

## SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA EL ANÁLISIS DE LA TENACIDAD A FRACTURA INTERLAMINAR EN MATERIALES COMPUESTOS

J. M. Menéndez, S. Díaz Carrillo, J. A. Güemes

Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial  
E.T.S. Ingenieros Aeronáuticos  
Universidad Politécnica de Madrid  
Plaza Cardenal Cisneros, 3. 28040 Madrid

**Resumen.** Una red de difracción de Bragg grabada en el núcleo de una fibra óptica actúa como un sensor local de deformaciones cuando se mide el desplazamiento de la frecuencia óptica reflejada, y como sensor del gradiente de deformación cuando se mide la distorsión de la señal reflejada. Esta peculiaridad le hace particularmente útil para el análisis de ensayos en los que, por cualquier discontinuidad estructural, se producen cambios rápidos del campo de deformaciones.

Los fundamentos de la técnica, y su aplicación al análisis de uniones adhesivas fue presentado recientemente. En el presente trabajo se hace aplicación al análisis de ensayos en modo I y II de fractura interlaminar en Materiales Compuestos grafito/epoxy, (doble viga en voladizo y flexión con entalla en el extremo). Se compara el procedimiento con las técnicas clásicas de reducción de datos, demostrándose que se superan algunas de las limitaciones existentes.

### 1. INTRODUCCIÓN

Una red de difracción de Bragg es una variación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, provocadas mediante la incidencia de un patrón periódico de luz UV sobre dicho núcleo. El comportamiento de la red de Bragg frente a un haz luminoso de amplio espectro transmitido a lo largo de la fibra es el de un filtro (Fig. 1) que refleja una banda de luz muy estrecha (en torno a 0.15 nm), presentando un espectro de intensidad con un máximo muy acusado para una longitud de onda que cumple la llamada condición de Bragg:

$$\lambda_0 = 2n_0\Lambda_0 \quad (1)$$

donde  $\Lambda_0$  es el *pitch*, (período de modulación), es decir, la distancia entre dos puntos consecutivos de la red con el mismo índice de refracción, y  $n_0$  es el índice de refracción medio de la misma.

Si se somete a la red a una deformación uniforme, el periodo de la red cambiará y, de acuerdo con la condición de Bragg, la longitud de onda de Bragg

variará de forma lineal con la deformación (existe una pequeña variación del índice de refracción con la deformación, pero la influencia de dicho factor es muy pequeña). Midiendo la variación de la longitud de onda de pico reflejada, la determinación de la deformación

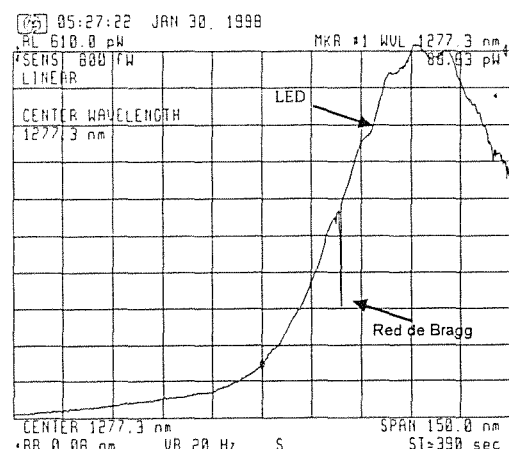


Fig. 1. Espectro de intensidad en transmisión de un LED y efecto de una red de Bragg sobre él.

de la red es inmediata. Esta propiedad permite que, pegada o embebida en un material cuyo campo de deformaciones varia lentamente en comparación con la longitud de la red, ésta pueda operar como sensor local de deformación.

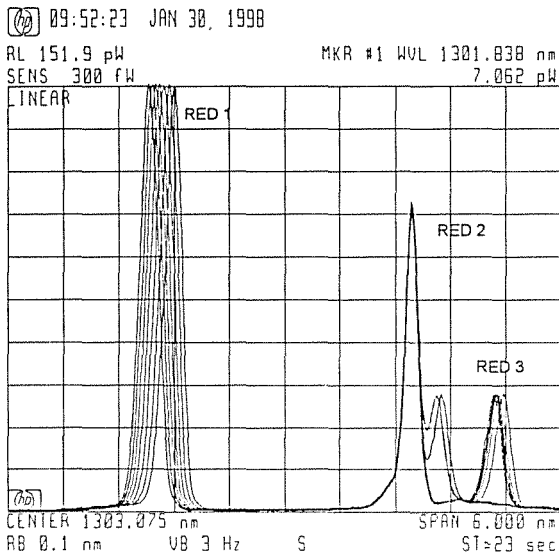


Fig. 2. Espectros de intensidad en reflexión de 3 redes de Bragg. La red 1, embebida en una probeta sometida a variación térmica, la red 2, inmóvil, como referencia, y la red 3, muy próxima a la 2 inicialmente, y separada aplicando distintos niveles de tracción.

