

Caracterización de Materiales

Tema 5. Caracterización a baja velocidad de deformación. Fluencia y relajación



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](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Comportamiento Mecánico.

Índice:

- Introducción
- Fenómenos viscoelásticos y viscoplásticos
- Modelos de comportamiento
- Fluencia
- Relajación

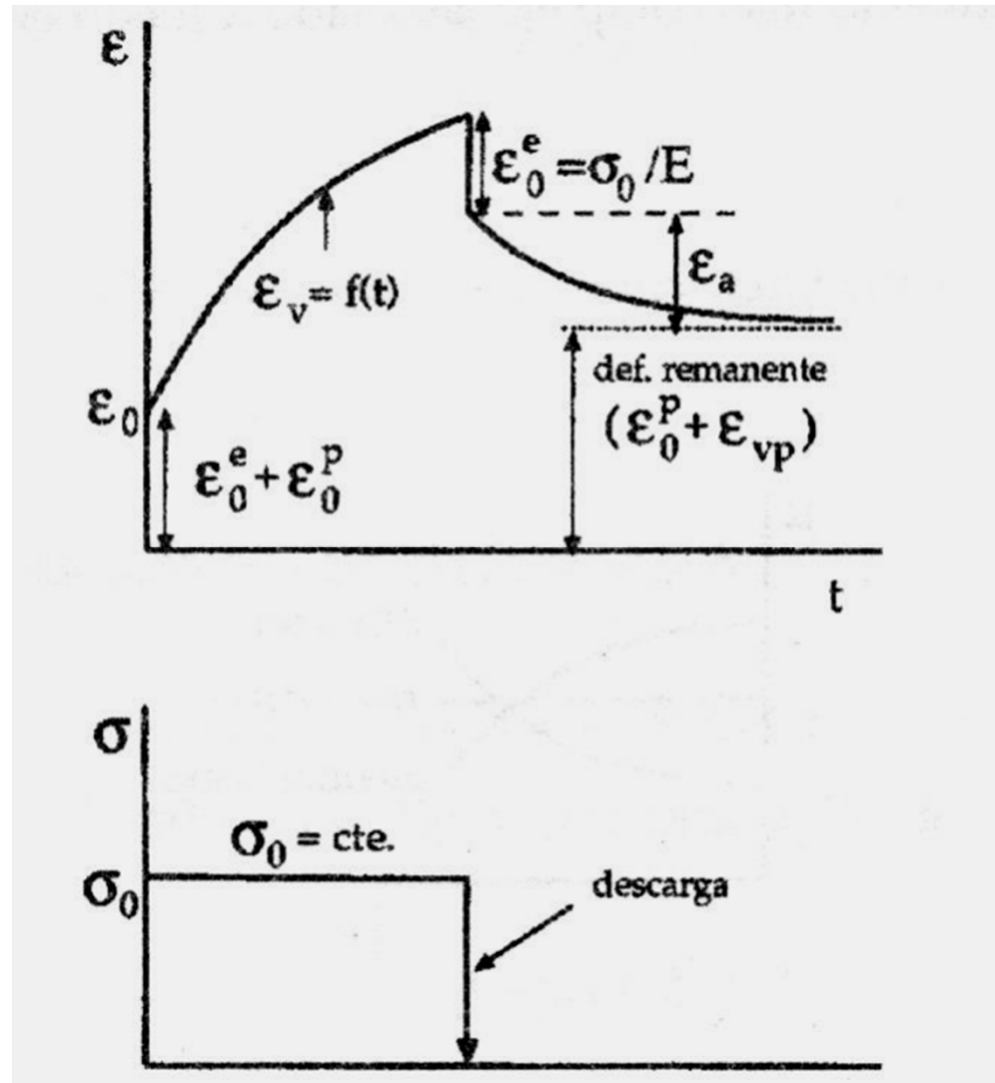
INTRODUCCIÓN

- ❑ Deformación total = Def. instantánea + Def. diferida
 - Deformación instantánea: elástica ó plastica
 - Def. dependiente del tiempo:
 - Viscoelástica: recuperable con el tiempo al cesar la carga
 - Viscoplástica: no recuperable a t infinito
- ❑ Comportamiento viscoelástico y viscoplástico
 - Las deformaciones en líquidos y sólidos poco consistentes a T^a adecuada están asociadas a un flujo de material
 - El comportamiento mecánico de estos materiales está condicionado por fenómenos de **viscosidad**
 - Algunos metales de bajo punto de fusión se deforman lentamente en el transcurso del tiempo por la sola acción de su peso (Ej: Pb)
 - Todos los metales se deforman, más o menos lento, con cargas pequeñas (inferiores a σ_y) → FLUENCIA
 - La fluencia aumenta con la T^a y la carga

