



Viscoelasticidad. Comportamiento mecánico de materiales plásticos a largo plazo.

Apellido, nombre	Balart Gimeno, Rafael Antonio (rbalart@mcm.upv.es) Quiles-Carrillo, Luís Jesús (lquiles1@epsa.upv.es) Torres-Giner, Sergio (storresginer@iata.csic.es) Lascano Aimacaña, Diego (dielas@epsa.upv.es) Rojas Lema, Sandra (sanrole@epsa.upv.es) Ivorra Martínez, Juan (juaiymar@epsa.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (DIMM)
Centro	Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) Universitat Politècnica de València (UPV)

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a mostrarte la diferencia de **comportamiento mecánico** que presentan los **materiales plásticos**, frente a otros materiales ampliamente utilizados en ingeniería, como son los materiales elásticos. En particular, el artículo se centra en la naturaleza **viscoelástica** de los materiales poliméricos y cómo este hecho afecta al comportamiento mecánico de este tipo de materiales ya que, entre otros, parámetros, se ve fuertemente influenciado por la variable **tiempo**.

2 Introducción

Los materiales plásticos y, fundamentalmente los **polímero lineales** o **termoplásticos**, presentan una naturaleza **dual**. Por un lado, se comportan como "**sólidos elásticos**" con una respuesta (deformación o elongación) inmediata o instantánea que no depende de la variable tiempo, sino solamente de las características elásticas del material. No obstante, es importante tener en cuenta que los termoplásticos, también presentan cierto comportamiento de "**líquido viscoso**", que está relacionado con la estructura molecular de los polímeros lineales. Evidentemente, la componente viscosa depende de la variable tiempo; en consecuencia, el comportamiento mecánico de este tipo de materiales, está fuertemente ligado a la variable tiempo.

Esta situación no ocurre en los sólidos elásticos, ampliamente empleados en ingeniería. Los metales y sus aleaciones se consideran como sólidos con comportamiento elástico (al menos en cierto rango de tensiones). De hecho, en la mayoría de los Grados en Ingeniería es posible encontrar asignaturas ligadas a "Elasticidad y resistencia de materiales". La versatilidad de los materiales con comportamiento elástico radica en que sus propiedades no varían con el tiempo. Así pues, si un determinado acero presenta un módulo elástico, $E = 210 \text{ GPa}$, se considera que es un valor constante para el material y no cambia con la variable tiempo ^[1].

Por el contrario, los termoplásticos o polímeros lineales, presentan una dualidad de comportamiento ya que su respuesta (deformación o elongación) frente a la aplicación de un estado tensional, está constituida por **dos componentes**: una **elástica** (relacionada con su naturaleza de sólido elástico) y una **viscosa** (ligada a su naturaleza de líquido viscoso). Es por ello que se considera que el comportamiento de estos materiales es de tipo "**viscoelástico**", término que engloba ambas componentes en la respuesta del material ^[2,3]. Esta dualidad de comportamiento conlleva un cambio importante en el comportamiento mecánico, ya que sus **propiedades mecánicas varían con el tiempo**. Para llevar a cabo una comparación con el ejemplo anterior, es posible afirmar que un determinado grado de poliestireno (PS) presenta un módulo de tracción (en el corto plazo) de 3.300 MPa pero que el mismo material, al cabo de 1.000 h de trabajo, su módulo se ha reducido hasta valores de 2.600 MPa.

Como se deduce del párrafo anterior, las **propiedades mecánicas** de los materiales viscoelásticos dependen de la variable **tiempo** y, considerando que las propiedades mecánicas representan la base para **diseño y cálculo** de piezas en ingeniería, la viscoelasticidad adquiere gran relevancia en el dimensionamiento de piezas de ingeniería con materiales que presentan este comportamiento.

3 Objetivos

El objetivo de este artículo docente es que puedas **identificar** las **variables** que intervienen en el **comportamiento mecánico** de materiales poliméricos (viscoelásticos) e identificar las diferentes **formas de trabajo** ligadas a la viscoelasticidad: **fluencia** o elongación con el incremento de tiempo, bajo la acción de una tensión constante y **relajación** o liberación de tensiones con el tiempo bajo la acción de una elongación o deformación constante.

4 Desarrollo

La **elasticidad** de materiales es una disciplina de gran relevancia en el ámbito de la ingeniería. Los materiales, en su zona de comportamiento elástico, presentan una respuesta como la de un muelle; es decir, si se aplica una tensión, se produce una elongación, pero si se elimina esta tensión, el material recupera completamente dicha deformación según la **Ley de Hooke** [1]. Es por ello que la zona de comportamiento elástico (lineal) sea de gran relevancia en ingeniería, ya que esta zona evita las deformaciones permanentes o plásticas. La **Figura 1** muestra el diagrama de tracción genérico de un acero donde se identifica el límite elástico (L_e) y la tensión de rotura (R_m). Habitualmente, la tensión máxima de trabajo (σ_w) en un material como el del gráfico se establece en el valor de L_e ya que, como puede apreciarse en el gráfico, una vez se elimina la tensión aplicada, el material recupera completamente hasta su forma original. En caso de que la tensión de trabajo máxima se estableciese por encima del límite elástico, se producirían deformaciones permanentes y, con valores cercanos a R_m se podría alcanzar la rotura de la pieza o componente. Es por ello que, en el campo de la ingeniería, suele trabajarse en la **zona elástica** ya que aporta un margen de seguridad importante en el dimensionamiento, evitando las deformaciones permanentes.

