

8) ENSAYOS MECÁNICOS: INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas de los polímeros dependen fuertemente de la temperatura T y de la escala temporal de la deformación.

En general, y debido a los diferentes procesos de relajación molecular, los polímeros se consideran materiales *viscoelásticos*; es decir: con propiedades intermedias entre los líquidos viscosos y los sólidos elásticos.

- A *bajas temperaturas*, se comportan como sólidos elásticos rígidos, con módulos elásticos o de Young entre 10^9 y 10^{10} Pa (1-10 GPa). La elasticidad es reversible sólo ante estiramientos muy pequeños, pero luego pueden ceder irreversiblemente (deslizamiento o “yield”), y eventualmente se rompen ante estiramientos de unos pocos puntos porcentuales.
- A *altas temperaturas*, y si los materiales están vulcanizados o bien poseen muy altas M , entonces se comportan como gomas elásticas, con módulos elásticos mucho menores (entre 10^5 y 10^6 Pa); pudiendo soportar estiramientos reversibles de hasta 100% o más sin exhibir deformación permanente luego de retirada la fuerza.
- A *temperaturas intermedias* (en el rango de la transición vítrea), el polímero no es ni totalmente vítreo ni totalmente gomoso, sino que exhibe características viscoelásticas, con módulos intermedios.

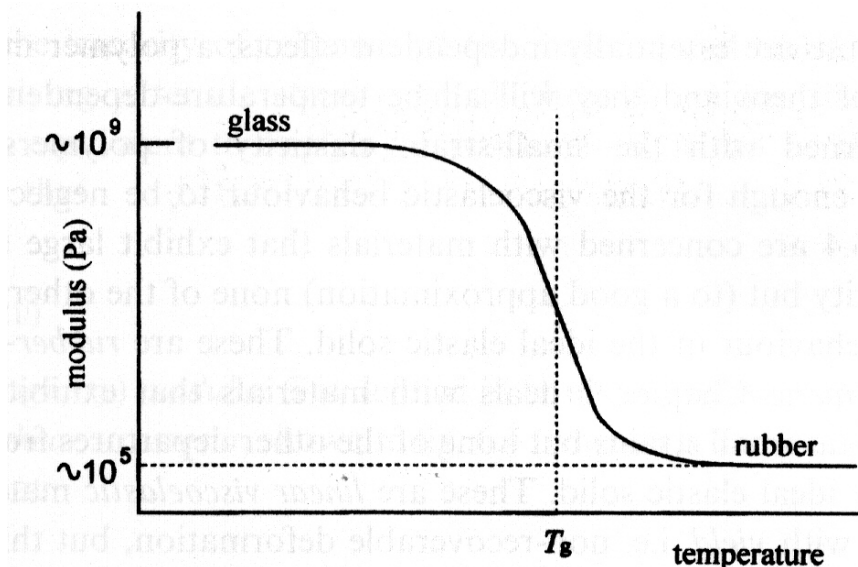


Fig. 6.1 Young's modulus versus temperature for a model polymer. T_g is the glass-transition temperature.

Los polímeros semi-cristalinos exhiben además una segunda caída del módulo, en T_m . Normalmente, los límites de uso de un material polimérico están determinados por sus valores de T_g , T_m y $T_{desc.}$, como sigue:

- en piezas *estructurales rígidas*: $T_{uso} < T_g$ ó $T_{desc.}$ o $T_{uso} < T_m$ ó $T_{desc.}$
- en materiales *elásticos o flexibles*: $T_{uso} > T_g$.

La T de uso más común es la T ambiente.

