

CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS DE DELAMINACIÓN EN LAMINADOS 0/90 SIMÉTRICOS

F. París¹, A. Blázquez², V. Mantic¹, N. L. McCartney³

¹ Escuela Superior de Ingenieros. Univ. de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla

² Centro de Enseñanzas Científicas y Técnicas. Univ. de Logroño, Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño

³ National Physical Laboratory, Queens Rd., Teddington, Middlesex, UK.

Palabras Clave: Materiales compuestos, Delaminación, Mecánica de la Fractura

Resumen: La presencia en un laminado de láminas a 90° con respecto a la dirección preferente de la carga origina la aparición casi inmediata de grietas transversales (paralelas a las fibras) en la lámina a 90°, que alcanzan la interfase con la lámina vecina, presumiblemente a 0°. Esto puede originar la bifurcación de la grieta, que se propaga ahora en forma de delaminación entre las dos láminas. El objetivo de este estudio es el caracterizar el estado tensional en el fondo de la grieta de delaminación para diferentes longitudes de la misma. Ello es el primer paso para establecer los criterios de Mecánica de la Fractura que deben ser aplicados en la predicción de la aparición y propagación de este tipo de daño.

Abstract: The presence in a laminate of laminae oriented 90 degrees with respect to the preferent direction of load generates almost immediately the appearance in these laminae of cracks transversal to the load (parallel to the fibres in the lamina). These cracks reach the interface with the neighbour lamina, which is usually oriented 0 degrees. This can originate the bifurcation of the crack, which appears now propagating as a delamination crack between the two laminae. The objective of this study is to characterize the stress state at the tip crack of the delamination crack for different lengths of the crack. This is the first step to establish appropriate criteria based on Fracture Mechanics to predict the appearance and growth of this type of damage.

1.- INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de métodos fiables de predicción de fallo en materiales compuestos es quizás una de las mayores dificultades cuando se diseñan estructuras y componentes de material compuesto. El análisis estructural de componentes reales de material compuesto conlleva generalmente el uso de elementos finitos para tomar en consideración geometrías complejas así como la presencia de anisotropías del material.

El fallo de la estructura es predicho mediante la satisfacción de un criterio. Para los materiales compuestos, numerosos criterios de fallo han sido propuestos e implementados

en códigos de elementos finitos. Estos criterios no tienen base física que pueda correlacionarse con la estructura interna de los materiales compuestos. En particular, no toman en consideración el hecho de que antes del fallo catastrófico, los materiales compuestos están sujetos a daño progresivo micro-estructural en forma de grietas en la lámina, delaminaciones, roturas de fibras o despegue de fibra y matriz.

Los criterios de fallo (la mayoría en términos de tensiones) son aplicados a campos tensionales estimados bajo la suposición de que el material no ha sufrido daño. Así, la transferencia de carga que se produce debida al daño local inducido por la relajación de deformaciones asociadas a la concentración de tensiones, no es tomada en consideración. Este fenómeno es en gran medida responsable de la falta de acuerdo entre las expectativas de comportamiento basadas en ausencia de daño y el comportamiento real. El uso de modelos de fallo que tomen en consideración la relajación de deformaciones producidas por daño conducirá a diseños más eficientes.

El progreso futuro en la predicción de fallo de los materiales compuestos sólo será posible si dichas predicciones están basadas en mecanismos de daño que ocurren antes del fallo catastrófico de la estructura. De dichos mecanismos anteriormente mencionados, en este trabajo se considera la delaminación entre láminas de un laminado $0^\circ/90^\circ$.

Aunque los laminados presentan láminas mayoritariamente orientadas a 0° con respecto a la dirección preferente de la carga, resulta necesaria la inclusión de algunas láminas a 90° que resultarán vecinas a las orientadas a cero grados. Para valores muy pequeños de la carga las láminas a 90° experimentarán fisuración generalizada perpendicular a la carga (paralela a las fibras de la lámina).