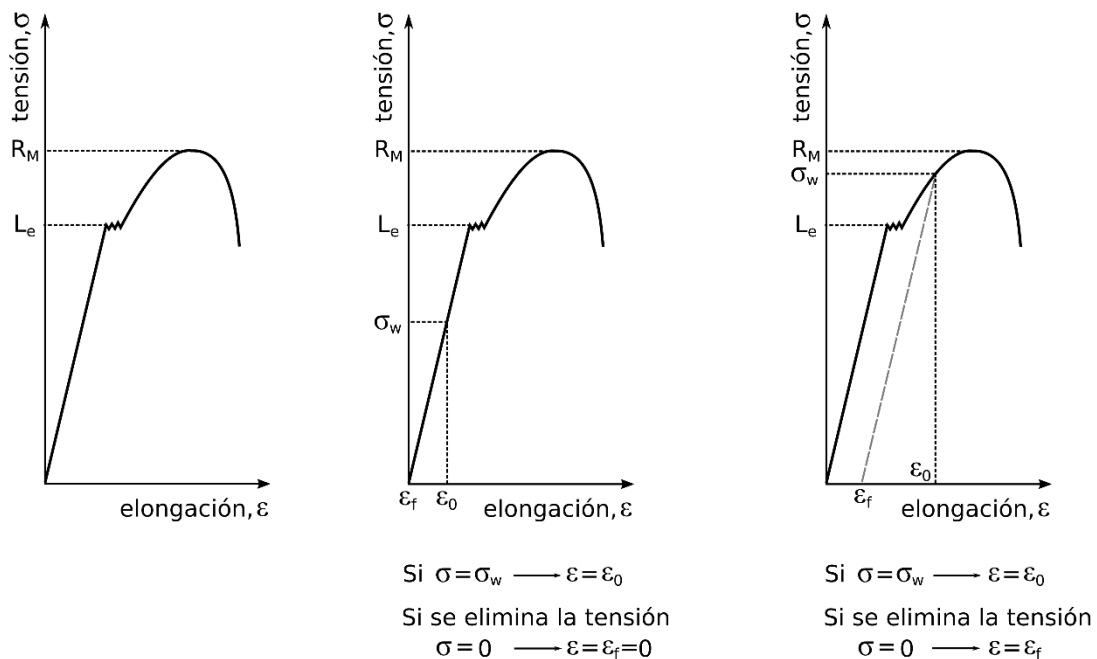


Figura 1. Representación esquemática del diagrama de tracción de un acero y comportamiento del material bajo diferentes estados tensionales.



En la zona de comportamiento **elástico**, el material se comporta según la **Ley de Hooke** que establece una proporcionalidad entre las tensiones aplicadas y las elongaciones. La **constante de proporcionalidad** es, precisamente, el módulo del material (E).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Expresión 1

Esta expresión **no** contempla la variable **tiempo**, de tal manera que, se puede considerar que la respuesta elástica en un material no depende de la variable tiempo y, en consecuencia, se produce de forma inmediata cuando se aplica el estado tensional. El comportamiento mecánico de los sólidos elásticos no depende del tiempo y, por ello, la relación entre las tensiones aplicadas (σ) y las elongaciones obtenidas (ε), queda perfectamente definida por la Ley de Hooke y el correspondiente diagrama de tracción o tensión-elongación.

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, *si tuvieses que dimensionar un componente con un acero cuyo módulo $E=210$ GPa, ¿crees que este módulo sería el mismo si la pieza tuviera que trabajar 100 h o 10.000 h?* Efectivamente, tal como sugiere la **Expresión 1**, la relación entre las tensiones y elongaciones de los materiales en su zona elástica depende de un valor constante que es su módulo elástico (E), que **NO** depende del tiempo de trabajo de la pieza o componente. Con lo cual, el módulo sería el mismo para los cálculos a diferentes tiempos de trabajo (sin considerar los fenómenos de fatiga bajo esfuerzos dinámicos).

Como se ha descrito anteriormente, los polímeros termoplásticos presentan un comportamiento mecánico que incluye una **naturaleza dual**: por un lado, se comportan como **sólidos elásticos**, con una respuesta inmediata que no depende del tiempo. No obstante, debido a su estructura en forma de ovillo, también ofrecen una respuesta de "**líquido viscoso**" con el paso del tiempo. Así pues, la respuesta global (por ejemplo, la elongación, ε , bajo un determinado estado tensional, σ) en un material polimérico, presenta una **componente elástica** (ε_e) y una **componente viscosa** (ε_v), tal y como se muestra en la **Expresión 2**.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v$$

$$\varepsilon_e \neq f(t)$$

$$\varepsilon_v = f(t)$$

Expresión 2

Debido a esta dualidad de comportamiento, se considera que los polímeros termoplásticos o lineales, presentan un comportamiento "**viscoelástico**" que, evidentemente, es **función del tiempo**.