FENÓMENOS VISCOELÁSTICOS Y VISCOPLÁSTICOS

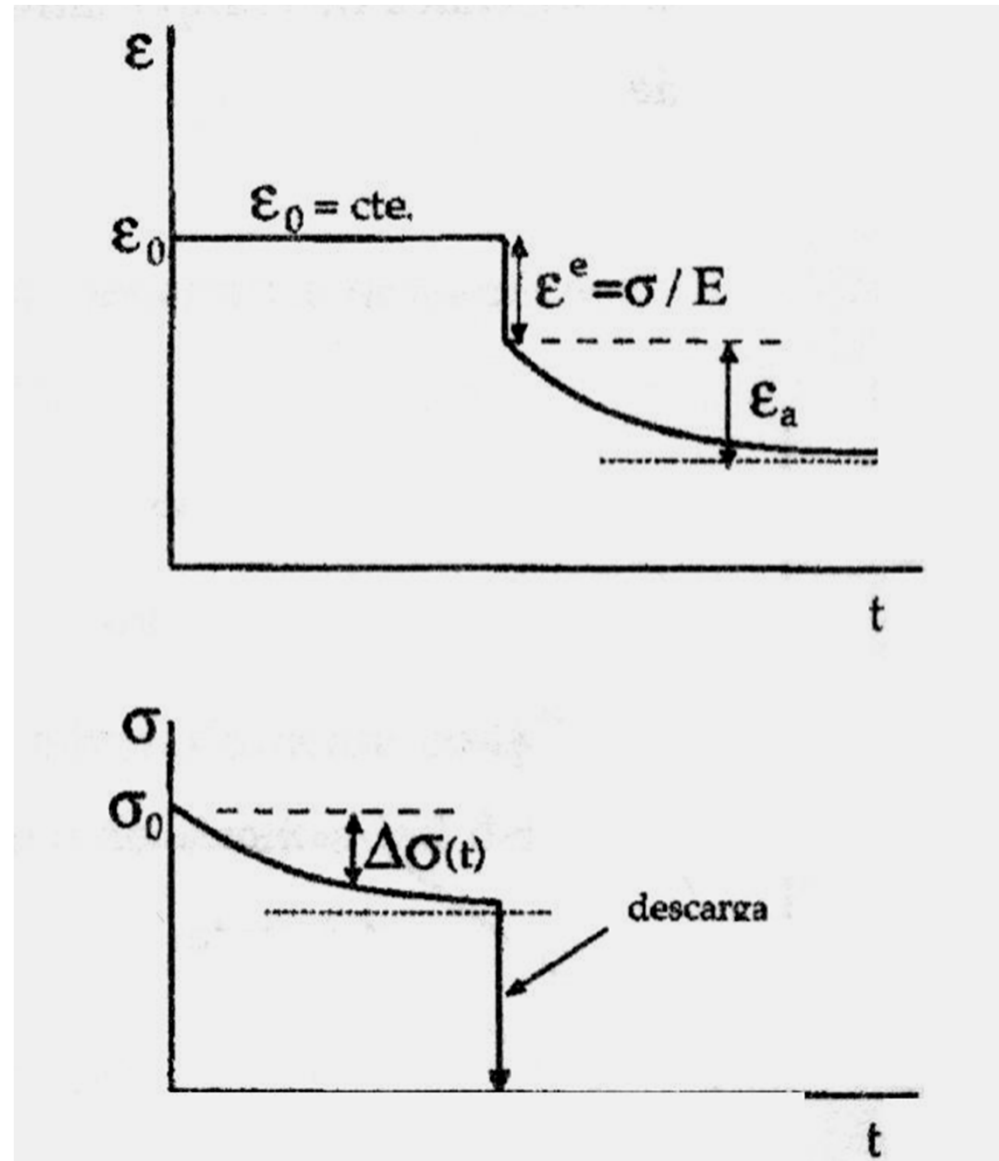
Fluencia

- ☐ σ constante
- ☐ ε creciente



Relajación

- ☐ ϵ constante
- ☐ σ decreciente



MODELOS DE COMPORTAMIENTO

- Simulación de los fenómenos viscoelásticos y viscoplásticos mediante la comparación de elementos mecánicos (mecanismos sencillos):

- Muelle** : comportamiento elástico

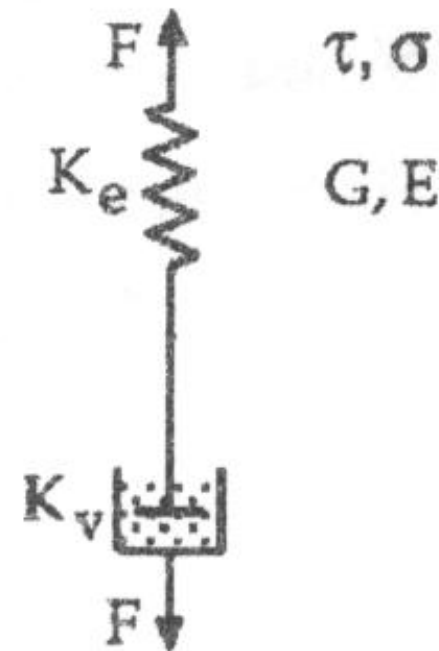
$$F = K_e \cdot x$$

$$\tau = G \cdot \gamma \quad \text{ó} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon$$

- Amortiguador**: comportamiento viscoso

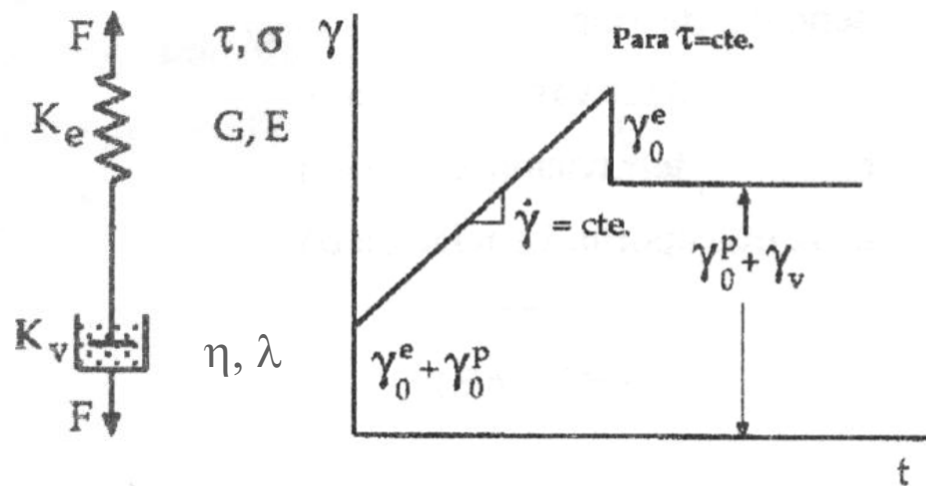
$$F = K_v \cdot \dot{x}$$

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{ó} \quad \sigma = \lambda \cdot \dot{\varepsilon}$$