La coalescencia de estas microgrietas da lugar a la aparición de una macrogrieta que se detiene al llegar a la lámina a 0° debido a la presencia de fibras perpendiculares a la misma. Ello conlleva la posibilidad de que se produzca una bifurcación en la grieta que ahora se propagaría entre las láminas a 0° y 90° produciendo la delaminación de las mismas.

El estado tensional que se origina en el entorno de este tipo de grietas es muy complejo y ha generado la atención de numerosos investigadores (Ting y Hoang¹ y Tewary y Kriz² entre otros). En el estudio que aquí se presenta se pretende caracterizar estas grietas de delaminación entre las láminas a 0° y 90° . Ello conlleva dilucidar el carácter singular de las componentes del estado tensional para establecer el modo de propagación de la grieta en términos de la Mecánica de la Fractura.

2.- PROBLEMA ANALIZADO

En la figura 1 se representan la geometría y cargas del problema analizado. Se trata de una configuración de laminado $0^\circ/90^\circ$ simétrico. La sollicitación es un desplazamiento impuesto en el contorno superior $u_y=0.1\text{mm}$. En dirección perpendicular a la carga existe una grieta en la lámina 90° .

Se ha considerado la hipótesis de deformación plana y se ha analizado el caso sin grieta interlaminar ($d=0$, problema P1) así como dos casos con longitudes de grieta interlaminar

diferentes ($d=0.1L$ y $d=0.5L$, problemas P2 y P3 respectivamente, siendo L la longitud de las láminas en la figura 1 en la dirección y).

Los resultados que se presentan aquí corresponden a una modelización sin considerar el efecto de la fricción entre las posibles zonas de contacto que puedan aparecer entre los labios de la grieta.

Las características del material son:

$$\begin{aligned} E_{11} &= 45600 \text{ MPa} & E_{22} &= E_{33} = 16200 \text{ MPa} \\ \nu_{12} &= \nu_{13} = 0.278 & \nu_{23} &= 0.4 \\ G_{12} &= G_{13} = 5830 \text{ MPa} & G_{23} &= 5786 \text{ MPa} \end{aligned}$$

siendo 1 la dirección de la fibra.

El estudio se ha realizado empleando el Método de los Elementos de Contorno, París y Cañas³. Se han utilizado elementos lineales continuos (con los nodos en los extremos de los elementos) y con un tamaño mínimo aproximado de 10^{-9} mm en el vértice de la grieta.

Para el caso de contacto entre los labios de la grieta se ha utilizado el algoritmo que impone las condiciones de contacto en forma débil, Blázquez et al⁴.

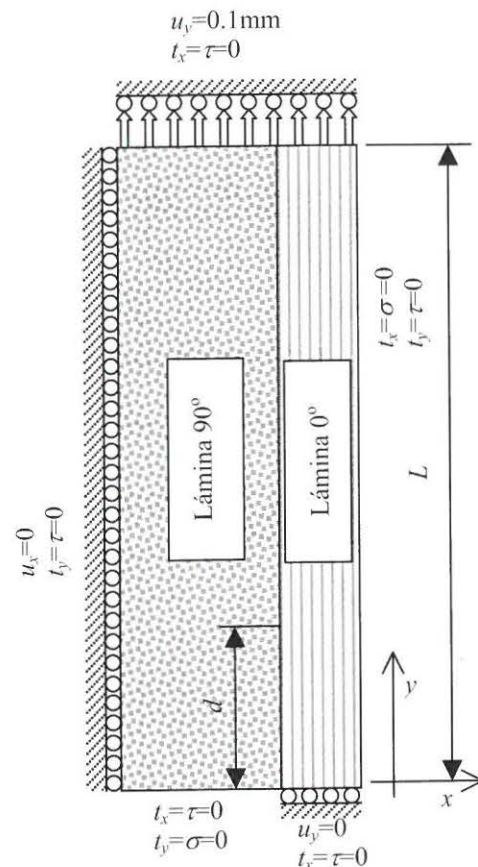


Fig. 1. Geometría del problema.