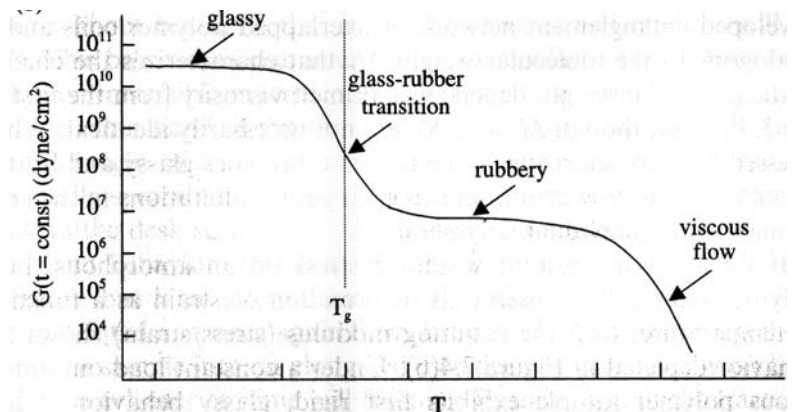
En la figura anterior, el tiempo t no aparece explícitamente. Sin embargo, ya veremos que existen gráficos equivalentes al visto, con T reemplazada por t . Las razones son las siguientes.

- El comportamiento elástico de materiales rígidos a bajas T (donde no ocurren relajaciones moleculares importantes) es similar al comportamiento elástico de materiales blandos en tiempos muy cortos o muy altas frecuencias de oscilación (en esas condiciones, las moléculas no alcanzan a relajarse y lucen como rígidas).
- Inversamente, si se aplican tensiones en tiempos muy largos, aún los materiales vítreos pueden deformarse o “fluir” como gomas o líquidos.

Así, un mismo polímero amorfo de alta M exhibe comportamientos similares ante: a) variaciones de T en ensayos a t intermedios constantes y del orden del segundo; y b) variaciones en el tiempo o frecuencia de aplicación de la tensión a T cte. (p.ej. a $T > T_g$).

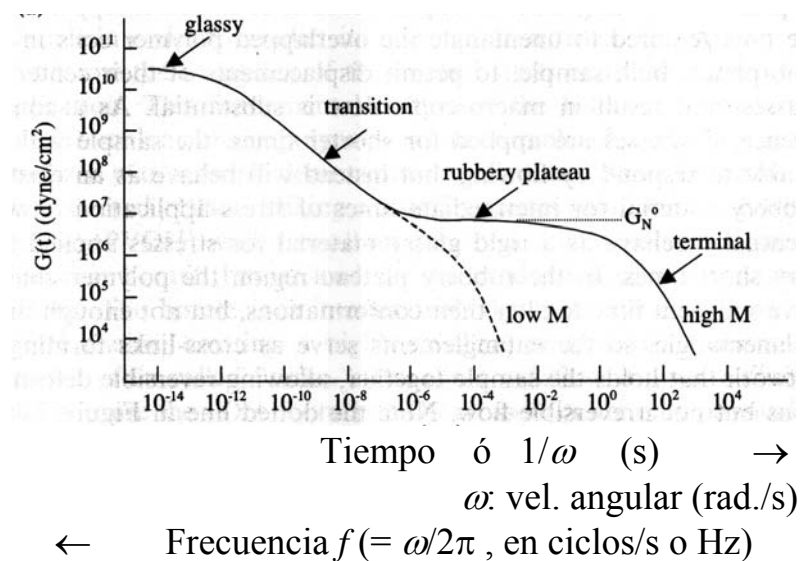
a) Módulo Elástico *vs.* T
(a t cte.)

$$(10 \text{ dyn/cm}^2 = 1 \text{ Pa})$$



b) Módulo Elástico *vs.* t (ó frecuencia) en ensayos oscilatorios con M alta y M baja
(a T cte. $> T_g$)

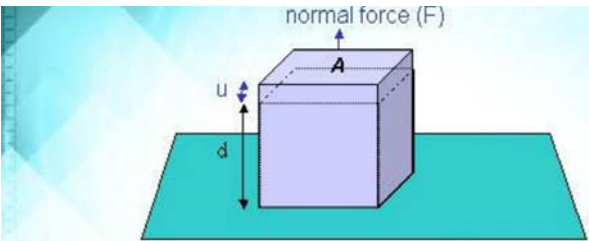
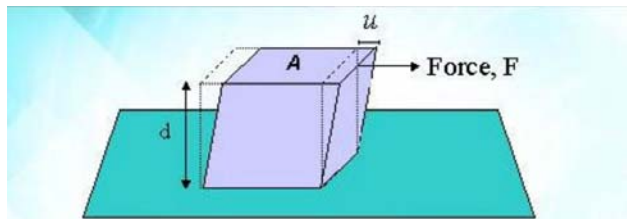
(G_N^0 : módulo de un material entrecruzado que no fluye)



