

2. ANTECEDENTES



2.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha definido en el capítulo anterior, los materiales compuestos permiten alcanzar unas propiedades determinadas, que por sí solos los constituyentes no tendrían. Algunas de estas propiedades pueden ser:

- Aislamiento Acústico
- Aislamiento Térmico
- Resistencia a la Abrasión
- Resistencia a la Corrosión
- Resistencia Mecánica
- Rigidez
- Peso
- Vida a fatiga

Los materiales que se van a considerar en este proyecto son los polímeros reforzados con fibras. Específicamente, dentro de este tipo de materiales, se concreta en los compuestos de grafito epoxi.

El tratamiento macromecánico de las láminas de material compuesto supone un comportamiento ortótropo de éstas respecto a los ejes de ortotropía del material.

La caracterización plana a rigidez de los laminados implicaría la determinación de las cuatro constantes que definen el comportamiento de un material ortótropo en el plano, es decir, el módulo de elasticidad en la dirección de la fibra (E_{11}) y perpendicular a éstas (E_{22}), el coeficiente de Poisson (ν_{12}) y el módulo a cizalladura intralaminar (G_{12}).

Las constantes E_{11} , E_{22} y ν_{12} se obtienen mediante ensayos de tracción en dos laminados, uno con fibra orientada en la dirección de carga y otra con fibra en dirección perpendicular a ésta. Para ello se sitúan las galgas como se muestra en la figura 2.1, obteniéndose en el primer espécimen las constantes E_{11} y ν_{12} , y en el segundo, la E_{22} .

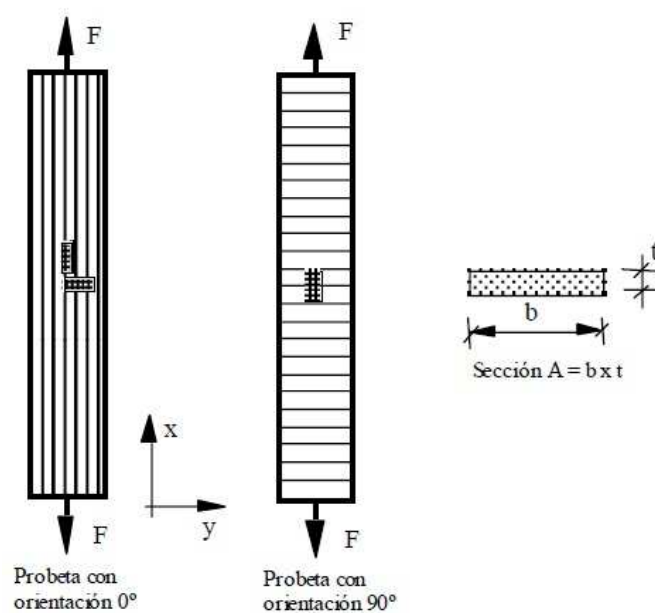


Figura 2. 1: Esquema de las probetas para el cálculo de E_{11} , E_{22} y ν_{12} , con las bandas extensométricas pegadas

Los diferentes métodos de obtención de la constante G_{12} , vendrán detallados en el siguiente apartado.

En cuanto a las constantes de resistencia, sería preciso determinar cinco valores admisibles como son la resistencia longitudinal a tracción X_T y a compresión X_C , la resistencia transversal a tracción Y_T y a compresión Y_C y por último, la resistencia a cortadura intralaminar S , para caracterizar el comportamiento resistente de las láminas en el plano.

Para obtener estas constantes, salvo el caso de la resistencia S que se verá en el siguiente apartado, se recurren a sencillos ensayos de tracción y compresión sobre laminados con orientaciones de fibra en dirección a la carga aplicada (X_T y X_C) y en dirección perpendicular a ésta (Y_T e Y_C), como se puede observar en las siguientes figuras.