El empleo de redes de Bragg como sensores de deformación local presenta importantes ventajas frente a los métodos convencionales existentes en la actualidad. En primer lugar, la codificación de la respuesta de la red en longitud de onda la hace insensible a las posibles fluctuaciones o desconexiones de la fuente, o a pérdidas de intensidad de la señal por defectos en el cableado o las conexiones. Este mismo método de codificación es el que permite su casi ilimitada capacidad de multiplexación, que permite situar un elevado número de sensores en una misma fibra óptica mientras sus anchos de banda de operación no se superpongan. Son inmunes frente a interferencias electromagnéticas, y su pequeño tamaño y geometría (125µm de diámetro, el de la fibra óptica en la que se encuentran integradas) las hacen especialmente indicadas para ser embebidas en estructuras realizadas en materiales compuestos, aunque también pueden ser pegadas en el exterior de estructuras ya fabricadas, de manera similar a una galga extensiométrica convencional.

Aunque para la mayoría de las aplicaciones de laboratorio en las que se necesita obtener el espectro de

intensidad de una red de Bragg, un analizador de espectro óptico (OSA) es suficiente, el coste de este equipo, su volumen, su lentitud y su escasa resolución (que limita la resolución en deformación a algunas decenas de microdeformaciones) lo hacen inapropiado para su aplicación en aplicaciones prácticas de monitorización estructural.

Por ello, se han desarrollado numerosos equipos, algunos ya en fase comercial, basados en diferentes esquemas de demodulación del espectro de intensidad de una red de Bragg que permiten la monitorización de una o varias redes en condiciones dinámicas con resoluciones cercanas a 1µε. Este hecho ha permitido la existencia ya en servicio de estructuras civiles, navales, y a corto plazo aeronáuticas y espaciales de sistemas de monitorización basadas en este tipo de sensores.

El Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial de la UPM, involucrado en la investigación del empleo de redes de Bragg como sensores de deformación como parte de un proyecto europeo de desarrollo de palas de aerogeneradores eólicos monitorizadas con sensores inteligentes, ha desarrollado un sistema de escritura de redes de Bragg, operativo actualmente. Además de los trabajos dirigidos a la caracterización de las redes de Bragg como sensores de deformación, de los cuales forma parte esta publicación, se encuentra en desarrollo un dispositivo de demodulación basado en un filtro Fabry-Perot sintonizable que se espera permita en breve monitorizar múltiples redes operando en condiciones dinámicas.

## 2. REDES DE BRAGG COMO SENSORES DE DISTRIBUCIONES DE DEFORMACIÓN

Hemos introducido el empleo de redes de Bragg como sensores de deformación local. Sin embargo, si provocamos a lo largo de la red un gradiente de deformaciones considerable, el espectro de intensidades sufrirá una distorsión debida a la pérdida de uniformidad del patrón de modulación del índice de refracción. Existen diversos procedimientos para obtener el perfil de deformaciones a que se encuentra sometida la red a partir de la integración de los espectros de intensidad y fase de la misma: mediante la integración del espectro de intensidad (ISB) [1], mediante la integración del espectro de fase (PSB) [2], o empleando el método de transformadas de Fourier (FTB) [3]. Este tercer método, que requiere el conocimiento de ambos espectros de la red, es el más general, dado que dispone toda la información suministrada por la red, y puede ser aplicado para calcular cualquier distribución de deformación aplicada sobre la red. Los otros dos procedimientos solo emplean parte de esta información, por lo que presentan algunas limitaciones importantes, pero pueden resultar de gran

utilidad en algunos casos particulares en los que se dispone de información adicional sobre la distribución de deformaciones aplicada sobre la red. En general, dichos métodos son aplicables si la red está sometida a una distribución de deformación monótona (creciente o decreciente).

El método de integración del espectro de intensidades requiere únicamente el empleo de un analizador de espectro óptico. Este hecho, unido a la sencillez de implementación de su modelo matemático han hecho que fuera el elegido para el desarrollo de este trabajo.