La respuesta elástica (ε_e), viene determinada por la **Ley de Hooke (Expresión 3)**, con una constante de proporcionalidad equivalente al módulo elástico. Por su parte, la respuesta viscosa (ε_v) viene definida por la **Ley de Newton** para fluidos newtonianos (**Expresión 4**).

$$\sigma = \xi \cdot \varepsilon_e \rightarrow \xi \equiv \text{Constante elástica}$$

Expresión 3

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_v}{dt} \rightarrow \eta \equiv \text{Constante viscosa}$$

Expresión 4

Teniendo en consideración esta naturaleza dual, el comportamiento mecánico de los materiales viscoelásticos, está ligado a las tensiones aplicadas (σ), las elongaciones (ε) y la variable tiempo (t). Es por ello que el comportamiento mecánico de un material viscoelástico no queda definido únicamente con un diagrama tensión deformación (σ - ε), ya que, además, se debe tener en cuenta la variable tiempo (t), dando lugar a un gráfico con una geometría de **superficie 3D** con los tres ejes correspondientes a las tensiones aplicadas (σ), elongaciones producidas (ε) y el tiempo de trabajo (t) tal y como se muestra en la **Figura 2**.^[4,5]

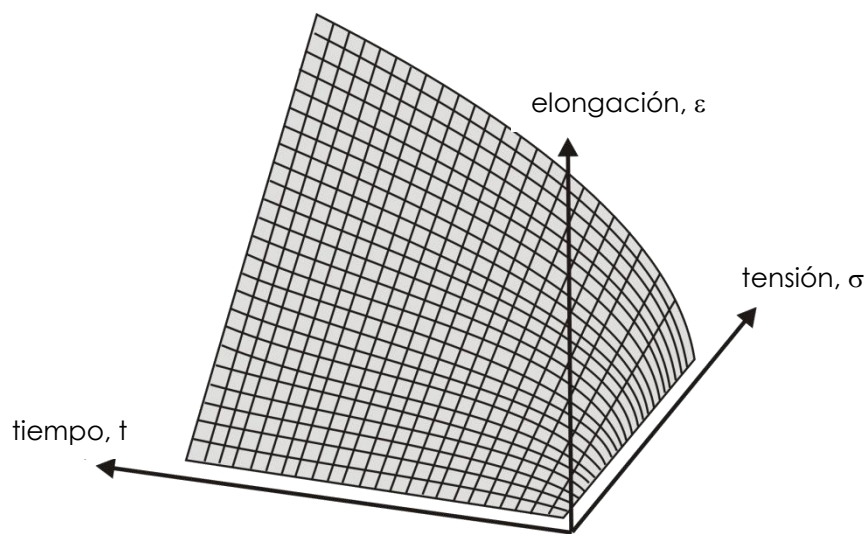


Figura 2. Representación tridimensional de la superficie de comportamiento mecánico de un material con naturaleza viscoelástica.

No obstante, en ingeniería es habitual que una pieza o componente esté soportando una **tensión constante** o bien que esté condicionada a una determinada **deformación**. Es por ello que, a partir de esta superficie de comportamiento mecánico, se pueden identificar estas dos formas de trabajo y se pueden proyectar sobre los ejes correspondientes para explicar dichos fenómenos^[6]. Estos son:

Fluencia: Elongación creciente con el tiempo bajo la acción de una tensión constante. Se representa en el plano (ε - t).

Relajación: Liberación o disminución de la tensión con el paso del tiempo bajo la acción de una deformación o elongación constante. Se representa en el plano (σ - t).

4.1 Fenómenos de fluencia en materiales viscoelásticos

Como se ha descrito anteriormente la **fluencia** o **plastodeformación** consiste en el alargamiento creciente con el tiempo, bajo la acción de una tensión constante. Para obtener un gráfico de este tipo a partir de la superficie 3D de comportamiento mecánico, basta con intersectar dicha superficie con un plano correspondiente a una tensión constante tal y como se muestra en la **Figura 3**.