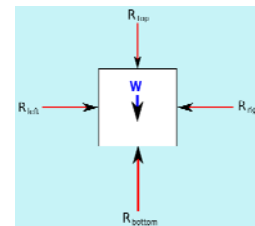
Ensayos de Tensión-Deformación en Sólidos y Fluidos

Para caracterizar a un sólido independientemente de las dimensiones y forma de la probeta, no se representa: **(Fuerza vs. Dimensión)**, sino: **(Tensión vs. Deformación Adimensional)**.

Ensayos más comunes de tensión/ deformación:

<p><i>Tensiones y deformaciones longitudinales (o extensionales)</i></p>  <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">Extensional stress (σ) = $\frac{\text{normal force (N)}}{\text{surface area (m}^2\text{)}}$</td> <td style="width: 20%;">$\sigma_e = \frac{F}{A}$</td> <td style="width: 20%; text-align: right;">Units Pa</td> </tr> <tr> <td>Extensional strain (ϵ) = $\frac{\text{deformation}}{\text{height}}$</td> <td>$\epsilon = \frac{u}{d}$</td> <td style="text-align: right;">None</td> </tr> <tr> <td>Extensional rate ($\dot{\epsilon}$) = $\frac{\text{change in strain}}{\text{change in time (s)}}$</td> <td>$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$</td> <td style="text-align: right;">1/s</td> </tr> </table> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">Esfuerzo Tensil (causa) → Deformación Adim. Tensil (efecto)</p> $\sigma_t = \frac{F_{\text{long.}}}{A_{\text{transv.}}} \qquad \epsilon_t = \frac{u}{d} = \frac{\Delta l}{l_0}$	Extensional stress (σ) = $\frac{\text{normal force (N)}}{\text{surface area (m}^2\text{)}}$	$\sigma_e = \frac{F}{A}$	Units Pa	Extensional strain (ϵ) = $\frac{\text{deformation}}{\text{height}}$	$\epsilon = \frac{u}{d}$	None	Extensional rate ($\dot{\epsilon}$) = $\frac{\text{change in strain}}{\text{change in time (s)}}$	$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$	1/s	<p><i>Tensiones y deformaciones tangenciales (o de corte)</i></p>  <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">Shear stress (τ) = $\frac{\text{force (N)}}{\text{surface area (m}^2\text{)}}$</td> <td style="width: 20%;">$\tau = \frac{F_{\text{tan.}}}{A}$</td> <td style="width: 20%; text-align: right;">Units Pa</td> </tr> <tr> <td>Shear strain (γ) = $\frac{\text{deformation}}{\text{height}}$</td> <td>$\gamma = \frac{u}{d}$</td> <td style="text-align: right;">None</td> </tr> <tr> <td>Shear rate* ($\dot{\gamma}$) = $\frac{\text{change in strain}}{\text{change in time (s)}}$</td> <td>$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$</td> <td style="text-align: right;">1/s</td> </tr> </table> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">Esfuerzo de Corte (causa) → Deformación Adim. de Corte (efecto)</p> $\tau_s = \frac{F_{\text{tangencial}}}{A_{\text{tangencial}}} \qquad \gamma = \frac{u}{d} = \tan \theta$	Shear stress (τ) = $\frac{\text{force (N)}}{\text{surface area (m}^2\text{)}}$	$\tau = \frac{F_{\text{tan.}}}{A}$	Units Pa	Shear strain (γ) = $\frac{\text{deformation}}{\text{height}}$	$\gamma = \frac{u}{d}$	None	Shear rate* ($\dot{\gamma}$) = $\frac{\text{change in strain}}{\text{change in time (s)}}$	$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$	1/s
Extensional stress (σ) = $\frac{\text{normal force (N)}}{\text{surface area (m}^2\text{)}}$	$\sigma_e = \frac{F}{A}$	Units Pa																	
Extensional strain (ϵ) = $\frac{\text{deformation}}{\text{height}}$	$\epsilon = \frac{u}{d}$	None																	
Extensional rate ($\dot{\epsilon}$) = $\frac{\text{change in strain}}{\text{change in time (s)}}$	$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$	1/s																	
Shear stress (τ) = $\frac{\text{force (N)}}{\text{surface area (m}^2\text{)}}$	$\tau = \frac{F_{\text{tan.}}}{A}$	Units Pa																	
Shear strain (γ) = $\frac{\text{deformation}}{\text{height}}$	$\gamma = \frac{u}{d}$	None																	
Shear rate* ($\dot{\gamma}$) = $\frac{\text{change in strain}}{\text{change in time (s)}}$	$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$	1/s																	