MODELOS DE COMPORTAMIENTO (II)

□ Modelo de Maxwell: serie



$$\tau = \tau_e + \tau_v$$

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_v$$

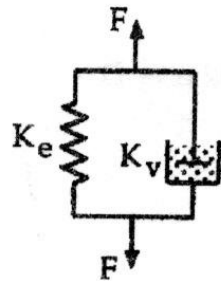
$$\frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta} = \dot{\gamma}$$

Aplicación: Relajación

$$\gamma = \text{cte} \Rightarrow \dot{\gamma} = 0 \Rightarrow \tau = \tau_0 e^{-\frac{G}{\eta} t}$$

MODELOS DE COMPORTAMIENTO (III)

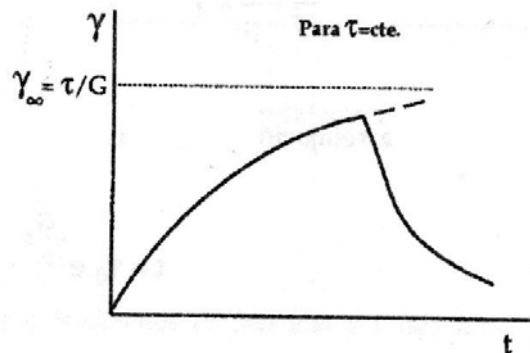
□ Modelo de Kelvin-Voigt: paralelo



$$\gamma = \gamma_e = \gamma_v$$

$$\tau = \tau_e + \tau_v$$

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$



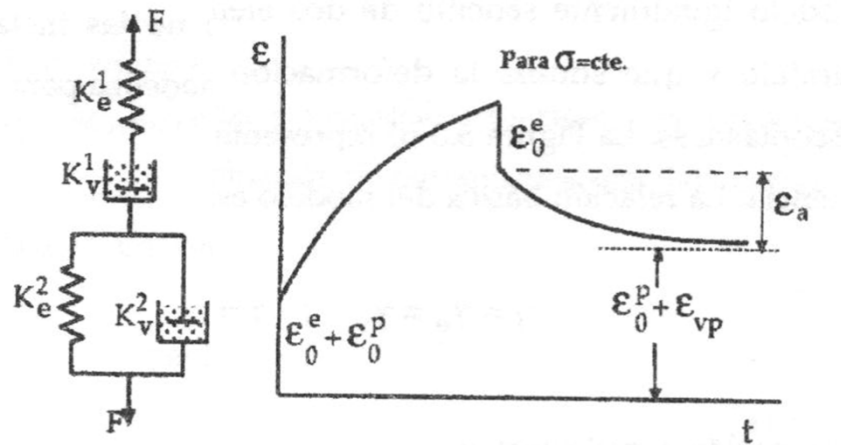
Aplicación: Fluencia

$$\tau = \text{cte}$$

$$t = 0 \Rightarrow \gamma = \frac{\tau_0}{G} \left(1 - e^{-\frac{G}{\eta} t} \right)$$

MODELOS DE COMPORTAMIENTO (IV)

❑ Modelo de Burgers: 4 elementos (serie + paralelo)



$$\epsilon = \epsilon_{e1} + \epsilon_{v1} + \epsilon_2$$

$$\epsilon_{e1} = \frac{\sigma}{E_1}$$

$$\dot{\epsilon}_{v1} = \frac{\sigma}{\lambda_1} \Rightarrow \epsilon_{v1} = \frac{\sigma}{\lambda_1} t$$

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\lambda_2} t} \right)$$

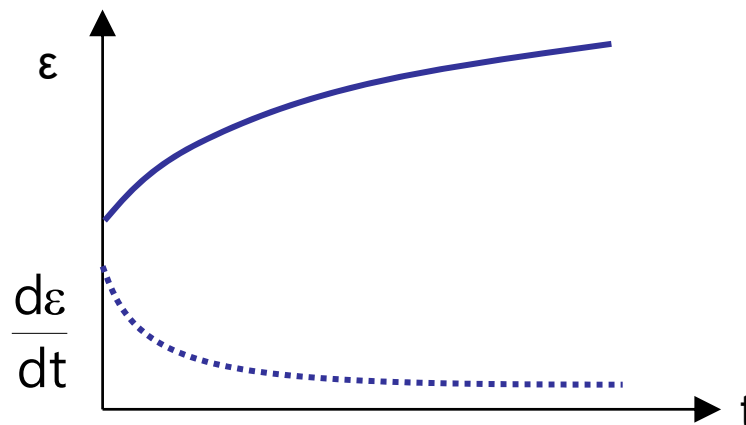
Aplicación: Fluencia

$$\sigma = \text{cte} \quad \epsilon(t) = \epsilon_{e1} + \epsilon_{v1} + \epsilon_2$$