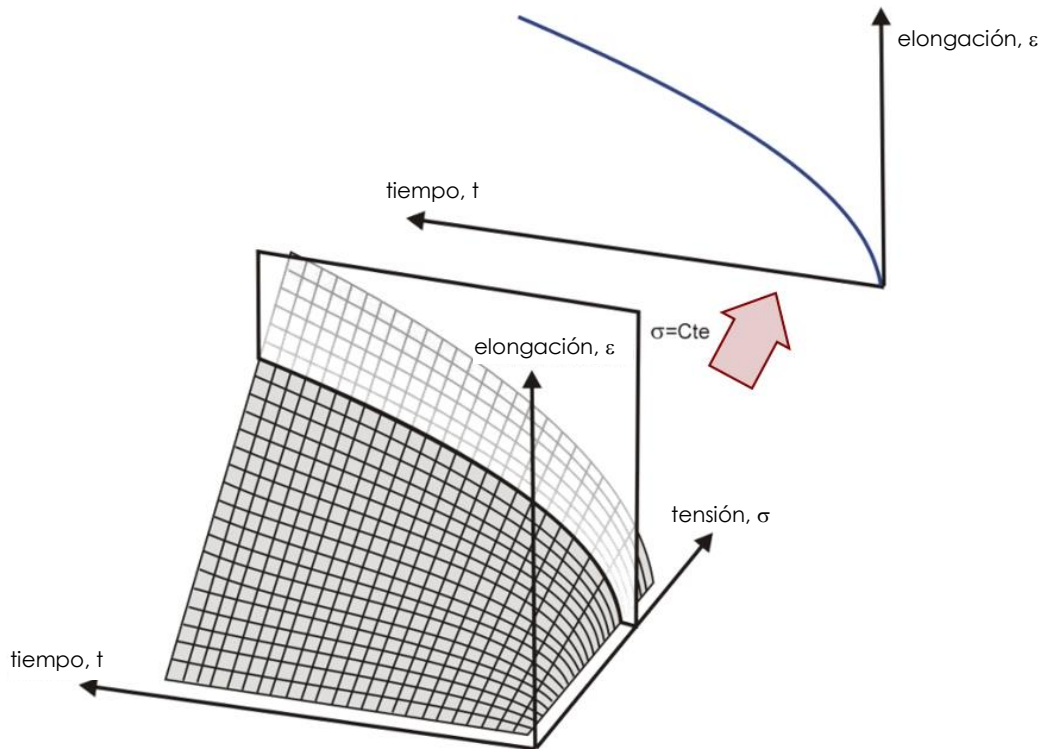


Figura 3. Obtención de una curva de fluencia por proyección de la intersección de un plano con tensión constante ($\sigma=c_{te}$) con la superficie de comportamiento mecánico, sobre el plano ($\epsilon-t$).

La fluencia está muy ligada a la naturaleza de ovillo que presentan los polímeros termoplásticos. De hecho, cuando un material plástico se somete a una tensión constante, se produce una elongación inicial (ϵ_e) inmediata, debida a la respuesta de sólido elástico y, además, una elongación creciente (ϵ_v) que está relacionada con la componente de "líquido viscoso" del material. Esta componente viscosa es la que hace fluir las cadenas unas sobre otras bajo la acción de una tensión constante, de tal manera que se produce un desenrollamiento del ovillo que provoca una elongación creciente (**Figura 4**).^[6]

Evidentemente, cuanto mayor es el valor de la tensión aplicada, mayor es la elongación inicial elástica (ϵ_e), y más rápido es el crecimiento de la elongación con el tiempo debido a la componente viscosa (ϵ_v) tal y como se aprecia en la **Figura 4**.

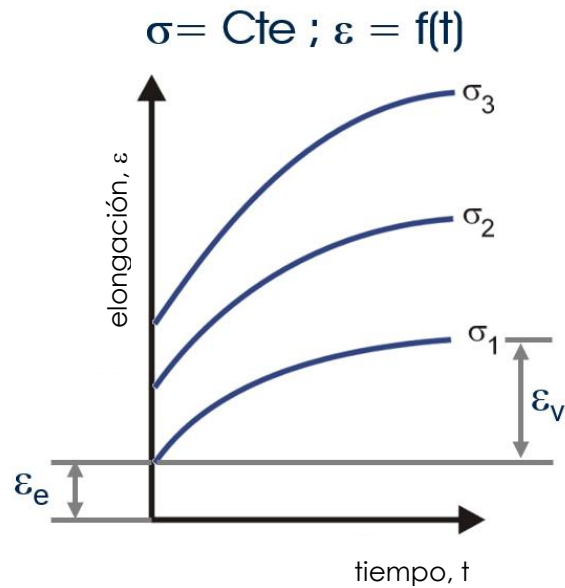


Figura 4. Representación esquemática de los fenómenos de fluencia en un material viscoelástico, con sus diferentes componentes, elástica (ε_e) y viscosa (ε_v), para diferentes niveles de tensión constante, $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$.

La elongación creciente influye de forma decisiva en el **módulo del material**, ya que este se considera como la relación o ratio entre la tensión aplicada (σ) y la elongación producida (ε). Si la elongación es creciente, esta relación también será decreciente, de tal manera que el módulo del material bajo fluencia (tensión constante) será decreciente; este aspecto es de vital importancia en el **dimensionamiento** de piezas o componentes de materiales plásticos ya que el módulo depende de la tensión aplicada y del tiempo de trabajo. Es el denominado **módulo de fluencia o de plastodeformación**. De hecho es habitual que los proveedores de materiales plásticos suministren información del módulo de fluencia ya que, a diferencia de los sólidos elásticos que presentan un módulo único, invariable con el tiempo, en los materiales viscoelásticos, el módulo depende tanto de la tensión aplicada como de la variable tiempo tal y como puedes comprobar en la **Figura 4**, correspondiente al módulo de fluencia ("creep modulus") a 23 °C para una poliamida 6, grado comercial Akulon® F-X9190 (cond.), suministrada por DSM (información proporcionada por www.campusplastics.com).