Otra ensayo importante de tensión-deformación es volumétrico o hidrostático (que no estudiaremos):

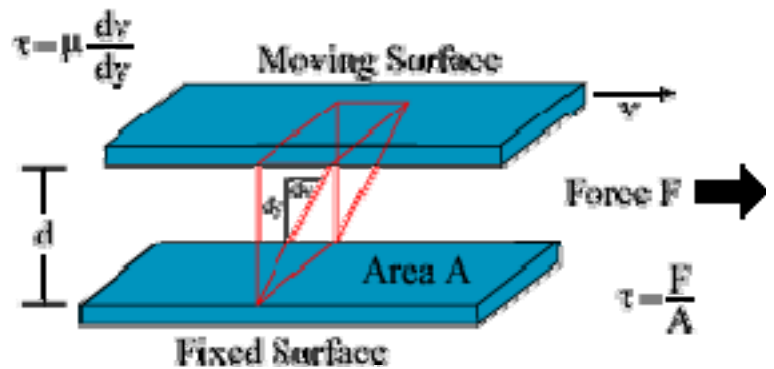


En Sólidos, se usan tensiones ingenieriles:

<p>Esfuerzo (“Stress”): Tensión Longitudinal Ingenieril</p> $\left(\equiv \frac{\text{Fuerza de Deformación}}{\text{Área Inicial de Aplicación}} \right)$ <p style="text-align: center;">[N/m² = Pa]</p>	→	<p>Deformación adimensional (“Strain”)</p> $\left(\equiv \frac{\text{Cambio de Dimensión}}{\text{Dimensión Inicial}} \right)$ <p style="text-align: center;">[—]</p>
--	---	---

Líquidos:

En líquidos, no es posible medir la deformación adimensional, y en cambio se mide el perfil de velocidades del flujo generado (o velocidad de deformación); de unidades [t^{-1}].



Esfuerzo de Corte
("Shear Stress")

$$\tau_s = \frac{F_{\text{tang.}}}{A_{\text{tang. inicial}}}$$

[N/m² = Pa]



Perfil de Velocidades,
Velocidad de Deformación
("Strain Rate") o
Velocidad de Corte
("Shear Rate")

$$\frac{dv}{dy} = \frac{de}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} \left(\approx \frac{v_0}{d} \right)$$

[s⁻¹]

Stress and strain

<http://www.youtube.com/watch?v=S6gu7bzvMqQ>

Comportamientos límites de sólidos y líquidos ante la aplicación de una fuerza

1) Si en un sólido no se excede el límite elástico, entonces la deformación ϵ resulta proporcional a la tensión aplicada τ (ley de Hooke):

$$\epsilon = (1/E) \sigma \quad (E: \text{Módulo de Young})$$

En cambio, en un fluido la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$ resulta proporcional a la tensión aplicada τ_s :

$$\dot{\gamma} = (1/\eta) \tau_s \quad (\eta: \text{Viscosidad})$$

2) En un sólido elástico, la deformación no depende del tiempo de aplicación de la fuerza; y la deformación desaparece al eliminarse la fuerza debido a la aparición de una fuerza interna de recuperación.

