



# Análisis de diagrama de tracción en materiales compuestos de matriz polimérica. Interacción fibra matriz y condiciones de isodeformación.

<b>Apellido, nombre</b>	Balart Gimeno, Rafael Antonio (rbalart@mcm.upv.es) Moreno García, Virginia (vmorgar1@upvnet.upv.es) Gómez Caturla, Jaume (jaugoca@epsa.upv.es) Tejada Oliveros, Ramón (rateol@epsa.upv.es) Ivorra Martínez, Juan (juaivmar@epsa.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (DIMM)
<b>Centro</b>	Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) Universitat Politècnica de València (UPV)



## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a realizar un **análisis básico** del comportamiento a **tracción** de los diferentes componentes que forman un **material compuesto**, fundamentalmente la **matriz**, y la **fibra de refuerzo**. Este análisis lo vamos a realizar considerando los componentes **individuales** y, a continuación, llevaremos un análisis similar cuando los dos componentes se **combinan** para formar una lámina de material compuesto. Si bien el cálculo de las tensiones reales a las que trabaja cada uno de los componentes es algo más complejo, la simplicidad con la que se aborda este análisis básico es suficiente para entender las condiciones de **isodeformación** en materiales compuestos, y la necesidad de una buena **interacción fibra-matriz**.

## 2 Introducción

Los materiales compuestos de matriz polimérica han ido ganando aplicaciones en el ámbito de la ingeniería, debido a las excelentes propiedades mecánicas que aportan, unidas a una gran ligereza <sup>[1]</sup>. Entre las propiedades generales de los compuestos con matriz polimérica, destacan las siguientes:

- Elevada resistencia mecánica frente a esfuerzos de **tracción y flexión**.
- Elevada **ligereza**.
- Alta **estabilidad dimensional**.
- Elevada resistencia a los **agentes químicos y atmosféricos**.
- Posibilidad de **aislamiento** térmico, acústico y eléctrico.
- Baja transmisión de **vibraciones**.
- Buen comportamiento a **fatiga**.
- Elevada **resistencia térmica** y buen comportamiento a la llama.

Si bien inicialmente se trataba de un grupo de materiales con aplicaciones en sectores de tecnología de vanguardia (**aeronáutica y aeroespacial, satélites**, etc.) en la actualidad invaden las aplicaciones industriales y de uso cotidiano, y han desplazado a los **metales y cerámicas** en muchas de sus aplicaciones tradicionales.

Como ya sabes, un material compuesto de matriz polimérica está formado por la **combinación** de un elemento de **refuerzo** (habitualmente en forma de **fibra**) y, obviamente, una matriz polimérica (usualmente de tipo **termoestable**). Cada uno de estos componentes desempeña una función en el compuesto. La **fibra** es la encargada de proporcionar excelentes **propiedades mecánicas a tracción y/o flexión**, destacando su **rigidez** y su **elevada tensión de rotura**. Por su parte, la **matriz**, tiene otras funciones importantes como <sup>[2,3]</sup>:

- Actúa como **sporte** de las fibras, y permite **moldear** el compuesto con la geometría deseada.
- Se encarga de **proteger** a las fibras frente a los agentes externos (luz, humedad, agentes químicos, etc.).
- Soporta los **esfuerzos de compresión** en el compuesto, ya que las fibras trabajan de forma excepcional en condiciones de tracción, pero no a compresión.
- **Transmiten** los **esfuerzos** que soporta la matriz hasta a las fibras, mediante **cortadura**.
- **Evitan** la **propagación** de las **grietas** durante el proceso de fractura.
- Mantienen **alineadas** a las fibras para que su desempeño sea el adecuado.
- Dan **cohesión** al composite como material de ingeniería.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, te puede venir a la cabeza cómo **trabajan** los diferentes componentes de un material compuesto, desde un punto de vista mecánico. El análisis de comportamiento a **tracción** (evolución de la fuerza o **tensión** aplicada, frente la deformación o **elongación** producida), puede representar una herramienta simple para entender cómo se reparten las funciones los componentes en el compuesto.

