

A. Barroso, J.C. Marín, V. Mantič, F. París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, ETS Ingeniería, Universidad de Sevilla, España.  
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla

## Eliminación de singularidades en ensayos estándar de materiales compuestos

### RESUMEN

**Historia del artículo:**

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

**Keywords:**

Singularidades de tensión

Ensayo

Off-axis

Resistencia a compresión

Resistencia bimaterial

En muchas situaciones de ensayo de probetas de material compuesto, sobre todo aquellas que necesitan tacos en los extremos de la probeta, aparecen configuraciones de esquinas multimateriales, con cambio brusco de geometría y propiedades mecánicas, donde las tensiones alcanzan valores muy altos y teóricamente se hacen infinitas. Estas intensificaciones de tensiones pueden provocar fallos prematuros o simplemente alteraciones del estado uniforme de tensiones que se pretende generar en la probeta, de manera que la resistencia del ensayo, calculada como una cierta carga dividida por una cierta área de fallo, puede no ser representativa de la resistencia real del material que se pretende determinar.

En el presente trabajo se muestran tres ejemplos prácticos en los que con una adecuada selección de los parámetros geométricos de la configuración de ensayo que no afectan a la determinación de la propiedad a calcular, se pueden eliminar (o disminuir al mínimo posible) las singularidades de tensiones inducidas en dichas esquinas. Los casos analizados son: a) los ensayos de resistencia a la tracción y cortadura (Iosipescu) en probetas bimateriales, b) el ensayo off-axis para la determinación de la resistencia intralaminar a cortadura de materiales compuestos y c) un ensayo de compresión de laminados unidireccionales de gran espesor. En dos de los tres casos se dispone de resultados experimentales y se ha corroborado que la eliminación de las singularidades en las esquinas multimateriales da lugar a valores de resistencia mayores que las obtenidas con las configuraciones originales de las probetas de ensayo.

## Removing stress singularities in standard tests of composite materials.

### ABSTRACT

**Keywords:**

Stress singularities

Test

Off-axis

Compression strength

Bimaterial strength

In many standard tests involving composite material, specially those needing tabs at the ends of the sample, configurations of multimaterial corners, with abrupt changes in geometry and material properties, typically appear giving rise to stress fields which achieve very high stresses and theoretically are unbounded. These stress intensifications may promote premature failures, or simply, alterations of the uniform stress state which is expected to occur in the specimen, and the test strength, calculated as a certain load divided by a certain failure area, may not be representative of the real strength of the material under analysis.

In the present work three examples are presented, in which, by means of an adequate selection of the geometrical parameters defining the test configuration which do not affect the mechanical property to be measured, the stress singularities at these multimaterial corners are removed (or at least reduced to a minimum). The three cases are: a) tests in tension and shear (Iosipescu) in bimaterial coupons, b) the off-axis test for the intralaminar shear strength in composite materials and c) a compression test of thick laminates in composite materials. In two of the three cases experimental results are available to corroborate that the removal of the stress singularities gives rise to higher strength values than those obtained in the original test configurations.

## 1 Introducción.

En muchos ensayos estandar con materiales compuestos es necesario el uso de tacos pegados en los extremos de la probeta para introducir la carga en la misma de forma suave. Las normas de ensayo, y la buena práctica en el laboratorio, indican que cuando la rotura de la probeta se inicia en (o en las proximidades) de los tacos, el resultado del ensayo debe descartarse, o tomarse con reservas. Esto es debido a que las concentraciones de tensión que se inducen en estos puntos críticos, donde confluyen varios materiales, puede inducir un fallo prematuro de la probeta o simplemente, alterar el estado tensional uniforme que se pretende generar en la probeta. Así pues, el valor de la resistencia puede no ser plenamente representativo de la resistencia real del material. Así mismo, la determinación de la resistencia de interfases entre materiales también es problemática en este aspecto, dado que las probetas bajo ensayo presentan cambios bruscos en las propiedades de los materiales, originando igualmente singularidades de tensión que alteran el valor medido de resistencia que pretende ser evaluado.

