

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MATERIALES GRAFITO/EPOXY ANTE IMPACTOS DE BAJA ENERGIA

J.M. García, F. París, J. Cañas

Dpto. Mecánica de Medios Continuos. Universidad de Sevilla. E.T.S.I.I.
Av. Reina Mercedes, s/n. 41012 Sevilla.

Resumen. - En este trabajo se pretende estudiar el comportamiento de los materiales Grafito/Epoxy (AS-4/3501-6(DMS 2224)) ante impactos de baja energía. Se ensayan tres secuencias de apilado diferentes ($[0]_8$, $[0/90]_{2s}$, $[45/0/-45/90]_s$). Se comparan para los distintos laminados estudiados la resistencia residual a tracción y área delaminada en función de la energía incidente para cada impacto. Para examinar el proceso de impacto se estudian los registros de impacto mediante una tarjeta de adquisición de datos. Finalmente se comparan los resultados para las tres secuencias de apilado obteniéndose distintas conclusiones sobre comportamiento del material, tipo de rotura, etc.

Abstract. - The influence of the stacking sequence on the low energy impact resistance of composite material laminates is discussed in this paper. The stacking sequences studied are $[0]_8$, $[45/0/-45/90]_s$ and $[0/90]_{2s}$. The residual strengths and the delamination areas have been measured as a function of incident energy for the three different laminates. The experimental results are explained and discussed in the paper. A discussion about the influence of the stacking sequence and the number of 0 degree plies, on the residual strength will be presented. Also graphs of the impact force will be presented in order to elucidate the effects of the impact on the specimen, by means of the graph of the impact force.

1. INTRODUCCION.

Los impactos de baja energía generalmente generan daños insignificantes en elementos metálicos. Sin embargo, cuando estos mismos impactos se realizan sobre materiales compuestos se puede reducir notablemente la capacidad portante de dicho elemento aunque mediante una inspección visual pudiera parecer que dicho material no ha sufrido ningún daño aparente. La importancia del daño depende de múltiples factores tales como la secuencia de apilado, el número de láminas, las propiedades matriz-fibra, etc. Un buen estudio que nos relacionase estos factores que influyen sobre el daño en el material y la energía de impacto nos permitiría conocer de antemano el comportamiento de este tipo de materiales y predecir el daño que se produciría bajo diferentes impactos.

2. DETALLES EXPERIMENTALES.

Todos los estudios se han realizado utilizando probetas cuya dimensiones son $1.3 * 12.3 * 120$ mm. Los impactos se han realizado con un péndulo tipo Charpy y un impactor intermedio, Figura 1, (entre péndulo y probeta) que distribuye uniformemente la carga de impacto y a su vez recoge la información del impacto mediante unas galgas extensométricas.

El estudio de las áreas delaminadas se realiza utilizando técnicas de ultrasonidos (pico-eco simple) [1]. La resistencia residual a tracción se ha medido con una máquina Instron 8033 de acuerdo con las normas establecidas en la ASTM D 3039 [2]. Las

áreas delaminadas se han obtenido como proyección horizontal del área delaminada aunque sobre la misma vertical pudieran existir varios planos de delaminación, como se muestra en la Figura 1.

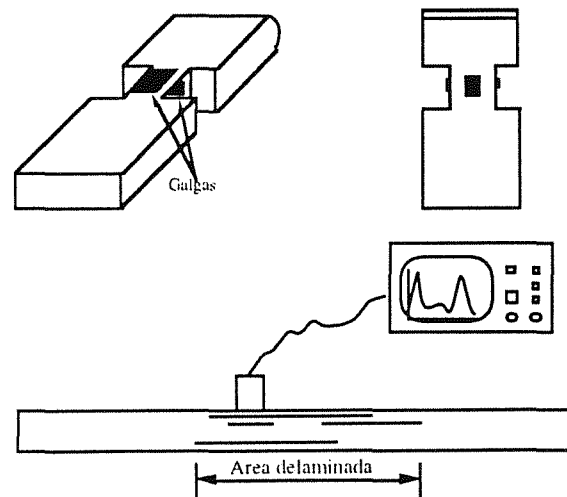


Fig.1. Detalles del impactor intermedio. Área delaminada total de una probeta ensayada con una determinada energía de impacto.