## 2 Objetivos

El objetivo de este artículo docente es que puedas **identificar** la **necesidad** de una buena **interacción** entre la **fibra** y la **matriz** polimérica, para que el compuesto pueda aportar una **sinergia**. Para llegar a este objetivo final, se llevará a cabo un análisis del comportamiento a tracción de la fibra, de la matriz y del compuesto, en el que podrás **identificar** las **elongaciones** y/o **rotura** que provocan los diferentes niveles de **tensión** aplicados, tanto en los componentes, de forma **individual**, como en el **compuesto**, donde fibra y matriz trabajan de forma **sinérgica**.

## 3 Desarrollo

### 3.1 Análisis del comportamiento a tracción de la fibra de refuerzo

Como ya sabes, la **fibra** es el componente que aporta **elevadas propiedades mecánicas** al compuesto. Para que te hagas una idea, vamos a comparar las prestaciones mecánicas de la fibra de carbono (CF) con las de un material ampliamente empleado en el ámbito de la ingeniería, el acero.

¿Podrías buscar e indicar el **módulo de Young** de un **acero** al carbono convencional, así como su **tensión de rotura** a tracción y **densidad**? Una simple búsqueda en algún catálogo o ficha técnica te indicará que el módulo de Young de un acero está en torno a **210 GPa**, su tensión de rotura se encuentra en el rango de **500 - 1000 MPa**, según la composición, y su densidad es cercana a **7,8 g/cm<sup>3</sup>**.

Pues bien, teniendo en cuenta estos valores como referencia, la **fibra de carbono** ofrece un módulo de Young de hasta **390 GPa**, una **tensión de rotura** que varía entre **2100 y 5000 MPa**, según el tipo de fibra de carbono. Con estos valores, ya te puedes hacer una idea de las excepcionales prestaciones mecánicas de la fibra de carbono que, además, presenta una densidad muy baja, en torno a **1,8 g/cm<sup>3</sup>**.

Como puedes intuir, el módulo de Young de la fibra de carbono es prácticamente el doble que el del acero, pero si se tiene en cuenta la densidad, podemos definir el **módulo específico** como el cociente entre el módulo de Young del material y su densidad. Si realizas estos cálculos para el acero y la fibra de carbono, obtendrás estos valores aproximados:

acero ( $E/\rho = 26,9 \text{ MPa cm}^3/\text{g}$ )

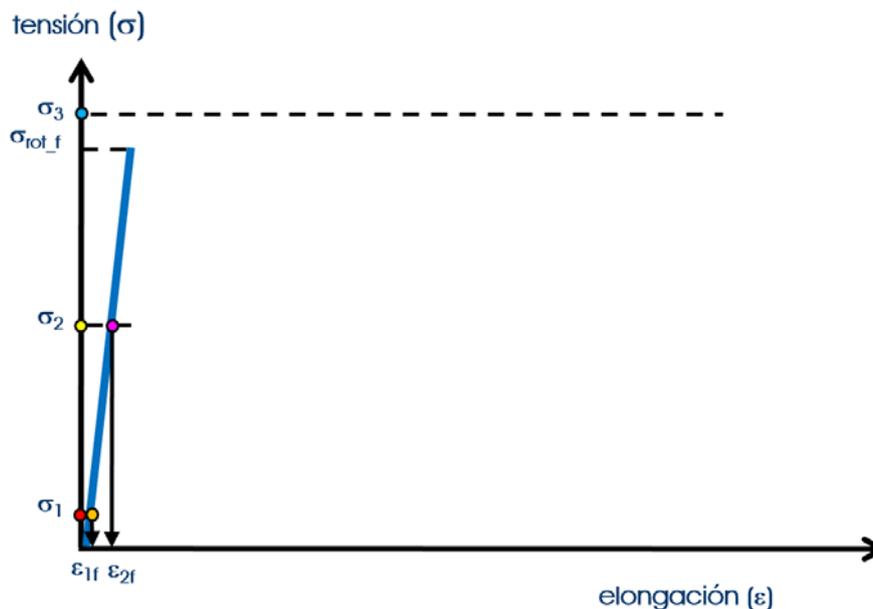
fibra de carbono ( $E/\rho = 216,7 \text{ MPa cm}^3/\text{g}$ ).

