

DETERMINACION DE TENSIONES INTERLAMINARES EN MATERIALES ANISOTROPOS LAMINADOS SEGUN ENSAYO DE DOBLE GRIETA

S. Baselga, A. Miravete, E. Larrodé

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza

Resumen

A través de la experimentación se ha podido obtener una buena referencia para observar el comportamiento preciso de la teoría que estudia las tensiones intralaminares en un estado de tensión plana.

Debido a la necesidad de registrar en todo momento el valor de las tensiones interlaminares de cortadura, se ha necesitado el apoyo de la realización de numerosos ensayos, los cuales han hecho de este proceso un método laborioso para describir con mucha aproximación la delaminación producida por las tensiones interlaminares.

Hasta el momento, el ensayo de cortadura se realizaba sobre tres puntos. Hoy en día, los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados con probetas de doble grieta se pueden contrastar perfectamente con los ensayos de cortadura. No se utilizan útiles especiales para acoplarlos a las máquinas de ensayo, lo cual facilita su ejecución.

Abstract

A theory of interlaminar stresses in a plane-stress state will be assessed by means of testing.

A high number of experimental measurements is needed in order to obtain accurate values of interlaminar shear strength components. Thus, this process is expensive because delamination induced by interlaminar strength components is evaluated very accurately.

So far, interlaminar shear strength has been obtained by means of a 3P test bending. Results got from the double notched specimen show accurate and consistent results. A standard uniaxial test machine can be used for this testing method.

1. INTRODUCCION.

La caracterización completa de un material compuesto laminado pasa por la determinación de su resistencia interlaminar entre otros parámetros.

En materiales de poco espesor, para conocer la tensión de cortadura interlaminar, la realización del ensayo a tres puntos resulta bastante más complicado por la dificultad del manejo de los útiles de ensayo que resultan demasiado grandes, por ello, el empleo de modos alternativos de ensayo son muy importantes para la determinación de esta propiedad.

Un modo de ensayo válido por su exactitud y facilidad de realización es el denominado ensayo de doble grieta.

Los materiales que se prestan con mayor exactitud al ensayo de doble grieta son aquellos constituidos por apilamientos homogéneos de láminas unidireccionales o por láminas de tejido, ya que de este modo se evita la aparición de tensiones adicionales como consecuencia de la orientación angular de las fibras.

Dado el concepto utilizado en el ensayo de doble grieta, es inmediato deducir que no es el adecuado para la determinación del módulo de cortadura interlaminar, así, se deberá de compaginar este ensayo con uno habitualmente utilizado para la determinación del módulo G, como tracción y toma de datos de dos galgas colocadas perpendicularmente entre si, consiguiendo con la combinación de ambos ensayos la perfecta caracterización del comportamiento a cortadura del material.

Con anterioridad, el profesor Ran Kim llevó a cabo un detallado estudio de materiales compuestos laminados según ensayo de doble grieta utilizando para ello apilamientos unidireccionales, recogiendo además información en trabajos incorporados en la "Fourth European Conference on Composite Materials".

Los estudios realizados en el actual desarrollo han sido llevados a cabo sobre apilamientos de láminas de tejido equilibrado, pudiéndose comprobar así la validez de método para este tipo de apilamientos.

2. CONDICIONES DE ENSAYO.

Los materiales elegidos para la realización de los ensayos y la geometría de las probetas utilizadas fueron los siguientes:

- Materiales:

- Carbono/epoxi, prensado en vacío
- Vidrio E/poliester, prensado en vacío

El carbono elegido es de bajo módulo y elevada resistencia.

Las láminas son, tal como se ha comentado anteriormente, de tejido equilibrado.

El objeto de utilizar dos materiales tan diferentes es la determinación de la influencia del tipo de refuerzo en la caracterización del ensayo y su posible influencia sobre la expresión matemática definida posteriormente.

Las características ingenieriles de estos materiales obtenidas a través de ensayos de tracción normalizados son las siguientes:

	v_f (%vol)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_1
Vidrio E/pol.	30	5	0.8	1.7	0.32
Carbono/ep.	30	36	6	2.3	0.28

Tabla 1. Constantes elásticas de los materiales.

- Geometría:

Las dimensiones generales de las probetas vienen indicadas en la figura 1, considerándose como condiciones de partida las siguientes:

$$6 \text{ mm} < l < 14 \text{ mm}$$

$$c = 0.8 \text{ mm}$$

$$d > 100 \text{ mm}$$

$$2e < b < 5e$$

Los motivos por los cuales se consideran las anteriores medidas son los siguientes:

1- La distancia considerada entre grietas "l", reduce como demuestran los cálculos, la componente de tensión transversal S_{22} .