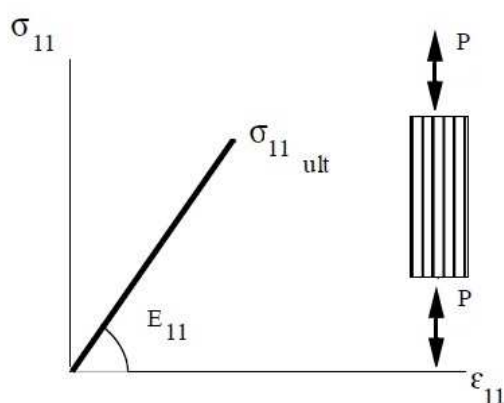


Figura 2. 2: Ensayo de caracterización de la resistencia longitudinal de tracción X_T y de la resistencia longitudinal a compresión X_C

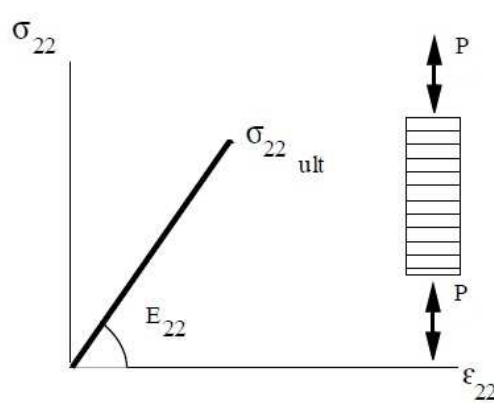


Figura 2. 3: Ensayo de caracterización de la resistencia transversal de tracción Y_T y de la resistencia transversal de compresión Y_C

Cabe destacar que para cualquier material grafito-epoxi, siempre se cumplen un par de reglas que relacionan las constantes de tracción entre sí y las de compresión entre sí. De este modo, siempre se cumple que $X_T > Y_T$, lo que significa que el material tendrá más resistencia a tracción cuanto más se aproximen las fibras del laminado a la dirección de carga. Sin embargo, en el caso de las compresiones ocurre lo contrario, $Y_C > X_C$ y por lo tanto, el material presentará más resistencia a compresión si las fibras se encuentran en dirección perpendicular al de la carga.

2.2. CARACTERIZACIÓN A CIZALLADURA INTRALAMINAR DE MATERIALES COMPUESTOS

Para poder determinar correctamente tanto la rigidez como la resistencia a cizalladura intralaminar (G_{12} y S respectivamente), hace falta tener un estado tensional tangencial puro. No obstante, existen métodos para calcular dichas constantes sin necesidad de que se logre dicho estado tensional, facilitando de cierto modo la geometría o características de agarre de las probetas a ensayo.

Los dos métodos existentes son los indirectos y los directos. En los primeros, mediante un ensayo con geometría más sencilla, se pretende alcanzar un estado tensional donde, pese a existir otras componentes de tensión, la tangencial presenta un valor muy influyente. Por otro lado, los segundos pretenden alcanzar el estado tensional tangencial puro directamente. En cada uno de estos métodos existen diferentes configuraciones de ensayos que se describen a continuación.

2.2.1. Indirectos

El principal ensayo del método indirecto, y más extendido para la caracterización tanto de S como de G_{12} es el **ensayo Off-Axis**, que se procederá a explicarlo en el siguiente apartado.

Una alternativa al Off-Axis dentro del método indirecto es el **ensayo de laminados equiangulares o laminados con una orientación de fibras de $\pm 45^\circ$** .

Este ensayo consiste en realizar un ensayo de tracción sobre un laminado de fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ respecto la dirección de tracción. Con esto se logra que la probeta no se deforme angularmente, ya que se consigue un estado simétrico equiangular. De este modo, se evita el acople existente en el ensayo Off-Axis entre tensiones normales y deformaciones tangenciales.

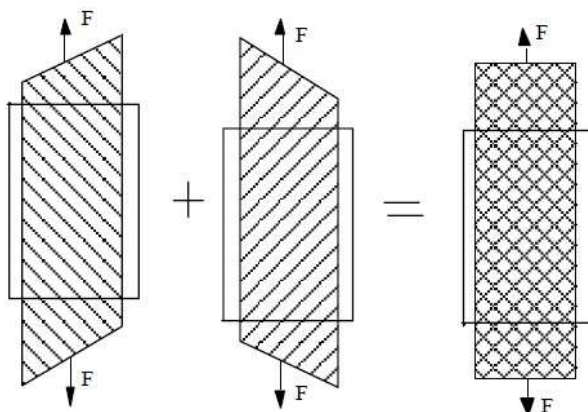


Figura 2. 4: Deformada de un laminado equiangular

Mediante dos galgas pegadas, una en dirección al eje de tracción, y la otra en su eje perpendicular, se consigue medir la deformación ocasionada a la probeta, y obtener la rigidez a cortadura gracias a la tensión tangencial.