FLUENCIA

Fluencia a bajas temperaturas

- ❑ $T/T_m < 0.5$
- ❑ Predominio de la componente viscoelástica
- ❑ Su magnitud global pequeña $\rightarrow \varepsilon_v < 0.1$
- ❑ En metales resulta apreciable para valores altos de tensión
- ❑ En mat. poliméricos o compuestos de base polimérica a menor σ
- ❑ Las deformaciones son ajustables por una ec. Logatitmica



$$\varepsilon_v = A \cdot \log(1 + vt)$$

$$v = 10^{10} \sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

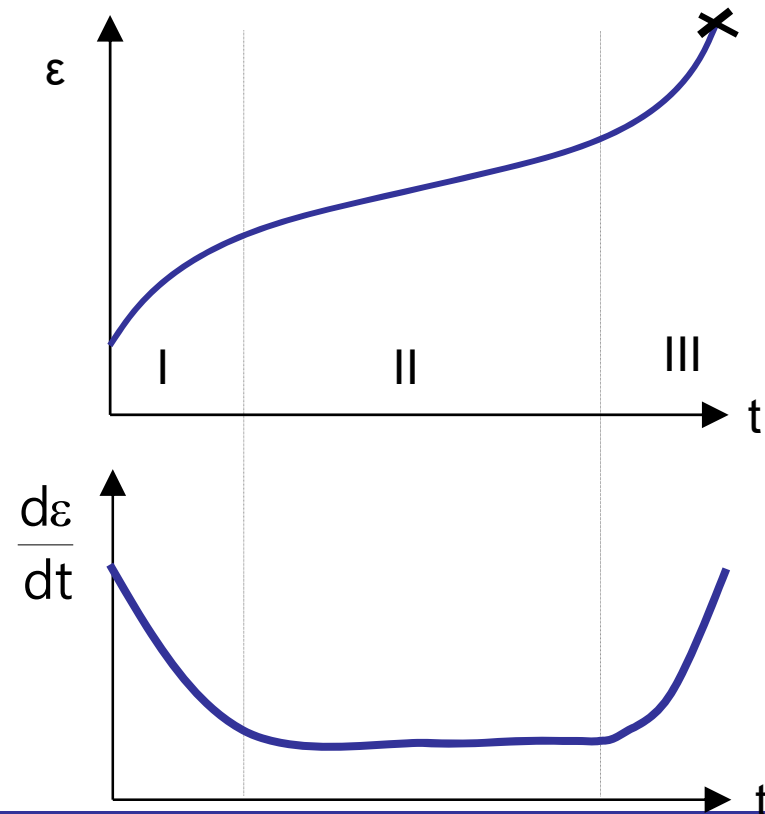
$$A = f(\sigma, T^a, \text{material})$$

Fluencia a altas temperaturas

- ❑ $T/T_m > 0.5$
- ❑ Predominio de la componente viscoplástica
- ❑ Su magnitud global grande $\rightarrow \varepsilon_v$ puede alcanzar valores $> 100 \%$

❑ Tres regiones:

- I: Fluencia transitoria, la ε crece con pendiente decreciente (2^a deriv < 0)
- II: Fluencia estacionaria, la ε crece de forma lineal
- III: Fluencia acelerada, la ε deformación crece con pendiente creciente hasta rotura (2^a deriv > 0)



Fluencia a altas temperaturas (II)

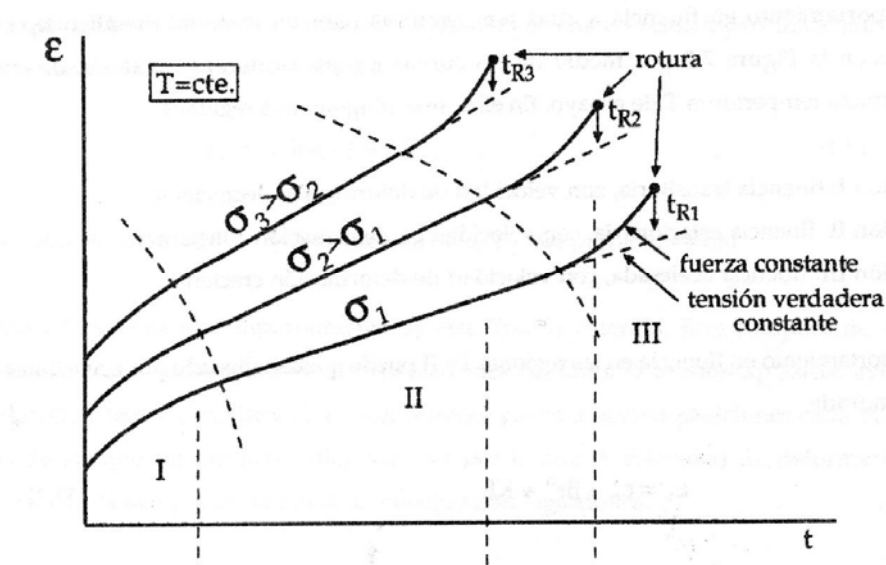
- ❑ No existe una ley que prediga correctamente las tres zonas.
- ❑ Ley de Andrade, ajusta la zona I + II

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \beta t^n + Kt$$

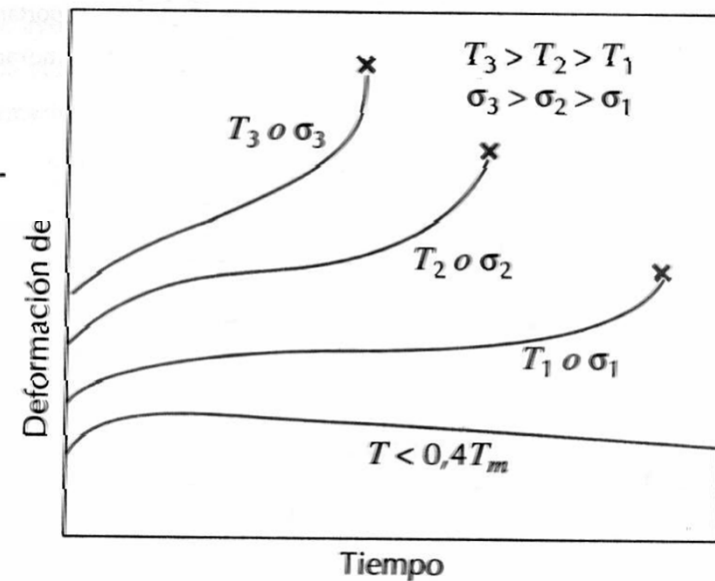
- $\varepsilon^e + \varepsilon^p \rightarrow$ deformación inicial instantánea (elástica + plástica)
- Región I $\rightarrow \beta t^n$ ($1/4 < n < 2/3$)
- Región II $\rightarrow Kt$ ($K = f(\sigma, T^a) = C\sigma^N e^{-Q/RT}$)
- Si se deriva respecto al tiempo: $\dot{\varepsilon} = n\beta/t^{1-n} + K$
- El primer término tiende a 0 cuando el $t \rightarrow \infty$ (fluencia transitoria)
- El 2º término indica una velocidad constante K (F. estacionaria)
- Región III $\rightarrow$ la sección $\downarrow$ y como la $F = cte \rightarrow \sigma \uparrow \rightarrow \dot{\varepsilon} \uparrow \uparrow$