En cambio, un fluido continua fluyendo mientras se siga aplicando una fuerza, pero deja de fluir sin recuperación en cuanto dicha fuerza es retirada.

Tres Comportamientos Característicos: Elasticidad, Plasticidad y Viscoelasticidad

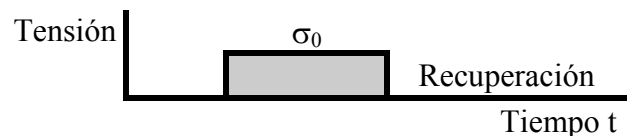
Elasticidad: Tendencia de un material a deformarse temporariamente cuando se le aplica una tensión y a recuperar su forma cuando esa tensión es eliminada. A tales efectos, se deforma primero reversiblemente para acomodar la tensión externa y autogenera luego una fuerza recuperatoria de la forma.

Plasticidad: Tendencia de un material a deformarse en forma permanente ante la aplicación de una tensión externa. Es el caso de una masilla o una goma de mascar.

Elasticidad y Plasticidad

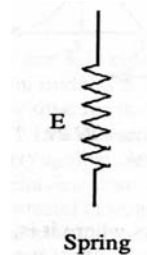
<http://www.youtube.com/watch?v=5iGy-cw2KCM>

Supongamos un ensayo de saltos escalón en la tensión:



a) Sólido elástico ideal

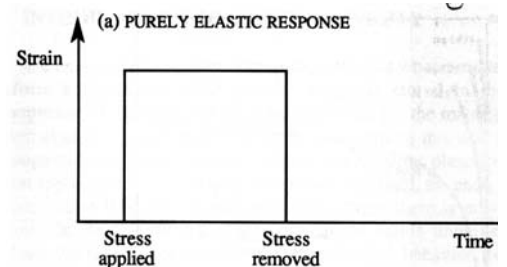
(resorte ideal):



$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t)$$

$$\varepsilon(t) = J_0 \sigma(t)$$

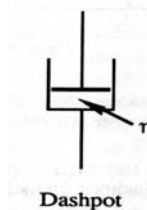
(E_0 : Mód. Young)
(J_0 : Compliancia)



Se estira (hasta σ_0/E_0) y se recupera instantáneamente sin deslizamiento (“creep”).

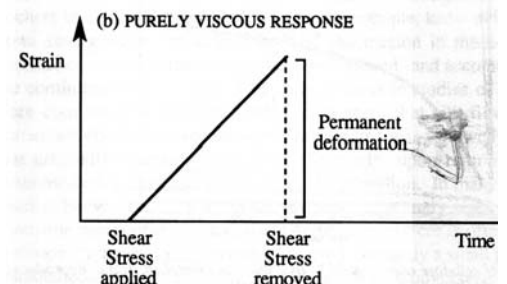
B) Fluido viscoso newtoniano ideal

(amortiguador con fluido incompresible ideal):



$$\sigma(t) = \eta_0 \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

(η_0 : Viscosidad)



“Creep” constante
 $\varepsilon(t) = (\sigma_0/\eta_0) \times t$
y deformación permanente.

c) *Materiales viscoelásticos*

(a) *Gomas vulcanizadas, analizadas a T decrecientes desde T_{amb} .*
Al acercamos a la T_g , el material se transforma desde un elastómero de respuesta instantánea a viscoelásticos con deslizamiento (“creep”) reversible o irreversible.

(b) *Fibra a T_{amb} .*
Se observa cedencia, “yield” o deformación plástica sin recuperación.

(c) *Plástico amorfo a $T \cong T_g$.*
Se observa cedencia de entrada, sin recuperación.