El inconveniente de este método es la fabricación de las probetas, ya que los laminados van orientados perpendiculares entre sí, y provocan no simetrías respecto al eje Z , lo que puede conllevar a un curado no efectivo de las probetas, con posibles deformaciones, y que la variación de ángulos entre ellos provoca que el efecto compensatorio entre laminados $\pm 45^\circ$, no se produzca.

2.2.2. Directos

En cuanto a los métodos directos, se dividen en tres ensayos distintos.

Ensayos de cortadura con railes (Rail Shear Test)

En este ensayo, se trabaja con probetas unidireccionales, generalmente orientadas a 90° respecto del eje X. Dichos especímenes se introducen en dos mordazas con railes solidarios a la probeta sobre la que se aplica una tracción. De este modo se somete a la probeta un estado de deformación tangencial puro.

Mediante la medida tomada por dos galgas colocadas a $\pm 45^\circ$ respecto a las fibras, al realizar una tracción o una compresión sobre la probeta, se obtiene un estado tensional tangencial puro en la línea central de la probeta.

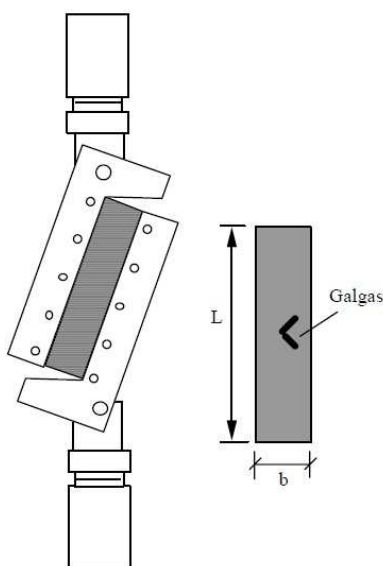


Figura 2. 5: Esquema de la probeta y sistema de cogida del ensayo Rail Shear Test

El inconveniente en este caso se produce en el sistema de agarre entre mordaza y probeta, ya que los múltiples taladros necesarios para incorporarla en las mordazas de rail se convierten en concentradores de tensiones, pudiendo debilitar la probeta localmente y originar fallos inesperados, además que la fabricación de las mordazas y el sistema de cogida resulta complejo a la hora de cambiar entre una muestra y otra.

Ensayo de cortadura sobre probetas de doble muesca (Iosipescu y Compact)

El ensayo Iosipescu es uno de los ensayos más extendidos para calcular la resistencia a cortadura. Al igual que en el caso anterior, se pretende generar una sección en la probeta donde se obtenga un estado tensional puro, que será medido mediante dos bandas extensométricas situadas en el medio de la probeta y orientadas a $\pm 45^\circ$.

La probeta Iosipescu es una probeta de doble muesca, donde la entalla en el medio de la probeta obliga a que la rotura se produzca en ese punto, ya que es la zona con menor

sección. La rotura en este punto se produce por completo en un estado tensional tangencial puro.

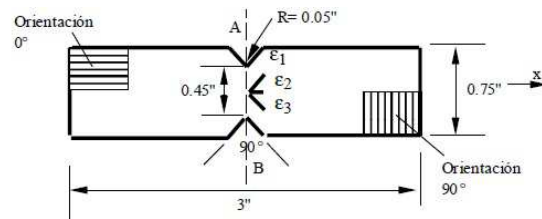
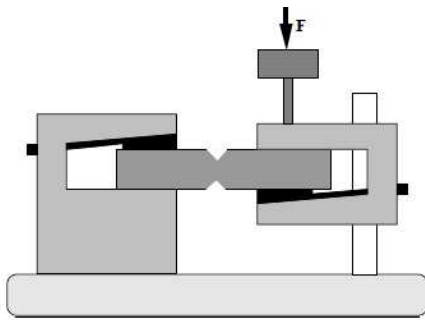