2- La sección de corte se consideró de 0.8 mm debido a que es la anchura de corte que se consigue con una sierra normal de taller de diamante, lo cual facilita su ejecución.

3- Con una longitud de probeta superior a 100 mm, se consigue evitar la aparición de tensiones desconocidas, en la zona de estudio entre grietas, por las condiciones de amarre de la probeta en sus extremos.

Las dimensiones anteriores fueron asimismo comprobadas con los trabajos realizados por Bouette.

Con el objeto de obtener el efecto deseado, la profundidad de la grieta debe sobrepasar en una cantidad mínima la línea neutra de la probeta, es decir, sobrepasará en una pequeña cantidad la mitad del espesor.

La forma elegida de grieta fue rectangular, comprobándose que no existía tan apenas dispersión con respecto a grietas realizadas con radios de 0.5 mm y 1 mm.

La exactitud de la fabricación de la probeta es un factor primordial, ya que dado el pequeño tamaño de ellas, cualquier dato erróneo de su geometría lleva a la obtención de unos resultados alejados de la realidad.

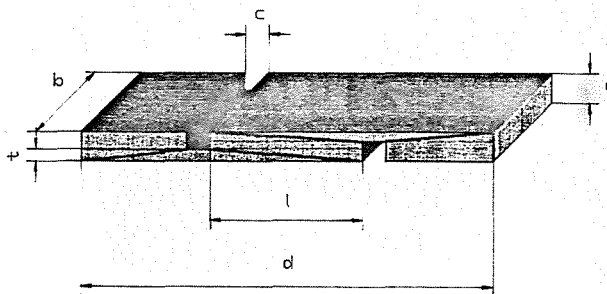


Figura 1. Definición de valores geométricos.

Las dimensiones particulares de las probetas ensayadas fueron las siguientes:

	l (cm)	b (cm)	e (cm)	t (cm)
Vidrio E/pol.	0.76	0.7	0.16	0.085
Carbono/epoxi	0.65	0.6	0.26	0.115

Tabla 2. Dimensiones de las probetas.

El número de láminas del apilamiento de vidrio es cuatro.

El número de láminas del apilamiento de carbono es ocho.

3. PROCESO OPERATIVO.

Máquina de ensayo.

El espécimen se ensayó en una máquina Lloyd 1000 con desplazamiento controlado. El test se llevó a cabo cuasi-estáticamente, analizando en todo momento valores de carga y desplazamiento.

Los útiles de anclaje empleados fueron los mismos que se usan para la realización de ensayos de tracción.

La forma de anclaje se pueden observar perfectamente en las figuras 2 y 3 mostrada a continuación.

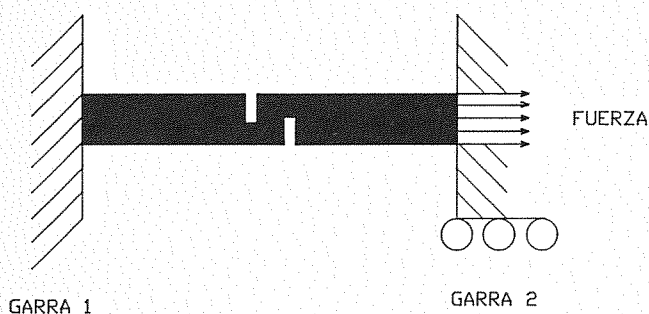


Figura 2. Condiciones de contorno

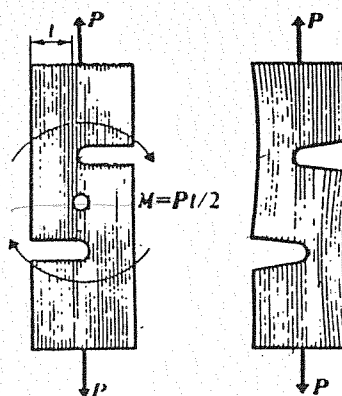


Figura 5. Parámetros de ensayo de doble grieta.

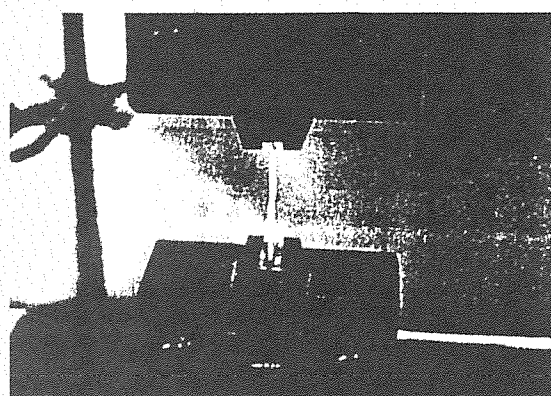


Figura 3. Anclaje en máquina de ensayos.

