

ESTUDIO DEL EFECTO ESCALA EN LAMINADOS [0,90n]s DE MATERIAL COMPUESTO

M.L. Velasco^{1*}, E. Correa¹, F. París¹

¹Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092. Sevilla-España

* Persona de contacto: mvelasco7@us.es

RESUMEN

El efecto escala en materiales compuestos es conocido como el retraso en la aparición de daño en las láminas más débiles de un laminado (típicamente las láminas a 90 grados). Esta cuestión ha adquirido una enorme relevancia con la aparición de las láminas ultradelgadas, de hasta 20 micras de espesor, en la idea de que su uso puede retrasar la aparición del daño y en algunos casos el fallo de una lámina en un laminado de forma muy significativa. En el presente trabajo se estudian los diferentes mecanismos de daño que se producen en función del espesor en la capa de 90 grados en laminados [0,90n]s a través de modelos numéricos micro- (modelando despegues de fibra-matriz) y meso-mecánicos (modelando grietas transversales en la capa de 90 grados). La herramienta numérica empleada ha sido el Método de los Elementos de Contorno. Con estos modelos numéricos se concluye que el efecto escala no está relacionado con el nivel de representación (micro o meso) del daño, sino que es una cuestión sobre cómo realmente es el daño y cómo nuestro modelo es capaz de representarlo, definiendo dos formas de generación del daño (denominadas progresiva y explosiva) en las que únicamente intervienen conceptos energéticos de Mecánica de la Fractura. Las dos formas posibles de generación del daño (explosiva y progresiva) han sido contrastadas con resultados obtenidos de numerosas campañas experimentales llevadas a cabo con el fin de detectar la aparición del daño en la capa de 90 grados en laminados [0,90n]s, obteniendo una explicación físicamente basada del efecto escala en materiales compuestos.

PALABRAS CLAVE: Material Compuesto, Daño Transversal, MEC, Mecánica de la Fractura, Efecto Escala

ABSTRACT

The scale effect in composite materials is known as the delay in the appearance of damage in the weakest lamina of a laminate (typically lamina oriented at 90 degrees). The availability of ultra-thin plies, of up to 20 microns of thickness, has attracted the attention on this effect, as the use of these plies can imply the delay of the onset of damage at a laminate in a significant manner. In the present work the different damage mechanisms that occur as a function of the thickness in the 90 degree layer in laminates [0,90n]s are studied through micro- (modeling debonding between fibre and matrix) and meso-mechanical (modeling transverse cracks in the 90 degree layer) numerical models. The numerical tool used has been the Boundary Elements Method. With these numerical models, it is concluded that the scale effect is not related to the level of representation (micro or meso) of the damage, but it is a question about how the damage really is and how our model is capable of representing it, defining two ways of damage generation (called progressive and explosive) in which only energetic concepts of Fracture Mechanics are employed. The two possible ways of damage generation (explosive and progressive) have been supported by results obtained from numerous experimental programmes carried out in order to detect the appearance of the first damage in the 90 degree layer in laminates [0,90n]s, obtaining a physically based explanation of the scale effect in composite materials.

KEYWORDS: Composites, Transversal Damage, BEM, Fracture Mechanics, Scale Effect

1.- INTRODUCCIÓN

La dificultad para predecir el fallo en los materiales compuestos es muy alta debido a la falta de criterios con base física en los mecanismos de daño que aparecen en este tipo de materiales. Un fenómeno muy conocido y del que no existe constancia en ningún criterio de fallo debido a que no existe una explicación física para él, es el denominado efecto escala, el cual consiste en el retraso en la aparición del daño a medida que se

disminuye el espesor de las capas. Los primeros autores en detectarlo experimentalmente fueron Parvizi et al [1] y Flaggs and Kural [2].