Fluencia a altas temperaturas (III)

- Influencia de la tensión y la T^a en el comportamiento en fluencia.

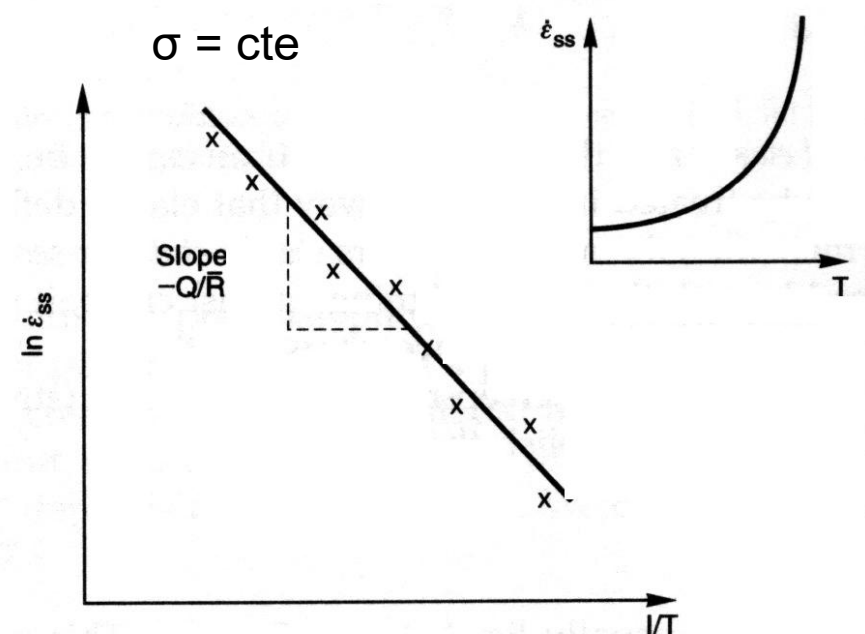
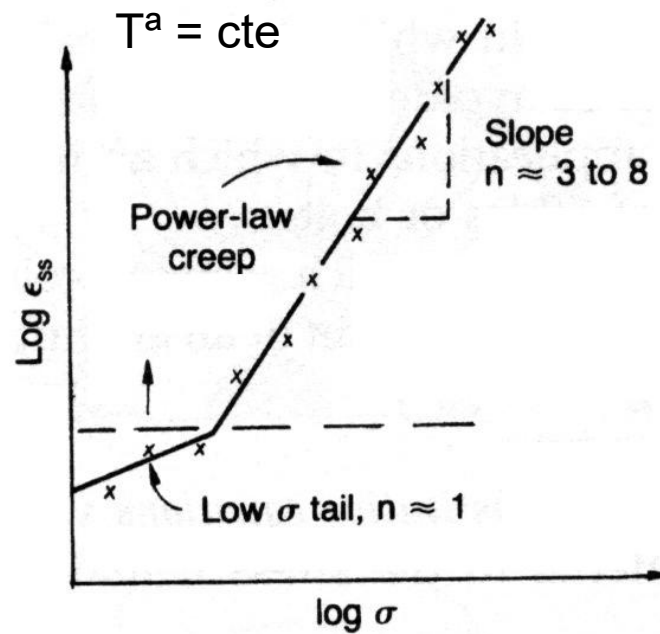


Evolución de las regiones



Fluencia a altas temperaturas (IV)

$$\dot{\epsilon}_{ss} = C\sigma^n e^{-Q/RT}$$

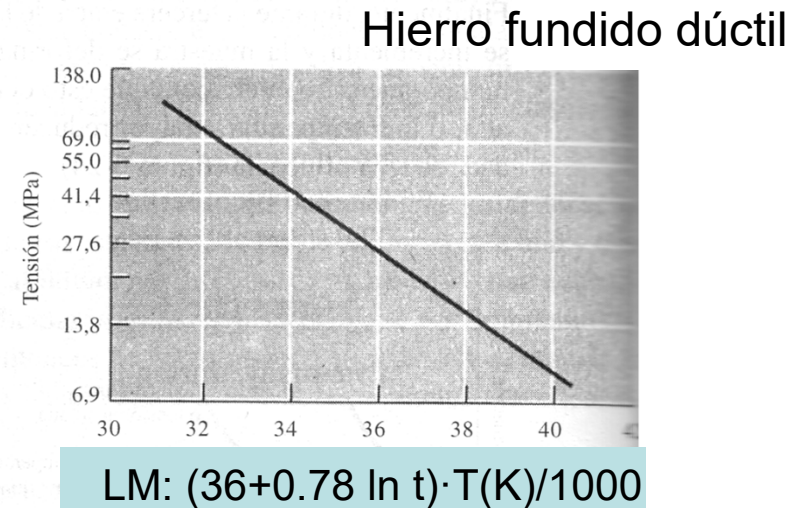
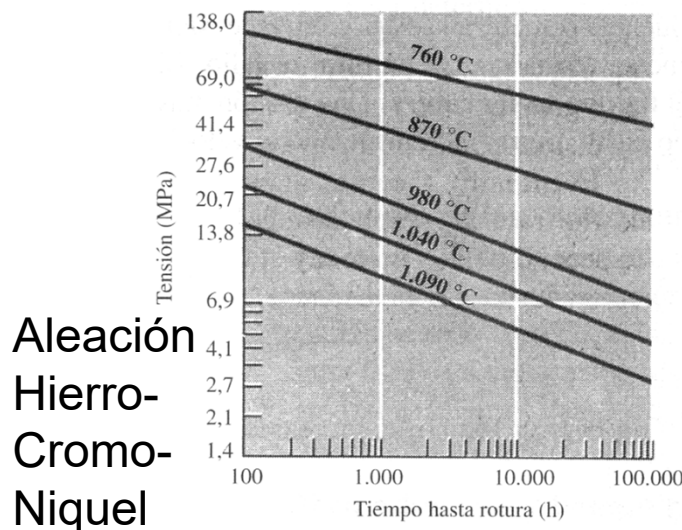


