

# APLICACION DE LA TECNICA DE INTERFEROMETRIA MOIRE ACROMATICA SOBRE PROBETAS DE GRAFITO-EPOXY DE PEQUEÑO TAMAÑO SOMETIDAS AL ENSAYO DE TRACCION "OFF-AXIS".

Marín Vallejo J.C.<sup>1</sup>; Cañas Delgado J.1; París Carballo F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Mecánica de Medios Continuos. E.S. Ingenieros de Sevilla  
Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla. Tfno: 95-4487299. Fax: 95-4461637

**Resumen :** En este artículo se aborda el estudio experimental de las configuraciones más habituales de las condiciones de contorno, en el ensayo de tracción "off-axis", a que dan lugar los diferentes tipos de cogida de la probeta. Para ello, se utilizó la técnica de interferometría moiré acromática, empleando un modelo compacto cuya portabilidad lo hace muy adecuado para su uso en la máquina de tracción.

El ensayo de probetas de grafito-epoxy de reducidas dimensiones, que es uno de los objetivos de este estudio, se consiguió mediante el empleo de un elemento adaptador, desarrollado en nuestro grupo, que permite extender la distancia entre la probeta y el equipo interferométrico y hacerlo accesible a espacios reducidos.

Como resultado de este estudio se obtuvieron los campos de deformaciones correspondientes a las diversas configuraciones ensayadas, analizándose la influencia de cada tipo de cogida sobre los resultados del ensayo, que es el objeto central de este estudio.

**Abstract :** A experimental study of the boundary conditions, produced by different jaw systems, at the off-axis tension test has performed on this paper. Achromatic moiré interferometry technique was used to measure displacements.

A special attachment element was designed to make possible to take measurements in reduced placements with the achromatic interferometer.

As a result of this study the strain fields of several configuration of the jaw fixtures was obtained. The influence on the results of the different configurations was analyzed.

## 1.- INTRODUCCION.

En el ensayo de tracción "Off-Axis" a 10°, uno de los métodos más extendidos para la caracterización a cortadura de laminados unidireccionales de material compuesto, son bien conocidos los problemas asociados a la influencia de las condiciones de contorno en los extremos sobre el campo de deformaciones en el centro de la probeta, la cuál es tanto más acusada cuanto menor es la relación longitud/ancho de la probeta utilizada. Una forma de paliar estos problemas, muy extendida, es el empleo de correcciones sobre los valores experimentales (habitualmente denominados "aparentes"), que contabilizan la discrepancia existente entre la solución del problema ideal (condiciones de contorno en tensiones en los extremos en forma de carga distribuida uniforme) y la solución del problema real [1][2].

Generalmente se suele considerar como configuración más aproximada a la real la de extremos empotrados en las mordazas con desplazamiento longitudinal de una de ellas, sin embargo se ha podido comprobar experimentalmente [3][4] que no todas las configuraciones habituales del sistema de cogida de la probeta (mordazas, refuerzos laterales "tabs", elementos intermedios) aseguran que se reproduzca la condición de empotramiento esperada. Este hecho tiene, evidentemente, una gran importancia a la hora de aplicar una corrección sobre los valores medidos que se base en la solución del problema empotrado, puesto que si efectivamente estas condiciones no se dan, el uso de

la corrección conduciría a valores erróneos.

Por las razones expuestas, se ha considerado de interés el estudio de los efectos de las diversas condiciones de contorno en los extremos de la probeta a que dan lugar los distintos sistemas de cogida más usualmente empleados, para probetas con diferentes relaciones de aspecto geométrico (longitud libre/ancho de la probeta). Para dicho estudio se consideró adecuado el uso de la técnica de interferometría moiré, que nos permite la obtención de una mayor información y más precisa de la zona de medida que técnicas menos sofisticadas como la extensometría óhmica.