En este trabajo, se va a analizar el efecto escala en laminados [0,90n]s, es decir, cómo el espesor de la capa de 90 grados puede influir en el mecanismo de daño que aparece en dicha capa cuando el laminado es sometido a tracción uniaxial, intentando obtener una explicación física para este fenómeno. Para ello se ha empleado el

Método de los Elementos de Contorno y se han usado fundamentos de la Mecánica de la Fractura de Grietas de Interfase y Mecánica de la Fractura aplicando un balance global de energía desde un estado prístino del material. Se ha realizado en primer lugar un análisis micromecánico del mecanismo de daño (apartado 2), después se ha estudiado el mecanismo de daño a nivel mesomecánico (apartado 3), concluyendo que pueden existir dos enfoques posibles para definir el daño en la capa de 90 grados (apartado 4). Por otro lado, se muestran evidencias experimentales del daño en la capa de 90 grados (apartado 5) y se propone una explicación esquemática sobre el efecto escala (apartado 6).

2.- ANÁLISIS MICROMECAÍNICO DEL MECANISMO DE DAÑO

Para llevar a cabo el análisis micromecánico del daño que se produce en la capa de 90 grados de un laminado $[0,90n]_s$ se asumió que el mecanismo de daño se generaba de la siguiente forma secuencial mostrada en la figura 1: a) primero aparecen los despegues aislados, b) después, estos despeguen abandonan la interfase fibra matriz comenzando a penetrar en la matriz (etapa conocida como *kinking* de la grieta de interfase), c) por último, los despegues se conectan y dan lugar a la aparición de la grieta transversal.

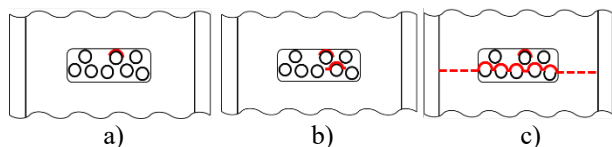


Figura 1. a) Aparecen despegues aislados. b) Se produce el kinking de la grieta de interfase. c) Se genera la grieta transversal.

En cada una de las fases del daño en la capa de 90 grados propuestas, se ha analizado la influencia del espesor.

2.1.- DESPEGUE FIBRA MATRIZ

Para estudiar este problema involucrando al laminado completo se ha generado un modelo multiescala, figura 2, donde se abarca el nivel mesomecánico (a nivel de lámina, formado por las láminas de 0 y 90 grados) y el nivel micromecánico (formado por una celda que representa la matriz y en cuyo interior se aloja una fibra), ver Velasco et al [3] para obtener detalles sobre el mismo. En este modelo se va a evaluar la energía liberada para diferentes longitudes de la grieta de despegue entre fibra y matriz, definida a través del parámetro θ_d , y a su vez para diferentes valores del espesor de la capa de 90 grados, definido a través del parámetro n . Las evoluciones energéticas se muestran en la figura 3 y se observa que no existen variaciones en ellas con el espesor de la capa de 90 grados, concluyendo que existe la misma probabilidad de encontrar despegues aislados en laminados con espesor de la capa de 90 grados grueso o delgado, París et al [4].

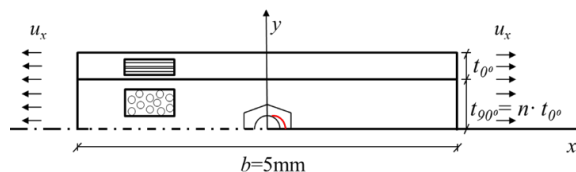


Figura 2.- Modelo BEM multiescala de un laminado $[0,90n]_s$.

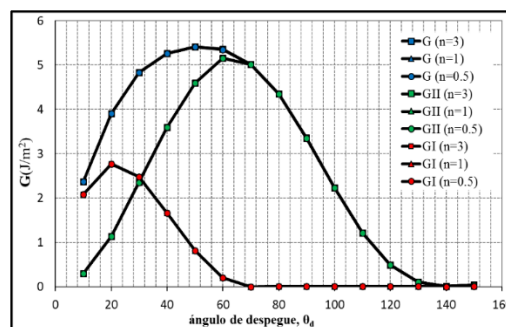


Figura 3.- Evolución de G con la extensión del despegue, θ_d , para distintos espesores, n , de la capa de 90 grados.