3. ESTUDIO DEL PROCESO DE IMPACTO.

Para estudiar dicho proceso se utilizan las galgas del impactor intermedio. Al realizar el impacto, si no ponemos ningún tipo de filtro a la señal analógica, estamos recogiendo todo lo que ocurre (todas las ondas) durante el proceso de impacto. Así, obtenemos unos registros que se caracterizan porque

poseen una gran dispersión de picos de tensión, como se puede ver en la Figura 2.

Estudiando estos picos de tensión se observa que cuando la masa del péndulo choca con el impactor intermedio, este en su conjunto sufre una compresión. A la vez, se piensa que se producen tracciones y compresiones en dicho impactor que son

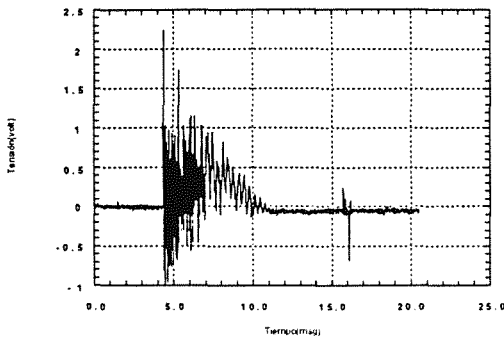


Fig. 2.- Registro sin filtrar de una probeta [0]20 para un impacto de 2 Julios.

recogidas por las galgas, debido a que existen ondas longitudinales y transversales que se propagan por el material (acero) que tardan en producir un ciclo completo de tracciones y compresiones mucho menos tiempo que lo que tarda en producirse la compresión aparente del conjunto. Estos ciclos se pueden eliminar con filtros. Así, utilizando el filtro de 1KHz se obtienen registros sin dichos picos.

Se pueden hacer varias comprobaciones para asegurar la validez de los registros en el caso de que no se haya producido daño en la probeta impactada, Figura 3.

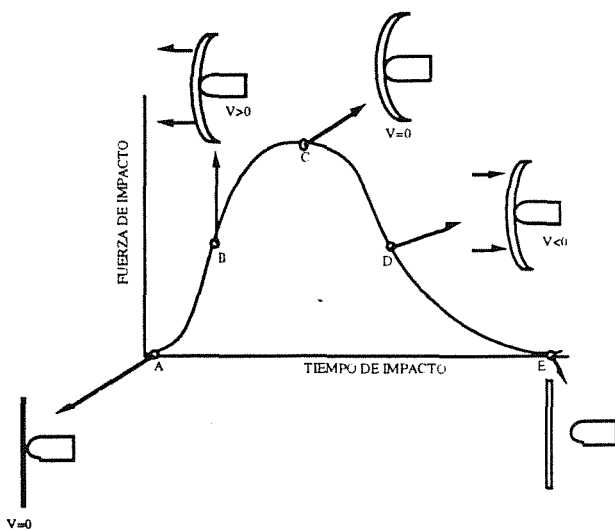


Fig.3.- Secuencia de impacto para una energía que no produzca daño.

Una de estas comprobaciones es ver que las áreas bajo la curva a ambos lados del máximo (punto de velocidad nula) son iguales, siempre que no se haya

producido daño en la probeta. Algunos de los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4 y 5.

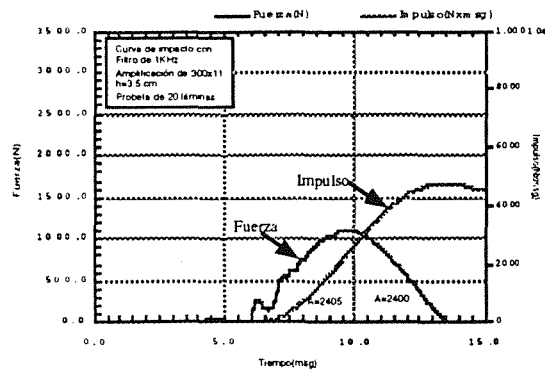


Fig. 4.- Registro para 1.25 Julios, filtro de 1KHz, sin daño.