Ahora que ya conoces la relevancia de los fenómenos de fluencia, *si tuvieses que dimensionar un componente de plástico con el material cuya información se muestra en la **Figura 5**, ¿cuál sería el módulo aproximado si la pieza debe soportar una tensión constante de 2 MPa durante un tiempo de 100 h? ¿y si en vez de 100 h, la pieza tuviese que trabajar durante 10.000 h en las mismas condiciones, cuál sería su módulo? Por otro lado, si la pieza tuviese que trabajar 10.000 h con una tensión superior de 11 MPa, ¿qué valor aproximado de módulo tendrías que utilizar para los cálculos?*

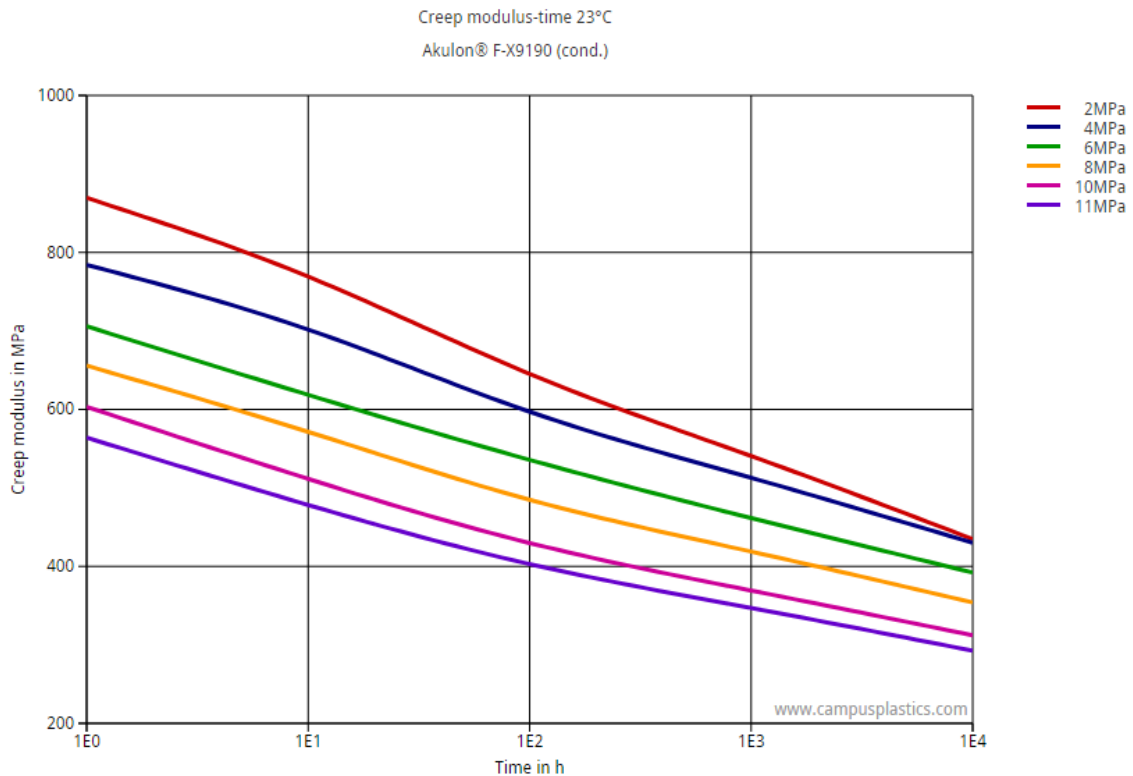


Figura 5. Variación del módulo de fluencia o plastodeformación a 23 °C de una poliamida 6 en función del tiempo y de la tensión aplicada. Grado comercial: Akulon® F-X9190 (cond.), DSM (información proporcionada por www.campusplastics.com).

La respuesta a la pregunta anterior es que, para un tiempo de trabajo de 100 h, el módulo de fluencia está en torno a 645 MPa y para 10.000 h, el módulo se reduce a 435 MPa. En cuanto a la respuesta para el módulo, E para un tiempo de trabajo de 10.000 con una tensión superior de 11 MPa, este adquiere un valor cercano a 290 MPa. Evidentemente la información que puedes obtener de estos gráficos es de gran relevancia para el correcto dimensionamiento de piezas y componentes en el ámbito de la ingeniería. Además, esta información pone de manifiesto la importancia que tienen los fenómenos de fluencia en las propiedades mecánicas, concretamente, el módulo que puede variar en el mismo material desde valores de 870 MPa ($t=1$ h, $\sigma= 2$ MPa) hasta valores de 292 MPa ($t=10.000$ h, $\sigma= 11$ MPa).