## 2.- MODIFICACION DEL EQUIPO INTERFEROMETRICO. ACOPLADOR DE ESPEJOS PARALELOS.

El equipo interferométrico que se juzgó más adecuado para medir sobre un espécimen que se encuentra sometido a tracción en una máquina de ensayos es uno del tipo acromático compacto [5], por las ventajas en cuanto a insensibilidad frente a las vibraciones, y a su carácter portable.

No obstante, pese a la adecuación del equipo a este tipo de ensayo, la realización de nuestro propósito de estudiar probetas de diferentes relaciones de aspecto (6, 8 y 10) presenta dificultades de tipo práctico a la hora de aplicar la técnica para la medida sobre probetas pequeñas, ya que el espacio libre entre mordazas es tan reducido como el tamaño de la probeta, y dado que el interferómetro debe situarse junto a la rejilla de difracción, que se adhiere a la probeta, éste debería colocarse en dicho espacio. Esta limitación no se podría cumplir para los ratios pequeños, más que utilizando probetas extraordinariamente anchas, lo cuál dificulta el abarcar todo el ancho de la probeta con el campo de medida del equipo. La ampliación del campo de medida, supondría un sobredimensionamiento del interferómetro (dimensión mayor de todos los elementos que conforman el mismo), lo que nos llevaría de nuevo a superar la longitud libre disponible.

Para solventar este problema, se ha diseñado un elemento acoplador, consistente en un tubo de sección cuadrada de espejos paralelos, que extienden el campo de acción del interferómetro conduciendo los rayos incidentes, a través de sucesivas reflexiones, hasta el plano de la rejilla. En la figura 1 se muestra el esquema interior del interferómetro en sus configuraciones con y sin el acoplador de espejos paralelos.

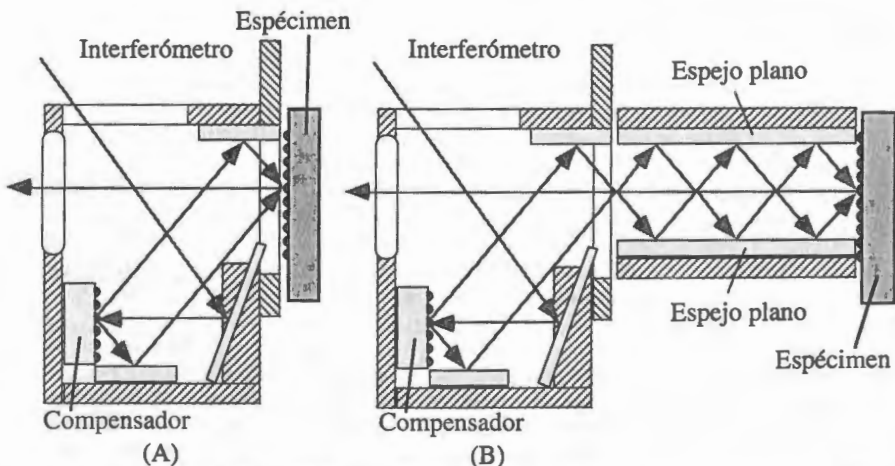


Figura 1.- Esquema de la configuración del interferómetro y trayectoria de los rayos en su interior: (A) configuración básica; (B) con acoplador de espejos paralelos.

Como se observa en la figura, la función del acoplador es permitir que se pueda alejar el interferómetro del plano de la rejilla adherida al espécimen, ello nos hace posible ensayar probetas de pequeña longitud, de manera que sea el acoplador el que pase entre las mordazas de la máquina, tal como se observa en la figura 2.