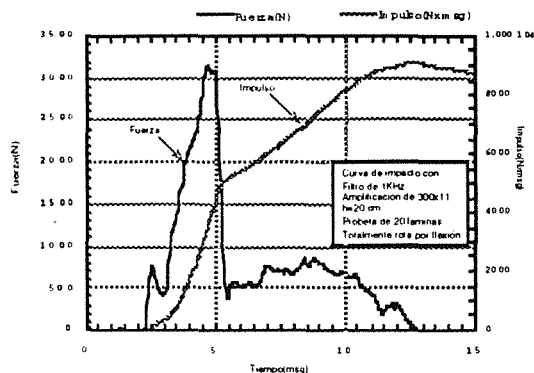


Fig. 5.- Registro para 7 Julios, filtro de 1KHz, con rotura por flexión en la cara posterior.

4. RESULTADOS POST-IMPACTO.

Para cada tipo de secuencia de apilado han sido ensayadas 40 probetas, dos o tres para cada nivel de energía de impacto. Los ensayos se han realizado para niveles de energía correspondientes a aumentos de 0.5 cm. de altura en el péndulo en cada ensayo.

4.1. Tipo de rotura durante el impacto.- La rotura de las probetas por energía de impacto puede seguir distintos mecanismos dependiendo de las dimensiones de la probeta ensayada. Como comenta Dorey [3] podemos distinguir varios mecanismos de rotura entre los que destacan tres bien diferenciados que son: Delaminación, Flexión y Penetración de la probeta. En nuestro caso solo se podrían producir los dos primeros, ya que la energía necesaria para producir el tercer mecanismo necesita una gran velocidad de impacto que no se obtiene con este tipo de experimentos. Para saber cual de los dos primeros es el que se produce estudiemos las energías elásticas de deformación asociadas a cada mecanismo, estas son:

$$E^d = \frac{2}{9} \cdot \frac{\tau^2}{E} \cdot \frac{w \cdot l^3}{t} \quad (\text{Delaminación})$$

$$E^f = \frac{1}{18} \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot w \cdot t \cdot l \quad (\text{Flexión})$$

Sabiendo que las dimensiones de nuestra probeta son: Ancho(w)=12.3mm, Longitud(l)=120mm, Espesor(t)= 1.3 mm. y el resto de magnitudes son: E=Módulo de elasticidad, σ =Resistencia a flexión, τ =Resistencia interlaminar a cortante. Podemos igualar ambas energías para encontrar el límite a los distintos mecanismos de rotura, obteniendo:

$$\frac{l}{t} \equiv \frac{\sigma}{2 \cdot \tau}$$

Si: $\frac{l}{t} < \frac{\sigma}{2 \cdot \tau}$ el mecanismo es la delaminación.

Si: $\frac{l}{t} > \frac{\sigma}{2 \cdot \tau}$ el mecanismo es la flexión.

Cogiendo valores de referencia para grafito/epoxi, τ está entre 100 y 200 MPa. y es prácticamente independiente de la secuencia de apilado. σ está entre 200 y 2000 MPa., según se trate de fibras a 90 o 0 grados respectivamente.

Por tanto, para fibras a 90 grados se obtiene:

$$\frac{\sigma}{2 \cdot \tau} = \frac{200}{2 \cdot 100} = 1$$

Para fibras a 0 grados se obtiene:

$$\frac{\sigma}{2 \cdot \tau} = \frac{2000}{2 \cdot 200} = 5$$

Por consiguiente, nos movemos dentro de un intervalo cuyos límites son 1 y 5. Un valor intermedio representativo de la relación entre ambas resistencias para un material grafito-epoxi podría ser:

$$\frac{\sigma}{2 \cdot \tau} = 2.5$$

Con este valor obtenemos que para:

$\frac{l}{t} < \frac{5}{2}$ el mecanismo dominante es la delaminación

$\frac{l}{t} > \frac{5}{2}$ el mecanismo dominante es el de flexión.