2.2.- KINKING DE LA GRIETA DE INTERFASE

Una vez que la grieta de interfase/despegue fibra-matriz se ha detenido, se dan las condiciones adecuadas para que la grieta abandone la interfase fibra-matriz y penetre en la matriz que rodea a la fibra. Esta cuestión ya fue estudiada ampliamente en un modelo de matriz infinita, París et al [5], y se trata ahora de analizar cómo el espesor de la capa de 90 grados puede afectar a la dirección de kinking (en la dirección de penetración de la grieta en la matriz de la capa de 90 grados). Para este efecto se va a usar el criterio de máxima tensión circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$ en el entorno del fondo de la grieta de despegue para una distancia de $0.001r_f$, siendo r_f el radio de la fibra, analizando si $\sigma_{\theta\theta}$ se ve afectadas por el espesor de la capa de 90 grados. Estas tensiones se han calculado en el modelo multiescala anterior, figura 2, y las evoluciones obtenidas se muestran en la figura 4, donde se representa el valor de $\sigma_{\theta\theta}$ frente al valor de la posición cercana del fondo de la grieta en el cual se han evaluado las tensiones. Observando que las tensiones circunferenciales, y por lo tanto la dirección de kinking de la grieta de interfase, no se ven afectadas por el espesor de la capa de 90 grados, Velasco et al [6].

2.3.- PROGRESIÓN DE LA GRIETA A TRAVÉS DE LA MATRIZ EN LA CAPA DE 90 GRADOS

Una vez que la dirección de penetración del daño en la matriz ha sido determinada, el estudio de la progresión de este daño requiere de algunas modificaciones en el modelo multiescala inicial. Se ha desarrollado de nuevo un modelo multiescala, figura 5, pero ahora el nivel micromecánico está representado por una celda rectangular, dividida en dos para poder modelar la grieta de kinking progresando a través de la matriz, y en cuyo

interior existe una fibra en la cual ya se ha generado un despegue.

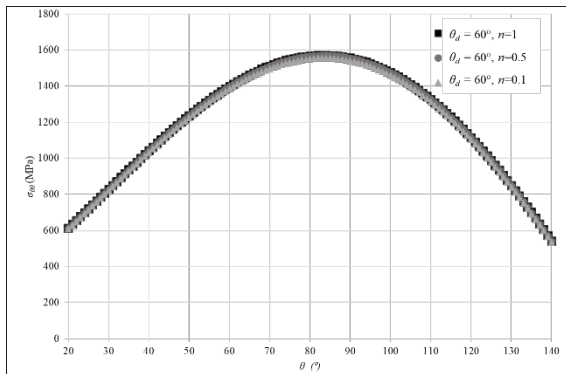


Figura 4.- Evolución de σ_{00} en el entorno del fondo de la grieta para diferentes espesores de la capa de 90 grados.

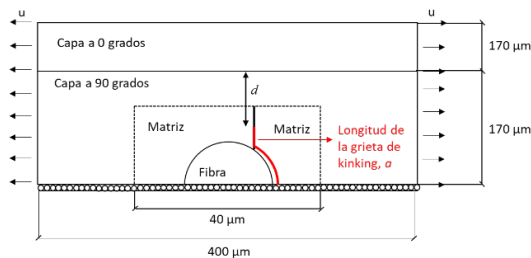


Figura 5.- Modelo BEM multiescala para estudiar la progresión de la grieta transversal en la capa de 90 grados a partir de un despegue fibra matriz.

En este caso se ha evaluado la energía liberada por el fondo de la grieta de kinking para diferentes longitudes de ésta (definida a través del parámetro a) y a su vez para diferentes espesores de la capa de 90 grados, mostrándose los resultados en la figura 6.

