

Estudios preliminares para la determinación de la resistencia a cortadura interlaminar S_T mediante los ensayos Iosipescu y "Short beam shear"

J. C. Marín, F. París, J. Cañas, A. Barroso, C. A. Méndez, W. Kruis
Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, España

RESUMEN

La resistencia a cortadura interlaminar S_T es una característica del material que juega un papel significativo en algunos de los criterios de fallo de la matriz en compresión con más repercusión en la actualidad (e.g.: Hashin, Puck, "World Wide Failure Exercise", 1998, 2002). Sin embargo, dicha característica resulta difícil de medir experimentalmente, por lo que es común la aproximación de dicho valor a partir de otras características del material que resultan más simples de determinar (resistencia a cortadura intralaminar S , resistencia a compresión perpendicular a las fibras Y_C , resistencia a cortadura en el ensayo "Short Beam Shear", SBS). En este trabajo se realiza un estudio acerca de la posibilidad de medir la resistencia a cortadura interlaminar S_T empleando una configuración modificada de la probeta Iosipescu, y mediante una variante del ensayo SBS con las fibras perpendiculares a la dirección longitudinal de la probeta. Los resultados obtenidos para las diferentes configuraciones, y para distintas dimensiones de las probetas son analizados en el presente estudio.

1. INTRODUCCIÓN

La resistencia a cortadura interlaminar S_T caracteriza la resistencia del material ante un estado de tensión tangencial, fuera del plano de la lámina, pura y uniforme, por lo que dicho valor forma parte de la caracterización tridimensional de una lámina. No obstante, en algunos criterios de fallo bidimensionales (Hashin, 1980; Puck, 1998), que han tenido un papel destacado en el reciente "World Wide Failure Exercise" (Soden et al, 1998; Hinton et al, 2002), aparece esta característica en la expresión del modo de fallo de la matriz en compresión. Así pues, resulta necesario el conocimiento de dicho valor para el correcto uso de tales criterios.

Para la evaluación de S_T existe un único ensayo normalizado con cierto nivel de reconocimiento (MIL-HDBK-17-1E, 1998), que es el denominado ensayo Iosipescu (ASTM D-5379, 1998), el cuál se realiza sobre una probeta de un laminado unidireccional

con las fibras orientadas perpendicularmente al plano del espécimen, tal como se muestra en la figura 1.

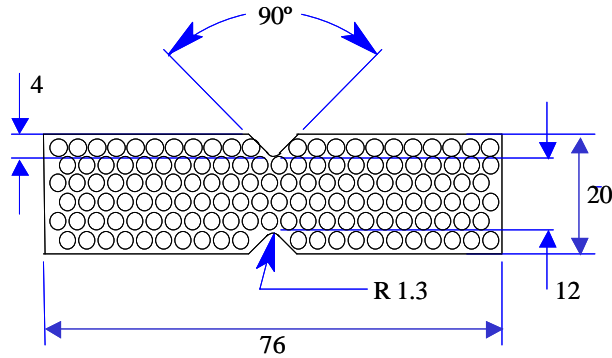


Fig. 1 - Esquema de la probeta del ensayo Iosipescu.

Dadas las dimensiones de la probeta Iosipescu, para la extracción de dicho espécimen sería necesario disponer de un laminado con un espesor en torno a 20 mm aproximadamente, magnitud que no suele ser habitual para el espesor de los laminados que se preparan para otros ensayos de caracterización.

Debido a las dificultades expuestas para la medida de la resistencia a cortadura interlaminar S_T , es una práctica común el aproximar dicho valor a partir del valor de otras características cuya evaluación resulta más simple (la resistencia a cortadura intralaminar S , la mitad de la resistencia a compresión perpendicular a las fibras $\approx 0.5 \cdot Y_C$ (Puck, 2002), la resistencia a cortadura en el ensayo SBS). En el presente trabajo se plantean como alternativas la posibilidad de medir S_T empleando una configuración modificada de la probeta Iosipescu que resulte más fácil de fabricar, y mediante una variante del ensayo SBS con las fibras orientadas perpendicularmente a la dirección longitudinal de la probeta.