Una descripción exhaustiva del modelo matemático del método de integración del espectro de intensidades se sale fuera de los límites de interés del artículo, por lo que se remitirá a la referencia [1] y [4-6]. El método se basa en el desarrollo de Matsuhara et al. [4], que, en caso de que la longitud de onda de Bragg a lo largo de la red  $\lambda(z)$ , que vendrá dada por la condición de Bragg local:

$$\lambda(z) = 2n(z)\Lambda(z) \quad (2)$$

donde  $n(z)$  y  $\Lambda(z)$  son el índice de refracción medio y el espaciado local a lo largo de la red, sea una función invertible de  $z$  (condición que exige que la distribución de deformación aplicada sobre la red sea una función monótona de  $z$ ), da la siguiente relación funcional entre  $\lambda$  y  $z$ :

$$\int_{\lambda(z=0)}^{\lambda(z)} \ln(1-R(\lambda))d\lambda = -\frac{\pi^2}{2} \int_0^z \frac{\Delta n^2(z)}{n(z)} dz \quad (3)$$

donde  $R(\lambda)$  es el espectro de intensidad relativo, o reflectividad en función de la longitud de onda, y  $\Delta n$  es la profundidad de modulación del índice de refracción de la red.

Conocida la relación  $\lambda(z)$ , y habiendo caracterizado previamente la sensibilidad a la deformación de la red, es posible obtener el campo de deformaciones aplicado sobre la misma.

Este proceso requiere así mismo un proceso previo de calibrado de la red, que permita estimar los parámetros ópticos que determinan el comportamiento de la red frente a la deformación, como son el índice de refracción medio efectivo tras la escritura de la red, y la profundidad de modulación del patrón periódico de índice de refracción.

La implementación práctica de la solución del problema completo ha requerido la elaboración de tres programas independientes:

- Un primer programa de adquisición de datos, realizado en LabView®, que permite adquirir el espectro de intensidad de la red obtenido mediante el OSA.

- Un programa de simulación de espectros de redes, realizado en MATLAB®, basado en un método numérico de solución de las ecuaciones de modos acoplados para redes aperiódicas [7], denominado Algoritmo de Matrices de Transferencia (TMF), y que teniendo como entradas los parámetros geométricos de la red y una distribución de deformación conocida, es posible estimar, mediante un proceso iterativo, los parámetros ópticos que permiten ajustar los espectros predichos por el programa de simulación y los espectros experimentales obtenidos bajo diferentes configuraciones de carga (la configuración empleada para esta caracterización, y que permite aplicar una distribución de deformación lineal a una red pegada superficialmente a una viga, es la del ensayo de una viga simplemente apoyada. La figura 3 muestra, en trazo fino, los espectros experimentales obtenidos para varios casos de carga aplicados en la configuración indicada, y en trazo grueso, la simulación obtenida empleando el algoritmo programado).

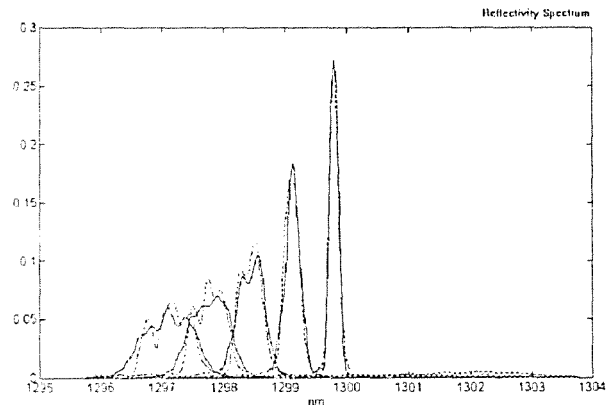


Fig. 3. Espectros experimentales y simulados para varios casos de carga de una red sometida a una distribución lineal de deformaciones

- Por último, un programa escrito también en MATLAB®, y que implementa el método de integración de espectros de intensidad, y que teniendo como entradas el espectro de la red obtenido de forma experimental y los parámetros geométricos y ópticos de la red, permite obtener la distribución de deformaciones aplicada sobre la red. La figura 4 muestra, en trazo fino, las distribuciones de distribución obtenidas para varios casos de carga aplicando la teoría de la elasticidad, y en trazo grueso las distribuciones obtenidas integrando los espectros experimentales obtenidos en dichos casos de carga.