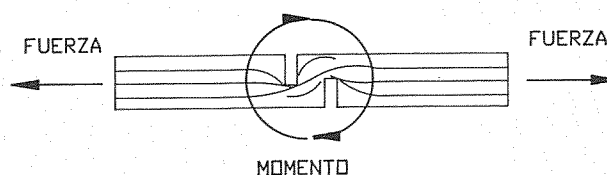


Figura 6. Parámetros de ensayo de doble grieta.

El estudio teórico fue llevado a cabo a través del programa de elementos finitos ABAQUS y del soporte de CAD aportado por I-DEAS.

La utilización de elementos tridimensionales permite analizar el comportamiento de todas las componentes de tensión, prestando especial interés en la tensión de cortadura interlaminar S_{13} , ya que es aquella que se quiere cuantificar para un determinado material.

La distribución de tensiones obtenida por ambos programas de elementos finitos es similar. Se considera la aparición de un momento torsor M que origina la aparición de tensiones de cortadura interlaminar S_{13} que serían las causantes de la rotura del material.

El mallado de la probeta utilizado para su cálculo por ABAQUS fue de 288 nodos para el vidrio y de 342 para el carbono, el elemento utilizado fue el cúbico de ocho nodos. La geometría resultante se aprecia en las figuras 7 y 8.

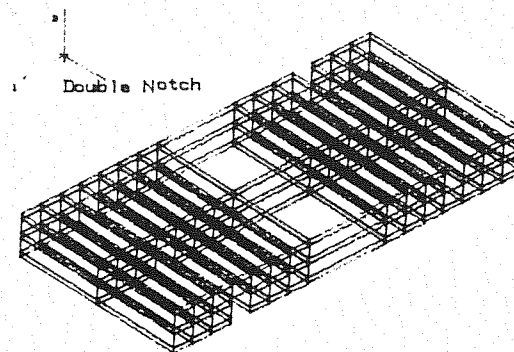


Figura 7. Vista general del mallado por ABAQUS.

Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno vienen dadas por las garras de anclaje a la máquina de ensayos, es decir amarre a las dos caras paralelas opuestas en anchura en ambos extremos, introduciendo la fuerza a través de una de las dos garras en el sentido longitudinal de la probeta. Ver figura 4.

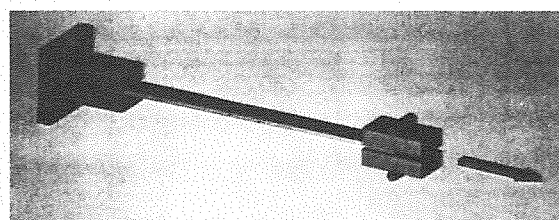


Figura 4. Solicitaciones.

El espécimen se someterá a un esfuerzo de tracción.

4. COMPROBACION ANALITICA.

Siguiendo los trabajos llevados a cabo por el profesor Kim, se ensayó la probeta libremente, siendo su comportamiento el mostrado en las figuras 5 y 6.

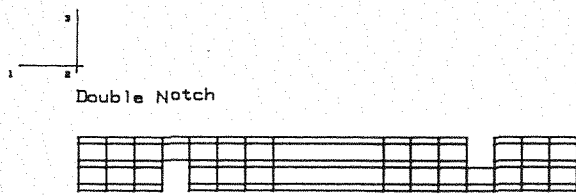


Figura 8. Sección frontal del mallado por ABAQUS.

Las discretización de la probeta a través de I-DEAS utilizó un mallado de más de 2.500 nodos, utilizando un elemento tetraédrico de diez nodos. En la figura 9 se observa con detalle el aspecto de la zona central de la probeta modelizadas por I-DEAS.

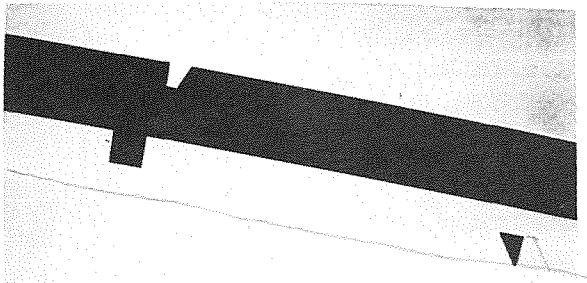


Figura 9. Detalle central de la probeta.