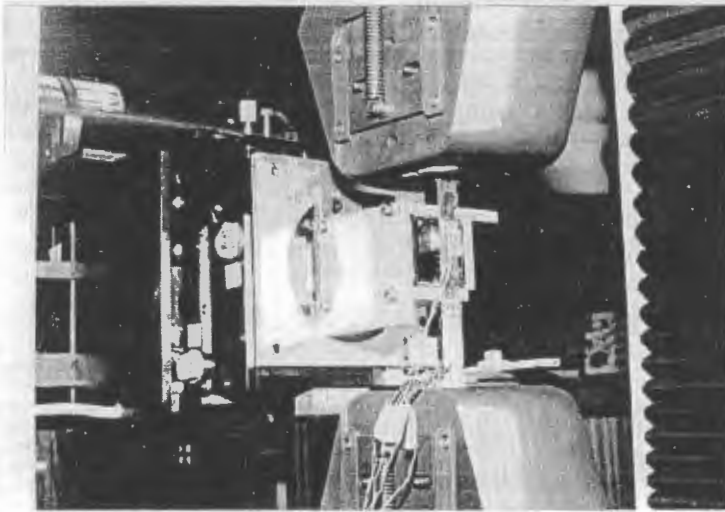


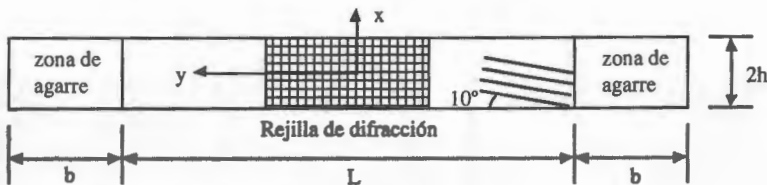
Figura 2.- Vista de la situación del acoplador de espejos durante uno de los ensayos.

Para comprobar la eficiencia del equipo modificado con la inclusión del acoplador, se llevaron a cabo ensayos de verificación sobre probetas de acero instrumentadas con bandas extensométricas y rejillas de difracción, siendo sometidas a tracción, y utilizándose el interferómetro con y sin el acoplador. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, presentando un total acuerdo entre las deformaciones medidas por las bandas y las medidas con las dos configuraciones del interferómetro.

### 3.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO OFF-AXIS.

Vista la viabilidad de la configuración modificada del interferómetro, se procedió a aplicar la técnica en ensayos Off-Axis a  $10^\circ$  sobre probetas de un laminado unidireccional de grafito-epoxy (AS4/3501-6) cuya caracterización arrojó los valores:

$$E_{11} = 145 \text{ GPa} ; E_{22} = 10 \text{ GPa} ; \nu_{12} = 0.3 ; G_{12} = 6 \text{ GPa}$$



t : Espesor de la probeta

Ratio 6 :  $L = 75.6 \text{ mm}$  ;  $b = 50 \text{ mm}$  ;  $2h = 12.6 \text{ mm}$  ;  $t = 1.02 \text{ mm}$

Ratio 8 :  $L = 100.8 \text{ mm}$  ;  $b = 50 \text{ mm}$  ;  $2h = 12.6 \text{ mm}$  ;  $t = 1.02 \text{ mm}$

Ratio 10:  $L = 126 \text{ mm}$  ;  $b = 50 \text{ mm}$  ;  $2h = 12.6 \text{ mm}$  ;  $t = 1.02 \text{ mm}$

Figura 3.- Esquema de las probetas ensayadas.

En la figura 3 se muestran las dimensiones de las probetas para las tres relaciones de aspecto consideradas (6, 8 y 10).

El tipo de mordazas utilizado fue de cuñas, por ser el más común en las máquinas de ensayo utilizadas para este tipo de materiales. Se consideraron diferentes sistemas de agarre de la probeta:

- Empleo de papel de esmeril como elemento intermedio entre mordaza y probeta.
- Empleo de refuerzos (tabs) de fibra de vidrio-resina epoxy unidos con papel adhesivo.
- Empleo de refuerzos (tabs) de fibra de vidrio-resina epoxy pegados a la probeta.