¿**Cómo interpretarías** estos valores? La comparación de los módulos específicos tiene en cuenta tanto la rigidez (módulo de Young), como el peso (densidad), con lo cual, es una medida que implica estos dos parámetros. Así pues, se puede afirmar que la fibra de carbono, con un módulo específico de **216,7 MPa cm<sup>3</sup>/g**, ofrece unas

prestaciones (**rigidez y ligereza**) casi 10 veces superior a la del acero, con un módulo específico de  $26,9 \text{ MPa cm}^3/\text{g}$ . También te habrás dado cuenta que la tensión de rotura de la fibra de carbono, puede llegar a ser 10 veces (5000 MPa) la de un acero al carbono (500 MPa).

Si tenemos en cuenta que el acero es un material metálico ampliamente utilizado en fabricación de estructuras y componentes de ingeniería que están sometidos a tensiones elevadas, las prestaciones que ofrece la fibra de carbono superan a las del acero. Esto te podría hacer pensar que la solución de ingeniería es el empleo de materiales compuestos para todas las aplicaciones. Nada más lejos de la realidad. Como ya hemos visto previamente, las **fibras trabajan** muy bien en condiciones de **tracción** y/o **flexión**, pero **no** soportan esfuerzos de **compresión** [4,5]. Además, la fibra de carbono es un material de **coste muy elevado**, comparado con materiales ampliamente utilizados en ingeniería, y las prestaciones finales de los compuestos están muy ligadas a los procesos de fabricación. Por ello, los compuestos representan una opción adicional para el ingeniero en el diseño y cálculo de piezas, componentes, estructuras, ensamblajes, etc. En función de la aplicación final, condiciones de trabajo, coste, etc. el ingeniero podrá **seleccionar** el material o materiales más adecuados.

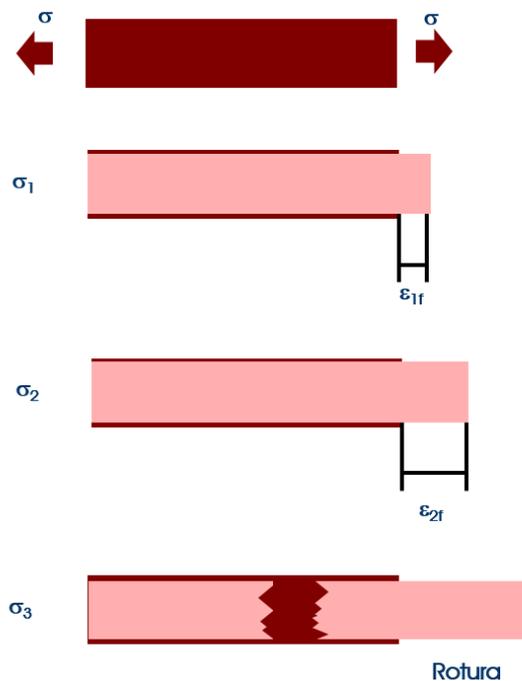
Bueno, ahora que ya entiendes el conjunto de propiedades mecánicas de la fibra de refuerzo, ya podemos realizar un **análisis** básico del comportamiento a **tracción**, tal y como se muestra en la **Figura 1**. Recuerda que el módulo de Young representa la rigidez del material y, matemáticamente, se corresponde con la pendiente de la línea recta en la zona lineal del diagrama de tracción. Como hemos visto anteriormente, la fibra presenta elevada rigidez (línea recta con elevada pendiente), y una elevada tensión de rotura (en el gráfico, la tensión de rotura de la fibra se corresponde  $\sigma_{rot,f}$ ).



**Figura 1.** Representación esquemática del diagrama de tracción de una fibra de refuerzo de alta rigidez. Se muestran las elongaciones ( $\epsilon_i$ ), para cada nivel de tensión aplicado ( $\sigma_i$ ).