2. CONFIGURACIÓN IOSIPESCU. ESTUDIOS PRELIMINARES

La idea de la modificación propuesta consiste en reproducir, manteniendo la orientación de las fibras, la forma de la probeta Iosipescu pegando unos refuerzos laterales ("tabs") sobre el laminado unidireccional que queremos ensayar, tal como se describe en el esquema de la figura 2. De esta manera se conseguiría construir el espécimen usando un laminado con un espesor más pequeño.

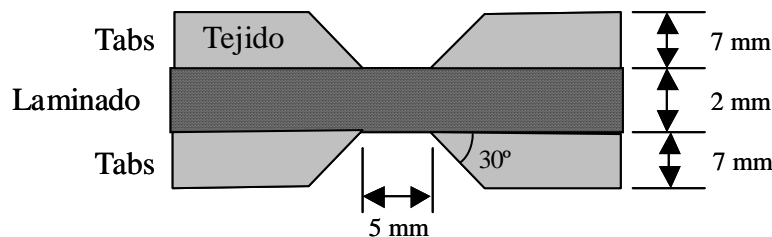


Fig. 2 - Esquema de la probeta Iosipescu modificada.

En un primer intento, y con objeto de estimar las dimensiones adecuadas para esta configuración, se realizó un ensayo con un laminado de grafito-epoxy de 2 mm de espesor, utilizando unos *tabs* de 7 mm de espesor y con un ángulo del chaflán de 30° construidos con tejido de grafito-epoxy, siendo la longitud horizontal intermedia entre los tabs de 5 mm. En la figura 3a se muestra una vista del dispositivo de ensayo.

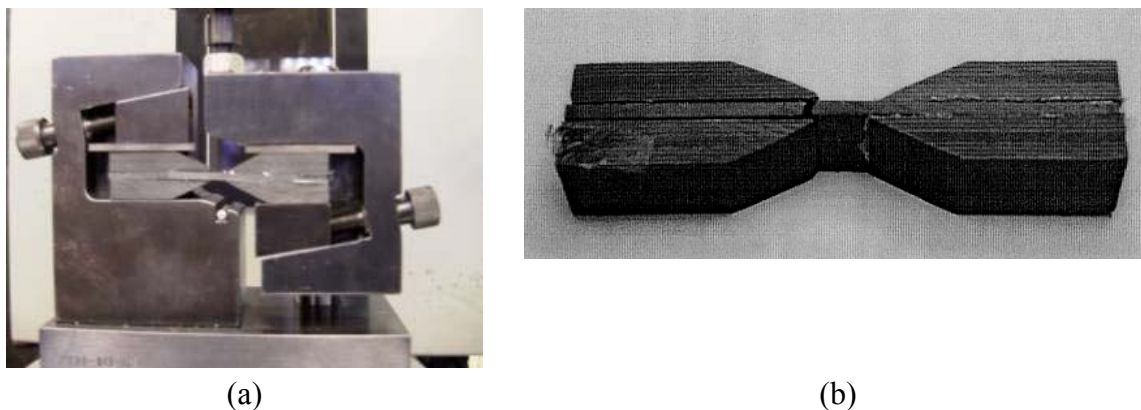


Fig. 3 - Ensayo Iosipescu:(a) vista del dispositivo, (b) vista de la rotura.

El resultado obtenido de este ensayo para la resistencia a cortadura fue de 10 MPa, apareciendo la rotura un poco dentro de la zona entre los *tabs* y según un plano aproximadamente vertical, tal como se observa en la figura 3b. El valor tan bajo de la resistencia, junto con el tipo de rotura observada y la forma de la deformada adquirida por el espécimen durante el ensayo (la cuál se representa de manera esquemática, y exagerada para facilitar su comprensión, en la figura 4), parecen indicar que la rotura se debió a la flexión existente, y por tanto a la componente normal longitudinal de tensión y no a la componente tangencial como sería deseable.

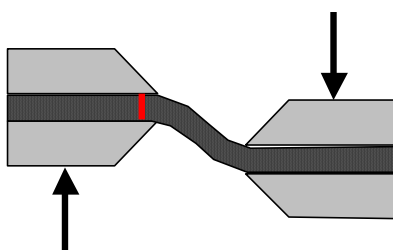


Fig. 4 - Esquema de la deformada del espécimen.