Con las dimensiones de nuestra probeta tenemos una relación de valor:

$$\frac{l}{t} = \frac{120}{1.3} = 92.3$$

Por tanto, estamos claramente dentro de los límites del mecanismo de rotura por flexión. Al ser tan grande la relación l/t comparada con la relación σ/τ , el límite superior de nuestro intervalo entraría dentro del mismo caso.

4.2. Secuencia de apilado [0]_g. Los resultados se muestran en la Figura.6. donde se observa que para una energía correspondiente a unos 2.3 Julios se origina una brusca reducción de resistencia residual llevando este valor aparejado una zona de daño considerable en el centro de la probeta.

De la gráfica también se puede desprender la existencia de cuatro zonas correspondientes a diferentes comportamientos y daños. Así, podemos observar una primera zona entre 0 y 1.5 Julios de

energía para la cual la probeta no ha sufrido daño y en consecuencia no se ha visto mermada para nada su capacidad portante, en esta zona la probeta actúa como si tuviese un comportamiento elástico. Entre 1.5 y 2.2 Julios, se puede apreciar por ultrasonidos que no se produce ninguna delaminación pero sí se deben producir pequeñas roturas de fibras en la cara posterior de la probeta principalmente, lo que provoca una disminución no dramática de la resistencia residual que es función del número de fibras que se hayan roto en el impacto. Entre 2.2 y 2.7 Julios, la rotura de fibras ha alterado la flexibilidad de la probeta originando grandes delaminaciones y provocando una caída de la resistencia residual similar a la de la zona anterior. Por último, para una energía superior a 2.7 Julios, prácticamente todas las láminas excepto una, la más próxima a la cara donde se produce el impacto, están rotas y en consecuencia la resistencia residual disminuye notablemente quedando a niveles muy bajos.

La zona delaminada y la pérdida de rigidez son consecuencia de la rotura de todas las fibras de la lámina posterior y subsiguientes de la probeta siendo sus valores del mismo orden que los de la zona anterior.

Al estudiar los valores de resistencia residual hay que tener en cuenta que ésta, la estamos obteniendo a tracción por lo que la orientación de las fibras en dirección de la tracción tiene gran importancia. Así, estudiando los valores de los dos niveles de resistencia podemos observar que en la zona que se puede considerar de comportamiento elástico el valor de la resistencia es de 150 Kg/mm² aproximadamente, mientras que en la zona de daño dramático la resistencia residual viene a ser del orden de 20 Kg/mm² aproximadamente. Evidentemente si las probetas son de ocho láminas, la resistencia de cada lámina es 1/8 de la resistencia total del laminado. Por tanto, esto nos corrobora el hecho de que solo resista la lámina más próxima a la cara del impacto cuando nos encontramos en la zona de daño dramático.

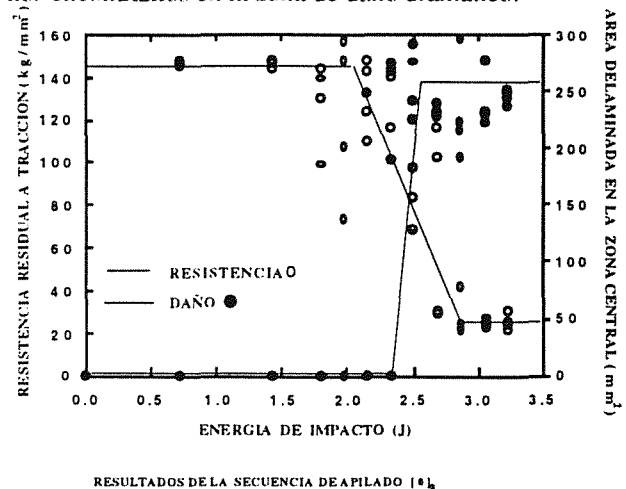


Fig. 6. Resistencia residual y área delaminada para distintas energías de impacto para probetas [0]_g.