Pero ¿cuál será la **elongación** en la fibra cuando se aplica un nivel de **tensión** muy bajo, digamos,  $\sigma_1$  (círculo de color rojo)? Para conocer la elongación,  $\epsilon$ , que experimenta la fibra para este nivel de tensión,  $\sigma_1$ , basta con trazar una línea horizontal desde  $\sigma_1$ , hasta que corte al diagrama de tracción (círculo de color naranja). Desde este punto, se traza una línea vertical hasta que corte al eje x o de elongaciones,

obteniendo un valor de elongación de  $\varepsilon_{1f}$ . Evidentemente, se trata de una elongación muy baja, ya que, como hemos dicho previamente, la fibra es un material extremadamente rígido. Para conocer la elongación,  $\varepsilon$ , cuando la fibra soporta un nivel de tensión superior, digamos  $\sigma_2$ , puedes proceder de la misma manera y te darás cuenta que la elongación es  $\varepsilon_{2f}$ , según indica el diagrama. De nuevo, la elongación que provoca un nivel de tensión más alto continúa siendo baja, ya que la fibra presenta elevada **rigidez**. Pero, ¿qué ocurre cuando la tensión aplicada a la fibra es superior a su tensión de rotura, digamos  $\sigma_3 > \sigma_{rot\_f}$ ? Te darás cuenta inmediatamente que cuando la fibra soporta este nivel de tensión  $\sigma_3$ , superior a su tensión de rotura, evidentemente, se produce la rotura de la fibra. Estas situaciones se resumen en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Representación esquemática de los niveles de elongación  $\varepsilon_i$ , provocados por la acción de las tensiones aplicadas  $\sigma_i$ , sobre una fibra de refuerzo, según diagrama de tracción,  $\sigma$ - $\varepsilon$  mostrado en la Figura 1.

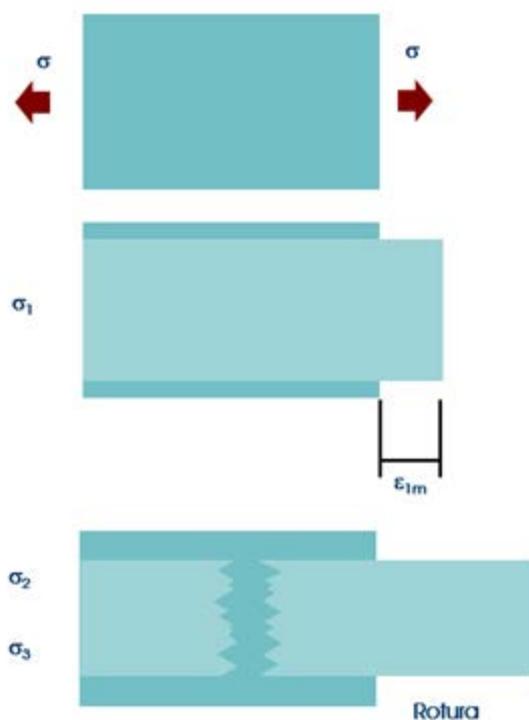
Ahora que ya entiendes cómo llevar a cabo este análisis básico de elongaciones en función de las tensiones aplicadas a partir del diagrama de tracción, ya puedes realizar el mismo análisis sobre la **matriz** polimérica.

### 3.2 Análisis del comportamiento a tracción de la matriz polimérica

Las **matrices poliméricas** empleadas en la fabricación de materiales compuestos pueden ser de naturaleza termoplástica, termoestable o elastomérica. No obstante, la versatilidad que ofrecen los **termoestables** como las resinas **epoxi** (EP), de **poliéster insaturado** (UP), de **viniléster** (VE), etc. entre otras, es superior a las matrices termoplásticas o elastoméricas, de ahí que se empleen ampliamente en la fabricación de materiales compuestos.