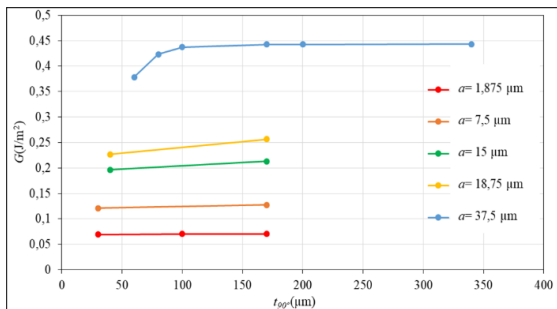


Figura 6.- Variación de G con el tamaño de la grieta de kinking y con el espesor de la capa de 90 grados.

Para pequeños valores del tamaño de la grieta de kinking no se aprecian variaciones de la energía con el espesor. Sin embargo, si nos vamos a valores del tamaño de la grieta de kinking más elevados, se observa una pequeña disminución de la energía liberada a medida que el espesor de la capa de 90 grados disminuye. Esta disminución de energía, que en principio podría asignarse a una posible manifestación del efecto escala, se debe a la presencia del denominado efecto Cook-Gordon y que se revela cuando tenemos una grieta acercándose a una interfase de mayor rigidez.

Por ello se concluye que la progresión de la grieta de kinking tampoco se ve afectada por el espesor de la capa de 90 grados, Velasco et al [6].

3.- ANÁLISIS MESOMECÁNICO DEL MECANISMO DE DAÑO

Un análisis mesomecánico del daño, es decir, un análisis al nivel de láminas, en este caso únicamente incluye el estudio de la aparición de la grieta transversal en la capa de 90 grados, ya que no puede incluir otro tipo de daño debido a que no se modelan las fibras y la matriz. Para llevar a cabo dicho análisis, se ha empleado el modelo meso representado en la figura 7.

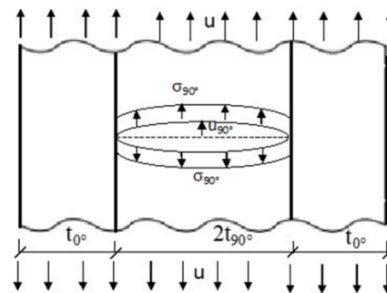


Figura 7.- Modelo BEM meso de un laminado $[0,90n]_s$.

Para ver si la aparición de la grieta transversal se ve afectada por el espesor de la capa de 90 grados, se ha evaluado el trabajo liberado en la creación de dicha grieta disponiendo de las tensiones que tiene la capa de 90 grados antes de que se produzca el daño, con los desplazamientos que se generan cuando se aparece dicho daño. Se ha aplicado el balance energético de la Mecánica de la Fractura, definido en la expresión (1), para obtener las curvas de γ (tenacidad a fractura del material) para diferentes valores de la deformación y para diferentes espesores de la capa de 90 grados y éstas se muestran en la figura 8. En esta figura se observa que para un material dado (es decir, para un valor concreto de la tenacidad a fractura, γ) la deformación necesaria para que se genere una grieta transversal aumenta a medida que se disminuye el espesor de la capa de 90 grados.

$$\sigma \int_0^{t_{90}} u ds = 2\gamma t_{90} \quad (1)$$

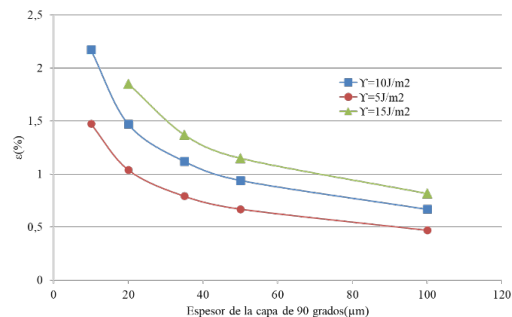


Figura 8.- Deformación requerida para que se genere una grieta transversal en función del espesor de la capa de 90 grados para diferentes materiales (diferentes valores de γ).