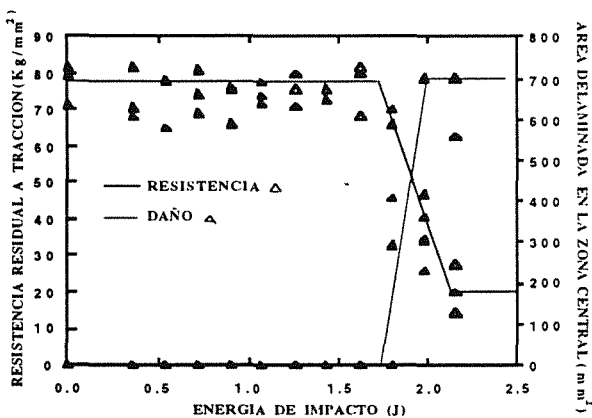
En cualquier caso parece observarse una gran dispersión en resistencia residual en las zonas centrales.

4.3 Secuencia de apilado [0/90]_{2s}.- Observando la gráfica (Figura 7) se observa que para un valor de energía de aproximadamente 1.6 Julios, comienza a disminuir la resistencia residual como consecuencia de la rotura de fibras. Se puede observar que este valor es algo inferior al que originaba el daño inicial en el caso de secuencia de apilado de la probeta de [0]₈.

No obstante, el intervalo para el cual se produce la caída brusca de resistencia es menor y ya para una energía de 2.1 Julios, la resistencia residual es ya muy baja, pero aproximadamente igual que la obtenida para la secuencia de apilado anterior.

Se observa que en la zona de comportamiento elástico tenemos una resistencia residual de 75 Kg/mm² mientras que en la zona de daño dramático la resistencia residual está en torno a 20 Kg/mm². Al igual que en el caso anterior, como solo tenemos cuatro láminas con fibras a cero grados, dirección de tracción, la resistencia de cada una de estas cuatro láminas es aproximadamente 1/4 de la resistencia total del laminado ya que en la dirección de tracción ni las láminas a 90 grados ni la matriz ofrecen prácticamente ninguna resistencia.

Al igual que en el caso anterior, en el nivel bajo de resistencia residual, al producirse el daño dramático sólo queda la lámina más próxima a la cara del impacto sin romper, que es una lámina a 0 grados, es ésta la que aporta toda la resistencia residual, como corroboran los cálculos del párrafo anterior, ya que las fibras de las láminas a 90° están perpendiculares a la tracción del laminado con lo que podemos suponer que estas láminas no resisten nada, aunque pudiera ser que no estuvieran dañadas por el impacto.



RESULTADOS DE LA SECUENCIA DE APILADO [0/90]_{2s}.

Fig. 7. Resistencia residual y área delaminada para distintas energías de impacto para probetas [0/90]_{2s}.

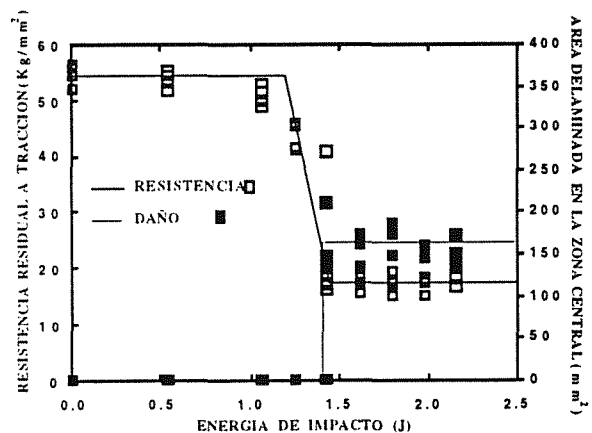
4.4. Secuencia de apilado [45/0/-45/90]_s.-De los resultados obtenidos en la gráfica (Figura 8) se

observa que para valores de energía entre 1.1 y 1.4 Julios, se origina una dramática caída de la resistencia residual lo que lleva aparejado rotura de fibras que provocan delaminaciones.