Ahora que ya sabes llevar a cabo el análisis de las elongaciones en función de las tensiones aplicadas, ¿podrías deducir qué le ocurre a la matriz polimérica cuando se somete a los mismos niveles de tensión que se han expuesto previamente en el análisis del comportamiento a tracción de la fibra de refuerzo,  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ? Evidentemente, cuando la tensión aplicada es inferior a la tensión de rotura de la matriz ( $\sigma_1 < \sigma_{rot,m}$ ), la elongación en la matriz vendrá determinada por el punto de corte de la línea horizontal trazada desde  $\sigma_1$ , con la curva de tracción de la matriz polimérica (círculo de color naranja), que se corresponde con una elongación de  $\epsilon_{1m}$ . Como ya podrás intuir, cuando los niveles de tensión que soporta la matriz son de  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , ambos valores superiores a  $\sigma_{rot,m}$ , se produce la rotura de la matriz, ya que la tensión aplicada supera la tensión de rotura del material. Estas situaciones quedan reflejadas en la **Figura 4**, que resume gráficamente, cómo se produce la deformación y/o rotura en la matriz polimérica, con los niveles de tensión aplicada  $\sigma_1 < \sigma_{rot,m} < \sigma_2 < \sigma_3$ .

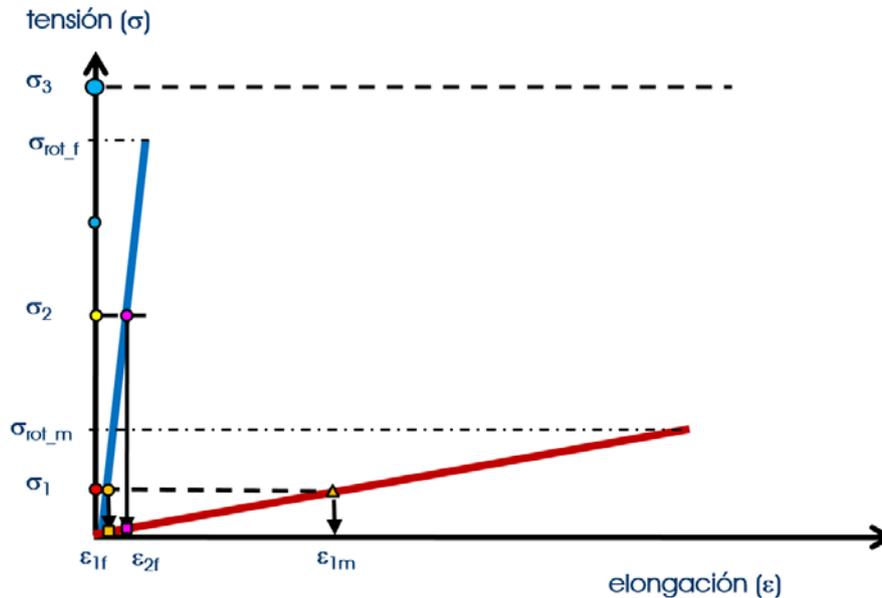


**Figura 4.** Representación esquemática de los niveles de elongación  $\epsilon_i$ , provocados por la acción de las tensiones aplicadas  $\sigma_i$ , sobre una matriz polimérica, según diagrama de tracción,  $\sigma$ - $\epsilon$  mostrado en la Figura 3.

### 3.3 Análisis del comportamiento a tracción del compuesto

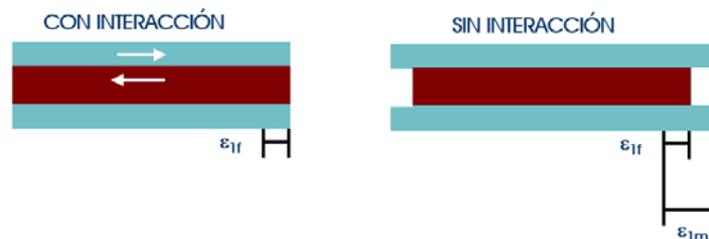
Ahora viene lo interesante. Previamente, hemos llevado a cabo el análisis de las elongaciones en la matriz polimérica y en la fibra de refuerzo, considerados como **componentes independientes**. Pero ¿qué ocurre cuando **combinamos** una **matriz polimérica** con cierta cantidad de fibras de refuerzo para formar un **material compuesto**? Con los conceptos que hemos trabajado previamente, serás capaz de deducir la **sinergia** que se alcanza en los materiales compuestos. Para este caso, vamos a considerar que a la matriz polimérica se le incorpora una cierta cantidad de fibras de refuerzo unidireccionales.