Puede observarse que la coincidencia de los resultados analítico y experimental es en general considerable, empeorando en los casos de distribuciones de pendiente más acusada, y en todos los casos, en los extremos de la red, donde los errores crecen de forma asintótica. Este fenómeno es debido a los defectos de modelización de la red, que no verifica la condición de Bragg de forma local en cada uno de sus puntos, sino que requiere una cierta longitud, denominada longitud efectiva, para verificarla, hecho que explica el agravamiento de error en los extremos por la exigencia que sobre el modelo impone la terminación brusca de la red.

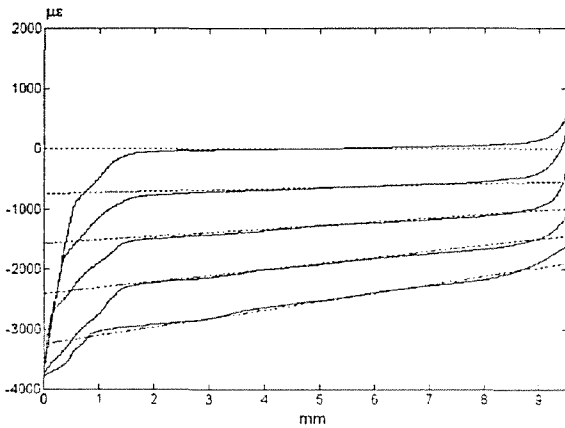


Fig. 4. Curvas obtenidas a partir de la integración de los espectros experimentales de la red en varios casos de carga de una red sometida a una distribución de deformaciones lineal, junto a los resultados previstos por la teoría de la elasticidad.

**3. APLICACIÓN DEL MÉTODO A UN ENSAYO DE FRACTURA INTERLAMINAR**

Una discusión pormenorizada de los ensayos de tenacidad a fractura interlaminar en compuestos carbono-epoxy empleando las técnicas clásicas de adquisición de datos se encuentra en la referencia 8. La dificultad para identificar el frente de grieta en los ensayos en modo I, y la disparidad de los resultados de tenacidad a fractura en modo II y mixto según el procedimiento empleado para la reducción de datos (método de las áreas, teoría de vigas, flexibilidad) son algunos de los aspectos que se proponen superar con la presente técnica.

**3.1. Detalle experimental**

Se construyó un laminado con cinta unidireccional carbono-epoxy T300/8556, en configuración  $(0)_{14}$ . Una red de Bragg de 20 mm de longitud fue embebida longitudinalmente en la línea central de una de las probetas, entre las capas 6 y 7, inmediatamente antes de la grieta interlaminar generada entre las láminas 7 y 8

mediante cinta de teflón. La red de Bragg coincidía parcialmente sobre la grieta inicial. Después del curado, el laminado fue ensayado a flexión en modo mixto, registrándose sucesivos espectros ópticos para pequeños incrementos de la flecha central. Las figuras 5 y 6 ilustran el montaje experimental y las dimensiones relevantes empleadas.

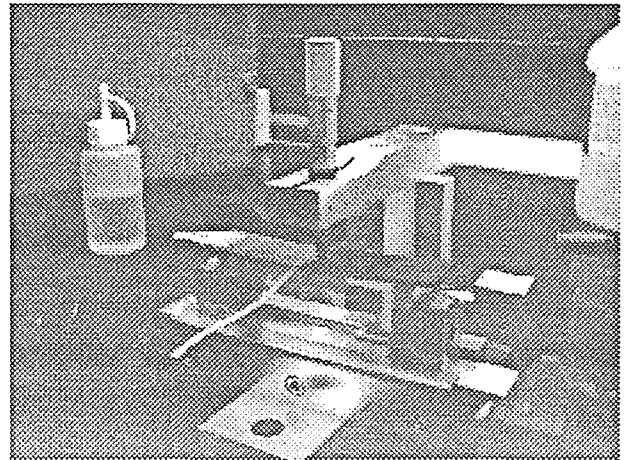


Fig. 5. Imagen del ensayo

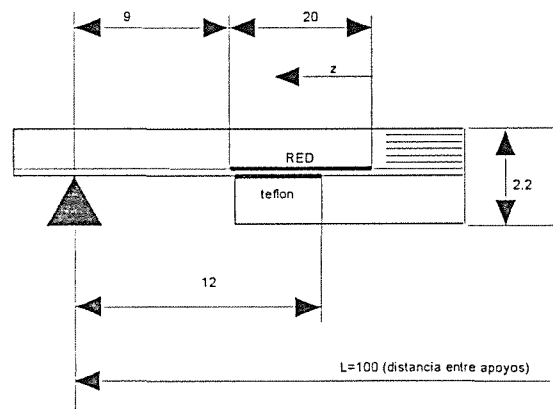


Fig. 6. Croquis con las dimensiones relevantes del ensayo

**3.2. Resultados obtenidos.**

La gráfica de la figura 8 recoge el espectro óptico en situaciones bien distintas:

- a) Viga descargada: el pulso luminoso reflejado tiene una anchura de 0.21 nm, centrado en 1301.18 nm.
- b) Viga con una flecha central de 3.7 mm, poco antes del crecimiento de grieta. Se aprecian en el espectro óptico dos picos muy separados, uno centrado en 1303.93 nm, que corresponde a la parte de la red

incluida en la cara sometida a tracción de la semiviga libre; el otro pico permanece sin desplazarse de la longitud de onda inicial, aunque aparece distorsionado por cargas compresivas (la red no está situada exactamente en la línea neutra de la viga total).

c) Viga con una flecha central de 3.9 mm, inmediatamente después de producirse el crecimiento inestable de grieta. El espectro correspondería al generado por la deformación en flexión de toda la semiviga.

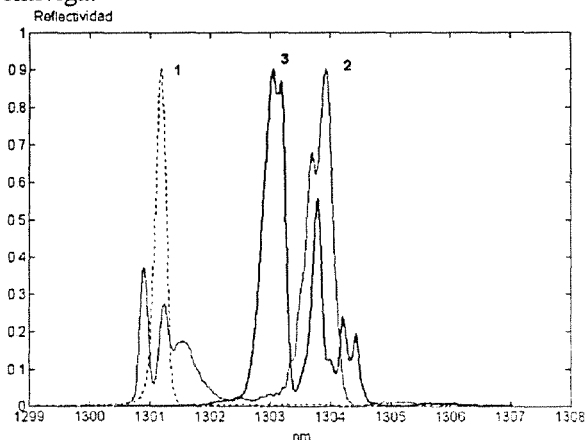


Fig. 8. Gráfica de los espectros correspondientes a los estados: 1) en trazo punteado, descargado, 2) en trazo sólido, cargado previo a la progresión inestable de la grieta y 3) en trazo sólido grueso, cargado posterior a la progresión inestable de la grieta.

3.3. Reducción de datos

Utilizando el programa de integración de espectros introducido anteriormente, se obtienen las distribuciones de deformación representadas en la figura 9.

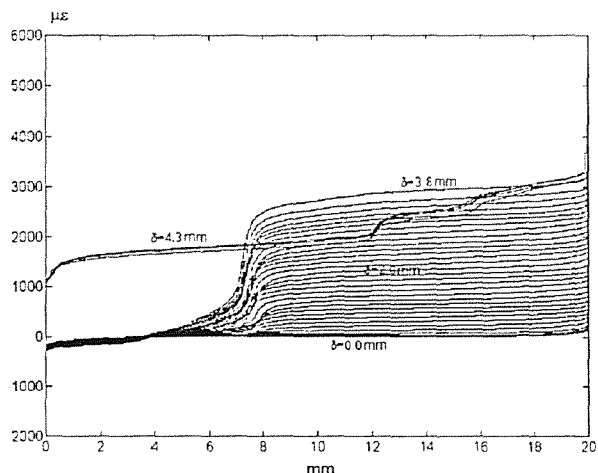


Fig. 9. Distribuciones de deformación obtenidas a lo largo del ensayo, desde la posición de viga descargada, pasando por diversos niveles de carga previos al crecimiento inestable de grieta.

crecimiento inestable de grieta, hasta la situación final posterior a dicho crecimiento.

La posición del frente de grieta queda bien definido, con precisión de ± 1 mm, así como los niveles de deformación de la zona de red incluida en la viga a flexión, con una anomalía importante provocada por la no monotonía de la distribución de deformaciones generada por la configuración del ensayo: como se ha indicado anteriormente, el análisis del espectro por el método de integración empleado requiere la monotonía de la distribución de deformaciones aplicada para poder relacionar el nivel de deformación local con la coordenada correspondiente de la red. Sin embargo, si como sucede en el presente caso, aún en el supuesto de no verificarse esta condición, existen dos o más zonas de la red sometidas a distintos perfiles de deformación bien delimitados, localmente monótonos y, lo que es más importante, con niveles de deformación no superpuestos, los resultados obtenidos podrán corregirse si, delimitando a lo largo de la longitud de la red las diferentes zonas de monotonía local, se aplica un cambio de orientación de la red en la zona considerada (Fig.10)