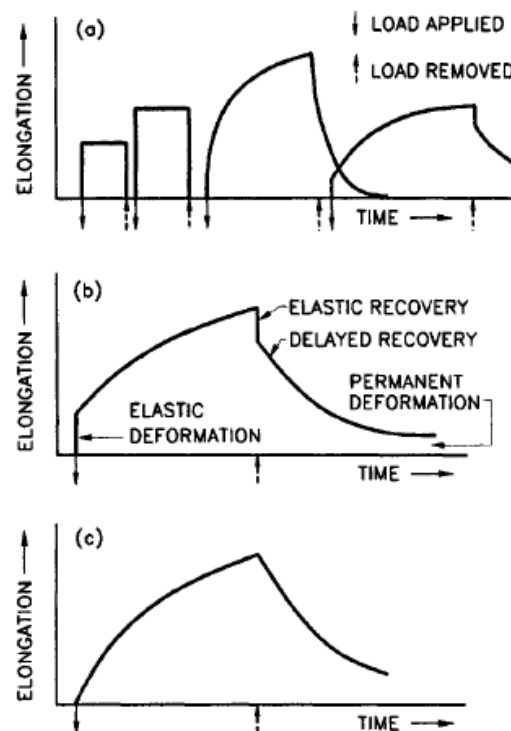


Fig. 1-3. Deformation of various polymer types when stress is applied and unloaded. (a) Cross linked ideal elastomer. (b) Fiber. (c) Amorphous plastic.

Desviaciones con respecto al comportamiento elástico ideal:

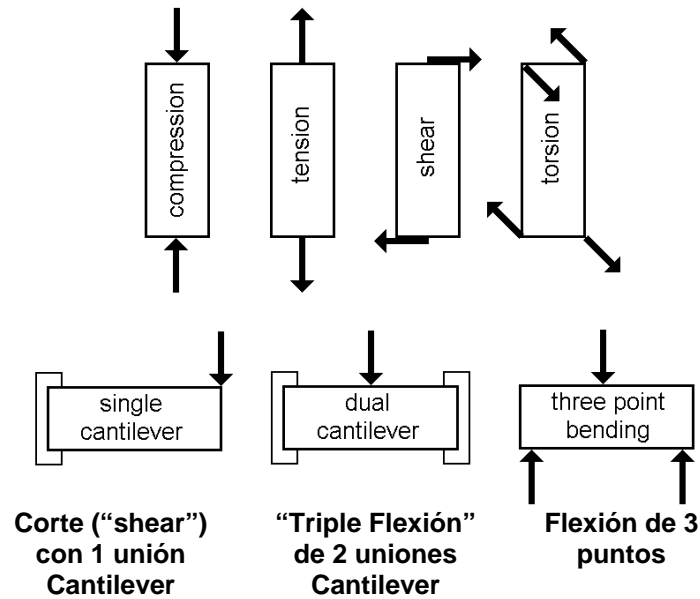
- 1) respuesta no lineal debido a variaciones en el módulo ($E = \sigma_0/\epsilon_0$), por lo cual al duplicar la tensión no se duplica la deformación; lo que no significa que no haya una recuperación completa de forma;
- 2) deslizamiento o “creep” no instantáneo ante una tensión instantáneamente aplicada;
- 3) recuperación incompleta al retirar la tensión; lo que implica cedencia irreversible (o “yield”);
- 4) grandes estiramientos sin fractura; y
- 5) respuesta anisotrópica.

Los 5 comportamientos **viscoelásticos** mencionados dependen de la temperatura y de la fatiga del material (“aging”).

Los materiales **viscoelásticos lineales** sólo exhiben desviaciones del tipo 2) de dependencia no instantánea entre tensión y deformación, pero ninguna de las otras características no ideales.

Clasificaciones de Ensayos Mecánicos

a) Según el tipo de sollicitación



b) Según que el tiempo aparezca o no como variable independiente

a₁) Ensayos escalón de deslizamiento ("creep") y recuperación: t es la variable independiente

Se aplica una carga constante durante un tiempo, y luego se la retira.

Se representa la deformación ϵ o la deformación adimensional vs. el tiempo t .