A continuación se muestran las imágenes de franjas obtenidas para cada una de las configuraciones mencionadas en el caso de  $\text{ratio}=6$ , correspondientes a los campos de desplazamientos longitudinal  $u$  y transversal  $v$  para la situación tomada como referencia (2 Kg) y para la situación final (50 Kg), de los cuales se obtuvieron las deformaciones correspondientes a un incremento de carga de 48 Kg para la línea central de la probeta.

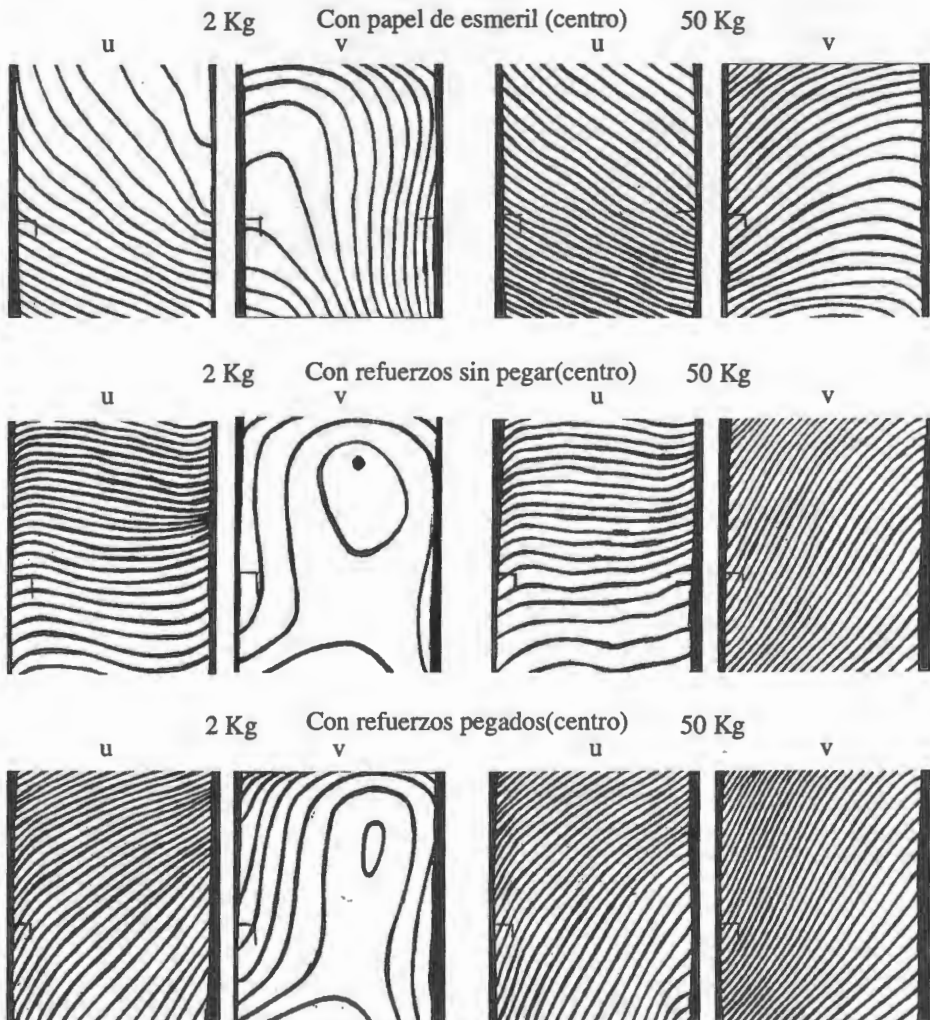


Figura 4.- Imágenes de franjas de moiré correspondientes a los ensayos de ratio 6.

#### 4.- ANALISIS DE RESULTADOS.

Los gráficos de la evolución de las deformaciones en la línea media de la probeta se presentan a continuación para cada uno de los ratios analizados.