Figura 2. 7: Esquema de la probeta losipescu

Figura 2. 6: Esquema del útil del ensayo losipescu

Pese a existir un largo debate acerca de la idoneidad del ensayo para el cálculo tanto del módulo de cizalladura como de la resistencia a cizalladura intralaminar, no se ha llegado aún a un acuerdo entre las ventajas del Ensayo Off-Axis frente al losipescu y viceversa. Artículos comparativos entre ensayos losipescu a 0° y Off-Axis a 10° [5], afirman que se produce el mismo resultado usando un método que otro, con variaciones muy pequeñas entre ellos. No obstante, estos artículos defienden la sencillez de la probeta Off-Axis frente a la losipescu, en cuanto a fabricación, y critican la cuantía de ensayos que hay que realizar en el método Off-Axis frente al losipescu para determinar la resistencia a cortadura. Además, como se sabe que el comportamiento es no lineal, con el método de losipescu se recurre a errores importantes en el modelo de elementos finitos a la hora de evaluar la tensión en la zona próxima a los nodos.

Ensayo de torsión de tubos

El último de los métodos directos para la obtención de la resistencia a cortadura es el ensayo de torsión de tubos. Este ensayo se puede definir como el mejor para calcular el parámetro debido a que al ejecutar una torsión sobre un tubo, se obtiene un estado tensional tangencial puro. De cualquier modo, es un ensayo difícil de ejecutar debido al sistema de cogida, y difícil de fabricar debido a la complejidad que conlleva fabricar un tubo de material compuesto, asimismo, resulta sumamente caro debido a los inconvenientes antes citados. Es por ello que se prefiere elegir el ensayo Off-Axis como primera opción.

2.3. EL ENSAYO OFF-AXIS

El ensayo Off-Axis es el método indirecto más empleado para el cálculo de la resistencia y del módulo a cizalladura, debido a su sencilla configuración geométrica tanto de la probeta como del sistema de mordaza. A su vez, es considerado uno de los ensayos que presentan mejores resultados junto al losipescu, como se explicó anteriormente.

2.3.1. Descripción del Ensayo

El ensayo Off-Axis se caracteriza por tratarse de un ensayo de tracción sobre un laminado de fibra de carbono, mediante el cual se intenta que, ya que no se puede conseguir de manera sencilla un estado tensional tangencial puro, la tensión tangencial tenga un papel predominante en el ensayo.

Por ello, el laminado es unidireccional, estando todas las capas con las fibras en la misma dirección, dichas capas están desplazadas un cierto ángulo θ respecto de la vertical, de modo que la tracción será soportada en gran medida por la fibra, no obstante una parte también la resistirá la matriz. Gracias a esto, es posible calcular los valores deseados.

Para medir las deformaciones que sufre el espécimen, se coloca una galga extensométrica o un extensómetro en dirección longitudinal para su obtención.

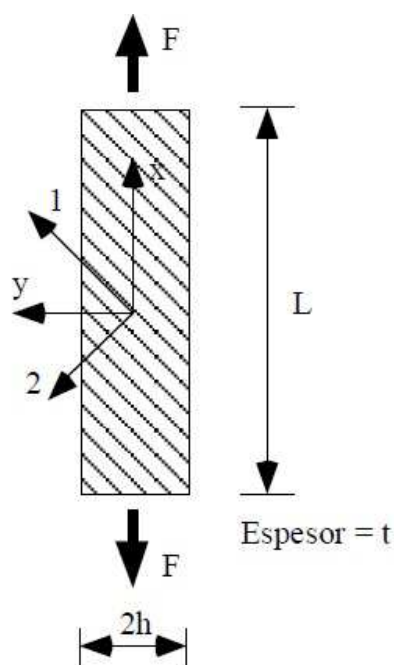


Figura 2. 8: Esquema de la probeta del ensayo Off-Axis

Mediante unas ecuaciones de relación tensión-deformación, se consigue definir el módulo de Young del material en la dirección principal de tracción (E_x), distinto del anteriormente definido en el eje de las fibras.

Para obtener su valor, es necesario resolver este problema implementando una solución analítica que describa las relaciones que se establecen en los materiales ortótropos. Esta clase de materiales, destaca por que se definen por completo mediante nueve constantes y no existe acoplamiento entre tensiones normales y deformaciones tangenciales en los planos principales del material. Además, si se considera que existe simetría respecto del eje z , se puede tratar como un problema de lámina, aplicando las ecuaciones de tensión plana, simplificando las ecuaciones, por lo que la ley de comportamiento en direcciones principales queda:

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j$$

Y desarrollando la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Donde las cuatro constantes S_{ij} representan:

$$S_{11} = \frac{1}{E_{11}}; \quad S_{22} = \frac{1}{E_{22}}; \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}}; \quad S_{12} = \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{-\nu_{21}}{E_{22}}$$

Como este laminado no se encuentra en ejes principales, sino que presenta un cierto ángulo respecto de la dirección de carga, hay que realizar un cambio de base, y por lo tanto, la relación deformación-tensión resulta:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Donde las nuevas constantes vienen definidas por las siguientes relaciones.

$$\bar{S}_{11} = S_{11}(\cos \theta)^4 + (2S_{12} + S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + S_{22}(\sin \theta)^4$$

$$\bar{S}_{12} = (S_{11} + S_{22} - S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + S_{12}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4)$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11}(\sin \theta)^4 + (2S_{12} + S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + S_{22}(\cos \theta)^4$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})(\sin \theta)(\cos \theta)^3 + (2S_{12} - 2S_{22} + S_{66})(\cos \theta)(\sin \theta)^3$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})(\cos \theta)(\sin \theta)^3 + (2S_{12} - 2S_{22} + S_{66})(\sin \theta)(\cos \theta)^3$$

$$\bar{S}_{66} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + S_{66}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4)$$

Gracias a esta nueva definición de constantes, se puede calcular el valor aproximado que tomaría la rigidez a cizalladura mediante una ecuación que relaciona el módulo de elasticidad en la dirección principal de carga del material con los parámetros básicos definidos para ejes principales, como son el módulo de Young tanto longitudinal como transversal respecto de la orientación de la fibra E_{11} y E_{22} y el coeficiente de Poisson del material, ν_{12} o ν_{21} .

Aplicando la igualdad $\bar{S}_{11} = \frac{1}{E_x}$, se consigue una relación sencilla para la obtención del módulo a cortadura.

$$G_{12} = \frac{(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2}{\frac{1}{E_x} - \frac{(\cos \theta)^4}{E_{11}} - \frac{(\sin \theta)^4}{E_{22}} + \frac{2\nu_{12}(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2}{E_{11}}}$$

En el método descrito anteriormente, pueden producirse errores asociados a la obtención de los parámetros de rigidez, como redondeos o mal posicionamiento de las galgas extensométricas, lo que conlleva a un arrastre de los mismos en el cálculo de la rigidez a cizalladura.

Para intentar solucionar este inconveniente, se procede a pegar, orientada en la dirección de carga, una roseta de galgas en el centro de la probeta, obteniendo gracias a ella la deformación tangencial que sufre el espécimen.

Una vez se tiene este valor, dando uso de la relación entre tensión y deformación tangencial se logra de manera directa y sin que intervengan las propiedades del material el valor de la rigidez a cortadura.

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}}, \quad \sigma_{12} = -\frac{F}{A} \sin \theta \cos \theta$$

Otro aspecto importante a tener en cuenta para caracterizar el ensayo es la orientación de las fibras en la probeta. Se pueden presentar orientaciones de muy diversos ángulos. En este proyecto se barajarán datos de especímenes con orientación de 10°, 15° y 30°, cuyas ventajas e inconvenientes se definirán a lo largo del estudio.

No obstante, varios estudios [3, 4, 5, 6] sobre una gran gama de materiales compuestos, definen, que la mejor orientación para alcanzar el máximo de la relación deformación tangencial frente a deformación longitudinal, se encuentra por lo general en una orientación de fibra cercana a 10°, presentando además un porcentaje de error prácticamente nulo frente a otras orientaciones.