Conviene también hacer notar, que el valor de energía para el cual se empieza a producir rotura de fibras es menor que en los casos anteriores, ello es consecuencia de que en esta secuencia de apilado las láminas a cero grados no se encuentran en las caras externas como ocurría en las dos anteriores.

Siguiendo un razonamiento análogo a los anteriores, podemos estudiar los niveles de resistencia residual viendo que en la zona de comportamiento elástico tenemos una resistencia de 55 Kg/mm² aproximadamente, mientras que en la zona de daño dramático la resistencia residual es del orden de 18 Kg/mm², que aproximadamente tiene un valor de 1/3 de la resistencia inicial.

Por otro lado, vemos que hay dos láminas con fibras a 0 grados, cuatro láminas a 45 grados y dos láminas a 90 grados. Las de 90 grados podemos suponer que no resisten a tracción como se ha dicho en el caso anterior. Por su parte las de 45 grados se comportan ante la tracción de forma intermedia a las fibras a 0 grados y a las fibras a 90 grados, pero mas cerca del comportamiento de las de 90 grados que de las de 0 grados ya que nos estamos saliendo de la dirección de tracción lo que hace que disminuya notablemente su resistencia. Así, podemos ver que las cuatro láminas con fibras a 45 grados se comportan como una lámina a 0 grados, lo que explica que la resistencia residual en la zona de daño dramático sea un tercio de la de comportamiento elástico.



RESULTADOS DE LA SECUENCIA DE APILADO [45/0/-45/90]_s.

Fig. 8.- Resistencia residual y área delaminada para distintas energías de impacto para probetas [45/0/-45/90]_s.

Para ver que las cuatro láminas a 45 grados se comportan como una a 0 grados se estudia la ley de comportamiento del laminado [4] observando que las tensiones y deformaciones están relacionadas entre sí en función de las constantes del material y del ángulo φ que forman la dirección de las fibras con la dirección

de tracción mediante: $\cos^4\phi$, $\sin^4\phi$ o $\cos^2\phi * \sin^2\phi$. Por tanto, al ser $\phi = 45^\circ$, las fibras a 45 grados se comportan más o menos como 1/4 de una fibra a 0 grados. Por tanto, tener cuatro láminas a 45 grados y dos a 0 grados es prácticamente equivalente a tener tres láminas a 0 grados y que cada una de ellas resista 1/3 de la resistencia total del laminado sin dañar.

5. CONCLUSIONES POST-IMPACTO.

Resulta instructivo la comparación conjunta en una misma escala de los resultados obtenidos para las tres secuencias de apilado, Figura 9.

En las tres secuencias de apilado estudiadas, la evolución de la resistencia residual con la energía de impacto es cualitativamente similar.

Existe un umbral de energía que separa el comportamiento elástico de la zona que experimenta una ruina cuasi total de la probeta.

El diferente valor de este umbral, la nitidez del mismo y el valor de la resistencia residual están condicionados por la secuencia de apilado y fundamentalmente por el número de láminas con las fibras dispuestas a cero grados. Así, la resistencia de la probeta $[0]_8$ es prácticamente el doble que de la probeta $[0/90]_{2s}$ y de un orden equivalente la relación entre sus umbrales.

También es importante la posición de estas láminas a cero grados en el laminado. Así, el menor valor de la resistencia correspondiente a la probeta $[45/0/-45/90]_s$ en relación a la probeta $[0/90]_{2s}$ está condicionado por la mala situación de las láminas con las fibras a 0 grados en la probeta cuasi-isótropa ante la flexión originada por el impacto.