Claramente en el análisis mesomecánico del daño se identifica la presencia del fenómeno bajo estudio, el efecto escala, París et al [7].

4.- DISCUSIÓN: DOS ENFOQUES PARA DEFINIR EL DAÑO

En el apartado 2, se han analizado las diferentes fases del daño a nivel micromecánico sin encontrar ninguna traza del efecto escala. Sin embargo, en el apartado 3, se ha analizado el daño a nivel mesomecánico, obteniendo la manifestación del efecto escala. La presencia de dicho fenómeno en el análisis mesomecánico, hace que se reflexione sobre el hecho de que su presencia no es una cuestión sobre el nivel de análisis del daño, sino que se trata de cómo es verdaderamente el daño y como el modelo realizado lo representa.

En el primer caso, se ha estudiado la generación del daño de forma progresiva (primero, los despegues; después, el kinking de la grieta de interfase; por último, la progresión de la grieta a través de la matriz) y en el segundo caso, se ha estudiado la generación del daño de forma explosiva (la directa aparición de una grieta transversal en la capa de 90 grados). Por lo que se trata de dos mecanismos de daño potenciales que se pueden producir en el material, la cuestión ahora es analizar por qué sucede un mecanismo y no el otro.

Para analizar la razón por la que se produce un mecanismo y no el otro, se ha empleado el modelo multiescala previo (apartado 1) donde se estudiaba el despegue entre la fibra y la matriz (concretamente, en este caso para un despegue de 60 grados) y se han planteado sobre él los dos mecanismos de daño posible, los cuales se esquematizan en la figura 9. En el caso del mecanismo de daño explosivo, la aparición del despegue aparecería de forma instantánea, es decir, se pasaría de tener la interfase fibra-matriz intacta a la aparición del despegue de forma directa; en el caso del mecanismo de daño progresivo el daño comenzaría por un pequeño despegue (por ejemplo, con una longitud de 10 grados) y éste crecería poco a poco hasta alcanzar la longitud total del despegue (60 grados en este caso bajo estudio).

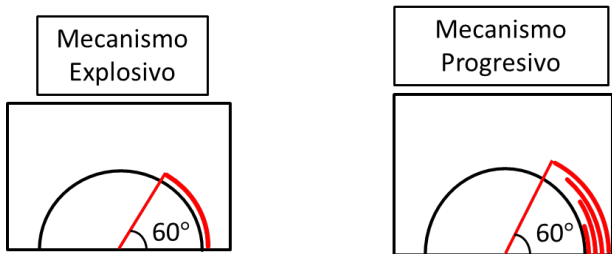


Figura 9.- Representación esquemática de los dos mecanismos de daño definidos (explosivo y progresivo, respectivamente).

4.1- MECANISMO DE DAÑO EXPLOSIVO

Para evaluar el trabajo en el caso de que el despegue entre la fibra y la matriz se genere de forma explosiva se

han empleado las tensiones que tiene la interfase cuando está intacta (antes de que se genere el daño), representadas en la figura 10, y los desplazamientos que se producen en la apertura instantánea del despegue, mostrados en la figura 11. El valor del trabajo en cada caso es calculado a partir de las expresiones (2) y (3) y los resultados obtenidos se recogen en la tabla 1.

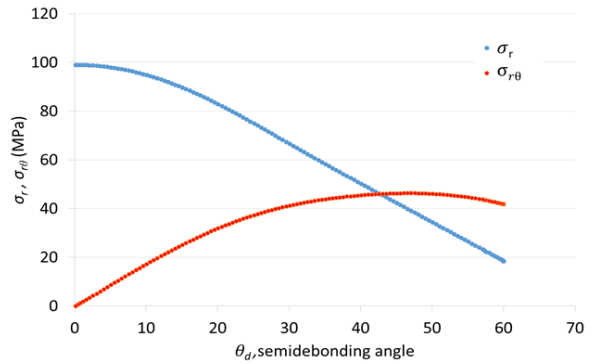


Figura 10.- Valores de σ_r y $\sigma_{r\theta}$ en el estado pristino de la interfase a lo largo de un ángulo de despegue de 60 grados.