La deformada de la probeta demuestra claramente la aparición de un momento torsor en la zona definida entre las grietas. Ver figuras 10 y 11.

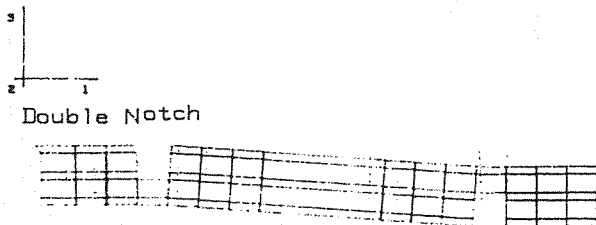


Figura 10. Deformada por ABAQUS.

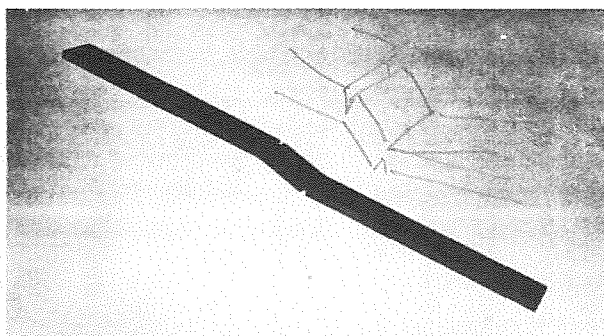


Figura 11. Deformada por I-DEAS.

La distribución de tensiones se muestra en el mapa de tensiones obtenido, en el cual se observan los picos de tensión máxima que se producen en las cercanías de la grieta y que se van propagando a través de la línea media del espesor. Ver figuras 12, 13 y 14.

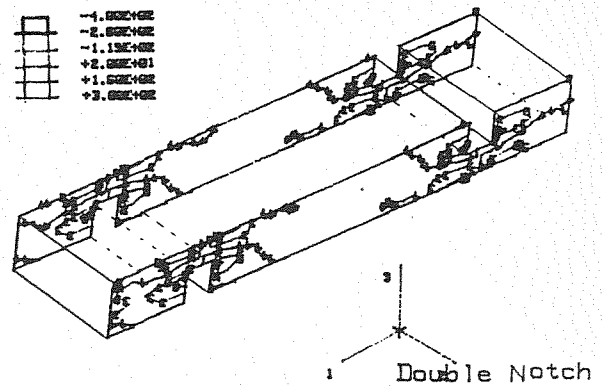


Figura 12. Mapa de tensiones por ABAQUS.

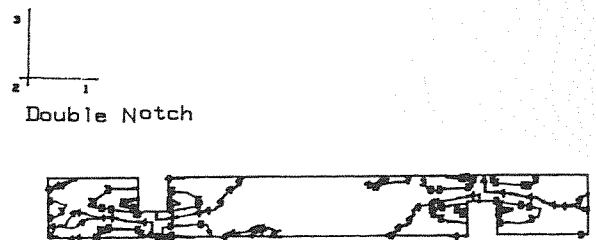


Figura 13. Vista frontal de mapa de tensiones por ABAQUS.

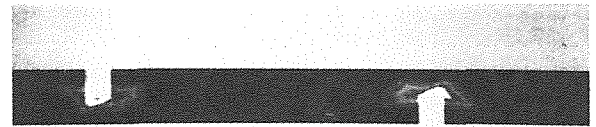


Figura 14. Vista frontal de mapa de tensiones por I-DEAS.

La comprobación del resto de las componentes de tensión demostró que la rotura se debía a la cortadura interlaminar.

La rotura obtenida se puede ver en la figura 15.

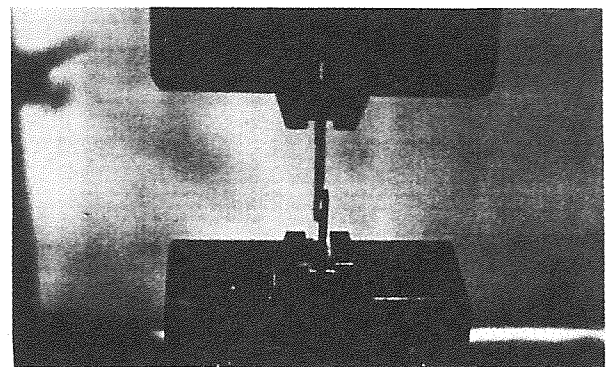


Figura 15. Aspecto de la rotura de probeta.