Con objeto de verificar estas circunstancias, y obtener consecuencias acerca de las modificaciones pertinentes a llevar a cabo sobre las dimensiones del espécimen, se ha realizado un modelo de elementos finitos del ensayo realizado. Los resultados del modelo de elementos finitos confirman el hecho de que la responsable de la rotura en este caso fuera la componente normal longitudinal, que presenta una concentración en la zona cercana al extremo de los *tabs* (figura 5a), y revelan por otra parte una cierta falta de uniformidad en las tensiones tangenciales (figura 5b) en la zona pretendida de rotura. Para

solventar estos problemas se ha planteado la posibilidad de alterar las dimensiones del espécimen, disminuyendo la distancia horizontal entre los *tabs* y aumentando el espesor del laminado. Analizando el modelo incluyendo estas modificaciones se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6.

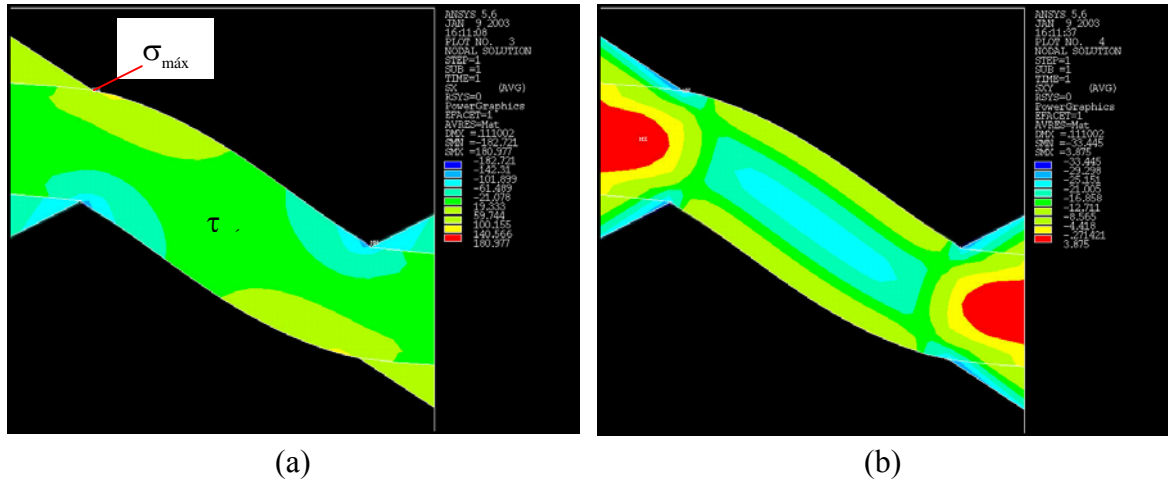


Fig. 5 - Distribución de tensiones en la zona central de la probeta: (a) componente normal longitudinal, (b) componente tangencial.