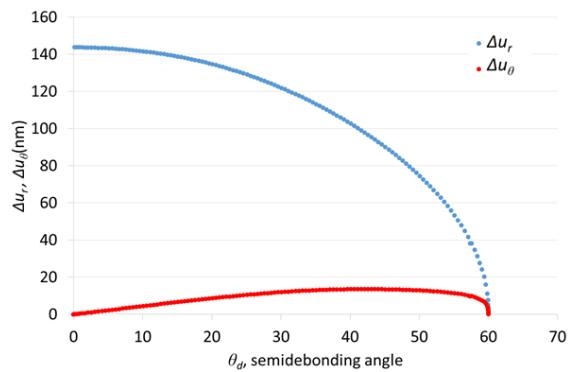


Figura 11.- Valores de Δu_r y Δu_θ correspondientes a un valor del ángulo de despegue de 60 grados.

$$W_{II}^{exp} = \frac{1}{2} \int_0^{\theta_d} \sigma_{r\theta} \cdot \Delta u_\theta \, d\theta \tag{2}$$

$$W_I^{exp} = \frac{1}{2} \int_0^{\theta_d} \sigma_r \cdot \Delta u_r \, d\theta \tag{3}$$

Tabla 1. Valores de W_I^{exp} , W_{II}^{exp} y W^{exp} para un ángulo de despegue de 60 grados asociado al mecanismo explosivo.

Mecanismo Explosivo	$\theta_d = 60^\circ$
$W_I^{exp} (10^{-3} \text{ J/m})$	0,062540
$W_{II}^{exp} (10^{-3} \text{ J/m})$	0,002922
$W^{exp} (10^{-3} \text{ J/m})$	0,065462

4.2- MECANISMO DE DAÑO PROGRESIVO

En el caso de que la aparición del daño se genere de forma progresiva, para evaluar el trabajo liberado se ha calculado el área bajo las curvas energéticas de la figura

12 (las curvas de G , G_I y G_{II} involucradas en la generación de un despegue) hasta un ángulo de despegue de 60 grados. Los resultados de estos trabajos se muestran en la Tabla 2

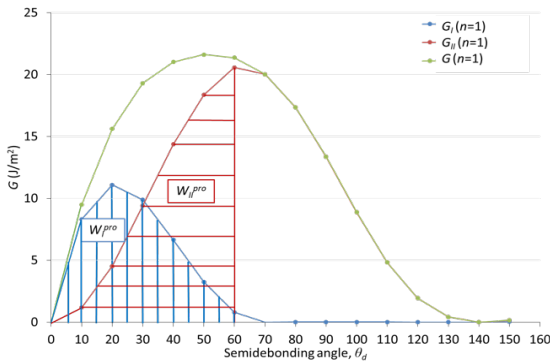


Figura 12.- Evolución de G y sus componentes G_I y G_{II} asociados con W_I^{pro} y W_{II}^{pro} para el caso de un ángulo de despegue en el caso del mecanismo de daño explosivo.

Tabla 1. Valores de W_I^{pro} , W_{II}^{pro} y W^{pro} para un ángulo de despegue de 60 grados asociado al mecanismo progresivo.

Mecanismo Progresivo	$\theta_d = 60^\circ$
$W_I^{pro} (10^{-3} \text{ J/m})$	0,026644
$W_{II}^{pro} (10^{-3} \text{ J/m})$	0,038086
$W^{pro} (10^{-3} \text{ J/m})$	0,064730

4.3- COMPARACIÓN ENTRE LOS DOS MECANISMOS DE DAÑO PROPUESTOS

Una vez que se han evaluado los trabajos liberados a través de los dos mecanismos de daño propuestos (progresivo y explosivo) es el momento de analizar qué es lo que sucede y por qué un mecanismo de daño puede ser dominante frente a otro.