Diseño en fluencia

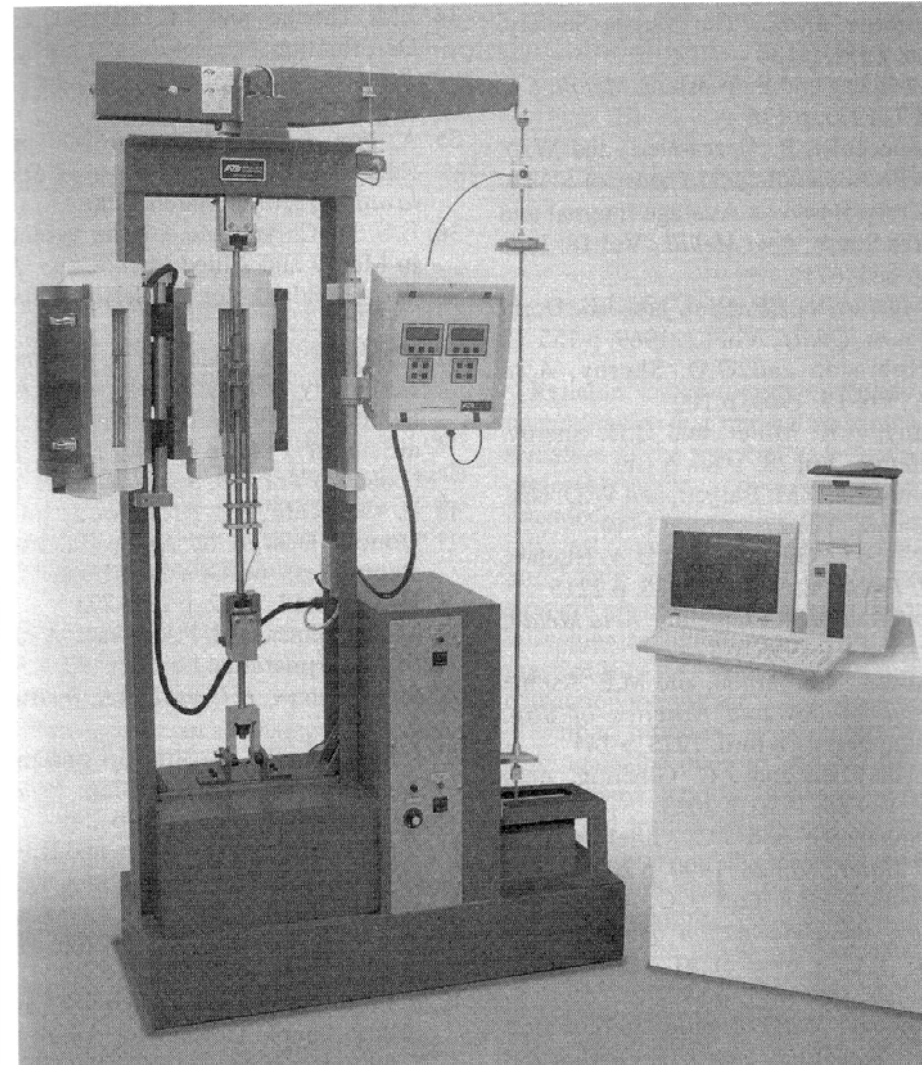
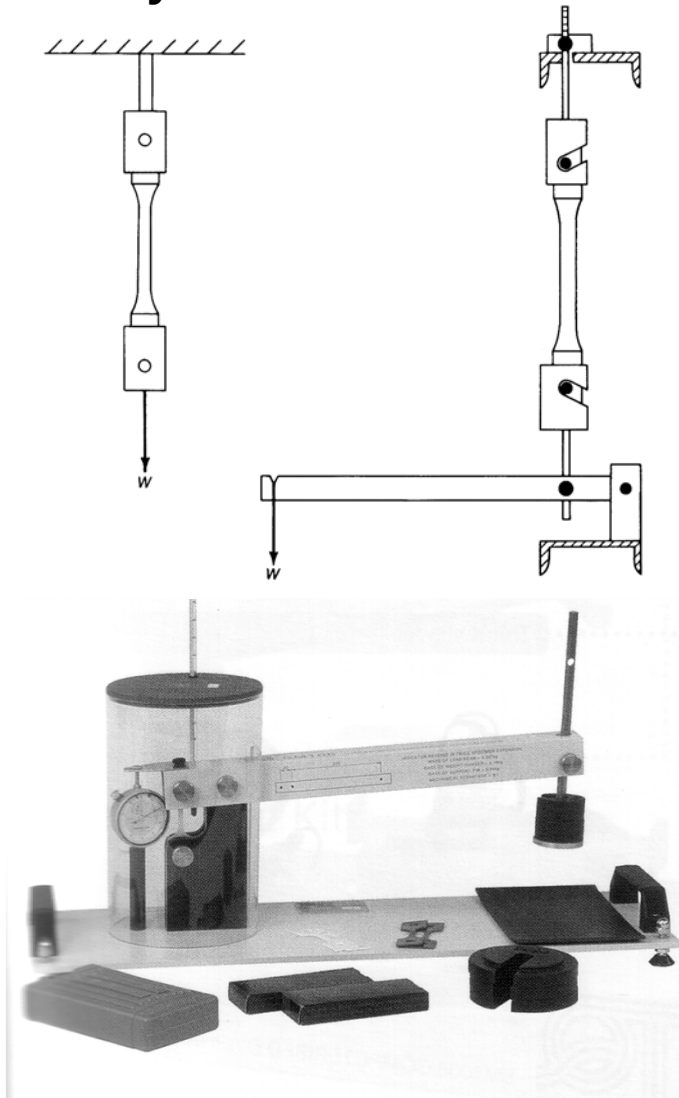
- ❑ Las curvas σ -t hasta rotura permite estimar la vida esperada de un componente para una combinación tensión y T^a
- ❑ El parámetro Larson –Miller es el más empleado para condensar la relación σ -t- T^a hasta rotura en una sola curva
- ❑ El parámetro Larson-Miller (LM) se define como