3.- COMENTARIOS Y RESULTADOS

En la figura 2 se presentan los resultados para el problema P1 ($d/L=0$). En dicha figura se incluyen la distribución de tensiones σ_{xx} , σ_{yy} (para ambas láminas) y σ_{xy} a lo largo de la interfase entre las láminas. También se representa la deformada (en ella, los desplazamientos u_x se han escalado por un factor de 5). Debe puntualizarse que el grado de aproximación en la componente σ_{xy} del tensor de tensiones es menor que en el resto de las componentes, dado que aquellas aparecen directamente en la formulación de Elementos de Contorno, mientras que ésta se ha calculado a posteriori a partir de los desplazamientos de los nodos, París y Cañas³.

Como puede observarse en la figura 2, las tres componentes del tensor de tensiones tienen carácter singular, como era esperable. Realizado un postprocesado de la solución obtenida en los nodos cercanos al vértice de la grieta, se han obtenido las características para dichas singularidades mostradas en la tabla 1, donde λ representa el orden de la singularidad, K el

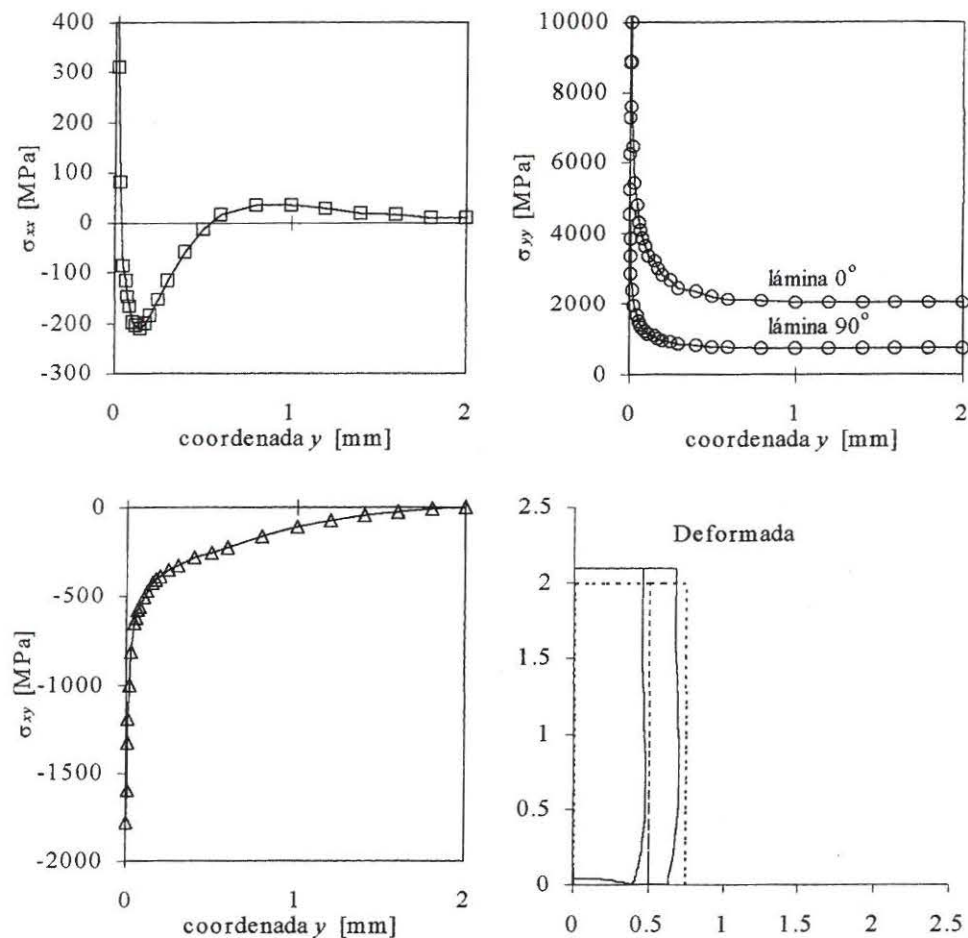


Fig. 2. Resultados para el problema P1 (sin grieta interlaminar).

peso de la misma y r^2 el coeficiente de regresión. La evolución más complicada de entender es la correspondiente a σ_{xx} cuyo cambio de signo (de tracción a compresión) puede ser entendido observando la deformada que se ha incluido en la figura 2.