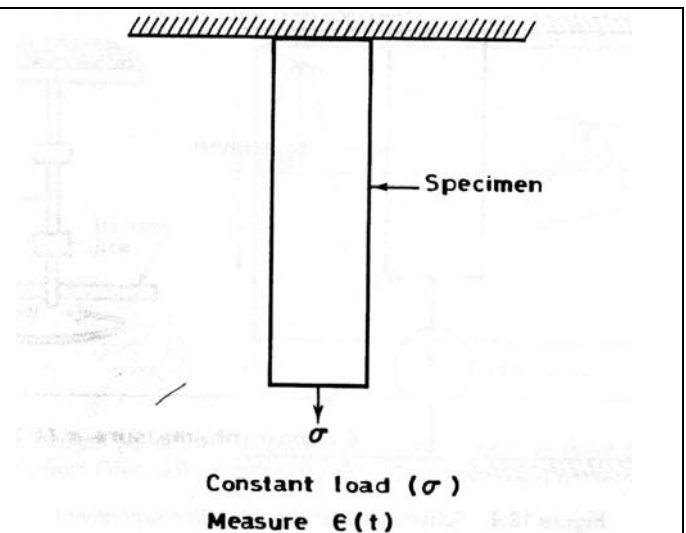


Figure 13.2 Schematic representation of creep experiment.

a₁) Tracción-Elongación a Vel. de Estiramiento Constante (t no aparece explícitamente)

Se aplica una vel. de estiramiento cte. ($\dot{\epsilon} = \text{cte.}$) y se mide la tensión generada (σ).

Se representa σ vs. ϵ , siendo $\dot{\epsilon}$ el parámetro de la curva.

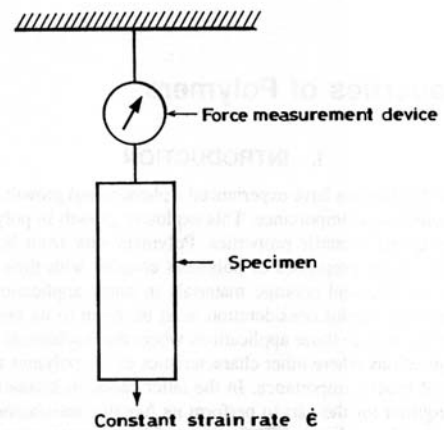


Figure 13.1 Schematic of stress-strain test.

a₃) Ensayos Oscilatorios (el t aparece indirectamente)

Se aplica una tensión de entrada sinusoidal:

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t).$$

- τ_0 : amplitud;
- ω : velocidad angular o frecuencia angular;
- ωt : ángulo en rad.

Si el sistema es viscoelástico lineal, la deformación de salida es también sinusoidal pero retrasada en δ ; con ($0 < \delta < \pi/2$), es decir:

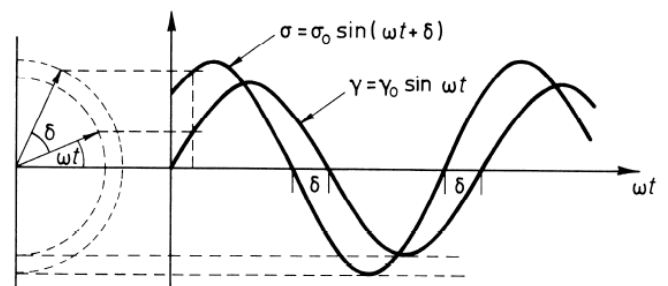
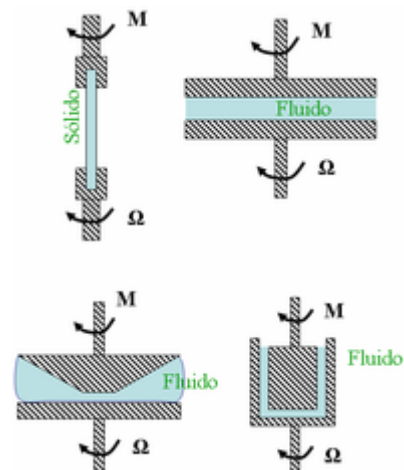
$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t - \delta)$$

A cada (τ_0, ω) , se miden:

- amplitud ϵ_0 , y
- retraso angular.

Luego de la desaparición del transitorio, la respuesta en frecuencia requiere conocer la relación de amplitudes $E^* = \sigma_0/\gamma_0$ y el desfase δ .