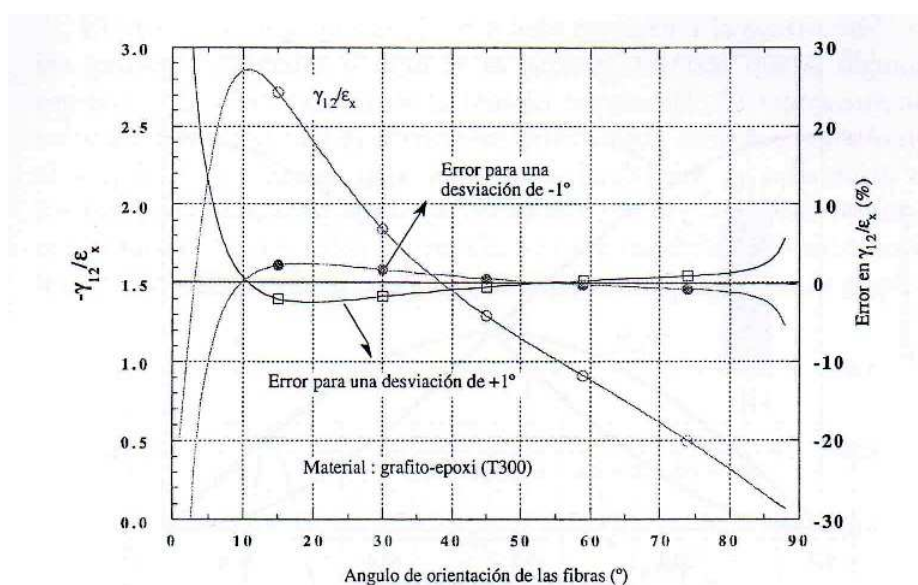


Figura 2. 9: Variación de la deformación tangencial frente a la deformación longitudinal según la orientación de fibras

Un segundo estudio se enfoca más en la resistencia a cizalladura que en el módulo, y analiza la orientación óptima para satisfacer a ambos valores a la vez. En este aspecto, estudiando cada componente de tensión en dirección de fibras frente a la tensión principal, se observa que en todo momento la tensión tangencial es inferior a una de las dos tensiones normales, por lo que podría interpretarse que el ensayo no está capacitado para definir de manera fácil el estado tensional tangencial puro, o un estado donde la rotura se produzca por un esfuerzo cortante entre fibras.

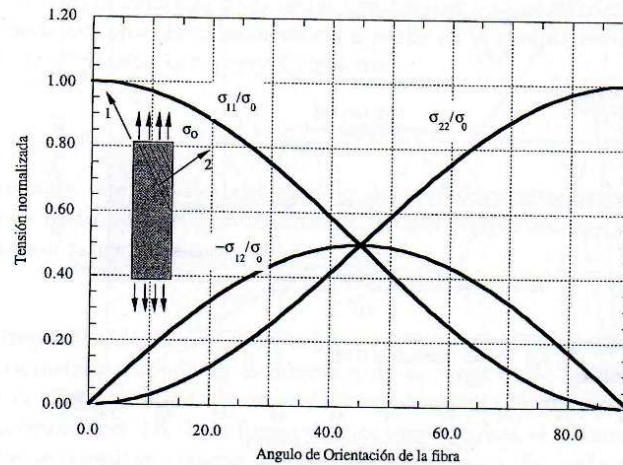


Figura 2. 10: Variación de las tensiones en función del ángulo de orientación en un ensayo Off-Axis

Pero a la hora de determinar la resistencia a cortadura, el peso que cada tensión introduce sobre los criterios de fallo varía. Haciendo uso del criterio de Tsai-Hill, que se explicará en detalle en el capítulo quinto, se llega a una serie de conjeturas.

$$\left(\frac{\sigma_o}{X_T}\right)^2 \left[\left\{ (\cos \theta)^4 - (\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2 + \left(\frac{X_T}{Y_T}\right)^2 (\sin \theta)^4 \right\} + \left\{ \left(\frac{X_T}{S}\right)^2 (\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2 \right\} \right] = 1$$

El primer término dentro del corchete representa la influencia de las tensiones normales al fallo de la lámina, frente al segundo término, que representa la contribución de las tensiones tangenciales. Asumiendo que la relación entre la resistencia a tracción en la dirección 1 y la resistencia a cortadura de los ejes 1-2 (X/S) toma el valor 15, y la relación entre tensiones a tracción en la dirección 1 y la 2 (X/Y) toma el valor 30 (valores típicos de cualquier material compuesto), se obtiene un gráfico que representa la contribución de la tensión tangencial en el fallo.

Se puede observar claramente en la imagen 2.11, que el punto máximo también se localiza en una orientación de fibras de 10° , lo que a priori se puede considerar como la orientación deseada. No obstante, se irá analizando las ventajas e inconvenientes de este valor, y el cambio a orientaciones de 15° para reducir los fallos.