	λ	K	r^2
Distribución σ_{xx}	0.438	206.32	0.999904
Distribución σ_{yy}	0.4373	740.78	0.999940
Distribución σ_{xy}	0.4372	172.38	0.999975

Tabla 1. Características de la singularidad para el problema P1 (sin grieta de interfase).

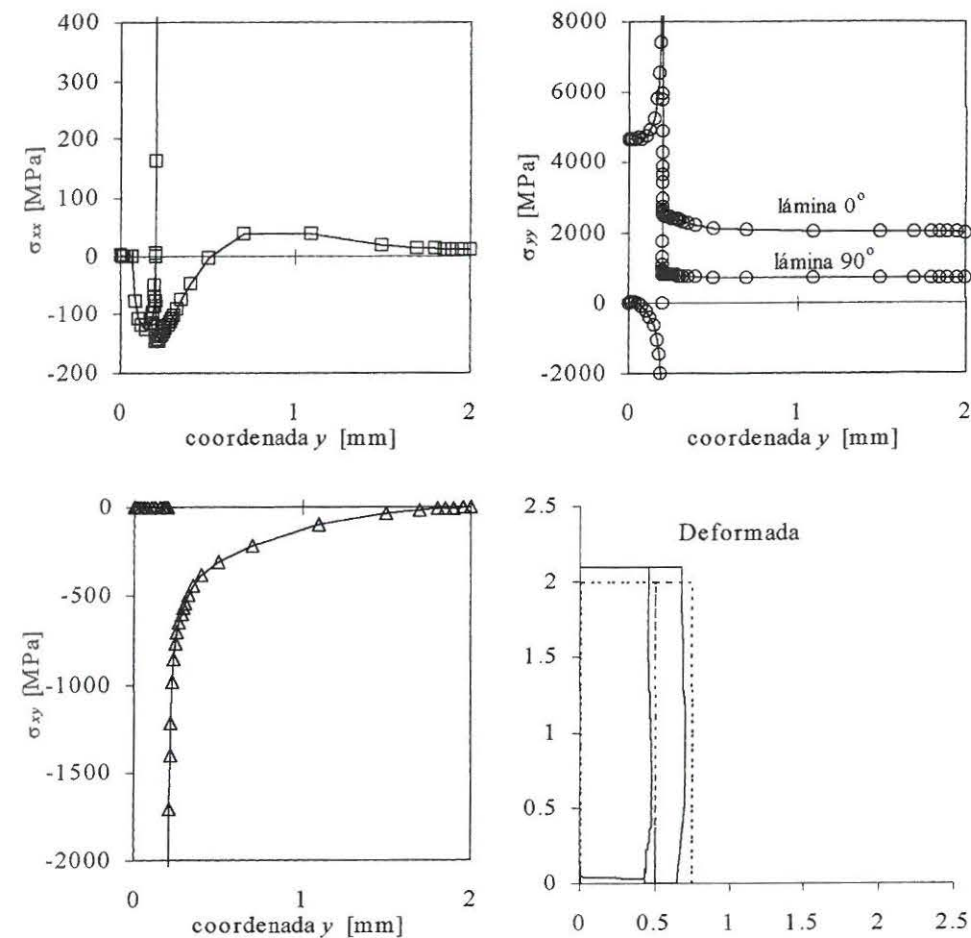


Fig. 3. Resultados para el problema P2 (caso $d/L=0.1$).