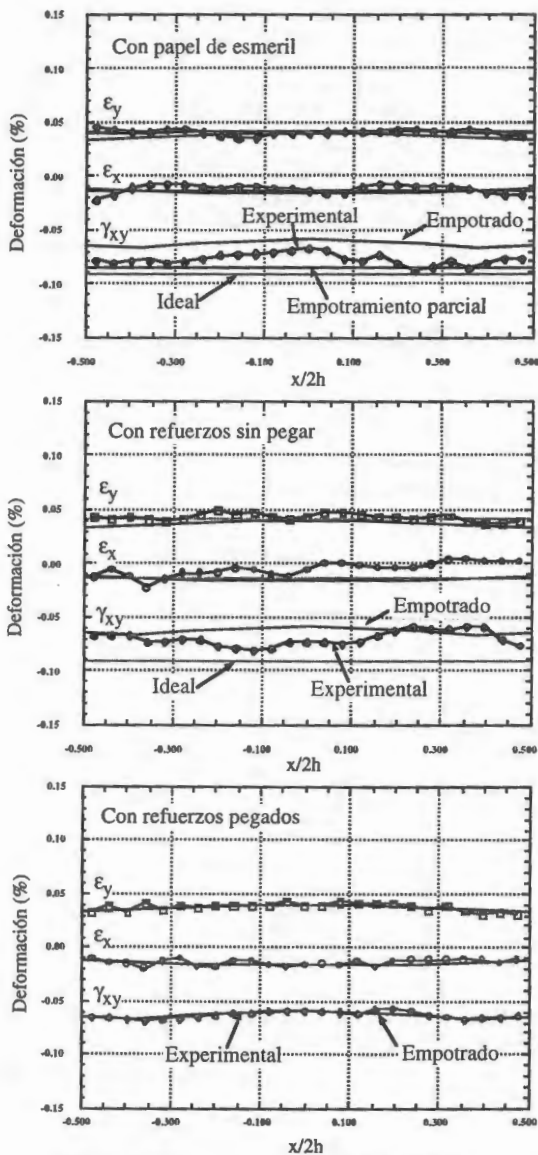


Figura 5.- Distribución de las deformaciones en la línea central en ejes geométricos del espécimen, para ratio 6.

Junto a los resultados experimentales se pueden observar los resultados numéricos, obtenidos usando MEF, correspondientes a distintas condiciones de contorno: configuración ideal, configuración empotrada y empotramiento parcial (liberación de

algunos nodos en las zonas de altas concentraciones de tensión que aparecen en dos de las esquinas). De los gráficos se observa la casi total coincidencia de las distribuciones correspondientes a las probetas con refuerzos laterales pegados con las del análisis numérico con extremos empotrados, mientras que tanto en el caso de los ensayos con papel de esmeril como en los que se usó refuerzos laterales sujetos con papel adhesivo las distribuciones de deformación resultantes adoptan posiciones intermedias entre las configuraciones ideal y empotrada. Se puede observar, que en el caso de los ensayos con papel de esmeril como elemento intermedio la distribución parece próxima a lo que sería un empotramiento parcial de los extremos, mientras que en el caso de refuerzos laterales sujetos con papel adhesivo la distribución resultante se muestra muy irregular acercándose al empotramiento total en las zonas laterales del ancho de la probeta, y al empotramiento parcial en la zona central. Asimismo, en estos últimos ensayos se comprobó visualmente, al extraer la probeta tras el ensayo, que los refuerzos habían sufrido un giro respecto a su posición inicial. Por estos motivos expuestos se decidió no considerar este sistema de cogida para el resto de las configuraciones a estudiar (ratios 8 y 10).