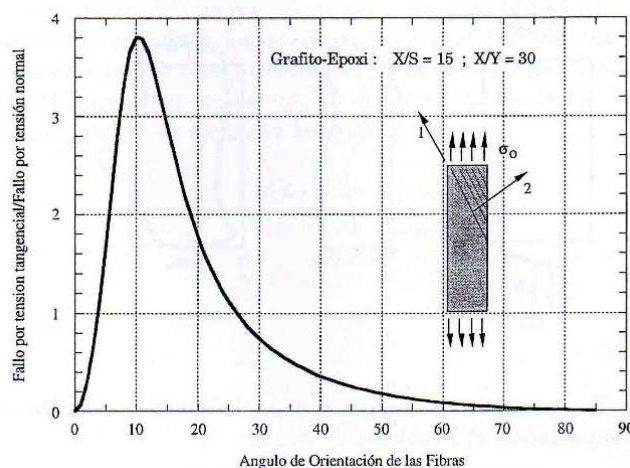


Figura 2. 11: Contribución de la tensión tangencial al fallo

2.3.2. Problemas asociados

Aunque el ensayo está definido para que su ejecución sea sencilla, se presenta un problema que debe ser solucionado para llegar a tener un estado tensional lo más parecido posible a un estado tensional tangencial puro.

En este aspecto, se define la existencia de un acoplamiento entre tensiones normales y deformaciones tangenciales, que se debe intentar solucionar en la medida de lo posible para conseguir el desacople de ambos esfuerzos, y así obtener un estado tensional uniforme de carga.

Debido a este acople de tensiones, la deformación ideal que el ensayo necesita para poder realizarse de manera efectiva es difícil de lograr.

Por lo general, las mordazas fijan los extremos de la probeta, obteniendo un empotramiento en uno de los extremos y permitiendo un desplazamiento en la dirección de carga en el otro extremo. En ningún caso se permite bajo esta configuración de probeta una deformación sobre el espécimen al mismo tiempo, por lo que el sistema de mordazas puede incurrir en un serio problema.

La deformación acaecida sobre la probeta es debida a que se origina un esfuerzo cortante y un momento flector que anulan el giro de los extremos, y además se crea un complejo estado tensional no uniforme, tanto menos uniforme conforme el ratio de la probeta disminuye. [9]

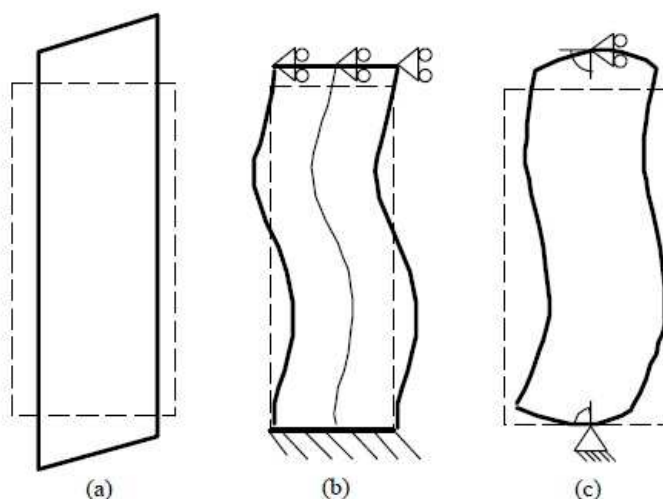


Figura 2. 12: Esquema de la deformada de la probeta del ensayo Off-Axis. El caso (a) corresponde a la deformada ideal, el caso (b) corresponde a la deformada debido al sistema de cogida real, y por último, el caso (c) es la solución propuesta de Pagano para suavizar éstos esfuerzos

Para poder lograr este desacople, existen dos maneras de intervenir. La primera, consistiría en actuar sobre las mordazas de las probetas para que permitan esta deformación libremente. La segunda, estribaría en trabajar sobre los tacones de las probetas, de modo que se obtenga en el área central del espécimen un estado, lo más homogéneo posible.

2.3.3. Soluciones planteadas

Los estudios realizados en este campo, indican que hay dos vertientes de pensamiento para solucionar este problema. Por un lado, se pretende evitar el acoplamiento modificando la configuración del ensayo, y por otro lado, se plantea la posibilidad de, manteniendo la configuración del ensayo, aplicar unos gráficos de corrección para solventar el acoplamiento entre tensiones normales y deformaciones tangenciales.

La primera decisión de modificar la configuración del ensayo Off-Axis, tiene varias vías de actuación, defendidas por distintos autores.