En la **Figura 5** se muestra un diagrama con la superposición de las curvas de tracción de la fibra de refuerzo (color azul) y de la matriz polimérica (color rojo). También se indican las tensiones de rotura de cada uno de los componentes.



**Figura 5.** Representación esquemática del diagrama de tracción de una matriz polimérica y una fibra de refuerzo para análisis de comportamiento de material compuesto. Se muestran las elongaciones ( $\epsilon$ ), para cada nivel de tensión aplicado ( $\sigma$ ).

Veamos qué ocurre cuando la tensión aplicada es  $\sigma_1$ . En estas condiciones de tensión, la fibra, considerada independientemente de la matriz tendría una elongación de  $\epsilon_{1f}$  (círculo de color naranja). Sin embargo, para esta misma tensión,  $\sigma_1$ , la matriz tendría una elongación muy superior,  $\epsilon_{1m}$ , (triángulo de color naranja), ya que es un material con una rigidez notablemente inferior a la de la fibra de refuerzo. Este sería el comportamiento de cada uno de los componentes del compuesto considerados independientemente, sin ningún tipo de interacción (**Figura 6b**).

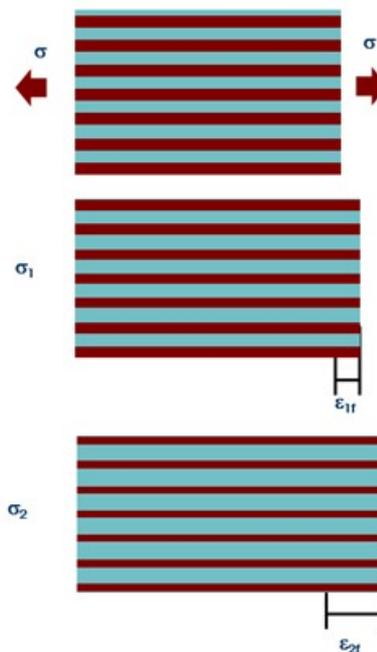


**Figura 6.** Representación esquemática de a) la sinergia que se consigue en un compuesto cuando hay buena interacción fibra/matriz, y b) el comportamiento independiente de los componentes de un compuesto cuando no hay interacción.

Como puedes apreciar, fibra y matriz tienen deformaciones diferentes y ello provocaría el fallo en el material; de hecho, cuando no se producen interacciones entre la fibra y la matriz polimérica, realmente no se consigue ninguna sinergia. No obstante, es interesante razonar cuál será la **elongación** en la **matriz** y en la **fibra** cuando existe una **buena interacción/adhesión** entre ambos componentes. Como ya hemos indicado, la fibra de refuerzo es el componente más rígido, y para una tensión  $\sigma_1$ , no

puede elongarse más de  $\varepsilon_{1f}$ . Sin embargo, la matriz, sí que podría elongarse más (hasta  $\varepsilon_{1m}$ ). No obstante, si hay una buena **interacción/adhesión** entre la fibra y la matriz, el componente que limita la elongación es la fibra, ya que es el componente más rígido, y al estar adherida a la matriz, evitará que la matriz se estire o elongue (**Figura 6a**), siendo la elongación del compuesto  $\varepsilon_c = \varepsilon_{1f}$  (idéntica en la fibra y la matriz, o **isodeformación**). Pero, además, hay un detalle muy interesante. Para este nivel de tensión,  $\sigma_1$ , la matriz tendrá una elongación  $\varepsilon_{1f}$  (la que limita la fibra de refuerzo). Para esta elongación, la tensión que realmente soporta la matriz es muy inferior a  $\sigma_1$  (cuadrado de color naranja sobre línea roja), corroborando, de esta manera, que la fibra es el componente que aporta propiedades mecánicas. La **matriz**, al tener una buena adhesión con la fibra, **transmite los esfuerzos** que soporta a la fibra mediante **cortadura**, ya que la fibra, debido a su rigidez, es capaz de soportar altas tensiones con bajas elongaciones.