En la figura 3 se presentan los resultados correspondientes al caso $d/L=0.1$. Estos resultados pueden resultar complicados de entender debido, fundamentalmente, a dos razones:

- En la zona del vértice de la grieta se obtienen valores muy altos y localizados de σ_{xx} , que parece tener carácter singular. Además estos valores son de tracción, mientras que dicha zona está, en este caso, situada en una zona de tensiones nominales de compresión. En la figura 4 se muestra un detalle de dicha evolución en esta zona.
- En acuerdo con la evolución de las tensiones σ_{xx} , en el entorno del fondo de grieta, donde como se puede observar en la figura 4 hay una zona en que las tensiones son nulas, aparece una separación de los contornos de las dos láminas tal como puede observarse en la configuración de desplazamientos que aparece en la figura 5. La morfología de esta especie de burbuja que se genera en el fondo de grieta es absolutamente similar a las predichas por los estudios analíticos de Comninou y Schmuesser⁵ y Gutesen y Dundurs^{6,7}. La única cuestión es que analíticamente se predice la aparición de una zona de contacto entre los labios de la grieta en la zona del fondo de la misma, zona que no es detectada en el análisis

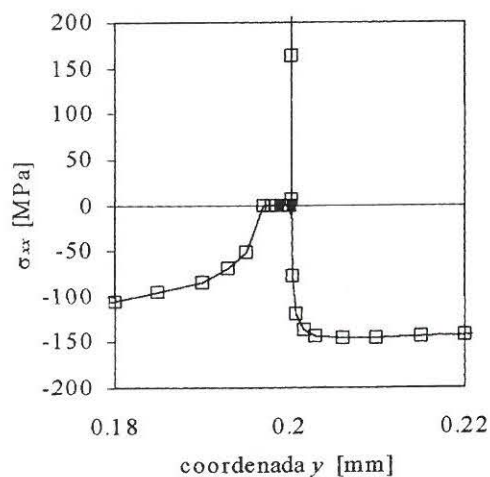


Fig. 4. σ_{xx} en el vértice de la grieta.

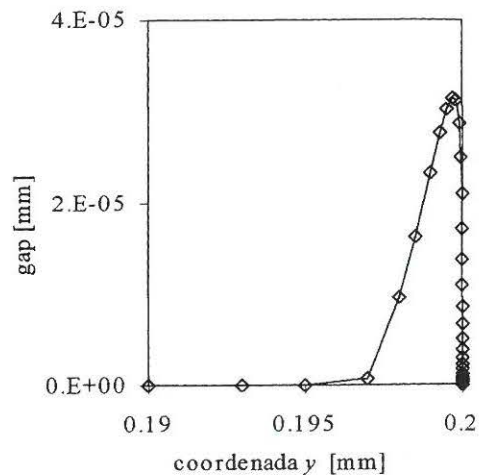


Fig. 5. Separación en el vértice de la grieta.

numérico. Una estimación de esta zona en función de las propiedades de las láminas y utilizando las expresiones analíticas indica que el tamaño de la zona de contacto sería del orden de 10^{-70} en relación al tamaño de la longitud de la grieta. Al no detectarse esta zona en el análisis numérico (zona cuya presencia indicaría valores de σ_{xx} de compresión) ello conduce a una distribución aparentemente singular en σ_{xx} y σ_{xy} en concordancia con el carácter abierto de la grieta. En cualquier caso, puede observarse a través de los valores deducidos del análisis numérico para la caracterización de los valores singulares de σ_{xx} y σ_{xy} , tabla 2, el carácter virtual de la singularidad asociada a σ_{xx} en relación al carácter real de la singularidad asociada a σ_{xy} .

	λ	K	r^2
Distribución σ_{xx}	0.6206	1.4220	0.99976
Distribución σ_{xy}	0.4911	131.4	0.99955

Tabla 2. Características de la singularidad para el problema P2 ($d/L=0.1$), $\mu=0$.

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos para el problema P3 ($d/L=0.5$). Ahora el vértice de grieta se sitúa en una zona de tensiones nominales de tracción. Lo más destacable de estos resultados es que, localmente, son muy similares a los obtenidos para el problema P2, donde las tensiones nominales son de compresión. Ello explica que el tamaño de la burbuja en el vértice de la grieta haya aumentado, como también lo ha hecho la separación entre los labios de la grieta. También han disminuido los valores máximos de la tensión σ_{xx} , conforme con el hecho de que el tamaño de la zona de contacto ha aumentado. En cualquier caso, los comentarios realizados sobre los resultados obtenidos para el problema P2 son aplicables también ahora.