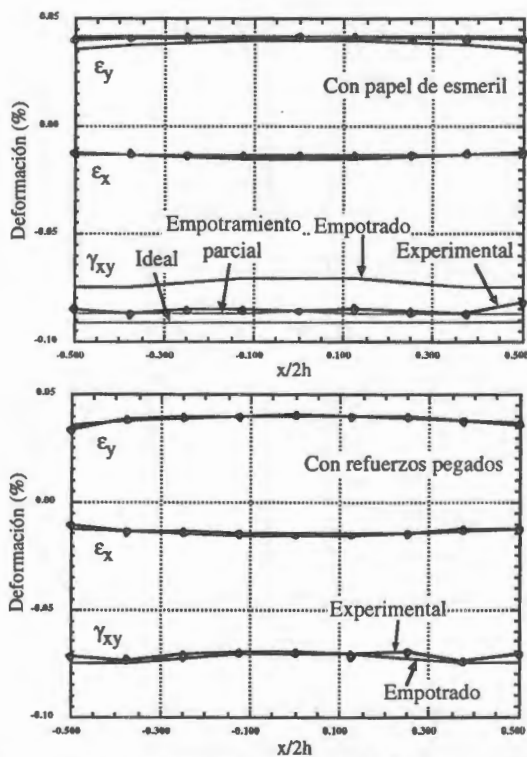


Figura 6.- Distribución de las deformaciones en la línea central en ejes geométricos del espécimen, para ratio 8.

Para el caso de ratio 8, se observa como de nuevo la configuración con refuerzos laterales pegados se ajusta perfectamente a los resultados numéricos correspondientes a la situación empotrada. En cuanto a la configuración con papel de esmeril de elemento intermedio entre probeta y mordaza, los resultados de ésta se aproximan a lo que sería un empotramiento parcial de los extremos.

En el caso de ratio 10, para la configuración con refuerzos pegados se volvió a

comprobar la coincidencia con los resultados correspondientes al caso empotrado (figura 7).

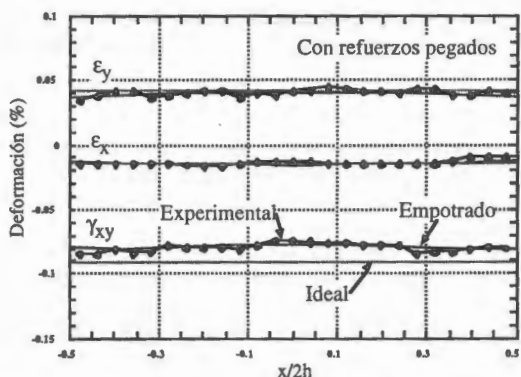


Figura 7.- Distribución de las deformaciones en la línea central en ejes geométricos del espécimen, para ratio 10 y refuerzos laterales pegados.

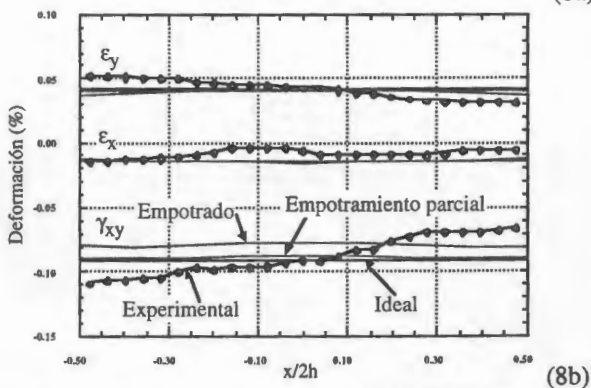
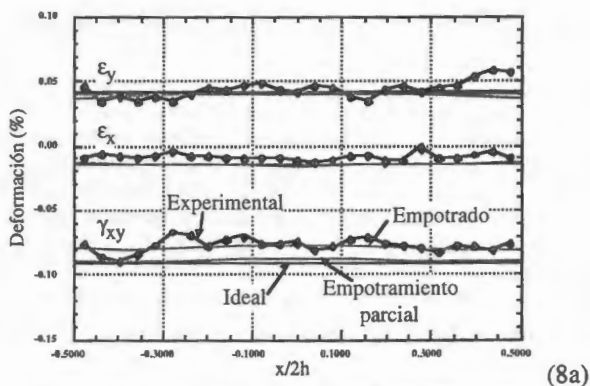


Figura 8.- Distribuciones de las deformaciones en la línea central en ejes geométricos del espécimen, para ratio 10 y papel de esmeril como elemento intermedio.

