del ciclo de histéresis, y tomando ésta como referencia se realiza el procedimiento habitual



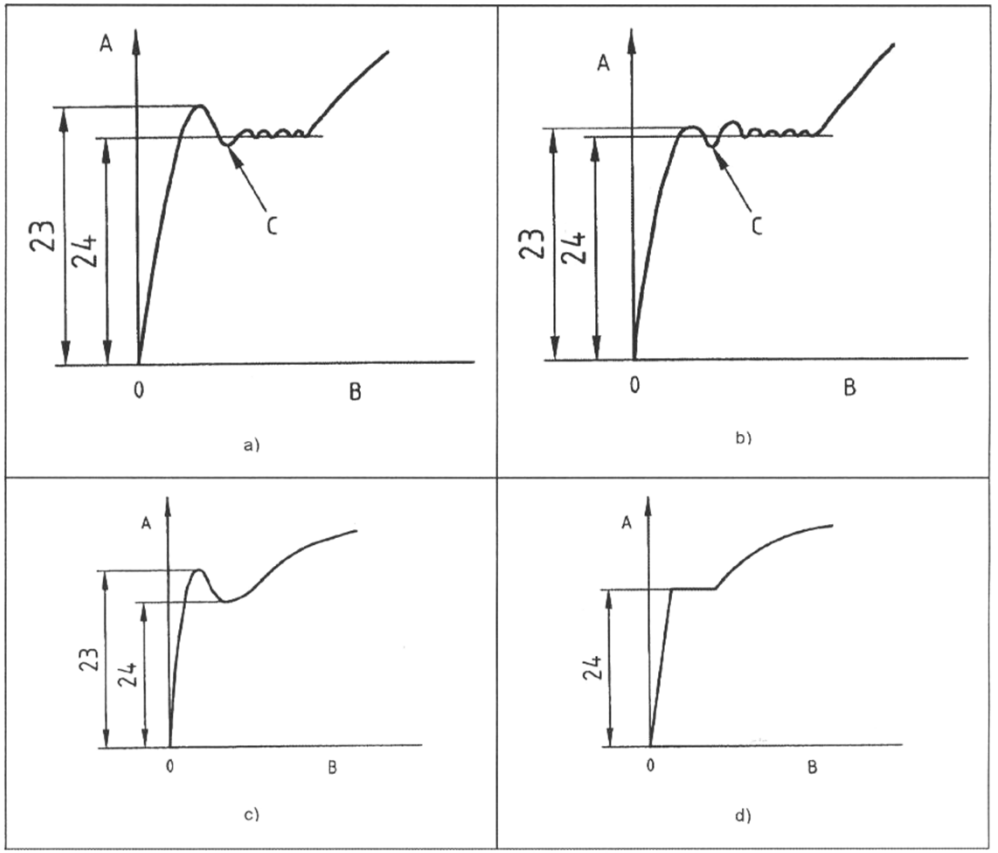
ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de parámetros: Límite elástico (s_y)

Límite elástico aparente: tensión correspondiente a un aumento de la deformación plástica sin que haya ningún aumento en la carga

Resistencia dúctil superior (R_{eH}): (23) tensión en el momento en el que se observa la primera disminución en la carga

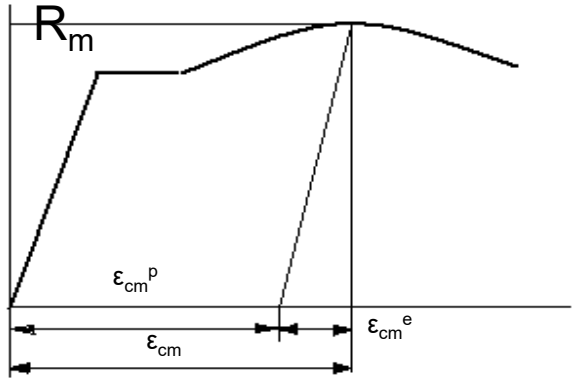
Resistencia dúctil inferior (R_{eL}): (24) tensión mínima durante la ductilidad plástica, ignorando efectos transitorios iniciales



c. Efecto transitorio inicial

ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de parámetros:



Resistencia a tracción, σ_R o $\sigma_{máx}$

- Sobre el diagrama σ-ε
  el punto más alto → R_m

Deformación bajo carga máxima (A_{gt})