Si nos fijamos en las tablas 1 y 2, se observa que en ambos mecanismos la cantidad total de trabajo, W , es el mismo, como correspondería desde un punto de vista de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal. Sin embargo, el mecanismo explosivo de daño está claramente dominado por el modo I, mientras que el mecanismo de daño progresivo está dominado por el modo II y también está presente el modo I.

Por lo tanto, alcanzar una situación de daño similar siguiendo los dos mecanismos de daño propuesto, no conducen (en el caso del daño considerado) a situaciones equivalentes desde un punto de vista energético. Un mecanismo de daño prevalece sobre otro, debido a la implicación de los modos de fallo y esto es lo que puede estar detrás del efecto escala, es decir, esto puede hacer que un mecanismo de daño sea

predominante frente a otro en función del espesor de la capa de 90 grados, París et al [7].

5.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APARICIÓN DEL DAÑO EN LA CAPA DE 90 GRADOS EN LAMINADOS [0,90n]s

Para contrastar los resultados de los modelos numéricos se han fabricado probetas de laminados [0,90n]s y se han sometido a tracción uniaxial hasta detectar la aparición del primer daño en la capa de 90 grados. Se han empleado espesores de la capa de 90 grados desde 0.020 mm hasta 3.4 mm. El daño observado en cada caso tenía diferente morfología: para espesores muy delgados de la capa de 90 grados se han observado despegues desconectados, como se muestra en la figura 13, y para espesores de la capa de 90 grados muy gruesos se han detectado grietas transversales con extensas delaminaciones, figure 14.

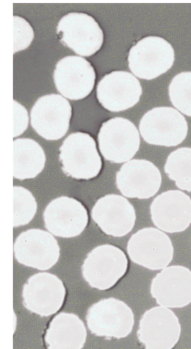


Figura 13.- Despegues desconectados que se han detectado para un espesor de la capa de 90 grados delgado

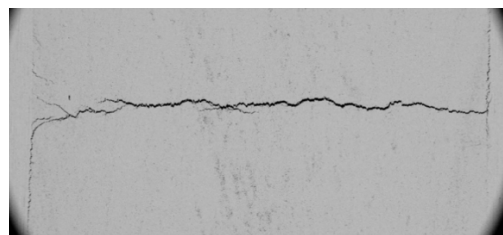


Figura 14.- Grieta transversal con extensa delaminación que se ha observado para un espesor de la capa de 90 grados gruesa

De los resultados experimentales puede deducirse que existen diferentes mecanismos de daño en función del espesor de la capa de 90 grados, siendo esto una clara manifestación experimental del efecto escala.

6.- UNA EXPLICACIÓN ESQUEMÁTICA DEL EFECTO ESCALA

En los estudios numéricos llevados a cabo en este trabajo se ha concluido que pueden existir dos mecanismos de daño, denominados *explosivo* (el cual consistiría en la aparición directa de una grieta transversal y en el que el efecto escala está claramente identificado) y *progresivo* (el cual consistiría en la

aparición de un despegue fibra y matriz, que después penetraría en la matriz y por último, daría lugar a la creación de la grieta transversal, y en el que el espesor de la capa de 90 grados no tiene influencia). Por otro lado, en los estudios experimentales también se ha detectado la presencia de estos dos mecanismos de daño diferentes.

En la figura 15 se muestra una representación esquemática de una posible explicación del efecto escala en materiales compuestos. En ella se ha representado en el eje vertical la deformación y en el horizontal el espesor de la capa de 90 grados. La curva EFGH representaría el valor de la deformación a la cual aparece la grieta transversal en el material (similar a las representadas en la figura 8) y la franja ABCD, representaría el valor de la deformación a la cual aparecen los despegues aislados.