4.2. Fenómenos de relajación o liberación de tensiones en materiales viscoelásticos.

Otra situación en la que pueden trabajar las piezas o componentes en ingeniería es bajo **restricciones** de **elongación** o deformación. En estas condiciones se produce una **liberación** o **relajación de tensiones** que, en el gráfico correspondiente a la superficie de comportamiento mecánico de un material viscoelástico, se obtiene mediante la intersección de un plano equivalente a elongación constante ($\epsilon=cte$), con dicha superficie, y se proyecta sobre el plano tensión-tiempo ($\sigma-t$) tal y como se muestra en la **Figura 6**.

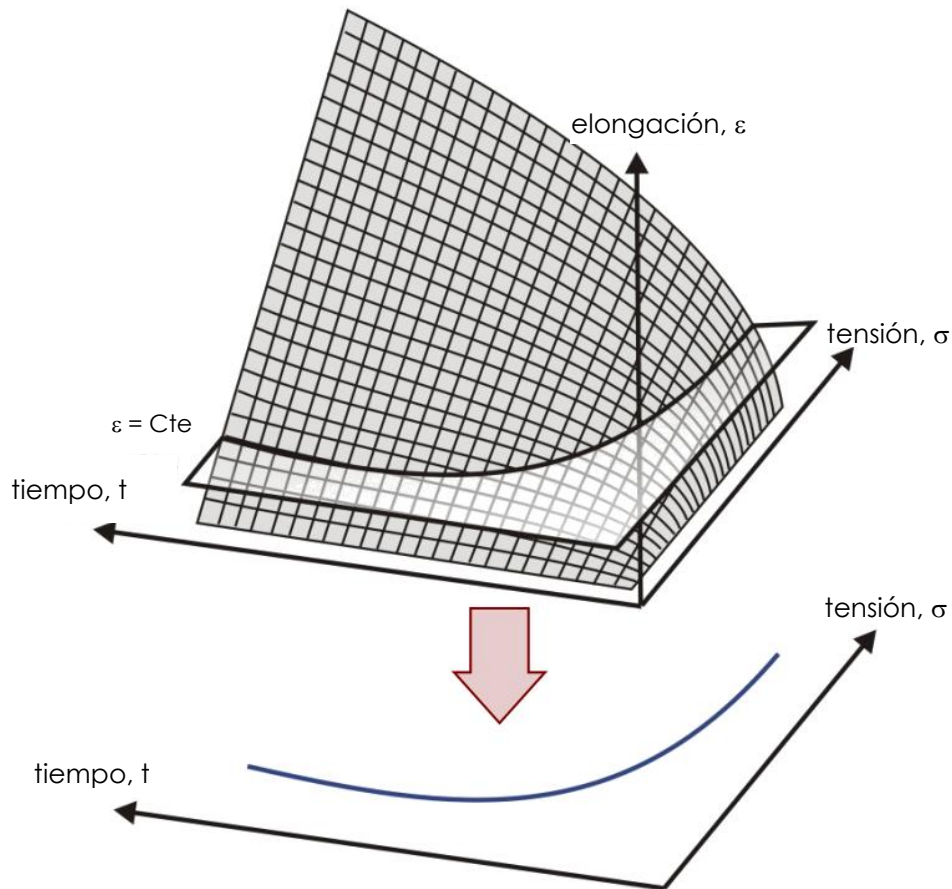


Figura 6. Obtención de una curva de relajación por proyección de la intersección de un plano con elongación constante ($\varepsilon = cte$), con la superficie de comportamiento mecánico, sobre el plano (σ - t).

Cuando un material (o pieza, componente, etc.) se somete a una elongación constante, se requiere una **tensión inicial** para alcanzar dicha elongación (σ_0). Bajo estas condiciones, si la tensión se mantuviese constante, el sistema tendería a incrementar la elongación (fluencia), debido al desenrollamiento del ovillo de cadenas poliméricas. Como el material está trabajando en condiciones de deformación constante, no puede incrementar la elongación; en estas condiciones, lo que ocurre es un reordenamiento de las cadenas poliméricas que forman el ovillo que se traduce en una liberación de tensiones internas entre las cadenas poliméricas, dando lugar a una relajación del material o, lo que es lo mismo, una reducción de la tensión inicial necesaria para mantener dicha elongación. Esta situación se aprecia en la **Figura 7** donde se muestran diversas curvas de relajación (correspondientes a diferentes niveles de elongación). Una vez conocido el fenómeno de relajación de tensiones, **¿sabrías razonar si las elongaciones en la Figura 7 siguen una tendencia creciente ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$) o decreciente ($\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$)?**

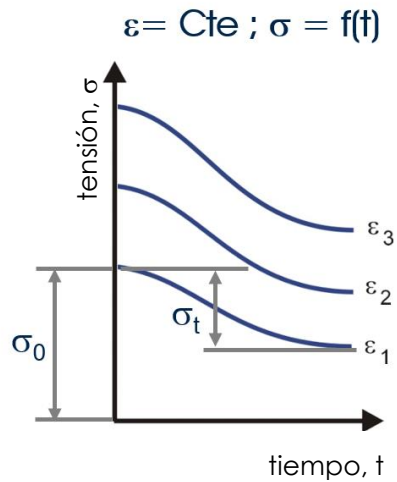


Figura 7. Representación esquemática de los fenómenos de relajación en un material viscoelástico, con sus diferentes componentes: tensión inicial ligada a la naturaleza elástica (σ_0) y tensión decreciente con el tiempo debido a la naturaleza viscosa (σ_t), para diferentes niveles de elongación constantes, $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$.