- Sobre el diagrama σ-ε → $A_{gt} = e_{cm}$
- Sobre el diagrama F-ΔL se determina la extensión a la F_m → ΔL_m
- Elongación total porcentual a la F_m → $A_{gt} = (\Delta L_m / L_e) \cdot 100$
- Si en F_m se presenta una meseta se toma el punto medio de la misma
- **Método manual** → medir la elongación no proporcional porcentual a F_m
  Se divide la longitud libre con marcas equidistantes a L_0.
  Tras la rotura se mide la longitud entre marcas fuera de la estricción (L_u')

$$A_{gt} = \left(\frac{L_u' - L_0}{L_0} + \frac{R_m}{E} \right) \cdot 100$$

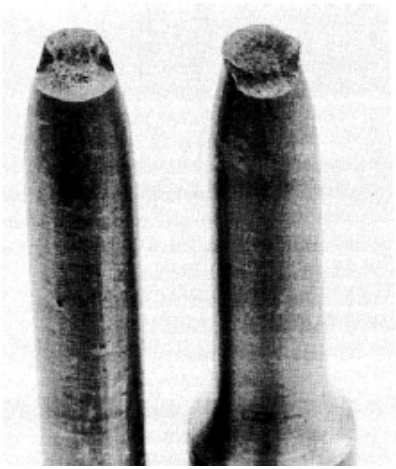
ENSAYO DE TRACCIÓN

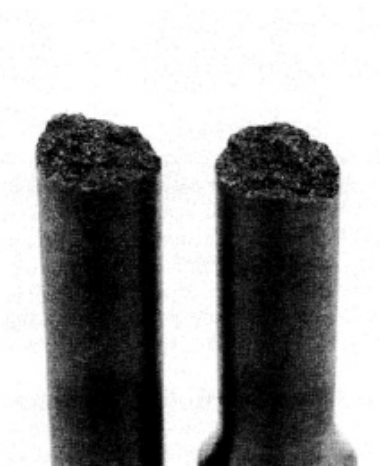
Determinación de parámetros:

Reducción porcentual de área (RA) o coeficiente de estricción (Z)

- Se recomponen los trozos rotos de forma que sus ejes coincidan, si es posible
- Se mide la sección transversal mínima tras la fractura (S_u)
- $$Z = \left(\frac{S_0 - S_u}{S_0} \right) \cdot 100$$
- Para probeta cilíndrica:

$$Z = \left(\frac{\varnothing_0^2 - \varnothing_u^2}{\varnothing_0^2} \right) \cdot 100$$





ENSAYO DE TRACCIÓN

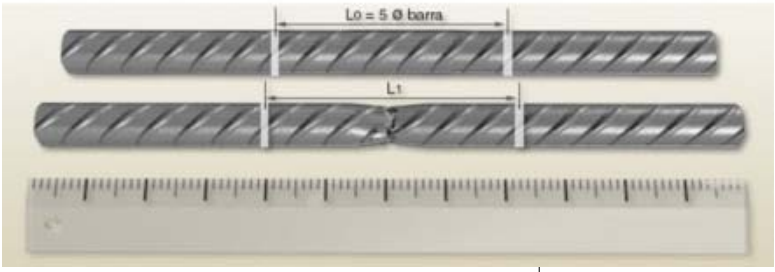
Determinación de parámetros:

Determinación de la elongación porcentual tras la rotura (A_R)

Determinación de A_R por marcado de L_0 sobre la probeta

- Marcado previo sobre la probeta de L_0 (no mediante entalladura)
- Recomposición tras la rotura de forma que los ejes coincidan
- Se mide L_u

$$A_R = \left(\frac{L_u - L_0}{L_0} \right) \cdot 100$$



- Válido si la distancia de la fractura a la marca más cercana ≥ 1/3 L_0
- Cuando se trata de una muestra larga, para asegurar que la rotura se produce dentro de L_0, se subdivide la muestra en segmentos de L_0 (se pueden colocar al tresbolillo en dos generatrices para asegurar la rotura entre marcas)
- Para asegurar la validez se marcan dos generatrices al tresbolillo

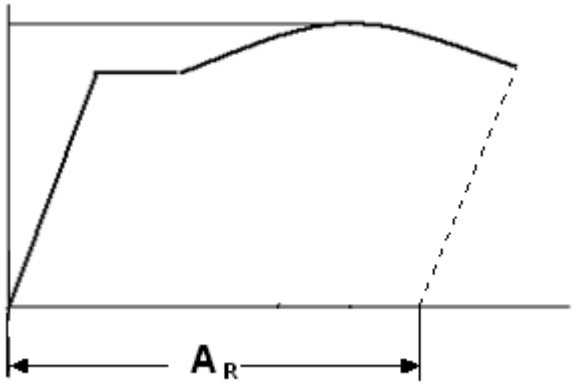
ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de parámetros:

Determinación de la elongación porcentual tras la rotura (A_R)

Determinación de A_R empleando el extensómetro

- Si se emplea extensómetro no es necesario marcar L_0
- Medida válida si la fractura ocurre dentro de la base de medida (L_e)
- Si la norma de producto exige un L_0 determinado, se hace $L_e = L_0$
- A_R se mide como la extensión total en el momento de la fractura descontando la extensión elástica



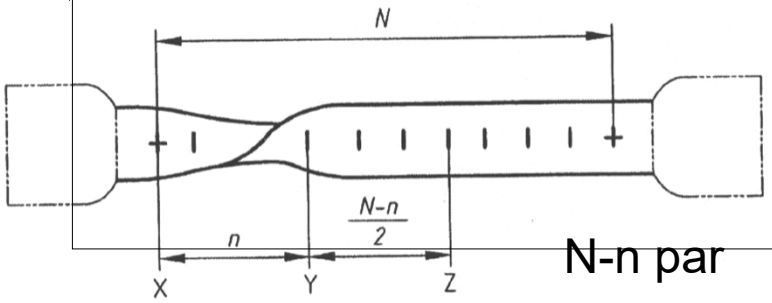
ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de A_R empleando la medida basada en al subdivisión de la longitud de calibración inicial

- Para evitar rechazar muestras que no cumplen con la condición (1/3 L_0)
- Se subdivide la L_0 en N partes iguales
- X: marca de calibración del trozo corto; Y: equidista de la fractura con X
- n: nº de intervalos entre X e Y.
- Si **N-n es un nº par** se mide la distancia XY y YZ,

  Z situado a (N-n)/2

$$A_R = \frac{XY + 2YZ - L_0}{L_0} \cdot 100$$

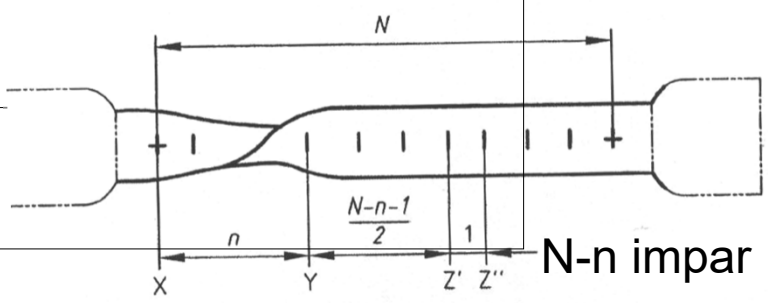


N-n par

- Si **N-n es un nº impar** se mide la distancia XY y desde Y a Z' y Z'',

  Z' a (N-n-1)/2 y Z'' a (N-n+1)/2

$$A_R = \frac{XY + YZ' + YZ'' - L_0}{L_0} \cdot 100$$



N-n impar

ENSAYO DE TRACCIÓN

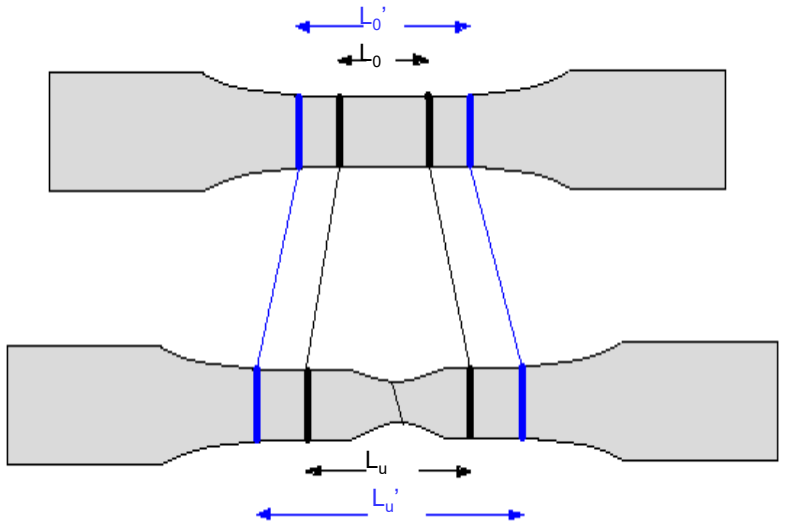
Ejercicio propuesto:

Determinación de A_R' a partir de otra A_R de diferente base

Datos:

- L_0: distancia inicial base original
- L_u: distancia final
- L_0': distancia inicial base nueva

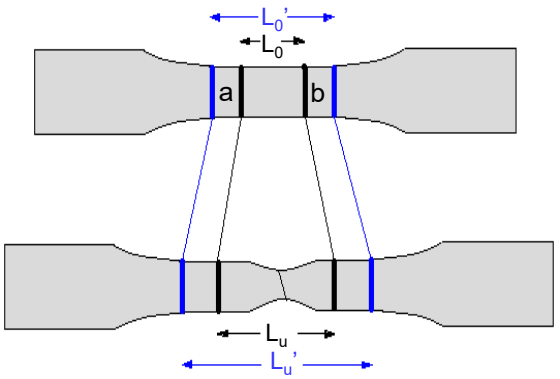
} A_R

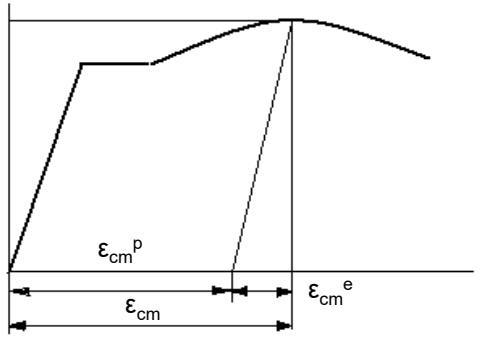


ENSAYO DE TRACCIÓN

Determinación de A_R' a partir de otra A_R de diferente base

- Dato: A_R en base L_0 → $A_R = 100\cdot(L_u-L_0)/L_0$
- Se quiere calcular A_R' en base L_0'
- Se desconoce L_u'
- $L_0' = L_0 + X$ → (X conocido = $L_0'-L_0$= a+b)
- $L_u' = L_u + X + \Delta L$ (siendo ΔL el incremento sufrido por X, que al estar fuera de la zona de estrición → $\varepsilon_{cm}^p = \Delta L/X \rightarrow \Delta L = X\,\varepsilon_{cm}^p$)
- Además: $\varepsilon_{cm}^p = \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cm}^e = \varepsilon_{cm} - R_p/E$





$$A_R' = \frac{L_u'-L_0'}{L_0'}\cdot 100 = \frac{L_u + X(1+\varepsilon_{cm}^p) - L_0'}{L_0'}\cdot 100$$

$$A_R' = \frac{L_u + (L_0'-L_0)\left(1+\varepsilon_{cm} - \frac{R_p}{E}\right) - L_0'}{L_0'}\cdot 100$$

ENSAYO DE TRACCIÓN

Diagrama de variables reales

- Las variables obtenidas directamente en laboratorio a partir de un ensayo de tracción son variables **ingenieriles**:
  - Tensión ingenieril: $s = F/A_0$
  - Deformación ingenieril: $e = \Delta L/L_0$

  } Area y base inicial (A_0 / L_0)

- El área y la base de medida cambian → Variables **reales o verdaderas**
  - Tensión verdadera: $\sigma = F/A$
  - Deformación verdadera: $d\varepsilon = dl/l \rightarrow \varepsilon = \int dl/l = \ln(l/l_0)$

- En la zona elástica $A \approx A_0$ y $l \approx l_0$ por lo que en esta zona las variables reales e ingenieriles se consideran prácticamente coincidentes