Sin embargo, en el caso de la configuración con papel de esmeril como elemento intermedio, se observó la existencia de una clara dispersión en los resultados a

diferencia del resto de ensayos para las otras configuraciones, variando los resultados entre los que se acercan al ensayo empotrado (figura 8a) a distribuciones que no se ajustan a ninguno de los casos analizados numéricamente (figura 8b). Distribuciones del tipo de la mostrada en la figura 8b fueron encontradas en estudios previos [3], obteniéndose que estaban asociadas a descentramientos de la resultante de cargas.

## 5.- CONCLUSIONES.

Se ha desarrollado un elemento acoplador que permite el empleo de un equipo interferométrico acromático para realizar medidas sobre superficies de reducidas dimensiones o de difícil acceso como es el caso de probetas de pequeñas dimensiones sometidas a tracción en una máquina de ensayos.

El equipo interferométrico modificado con la inclusión del acoplador de espejos paralelos ha sido empleado para la medida de los desplazamientos, en el plano de la probeta, sobre la zona central de la misma, cuando se la somete a ensayo de tracción "Off-Axis" a 10°, bajo diversas configuraciones del sistema de cogida y mordazas de tipo cuña.

De la comparación de los resultados experimentales obtenidos con las distribuciones de deformación calculadas numéricamente para los casos ideal, empotrado y parcialmente empotrado, se puede deducir en primer lugar que para todos los valores de la relación de aspecto considerados la configuración con refuerzos laterales de los extremos pegados a la probeta es la que se ajusta perfectamente a la condición de empotramiento de los extremos, y por tanto la más adecuada para la realización del ensayo cuando se pretende usar uno de los métodos de corrección.

Por otra parte, de los resultados obtenidos para la configuración con refuerzos sujetos con papel adhesivo se deduce que no es adecuada para el ensayo "Off-Axis", puesto que no reproduce con fiabilidad una condición de contorno determinada.

En cuanto a la configuración con papel de esmeril como elemento intermedio entre probeta y mordazas, podemos decir que para los ratios pequeños ésta se aproxima bastante bien a un empotramiento parcial de los extremos, mientras que conforme aumenta la relación de aspecto geométrico los resultados muestran una dispersión considerable. Por lo tanto, podemos concluir que esta última configuración tampoco resulta recomendable para su empleo en el ensayo "Off-Axis" a 10° cuando se emplean mordazas de tipo cuña.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el CICYT dentro del proyecto MAT-94-0480

## 5.- REFERENCIAS.

- [1] - Cañas J., París F. and Marín J.C., *Numerical Analysis of Off-Axis Tension Test for Unidirectional Graphite-Epoxy Composites*, Proceedings of ICCM VIII, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 36F1-36F12, July 1991.
- [2] - Pindera M.-J. and Herakovich C.T., *Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test*, *Exp. Mech.*, pp.103-112, March 1986.
- [3] - París F., Cañas J., Marín J.C. and Morton J., *Deformation Studies in the Off-Axis Tension Test*, Proc. of 2nd International Conference on Deformation and Fracture of Composites, Manchester, UK, pp. 18.1-18.9, March 1993.
- [4] - Nemeth M.P., Herakovich C.T. and Post D., *On the Off-Axis Tension Test for Unidirectional Composites*, *Composites Technology Review*, Vol.5, No.2, pp.61-68, Summer 1983.
- [5] - Czarnek R., *High Sensitivity Moiré Interferometry with Compact Achromatic Interferometer*, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.13, No.2, pp. 99-116, 1990.