Al comparar las áreas delaminadas para las tres secuencias de apilado se observa que conforme menor es el número de láminas con fibras a cero grados, dirección mayor de la probeta y dirección de tracción, más homogéneos son los resultados para las distintas energías de impacto ensayadas. Esto puede ser debido a que al producirse el impacto las láminas a cero grados se flexionan todas por igual no influyendo mucho en la delaminación. Sin embargo, cuando hay láminas con fibras orientadas en otras direcciones al producirse el impacto estas láminas no se flexionan por igual generando elevadas tensiones tangenciales en la interfase que dan lugar a delaminaciones en distintos planos. Así, la cuasi-isótropa, para todos los impactos realizados, muestra una mayor homogeneidad en los resultados que la $[0/90]_{2s}$ y esta a su vez mayor homogeneidad que la de $[0]_8$.

Respecto a la dispersión de resistencia residual, parece que la probeta $[0]_8$ no se comporta como un verdadero material compuesto, formado por varias capas de

materiales homogéneos, con diferentes propiedades y orientación de fibras, sino más bien como un material heterogéneo. Si hubiésemos ensayado probetas $[90]_8$ o $[+45]_8$ encontraríamos casi con toda seguridad dispersiones equivalentes a los niveles encontrados en la probeta $[0]_8$.

La explicación la podríamos encontrar en que existe una superposición de efectos:

- por un lado, el laminado está formado por láminas ortótropas homogéneas orientadas de forma diferente.

- por otro lado, las láminas no son homogéneas.

En la probeta $[0]_8$ se da fundamentalmente el segundo efecto ya que realmente no es un laminado mientras que, por ejemplo, en la cuasi-isótropa el primer efecto tiene mayor ponderación que el segundo, convirtiéndose este primero en el mecanismo dominante por lo que la dispersión de resultados es mucho menor. Ver Figura 9.

Se puede concluir que la dispersión no es consecuencia de que todas las láminas tengan sus fibras a cero grados sino de que todas las láminas tengan las fibras orientadas en una sola dirección, independientemente de que ésta sea la dirección de tracción o no.

El papel que juega la delaminación en las tres secuencias de apilado estudiadas es diferente aunque en los tres casos se observe una correlación más o menos pronunciada entre las evoluciones de la resistencia residual y el área delaminada con la energía de impacto, como se muestra en la Figura 5.

En la probeta $[0]_8$ la delaminación no juega ningún papel en la resistencia a tracción residual en el sentido de que a tracción es indiferente que las láminas estén o no adheridas.

En la probeta $[0/90]_{2s}$ la delaminación tiene alguna influencia aunque pequeña puesto que la resistencia está fundamentalmente condicionada por la de las cuatro láminas con las fibras a cero grados.

En la probeta con secuencia $[45/0/-45/90]_s$ la delaminación sí tiene una gran importancia, esto se aprecia en la casi coincidente relación entre caída de resistencia y aumento de área delaminada, situación que no se da en los otros dos casos donde la caída de resistencia es consecuencia de la rotura de fibras en las láminas, lo que progresivamente fue generando delaminaciones al variar la flexibilidad de cada una de las láminas del laminado.

En cualquier caso dada la relación entre la longitud de la probeta y su espesor la delaminación no es el mecanismo de fallo generado por la carga de impacto. La flexión es el mecanismo de fallo que provoca

rotura de fibras en las láminas más traccionadas y posteriores delaminaciones.

Al comparar las áreas delaminadas en la zona de daño dramático para las tres secuencias de apilado, Figura 5, se observa que las áreas delaminadas para la probeta $[0/90]_{2s}$ son muy superiores a las encontradas en las otras dos secuencias de apilado. Las áreas delaminadas que aparecen en las gráficas son la suma de las producidas por la diferencia de flexibilidad de las láminas adyacentes y las producidas por la rotura de fibras tras el impacto. Así, en el laminado $[0/90]_{2s}$ se tienen las láminas contiguas con las fibras en

direcciones perpendiculares entre sí con lo que en la dirección longitudinal de la viga, la lámina a 0 grados es mucho más rígida que la lámina a 90 grados, esta diferencia de flexibilidad hace que aparezcan grandes tensiones tangenciales que pueden generar la suficiente energía como para provocar delaminaciones. En el resto de secuencias de apilado, en las que no existe ese cambio tan dramático de orientación de fibras en láminas contiguas, este efecto de las tensiones tangenciales es menor generándose áreas delaminadas menores.