Luego, se calculan: E' , E'' , y $\tan\delta$.

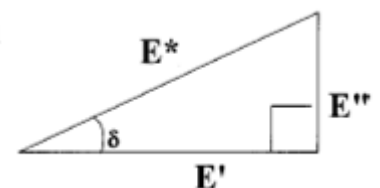


$$E^* = \text{stress/strain}$$

$$E' = E^* \cos \delta$$

$$E'' = E^* \sin \delta$$

$$\tan \delta = E''/E'$$



c) Según el tipo de relación Causa-Efecto

c₁) Causalidad Normal

- “Creep”/ Recuperación: Aplicamos σ y medimos ϵ .
- Ensayo oscilatorio: Aplicamos tensión sinusoidal y medimos ϵ .

c₂) Causalidad “Invertida”

- Tracción/ Elongación: Aplicamos $\dot{\epsilon} = \text{cte.}$ y medimos σ .
- Ensayo oscilatorio: Aplicamos deformación sinusoidal y medimos σ .

d) Según las magnitudes de las tensiones y deformaciones

d₁) Pequeñas Tensiones/ Deformaciones

En el uso normal de un sólido polimérico, las tensiones/ deformaciones son lo suficientemente pequeñas como para no generar deformaciones irreversibles o roturas.

Los ensayos dinámicos oscilatorios caracterizan el comportamiento dinámico normal de un material polimérico, y también permiten desarrollar modelos matemáticos dinámicos de ecuaciones diferenciales lineales (o viscoelásticos lineales).

c₂) Grandes Tensiones/ Deformaciones

Son necesarias para evaluar las características últimas de resistencia mecánica como la tenacidad y la deformación de rotura del material.

- Ensayo típico: Análisis de Tensión-Deformación en máquina Instron.

Modelos Viscoelásticos Lineales

Se procura desarrollar modelos matemáticos dinámicos simples que representen el comportamiento temporal viscoelástico del material ante pequeñas entradas (p.ej.: escalón o sinusoidales, en tensión o en deformación).

Los modelos viscoelásticos lineales se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales de primer grado con coeficientes constantes (E_0 y η_0).

En general, en el tratamiento básico se desprecian las contribuciones inerciales, es decir se asumen masas nulas.

Para representar a los distintos comportamientos dinámico-mecánicos, se emplean combinaciones (en serie, en paralelo, o en serie/paralelo) de los 2 elementos ideales básicos: el elástico ideal (resorte) y el plástico ideal (amortiguador).

Elemento de Maxwell

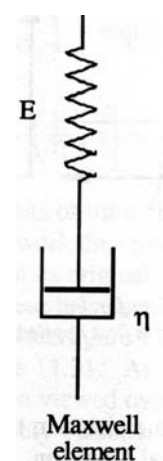
$$\sigma_{\text{spring}}(t) = \sigma_{\text{dashpot}}(t) = \sigma(t)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_s(t) + \varepsilon_d(t)$$

$$\sigma_s(t) = E_M \varepsilon_s(t)$$

$$\sigma_d(t) = \eta_M \dot{\varepsilon}_d(t)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_M} \frac{d\sigma_s}{dt} + \frac{\sigma_d}{\eta_M}$$

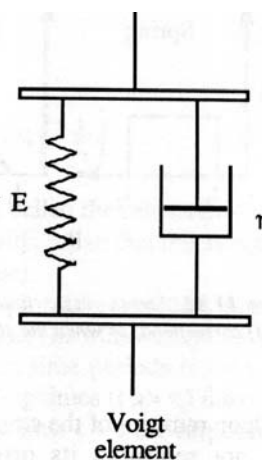


Elemento de Voigt-Kelvin

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_s(t) = \varepsilon_d(t)$$

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d$$

$$\sigma = E_V \varepsilon_s + \eta_V \frac{d\varepsilon_d}{dt}$$



Como veremos más adelante, los modelos de Maxwell y/o de Voigt-Kelvin son insuficientes para simular el comportamiento viscoelástico de “creep”/ recuperación.