La forma de la burbuja que se genera en el vértice de la grieta se muestra en la figura 7. Un detalle de la distribución de tensiones σ_{xx} en la zona del vértice de la grieta se muestra en la figura 8. En ellas puede apreciarse la semejanza con las figuras 5 y 4 respectivamente.

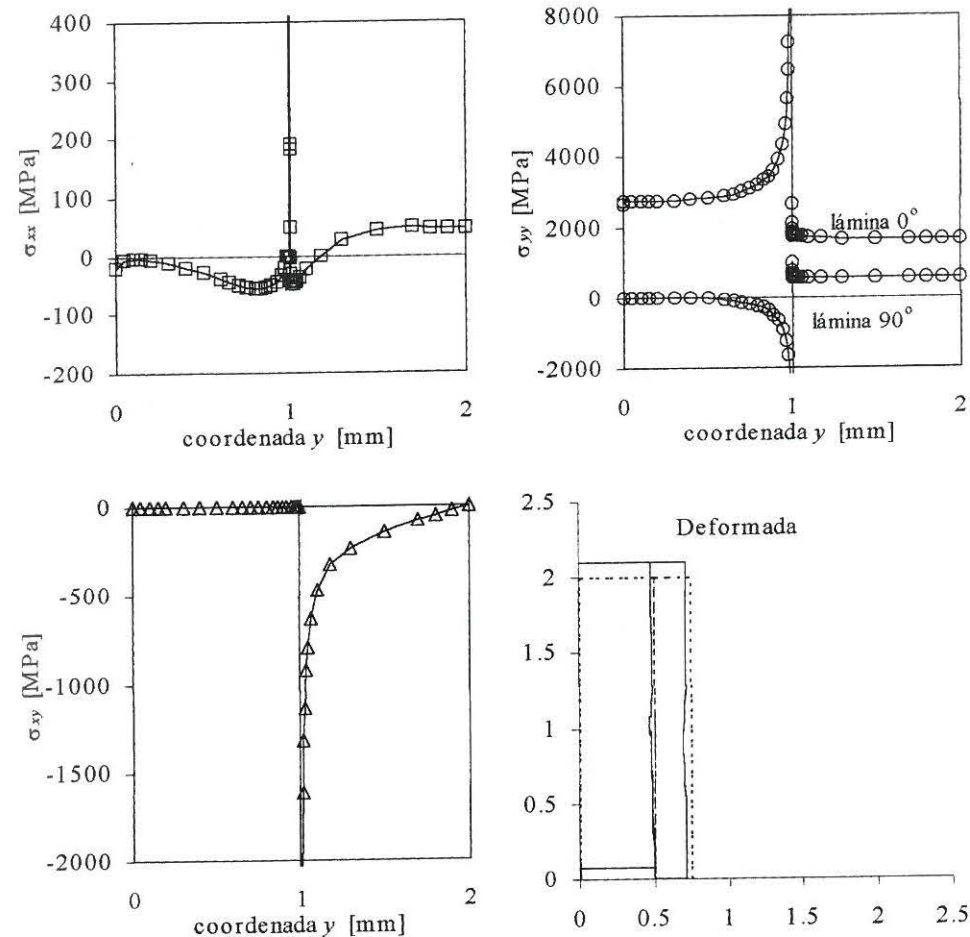


Fig. 6. Resultados para el problema P3 (caso $d/L=0.5$).

4.- CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio sobre el estado tensional en el entorno de una grieta de delaminación entre dos capas de 0° y 90° para diferentes longitudes de grieta. Ello en presencia de grietas transversales a la dirección de la carga en la lámina a 90° , grietas que plausiblemente aparecen para niveles de carga muy bajos. Tomando como referencia un problema sin grieta interlaminar, se han estudiado dos problemas. El primero de ellos con una longitud de grieta interlaminar tal que el vértice de la misma se coloca en una zona de tensiones nominales de compresión. En el segundo problema el vértice de grieta se sitúa en una zona de tensiones nominales de tracción.