4.3. Curvas isócronas.

Si bien no representan un fenómeno físico, en el ámbito de la viscoelasticidad, es bastante frecuente el empleo de **curvas isócronas** que se obtienen por la proyección de la intersección de un plano para un tiempo constante ($t=cte$), con el plano de tensiones y elongaciones ($\sigma-\varepsilon$), dando lugar al **diagrama de tracción** equivalente para dicho tiempo de trabajo. Esta situación se puede apreciar en la **Figura 8**.

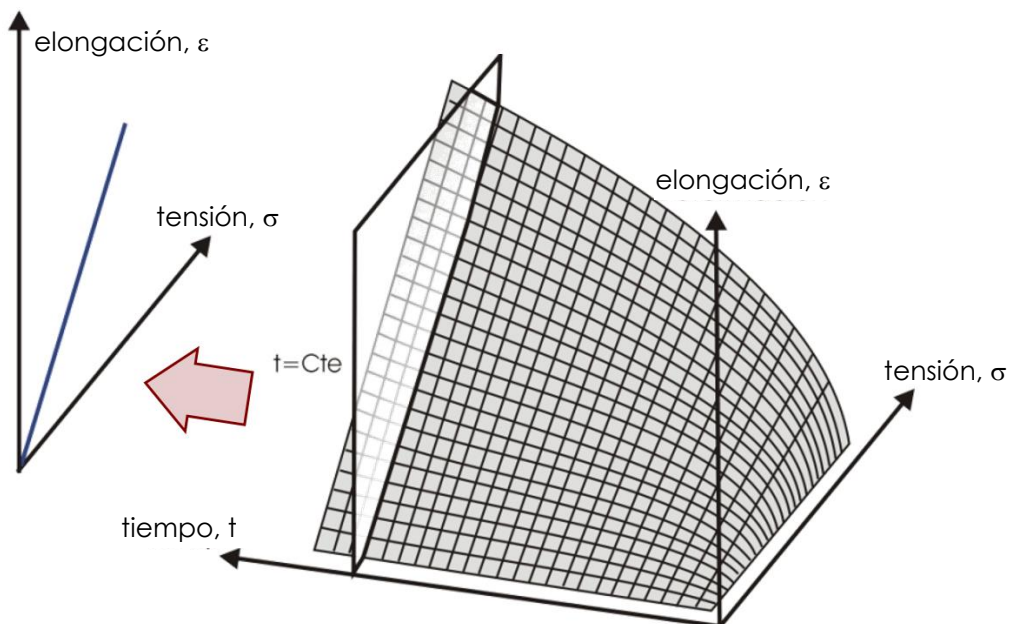


Figura 8. Obtención de una curva isócrona por proyección de la intersección de un plano con tiempo constante ($t=cte$), con la superficie de comportamiento mecánico, sobre el plano ($\sigma-\varepsilon$).

La ventaja de estas curvas es que representan los diagramas de tracción para diferentes niveles de trabajo y este tipo de gráficos, son muy habituales en ingeniería. La **Figura 9**, muestra las curvas isócronas de una PA-6 Akulon® F-X9190 (cond.) a 23 °C para diferentes tiempos de trabajo. Como puede apreciarse, a medida que aumenta el tiempo de trabajo, la rigidez del material es inferior, debido a los fenómenos de fluencia anteriormente descritos. **Una vez conocidos todos los fenómenos ligados a la viscosidad, ¿sabrías calcular el módulo de fluencia o plastodeformación para el material cuya información se muestra en la Figura 9, trabajando en las siguientes condiciones: tensión, $\sigma=5$ MPa, tiempo, $t=1.000$ h?**