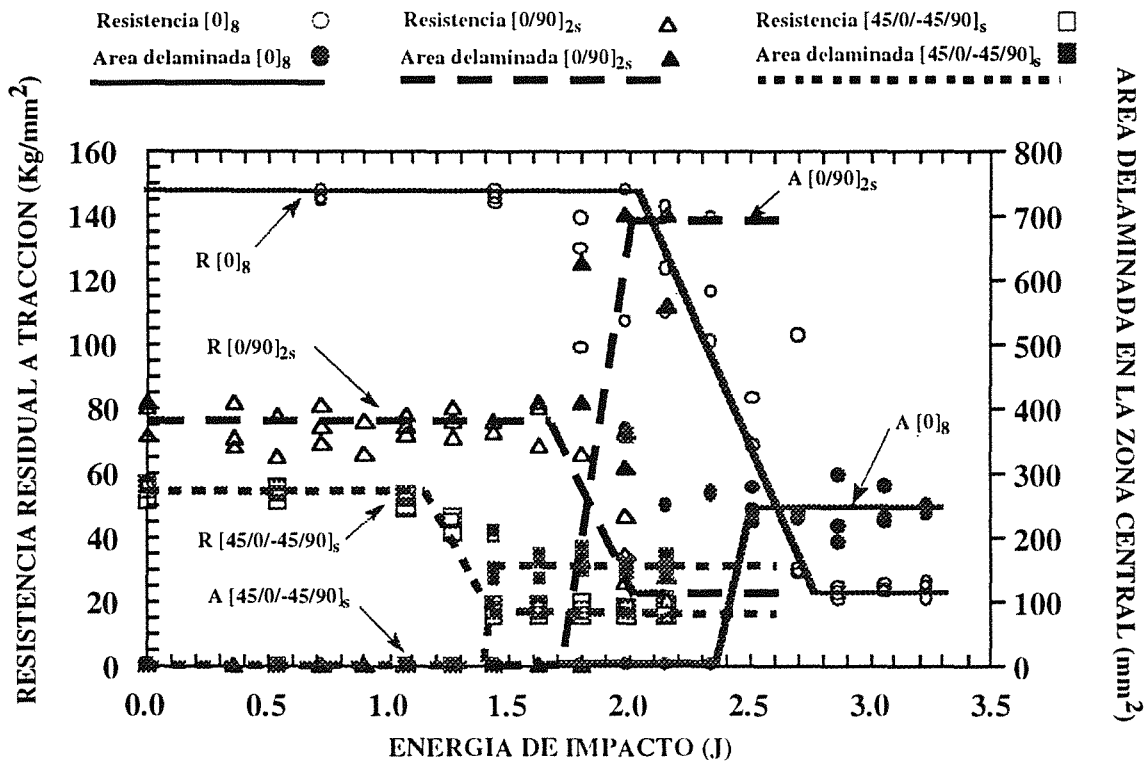


Fig.9. Comparación de las tres secuencias de apilado bajo la misma escala.

6. REFERENCIAS.

[1] Krautkrämer J., Krautkrämer H.: "Ultrasonic testing of materials". 4th revised. Ed. Springer-Verlang.
 [2] ASTM D 3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites.
 [3] Dorey G., "Damage tolerance and damage assessment in advanced composites", Materials and structures departament, R. A. F. Hampshire, UK.
 [4] Paris F., Cañas J.: "Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos", E.S.I.Industriales, Sevilla.
 [5] Agarwall B. D., Broutman L. J., "Analysis and performance of fiber composites". John Wiley & Sons (1.980).