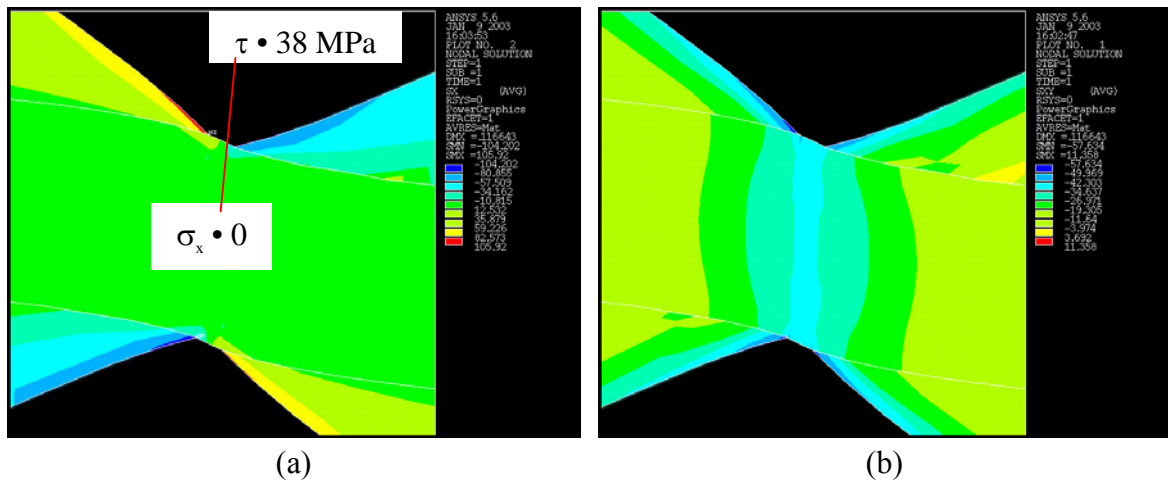


Fig. 6 - Distribución de tensiones en la zona central para el modelo modificado: (a) componente normal longitudinal, (b) componente tangencial.

De los resultados del modelo modificado se observa cómo disminuye considerablemente la concentración de las tensiones normales longitudinales en la zona central de la probeta, haciendo posible que las tensiones tangenciales pasen a ser predominantes en dicha zona. Adicionalmente, se observa cómo la distribución de tensiones tangenciales resulta mucho más uniforme sobre la sección central. Por tanto, para la confección de las probetas Iosipescu modificadas se utilizará un laminado con un espesor superior (en torno a 4 y 6 mm), y se reducirá al máximo la distancia horizontal entre los *tabs*.

3. RESULTADOS DE LA CONFIGURACIÓN IOSIPESCU MODIFICADA

Para la fabricación de las probetas se prepararon dos paneles unidireccionales de un compuesto grafito-epoxy de denominación AS4/8552, con espesores de 4.2 mm y 5.8 mm. A partir de dichos paneles se obtuvieron probetas con dos anchos diferentes, 9 mm y 12 mm respectivamente. Así mismo, se mecanizaron los *tabs* a partir de un laminado de tejido grafito-epoxy de 7 mm de espesor, para los dos anchos considerados (9 y 12 mm) y con dos ángulos del chaflán diferentes (30° y 45°). Para cada combinación de espesor y ángulo de los *tabs* se ensayaron 4 especímenes, recogiendo a continuación los resultados correspondientes en la tabla 1.

Espesor (mm)	Ancho (mm)	Ángulo (°)	n° ensayos	S _T media (MPa)	Desv.Stand.
4.2	9	30	4	39.59	7.08
4.2	9	45	4	29.30	3.79
5.8	12	30	4	29.22	8.03
5.8	12	45	4	39.28	5.63

Tabla 1 - Resumen de resultados de los ensayos Iosipescu.

La dispersión observada en los resultados es considerable, y como vemos no existe una correlación de los resultados con el ángulo y el espesor empleados. En la tabla 2 se describen los tipos de rotura apreciados en los ensayos, los cuales se pueden observar en la figura 7.