En primer lugar, aumentar el ratio o relación entre longitud de probeta frente al ancho de la misma, de modo que, al tener una probeta tan esbelta, apenas sean perceptibles las deformaciones tangenciales. De este modo, se origina una zona central de la probeta donde el estado tensional es lo más uniforme posible. Este estudio es llevado a cabo por Chamis y Sinclair. [14]

Otra vía de actuación sería la de incurrir directamente sobre las mordazas, permitiendo de esta manera los giros necesarios en los extremos de las probetas a fin de evitar el momento flector y el esfuerzo cortante que hacen que la probeta se deforme. Pindera y Herakovich, llevaron a cabo este estudio y diseñaron un sistema de mordazas que aunaba todos los conocimientos hasta el momento, utilizando las bases de: Wu y Thomas, “El empleo de mordazas que permitan la rotación, reduce las perturbaciones sobre el campo de deformaciones”, de Pagano “El acortamiento es el factor dominante” y Rizzo, “Es aconsejable el uso de mordazas que permitan el giro”. Sin embargo, la dificultad de llevar a cabo los ensayos por el tipo de mordaza a usar, hace que se planteen algunos sistemas más simples.

Por último, el método de actuación más sencillo. En él, se pretende cambiar la configuración estándar de tacones rectos usados en los ensayos, por una configuración de tacones oblicuos, con una inclinación fijada según la orientación de las fibras en la probeta, optimizando de este modo la minimización del acople entre tensiones normales y deformaciones tangenciales. Este procedimiento fue propuesto por C.T. Sun [12, 13], y va a ser el principal punto de estudio para la elaboración del documento. La explicación de la elección del ángulo de inclinación de los tacones o de la influencia que las propiedades tienen sobre este elemento, se tratarán en capítulos posteriores.

La segunda decisión tomada para solucionar los problemas que aparecían en el ensayo Off-Axis, es mantener la configuración del ensayo estándar de tracción, y crear un modelo de corrección, de modo que mediante números adimensionales y con unas relaciones entre variables reales y variables aparentes, se llegue a unos gráficos de correlación para que, sabiendo el resultado del ensayo, se pueda obtener el valor real del parámetro que queremos estudiar. Bajo esta línea de investigación, autores como Pagano y Halpin [9] comenzaron a buscar ecuaciones que relacionaran parámetros reales y aparentes. Posteriormente, autores como Pindera y Herakovich [11] o más tarde J.C. Marín [3, 4], profundizaron en su investigación.

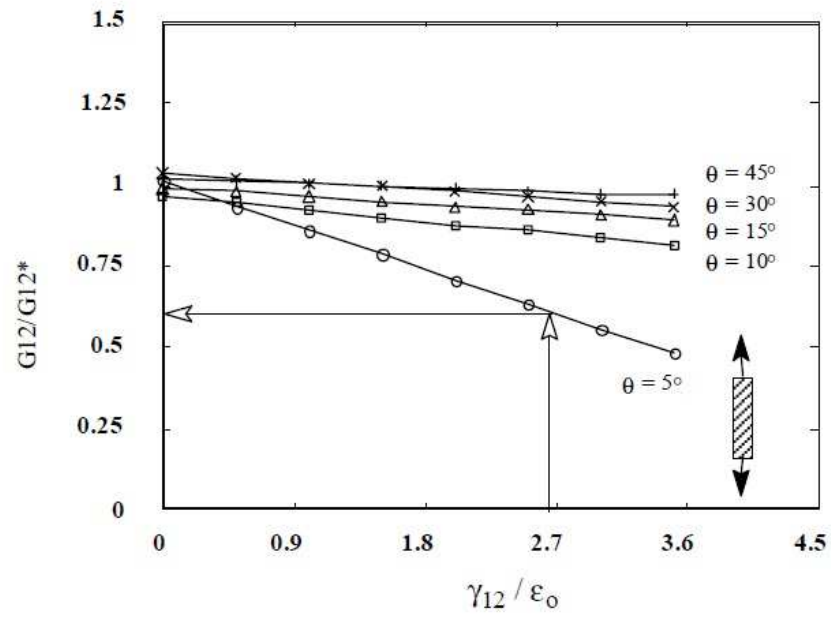


Figura 2. 13: Ejemplo de gráfico de corrección para probetas de ratio 10 y varios ángulos de orientación