$$LM = (T/1000) \cdot (A + B \cdot \ln t)$$

donde T [K], t [h] y A y B son constantes que dependen del material

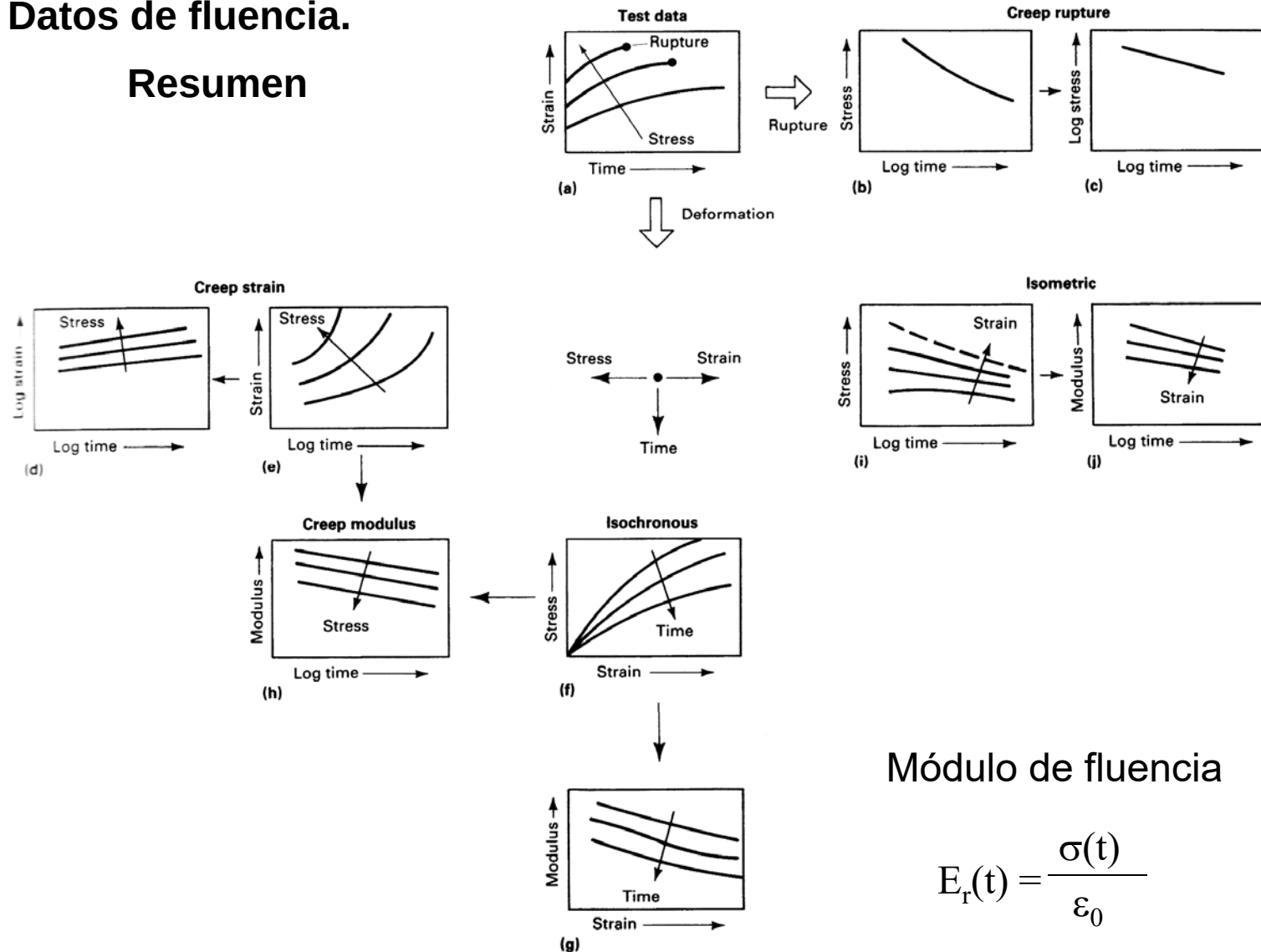


Ensayos de Fluencia



Datos de fluencia.