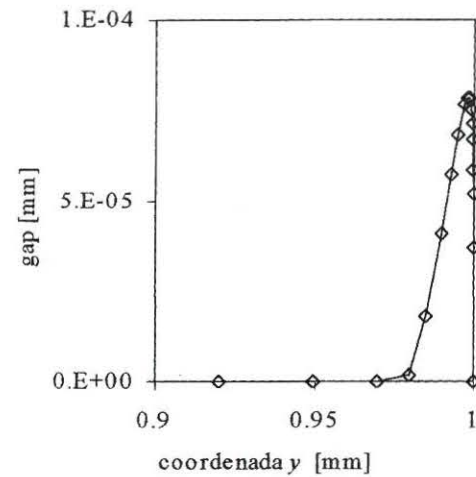
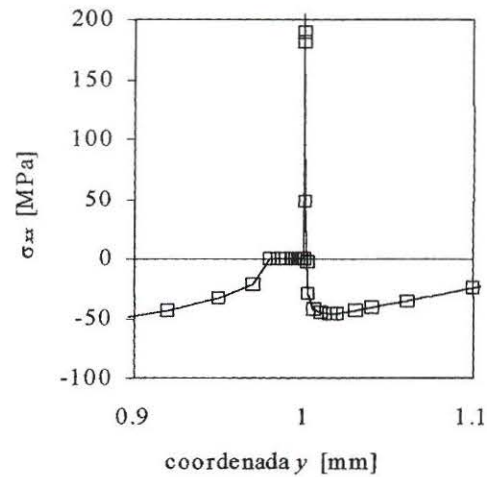


Fig. 7. Separación en el vértice de la grieta.

Fig. 8. σ_{xx} en el vértice de la grieta.

En el estudio realizado se ha observado que la forma local de la distribución de tensiones en el vértice de la grieta es similar para ambos problemas. La distribución de tensiones normales de contacto es aparentemente singular dada la imposibilidad de recoger (con la discretización utilizada) la zona de contacto que, según predicen estudios analíticos, se forma en el vértice de la grieta. No obstante el estudio de estas singularidades lleva a pensar que, efectivamente, el carácter singular de las σ_{xx} es sólo aparente. No ocurre lo mismo con las σ_{xy} , cuyo carácter es claramente singular. Ello incitaría a pensar que la propagación de la grieta se produciría predominantemente en modo II. Las burbujas que se forman en la zona del vértice de la grieta son de características similares para los dos problemas, y apoyan la comparación realizada con los estudios analíticos referidos.

5.- REFERENCIAS

1. Ting, T.C.T. y Hoang, P. H. (1984), Singularities at the Tip of a Crack Normal to the Interface of an Anisotropic Layered Composite, *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 20, N° 5, pp. 439-454.
2. Tewary V. K., Kriz R. D. (1991), Generalized Plane Strain Analysis of Bimaterial Composite a Free Surface Normal to the Interface, *J. of Material Research*, Vol. 13, pp. 2609-2622.
3. París F., Cañas J. (1997), *Boundary Element Method*, Oxford Univ. Press.
4. Blázquez A., París F., Mantič, V. (1998), BEM solution of two-dimensional contact problems by weak application of contact conditions with non-conforming discretizations. *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 35, N° 24, pp. 3259-3278.
5. Comninou M., Schmueser D. (1979), The Interface Crack in a Combined Tension-Compression and Shear Field, *J. Applied Mechanics*, Vol. 46, 345-348.
6. Gautesen A.K., Dundurs J. (1987), The Interface Crack in a Tension Field, *J. Applied Mechanics*, Vol. 54, 93-98.
7. Gautesen A.K., Dundurs J. (1988), The Interface Crack under Combined Loading, *J. Applied Mechanics*, Vol. 55, 580-586.