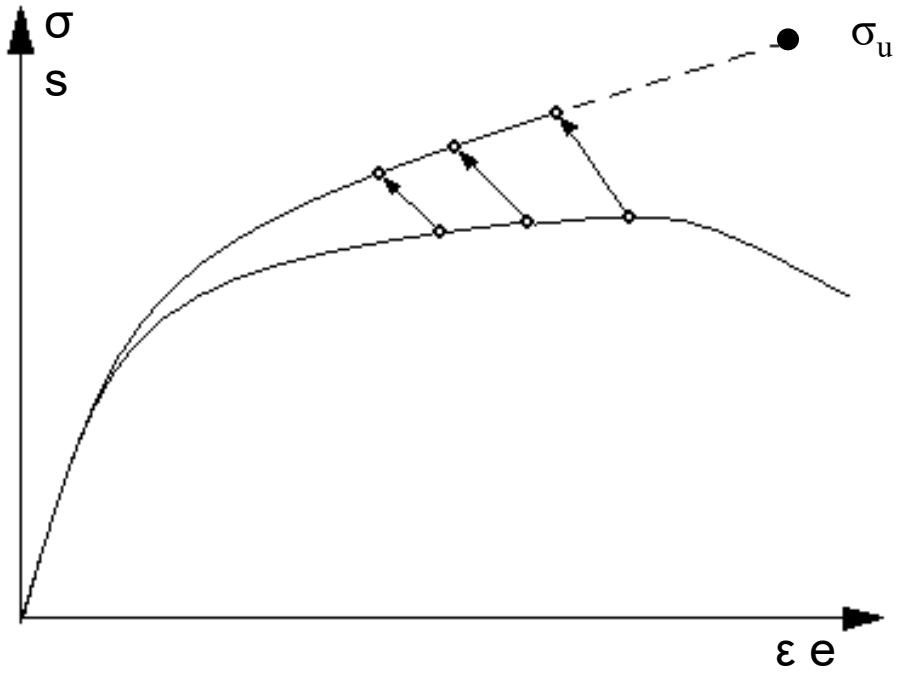
ENSAYO DE TRACCIÓN

Diagrama de variables reales

- Hipótesis de conservación de volumen → $l_0 \cdot A_0 = l \cdot A$; $A = l_0 \cdot A_0 / l$
  - **Deformación** → $\varepsilon = \ln (l/l_0) = \ln ((l_0 + \Delta l)/l_0) = \ln(1 + \Delta l/l_0) = \ln (1+e)$
  - **Tensión** → $\sigma = F/A = F \cdot l/(A_0 \cdot l_0) = (F/A_0) \cdot (l_0 + \Delta l)/l_0 = s(1+e)$
  - Estas relaciones solo son válidas hasta F_{max}

$\varepsilon = \ln(1+e) < e$

$\sigma = s\,(1+e) > s$



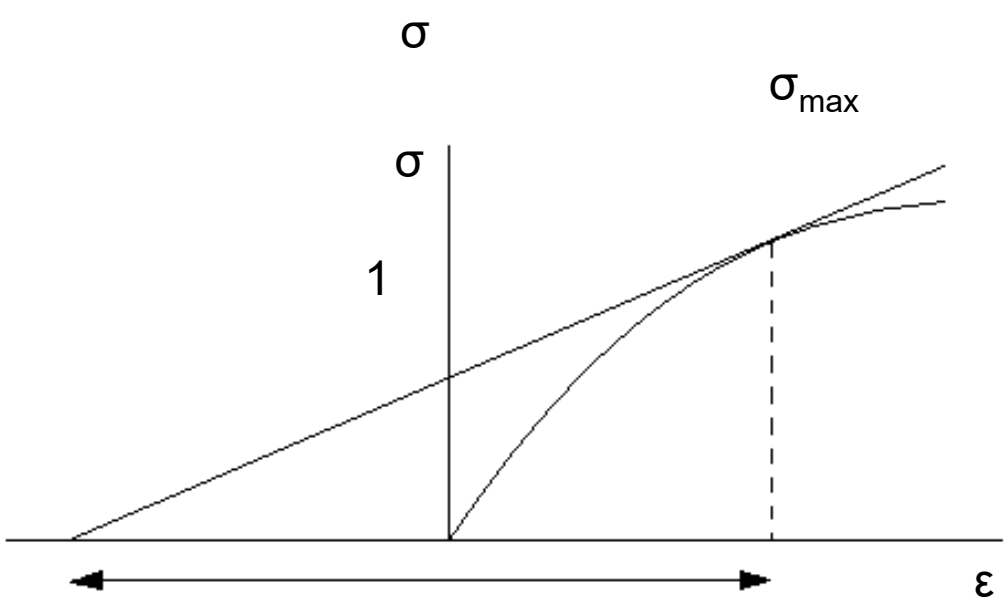
- **$\sigma_u = F_u/S_u$**

ENSAYO DE TRACCIÓN

Resistencia a tracción en diagrama de variables reales (carga máxima)

- La Fuerza ($F = \sigma \cdot A$) presenta un máximo → $dF = \mathbf{0 = Ad\sigma + \sigma dA}$
- Conservación de volumen → $V = L \cdot A = cte$; $dV = 0$; $\mathbf{Adl + ldA = 0}$

  - $d\sigma/\sigma = -dA/A$
  - $dl/l = -dA/A$

$d\sigma/\sigma = dl/l = d\varepsilon$

$\mathbf{d\sigma/d\varepsilon = \sigma}$