Con respecto al espesor de la capa de 90 grados, dos evoluciones extremas posibles de daño van a ser mostradas (aunque obviamente, situaciones intermedias también son posibles):

- Espesor de la capa de 90 grados muy grueso, denotado en la figura 15 como I. Nada más comenzar a aplicar una deformación, rápidamente alcanzamos la curva EFGH (punto J) y el material tiene según la MFEL energía suficiente para romper los enlaces del material, aunque como no existe ningún daño previo (requisito indispensable de la MFEL) la grieta transversal no se produce. Si seguimos aumentando la deformación, alcanzamos la franja ABCD (punto K) y ya existe en el material la energía suficiente (asociada a Y_T) para que se genere un despegue, que provocará la aparición de la grieta transversal completa en el espesor de la capa de 90 grados.
- Espesor de la capa de 90 grados muy delgado, denotado en la figura 15 como L. Obviamente es imposible alcanzar la curva EFGH sin pasar por la franja ABCD, por lo tanto, al incrementar la deformación, se alcanza dicha franja (punto M) y los despegues aparecen. Si seguimos aumentando la deformación y paramos en un punto arbitrario (punto M), se observa un daño más avanzado que el encontrado inicialmente y puede que al seguir incrementando la deformación se nos produzca la rotura del laminado (punto P) debido a la rotura de las fibras de la capa de 0 grados sin haber sido capaces de observar una grieta transversal en la capa de 90 grados.

A grandes rasgos, que se produzca una situación u otra dependerá del material y del espesor de la capa de 90 grados. Esta podría ser una posible explicación físicamente basada del efecto escala en materiales compuestos.

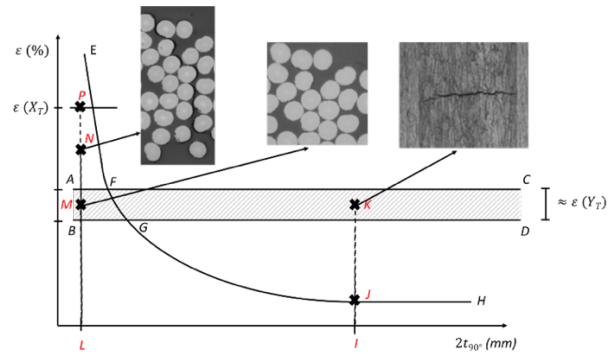


Figura 15.- Representación esquemática de una posible explicación del efecto escala en laminados $[0,90]_n$ s, París et al [7].

7.- CONCLUSIONES

Se ha obtenido una explicación físicamente basada del efecto escala, sin necesidad de hacer uso de parámetros de ajuste, solo conceptos de la Mecánica de la Fractura y de la Mecánica de la Fractura de Grietas de Interfase han sido empleados junto con las evidencias experimentales obtenidas de los ensayos.

REFERENCIAS

- [1] A. Parvizi, K.V. Garret, J.E. Bailey, Constrained cracking in glass fibre-reinforced epoxy cross-ply laminates, *J Mat Sci* (1978) 13:195-201.
- [2] D.L. Flaggs, M.H. Kural, Experimental determination of the in situ strength in graphite/epoxy laminates, *J Com Mat* (1982) 16:103-116.
- [3] M.L. Velasco, E. Graciani, L. Távora, E. Correa, F. París, BEM multiscale modelling involving micromechanical damage in fibrous composites. *Eng Anal Boun. Elem* (2018) 93:1-9.
- [4] F. París, M.L. Velasco y E. Correa, Micromechanical study on the influence of scale effect in the first stage of damage in composites, *Comp Sci Tech* (2018) 160: 1-8.
- [5] F. París, E. Correa, V. Mantič, Kinking of Transversal Interface Cracks Between Fiber and Matrix, *J. Appl. Mech.* (2007) 74: 703–716.
- [6] M.L. Velasco, F. París, E. Correa, Numerical study of the progression of the micromechanical debonding damage in composites, *Key Eng Mat* (2018) 774:644-649.
- [7] F. París, M.L.Velasco, E. Correa, The scale effect in composites: An explanation physically based on the different mechanisms of damage involved in failure, *Com. Struc* (2021) 257:113089.