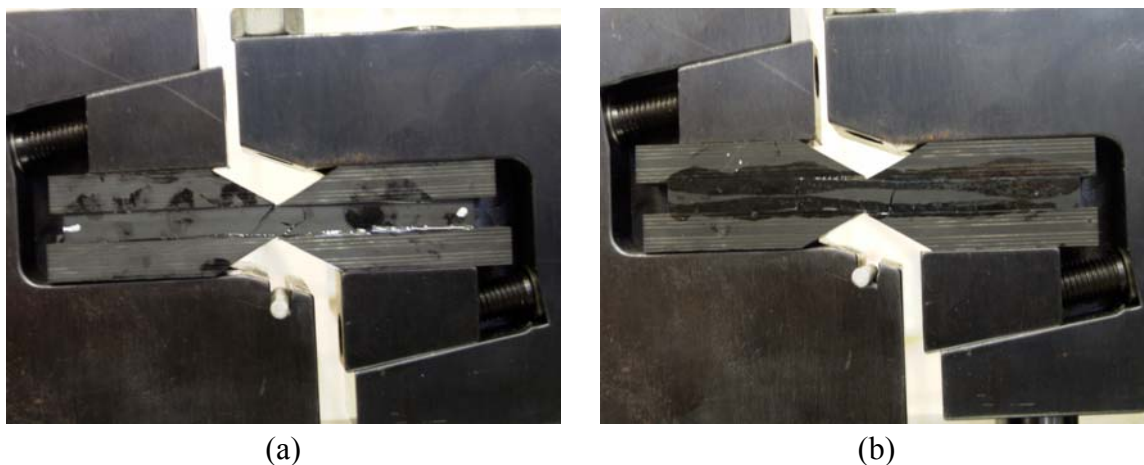


Fig. 7 - Vistas de los tipos de rotura observados: (a) grietas inclinadas a 45°, (b) grietas verticales.

Espesor (mm)	Ángulo tabs (°)	Tipo de rotura
4.2	30	grietas a 45° zona entallas
	45	grietas a 45° zona entallas
5.8	30	(2 ensayos) grietas a 45° zona entallas (2 ensayos) grietas verticales laterales
	45	grietas verticales zona entallas

Tabla 2 - Tipos de rotura.

Las grietas a 45° en la zona entre entallas (figura 7a) estarían asociadas a una rotura por cizalladura, que es el efecto buscado para la evaluación de S_T . Las grietas con tendencia vertical (figura 7b) parecen indicar la influencia de la tensión normal longitudinal en la combinación de tensiones que origina la rotura.

4. CONFIGURACIÓN SBS MODIFICADA

El ensayo SBS en su configuración habitual consiste en someter a flexión en tres puntos a una probeta rectangular de un laminado unidireccional cuyas fibras siguen la dirección longitudinal del espécimen. El resultado del mismo es una medida de la resistencia a cortadura S_{13} . Lo que se plantea en este trabajo es estudiar la posibilidad de utilizar este ensayo para medir S_T utilizando probetas con las fibras orientadas perpendicularmente al plano de la flexión del espécimen, tal como se muestra en la figura 8(a). Para este estudio se realizará una serie de ensayos para distintos valores de la distancia entre los apoyos. En la figura 8(b) se muestra una imagen del dispositivo empleado.

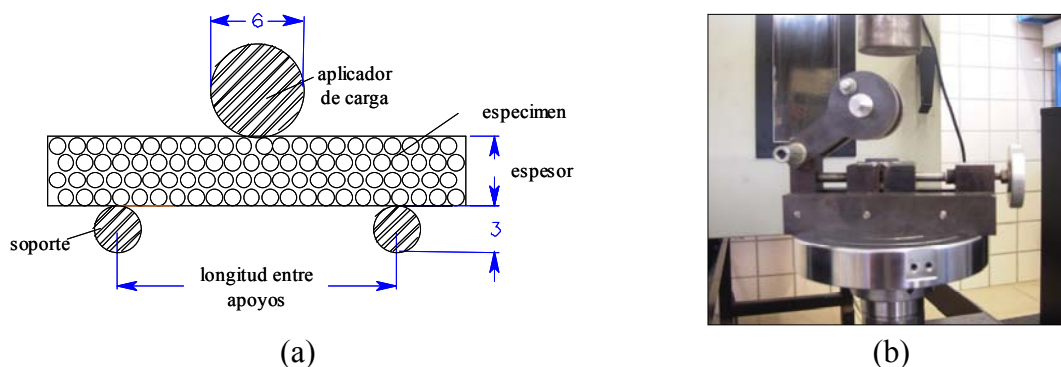


Fig. 8 - Ensayo SBS: (a) esquema de la configuración modificada, (b) vista del dispositivo de ensayo.

5. RESULTADOS DE LA CONFIGURACIÓN SBS MODIFICADA

Para los ensayos se obtuvieron probetas del mismo laminado unidireccional de grafito-epoxy (AS4/8552), de 4.2 mm de espesor, empleado en los ensayos Iosipescu, utilizándose tres distancias entre apoyos distintas (18, 13 y 9 mm). Los resultados de los ensayos se recogen en la tabla 3, donde S_T se evalúa mediante la expresión $S_T = 3F/(4bt)$ (ASTM D-2344), siendo F la carga de rotura, b el ancho de la probeta, y t el espesor del laminado.