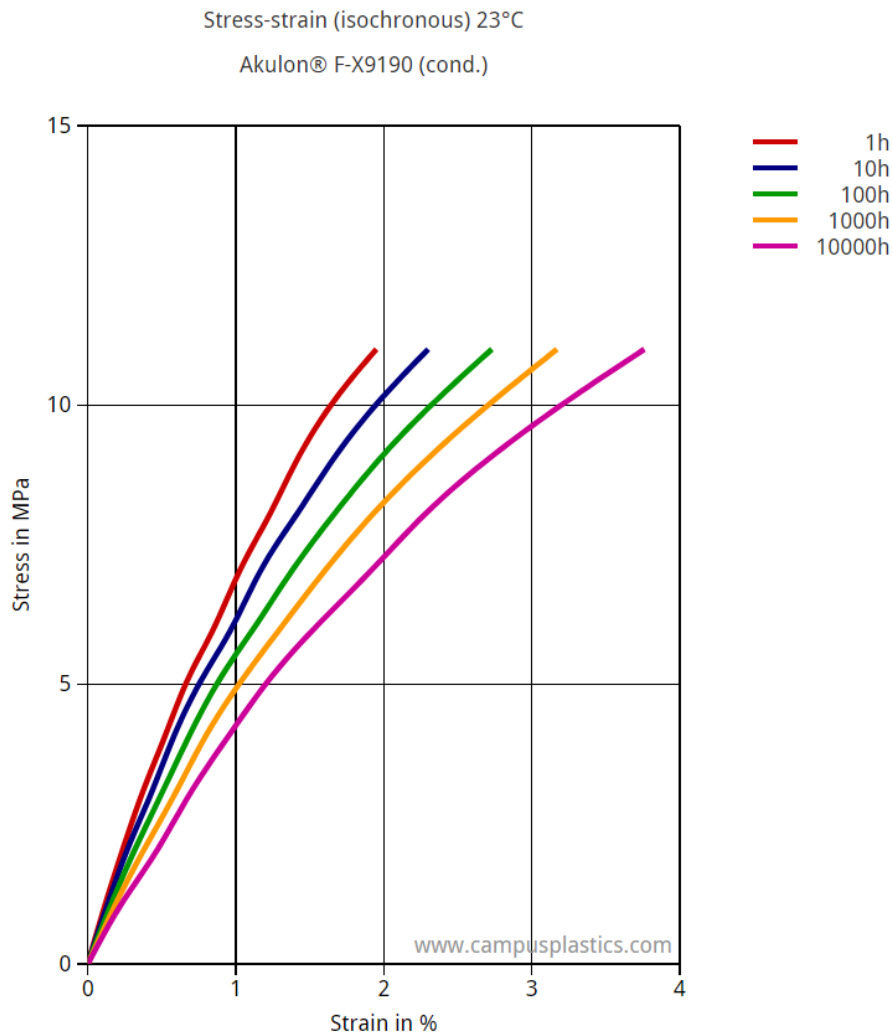


Figura 9. Curvas isócronas a 23 °C de una poliamida 6 en función del tiempo de trabajo. Grado comercial: Akulon® F-X9190 (cond.), DSM (información proporcionada por www.campusplastics.com).

El cálculo es muy sencillo ya que, por definición el módulo es el cociente entre la tensión aplicada (σ) y la elongación obtenida (ϵ). En las condiciones descritas, la tensión, $\sigma=5$ MPa y la elongación, para un tiempo de trabajo de 1.000 h es, según el diagrama, un 1%. Por lo tanto el módulo será $E_{(5 \text{ MPa}/1.000 \text{ h})} = 5 \text{ MPa}/0.01 = 500 \text{ MPa}$.



5. Conclusiones

Los materiales poliméricos y, fundamentalmente los polímeros lineales o termoplásticos, presentan un comportamiento dual de sólido elástico (con respuesta inmediata y no dependiente del tiempo) y de líquido viscoso (con respuesta dependiente del tiempo). Es por ello que se considera que estos materiales presentan un comportamiento viscoelástico. En consecuencia, las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticos están fuertemente influenciadas por la variable tiempo. De hecho, el comportamiento mecánico viene definido por la terna tensiones, elongaciones y tiempo (σ , ε y t), cuya representación gráfica es una superficie 3D.

En el ámbito de la ingeniería es posible que se produzcan dos formas de trabajo diferentes, que dan lugar a diferentes fenómenos ligados a viscoelasticidad. Por un lado, es posible que el material, pieza o componente esté trabajando en condiciones de tensión constante. Este fenómeno se denomina fluencia e implica una deformación creciente con el paso del tiempo. La otra posibilidad es que el material, pieza o componente esté trabajando en condiciones de elongación/deformación constante. En estas condiciones se produce una liberación de tensiones que se conoce con el término de relajación.

Con este Artículo Docente, has podido contrastar la diferencia de comportamiento entre los sólidos con comportamiento elástico y los materiales con naturaleza viscoelástica, aspecto de gran relevancia en la obtención de las propiedades mecánicas, que desempeñan un papel decisivo en el ámbito de diseño y cálculo de piezas para ingeniería.

6. Referencias

- [1] Valiente Camacho, A, "Curso de comportamiento mecánico de materiales, elasticidad y viscoelasticidad.". García-Maroto Editores (2014).
- [2] Phan-Thien, Nhan "Understanding viscoelasticity", Ed. Springer (2002).
- [3] Ferry, John D. "Viscoelasticity properties of polymers". John Wiley & Sons (1980).
- [4] Aklonis, John J. "Introduction to polymer viscoelasticity". John Wiley & Sons (1983).
- [5] Ward, I.M., Sweeney, J. "An introduction to the mechanical properties of solid polymers". John Wiley & Sons (2004).
- [6] Lin, Y.-H., "Polymer viscoelasticity: basis, molecular theories, experiments and simulations", Ed. World Scientific, (2011).