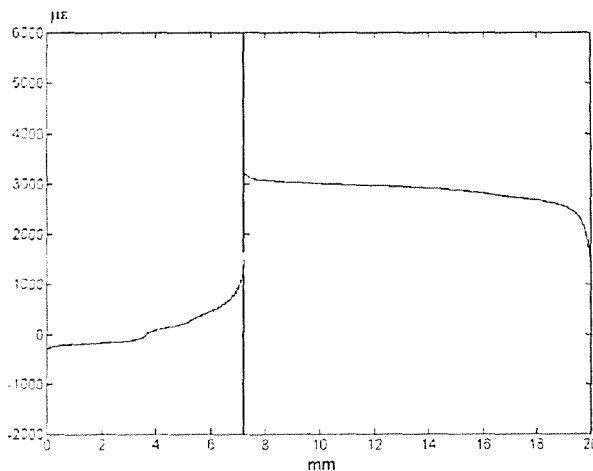


Fig. 10. Distribución de deformaciones "corregida" para una flecha de 3.8 mm.

Un conocimiento físico del problema es imprescindible en este caso.

4. CONCLUSIONES

La fibra óptica puede embeberse con facilidad en los materiales compuestos, provocando una mínima perturbación del campo de deformaciones cuando está situada paralela a las fibras del material adyacente. Cuando la fibra lleva localmente grabados sensores de deformación tipo -red de difracción- o -red de Bragg-, proporciona una información sobre la deformación local imposible de obtener por otro procedimiento.

El sensor de fibra óptica es capaz de discriminar si a lo largo de su longitud (10-20 mm típicamente, aunque pueden obtenerse redes de gran longitud, superiores a los 100 mm) se están produciendo fuertes variaciones en el perfil de deformaciones; en el caso del ensayo de tenacidad a fractura interlaminar realizado en este trabajo, la posición del frente de grieta queda determinado con una precisión de  $\pm 1$  mm.

Como limitaciones del método, hay que destacar su carácter cuasiestático, condicionado por la lenta respuesta dinámica del OSA, que es de algunos segundos (en torno a 10), y del tiempo requerido por el programa de adquisición y análisis de espectro, que emplea otro tanto en ofrecer valores en microdeformaciones a partir de los datos de reflectividad, y que la interpretación de los resultados puede conducir a importantes errores si no se respetan las hipótesis del problema, en particular en lo que se refiere a la monotonicidad del perfil de deformaciones.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Europea (DGXII) y a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología por la financiación recibida para el proyecto "SMART BLADES", (JOR-CT96-0104 y CICYT MAT96-2350-CE, respectivamente). que ha permitido la realización de este trabajo.

## Bibliografía

- [1] LeBlanc M., Huang S. Y., Ohn M. M., Measures R. M., Güemes J. A. y Othonos, A., "Distributed strain measurement using a fibre Bragg grating based on reflection spectrum analysis", *Optics Letters*, Vol. 21, Issue 17, 1405-1407 (1996)
- [2] Huang S. Y., Ohn M. M., y Measures R. M., "Phase-based Bragg intragrating distributed strain sensor", *Applied Optics*, Vol. 35, Issue 7, 1135-1142, (1996).
- [3] Ohn, M., Huang, S. Y., Measures R. M. y Chwang J., "Arbitrary strain profile measurement within fibre gratings using interferometric Fourier transform technique", *Electronics Letters*, Vol. 33, N. 14, pp. 1242-1243, 1997.
- [4] Matsuhara M., Hill K. y A. Watanabe. "Optical-waveguide filters: Synthesis". *Journal of the Optical Society of America*, Issue 65, Vol. 7, pp. 804-809.
- [5] Menéndez J. M., Güemes J. A. y Díaz-Carrillo S., "Determinación de deformaciones en una unión adhesiva mediante sensores de fibra óptica". *Actas del II Congreso de Materiales Compuestos*, 609-618 (1997)
- [6] Güemes J. A., Díaz-Carrillo S. y Menéndez J. M. "Measurement of strain distribution in bonded joints by fiber Bragg gratings", *Smart Structures and Materials 1998, Proceedings of the Meeting (1998)* (Próxima publicación).
- [7] Huang S. Y., LeBlanc M., Ohn M. M. and Measures R. M., "Bragg Intra-Grating Structural Sensing". *Applied Optics*, Vol. 34, Issue 22, 5003-5009 (1995).
- [8] Pintado, J. M. , "Investigación sobre fractografía micromecánica de materiales compuestos", Tesis Doctoral, ETSI Aeronáuticos, UPM (1994).