Espesor (mm)	Ancho (mm)	Dist. (mm)	n° ensayos	S _T (MPa)	Desv.Stand.
4.2	9	18	7	17.36	1.50
4.2	9	13	7	25.79	3.31
4.2	9	9	7	41.13	4.04

Tabla 3 - Resumen de resultados de los ensayos SBS.

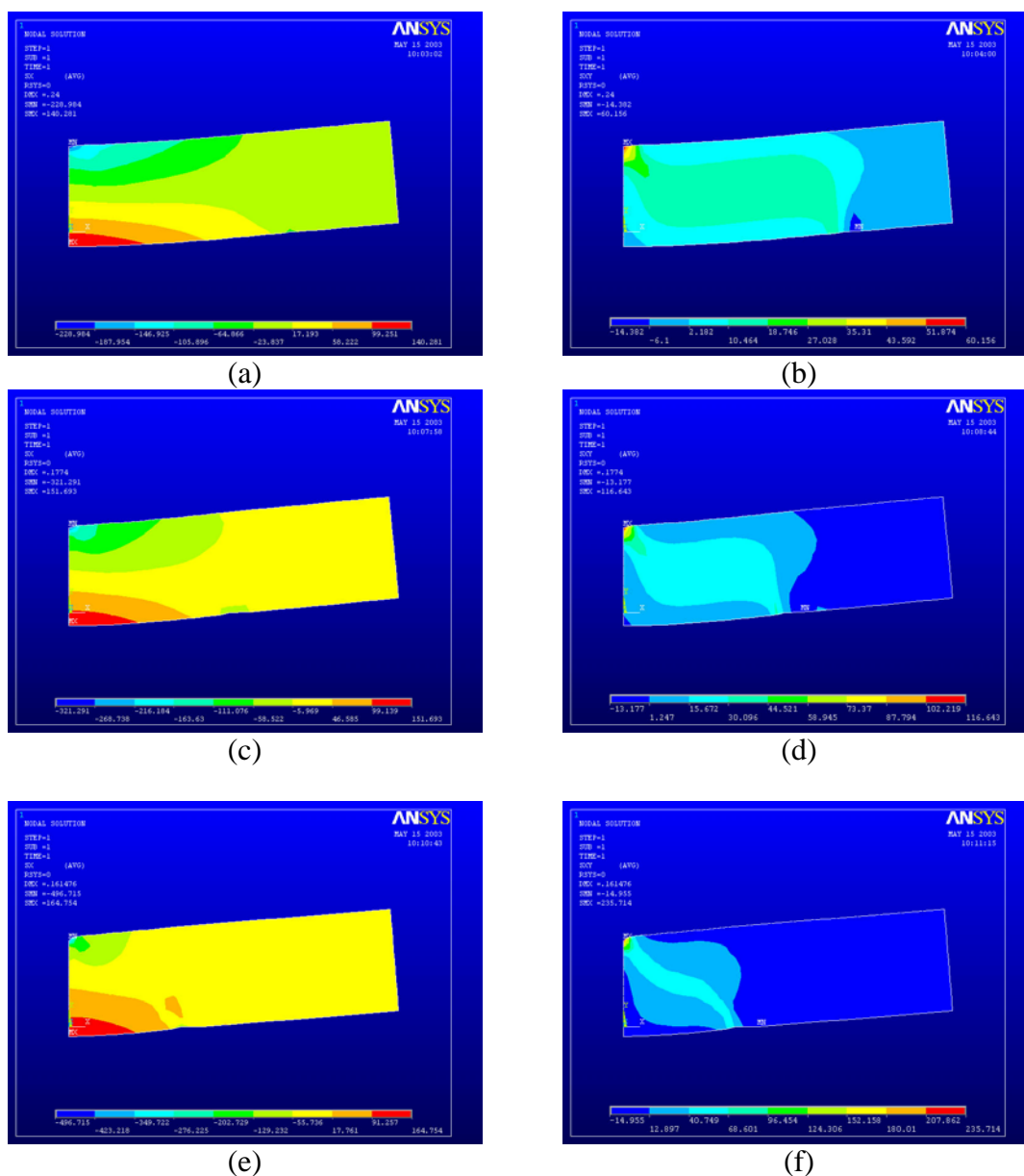


Fig. 9 - Distribución de tensiones en el ensayo SBS: (a, b) σ_x , σ_{xy} distancia 18 mm, (c, d) σ_x , σ_{xy} distancia 13 mm, (e, f) σ_x , σ_{xy} distancia 9 mm.