La delaminación debida a la rotura de la resina quedó perfectamente visible en los ensayos realizados.

5. RESULTADOS

El número de probetas ensayadas para cada material fueron diez.

El análisis de resultados se comprobó con los estudios realizados por el profesor Kim.

La tensión interlaminar S_{13} que aparece como consecuencia del momento torsor, tiene una fuerte dependencia de las características elásticas del material.

La expresión analítica que mejor aproxima el comportamiento resistente interlaminar del material frente a un ensayo de doble grieta es la siguiente:

$$\frac{S_{13}}{S_0} = \frac{\theta \cosh(\theta - \beta x)}{\sinh \theta}$$

donde la geometría de la probeta se encuentra definida en la figura 1.

$$0 < x < 1$$

$$\theta = \frac{\beta l}{2} \quad \beta = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{2G}{E}} \quad S_0 = \frac{F}{l b}$$

donde F es la fuerza de tracción.

La comparación de los resultados obtenidos por el estudio de elementos finitos y la expresión teórica anterior demuestran una gran aproximación.

Las figuras 16 y 17 presentan las tensiones interlaminares S_{13} frente a la distancia entre grietas en ambos materiales.

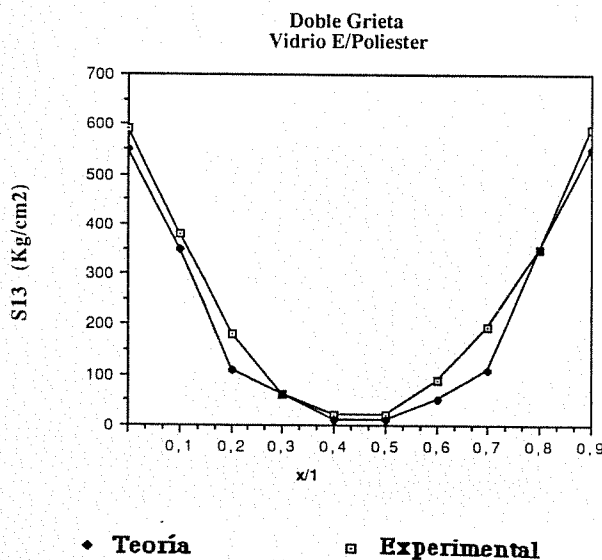


Figura 16. Tensiones interlaminares para vidrio.

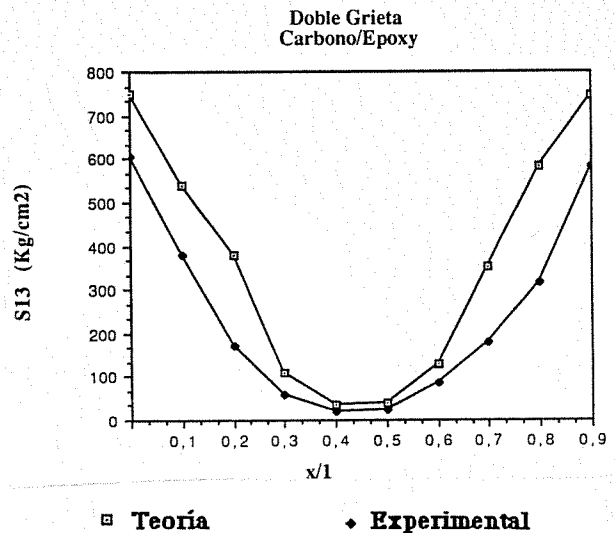


Figura 17. Tensiones interlaminares para carbono.

6. CONCLUSIONES

El ensayo de doble grieta no permite obtener valores apropiados para la predicción del módulo de cortadura, pero da una muy buena aproximación de valores de resistencia interlaminares.

La utilización de este ensayo exige una perfecta determinación de las características elásticas del material, así como de las dimensiones de la probeta y de las grietas, ya que cualquier pequeño error de medida desvirtúan notablemente los resultados.

Se ha comprobado que la expresión matemática desarrollada es válida para ambas clases de refuerzos, carbono y vidrio E.

Los resultados obtenidos demuestran que el ensayo es perfectamente válido para apilamientos constituidos por láminas de tejido equilibrado.

REFERENCIAS.

1. Kim, R., Conferencia INASMET, San Sebastián, Enero 1990.
2. Bouette, B., Cazeneuve, C., Comtand, "Shear in Carbon-Epoxy Laminates at Various Strain Rates", ECCM 4, 25-28 Septiembre 1990.
3. Tsai, S., Miravete, A., "Diseño y análisis de materiales compuestos", Ed. Reverté, 1988.