Resumen



Módulo de fluencia

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0}$$

RELAJACIÓN

$$\varepsilon = \varepsilon_0(\text{cte. inicial}) = \varepsilon_0^p + \varepsilon_0^e(t) + \varepsilon_v(t)$$

$$\dot{\varepsilon} = 0 = \dot{\varepsilon}_0^e + \dot{\varepsilon}_v \Rightarrow \dot{\varepsilon}_v = -\dot{\varepsilon}_0^e$$

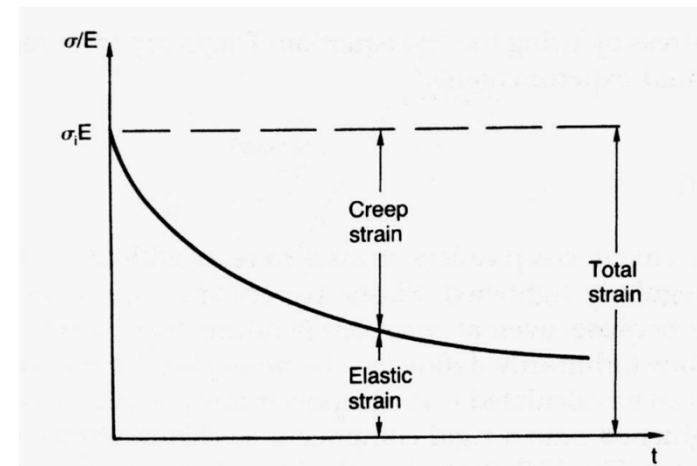
$$\dot{\varepsilon}_v = -\frac{\dot{\sigma}}{E}$$

$$\sigma_i \rightarrow \Delta\varepsilon_v (\sigma = \sigma_i)$$

$$\Delta\varepsilon_v (\sigma = \sigma_i) \rightarrow \Delta\sigma_i = -E\Delta\varepsilon_v; -\Delta\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_c$$

$$\Delta\sigma_{ic} = E\Delta\varepsilon_c \rightarrow \sigma_{i+1} = \sigma_i - \Delta\sigma_{ic}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 - \sum_1^{N(t)} \Delta\sigma_{ic}$$



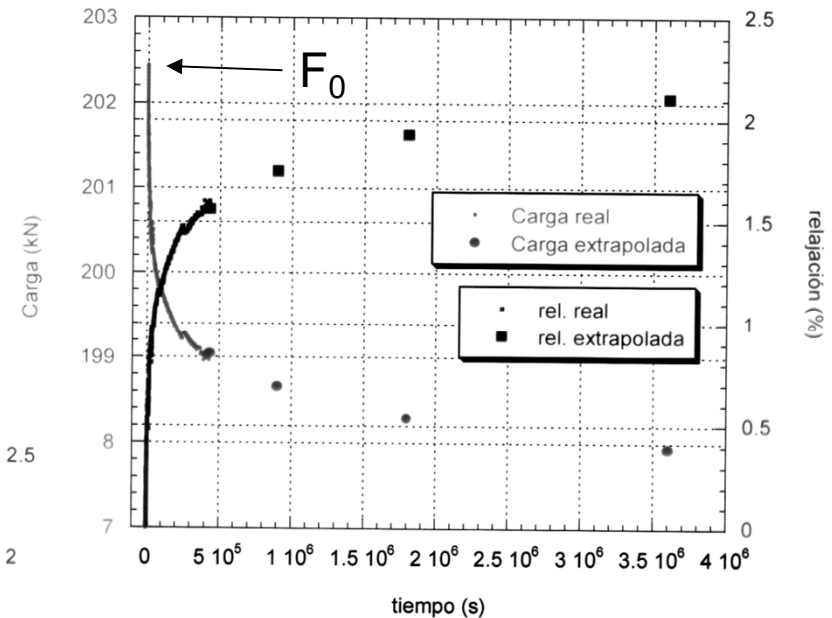
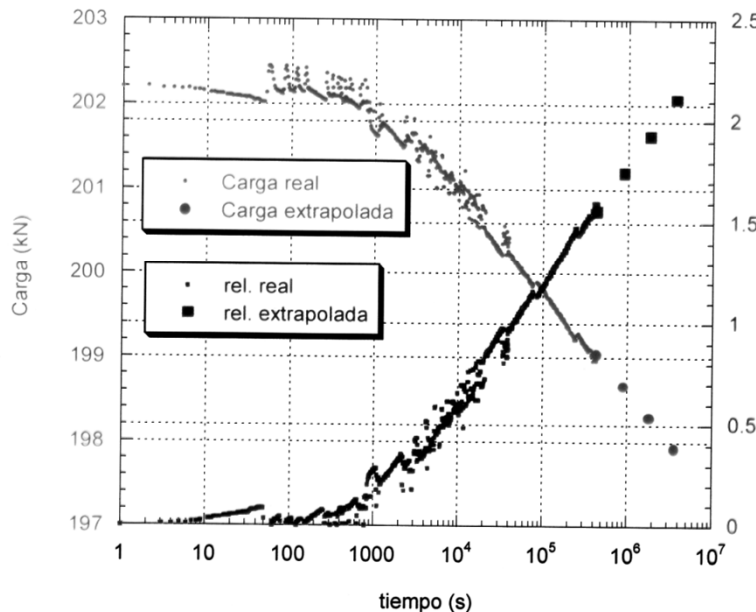
Ensayo de relajación. Equipo



Ensayo de relajación. Resultado

Ensayo de relajación a 120 h

$$R(t) = \frac{F_0 - F(t)}{F_0} \cdot 100$$



Extrapolado a 1000 h:

$$\log R = A \cdot \log(t) + B \quad (\text{UNE EN ISO 15630-3})$$

$$\frac{1}{N-1} \left(\frac{1}{\sigma^{N-1}} - \frac{1}{\sigma_0^{N-1}} \right) = A \cdot E \cdot \log(1 + \nu \cdot t)$$