De los resultados de los ensayos se observa que el valor de la resistencia a cortadura obtenido crece conforme disminuye la distancia entre apoyos. Para valorar estos resultados se ha llevado a cabo un análisis numérico del ensayo mediante elementos finitos. Los

resultados de este análisis se muestran en la figura 9, donde se representan los estados tensionales correspondientes a la carga de rotura de cada caso.

Observando los valores máximos de σ_x del modelo de elementos finitos, las diferentes cargas de rotura de cada caso están asociadas al mismo nivel del máximo de la tensión normal longitudinal σ_x (entre 140 y 160 MPa), mientras que las tensiones tangenciales varían apreciablemente, no correspondiendo el valor de S_T evaluado con las tensiones tangenciales que predicen los modelos numéricos en la sección central (prácticamente nulas). La distribución de s_{xy} y el significativo cambio en las tensiones tangenciales en el entorno de la zona prevista de rotura (10-18 MPa fig.9b, 15-30 MPa fig.9d, 40-68 MPa fig.9f) obtenido en el análisis numérico, junto a la evolución de S_T obtenida de la expresión de la norma ASTM D 2344, sugieren que es preciso redefinir la forma en que S_T debe ser obtenida del estado tensional. Así mismo, deberá realizarse una revisión de la geometría para intentar minimizar el efecto de las tensiones normales.

6. CONCLUSIONES.

Tras los estudios preliminares realizados se constata que no resulta fácil medir S_T mediante el uso de laminados delgados. En el caso del ensayo SBS sería preciso una modificación de la geometría de los apoyos, en orden a obtener unas zonas de contacto no puntuales que minimizen el efecto de la flexión. En cuanto al ensayo Iosipescu se ha visto que, aunque los modelos numéricos predecían un estado de tensión tangencial aproximadamente puro y uniforme en la zona central, sólo en algunas de las configuraciones ensayadas (espesor de 4.2 mm) se producía la rotura a cortadura buscada. Es preciso un estudio más profundo de la influencia de los diferentes parámetros geométricos sobre los resultados del ensayo, y de las razones que pueden inducir la dispersión observada en los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con cargo al proyecto CICYT MAT2000-1115.

REFERENCIAS

- HASHIN, Z. (1980). Failure criterion for unidirectional fiber composites. *J. of Applied Mechanics*, 47, pp. 329-334.
- PUCK, A., AND SCHURMANN, H. (1998). Failure Analysis of Frp Laminates by Means of Physically Based Phenomenological Models. *Comp. Sci. and Tech.*, 58(7), pp. 1045-1067.
- SODEN, P.D., HINTON, M.J., AND KADDOUR, A.S. (1998). A Comparison of the Predictive Capabilities of Current Failure Theories for Composite Laminates. *Comp. Sci. and Tech.*, 58(7), pp. 1225-1254.

- HINTON, M.J., KADDOUR, A.S., AND SODEN, P.D. (2002). A Comparison of the Predictive Capabilities of Current Failure Theories for Composite Laminates, Judged against Experimental Evidence. *Comp. Sci. and Tech.*, 62(12-13), pp. 1725-1797.
- MIL-HDBK-17-1E, (1998). *Polymer Matrix Comp. Vol.1 Guidelines for Characterization of Structural Materials*. Dep. of Def. Handbook, USA.
- ASTM Test Method D 5379/D 5379M-98. (1998). Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method, *Annual Book of Standards*, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- PUCK, A., KOPP, J., AND KNOPS, M. (2002). Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion, *Comp. Sci. and Tech.*, 62(12-13), pp. 371-378.