La situación es más curiosa, si cabe, cuando la tensión aplicada es  $\sigma_2 > \sigma_{rot,m}$ . Si trabajasen de forma independiente los componentes del compuesto, la fibra tendría una elongación de  $\varepsilon_{2f}$  (círculo color rosa sobre línea azul), y la matriz habría roto. Sin embargo, como hay una buena interacción fibra/matriz, la elongación en el compuesto será la que marque la fibra, es decir,  $\varepsilon_{2f}$ . En estas condiciones de elongación, la tensión que soportará la matriz será notablemente inferior a  $\sigma_2$  (cuadrado rosa sobre línea roja), que, evidentemente está por debajo de  $\sigma_{rot,m}$  y, en consecuencia, no romperá la matriz. Aquí es donde realmente empiezas a deducir la **sinergia** que se consigue al combinar una matriz polimérica con una fibra de refuerzo, con la premisa de una **buena interacción/adhesión** entre ambos componentes. Esta buena interacción implica que fibra, matriz y compuesto, se deforman la misma cantidad o en condiciones de **isodeformación**. Esta situación se refleja en la **Figura 7**, donde la máxima deformación en el compuesto viene determinada por la elongación en la fibra  $\varepsilon_i$ , según el nivel de tensión soportado,  $\sigma$ . Evidentemente, cuando la tensión aplicada es superior a la tensión de rotura de las fibras ( $\sigma_3 > \sigma_{rot,f}$ ), se produce la rotura de las fibras, e inmediatamente, ese nivel de tensión lo soportaría la matriz. Como  $\sigma_3 \gg \sigma_{rot,m}$ , la matriz falla inmediatamente y rompe.



**Figura 7.** Representación esquemática de los niveles de elongación  $\varepsilon_i$ , provocados por la acción de las tensiones aplicadas  $\sigma_i$ , sobre un compuesto fibra/matriz con buena interacción entre componentes (isodeformación), según diagrama de tracción,  $\sigma$ - $\varepsilon$  mostrado en la Figura 5.



## 4. Conclusiones

En un material compuesto, la **fibra** de refuerzo aporta las **propiedades mecánicas**, ya que se trata del componente con **mayor rigidez**. Por su parte, la matriz polimérica, prácticamente no trabaja desde el punto de vista mecánico. Sin embargo, se requieren **ambos** componentes para poder procesar y disponer de materiales compuestos con prestaciones elevadas. Además de combinar una matriz polimérica con fibras de refuerzo, se requiere una **buena interacción** entre ambos componentes para alcanzar la sinergia. Esta interacción se plasma a través de una buena adhesión de las fibras y la matriz polimérica que permiten que el compuesto se deforme de manera coherente (**isodeformación**). Si bien la fibra es el componente que aporta excepcionales propiedades mecánicas a los materiales compuestos, la **matriz** tiene otras funciones igualmente relevantes. Entre otras, las matrices poliméricas termoestables, facilitan el **procesado** y la adaptación de las fibras a las **geometrías** de piezas y componentes industriales, mantienen las fibras **orientadas** en las direcciones apropiadas, **protegen** las fibras de los agentes externos, **evitan la propagación** de grietas, **transmiten** la carga que soportan a las fibras de refuerzo mediante esfuerzos de cortadura, etc. La combinación de las propiedades que aporta cada uno de los componentes en un material compuesto garantizan la obtención de un efecto **sinérgico**.

## 5. Referencias

- [1] Tsai S.W.; Miravete, A., "Diseño y análisis de materiales compuestos", EDITORIAL REVERTÉ (1987).
- [2] Hull D., "Materiales compuestos", EDITORIAL REVERTÉ (1987).
- [3] Iyengar, N.G.R., "Composite Materials and Structural analysis", MV Learning (2015).
- [4] Tuttle, M.E., "Structural analysis of polymeric composite materials", CRC Press (2012).
- [5] Miravete, A.; Larrode, E.; Castejón, L., "Materiales compuestos I y II", Antonio Miravete (2011).