Formalmente, y realizando un análisis elástico lineal del estado tensional que aparece en geometrías donde confluyen varios materiales (el caso de los tacos y las probetas bimateriales), las tensiones son singulares [1,2]. El orden de la singularidad depende de la geometría local de la esquina multimaterial, de las propiedades mecánicas de los materiales y de las condiciones de contorno locales.

Dado que las propiedades de los materiales no se pueden alterar, en este trabajo se pone de manifiesto cómo, con una adecuada alteración local de la geometría de la probeta en los puntos en los que los tacos se pegan a la probeta se constata que la eliminación de estas configuraciones que dan lugar a tensiones singulares, originan un aumento de la carga de fallo de la probeta, aumentando así el valor de resistencia medida de los materiales bajo ensayo.

En el presente trabajo se realiza primero una pequeña introducción, en la Sección 2, sobre el origen y cálculo de órdenes de singularidad de tensiones en puntos donde confluyen varios materiales (esquinas multimateriales) y se van a presentar tres ejemplos.

Como primer ejemplo, en la Sección 3, se muestra la determinación de la resistencia a tracción y a cortadura de una interfase entre dos materiales de distinta naturaleza, uno de ellos siendo un laminado de carbono unidireccional y el otro un material polimérico.

Como segundo ejemplo, en la Sección 4, se muestra el ensayo off-axis, empleado para la determinación de la resistencia intralaminar en materiales compuestos y cómo la geometría adecuada del taco depende de la orientación seleccionada para el laminado unidireccional bajo ensayo.

Por último, en la Sección 5 se presenta como tercer ejemplo, un ensayo de compresión en laminados unidireccionales de gran espesor, en los que la carga, además de aplicarse directamente como una compresión en los extremos de la probeta, requiere el uso de tacos para introducir parte de la misma mediante cortadura.

En los tres casos se presentan modificaciones locales de la geometría en torno a los puntos donde los distintos materiales se encuentran para eliminar las singularidades de tensión que se generan y así aumentar la carga de fallo de las probetas.

## 2 Singularidades de tensión.

En las configuraciones de probetas analizadas en este trabajo hay siempre presente una confluencia de materiales en un mismo punto, bien sea por la presencia de los tacos, bien sea por la propia unión de varios materiales entre sí (sin presencia de tacos), o por las condiciones de contorno en una geometría de esquina. En estos puntos, donde la propiedades de los materiales cambian bruscamente, se generan estados tensionales singulares. Tomando como origen de un sistema de coordenadas polar  $(r, \theta)$  el punto donde confluyen los materiales, la representación asintótica del estado tensional se puede expresar, con separación de variables, de acuerdo a la ecuación

$$\sigma_{\alpha\beta}(r, \theta) = \sum_k K_k r_{\alpha\beta}^{-\delta_k} f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta) \quad (1)$$

donde  $K_k$  son los Factores Generalizados de Intensificación de Tensiones,  $\delta_k$  (con  $0 < \delta_k < 1$ ) son los órdenes de singularidad de tensiones y  $f_{\alpha\beta}^{(k)}(\theta)$  son las funciones angulares características. Como las propiedades mecánicas de los materiales bajo ensayo no se pueden alterar, la supresión (o disminución) de los órdenes de singularidad se ha llevado a cabo mediante la alteración local de la geometría de las esquinas multimateriales o bien mediante el cambio de propiedades mecánicas de los elementos secundarios de ensayo (tacos y adhesivos).

En la expresión anteriormente introducida (1), son excepcionales los casos en los que esta representación tensional asintótica no admite separación de variables  $(r, \theta)$  estando dichos casos fuera del ámbito de este trabajo.

Para la determinación de los órdenes de singularidad de tensiones se ha empleado un código de desarrollo propio, ver [1,2] para todos los detalles de la implementación y limitaciones del mismo. Este código permite cualquier número de materiales confluyendo a la esquina, diferentes condiciones de contorno, diferentes leyes constitutivas y condiciones de contacto entre los distintos materiales bien de adhesión perfecta, bien de contacto con fricción.

## 3 Ensayos de tracción y cortadura en uniones bimateriales.

Una cuestión recurrente en la predicción del fallo en uniones adhesivas es la determinación de las propiedades de resistencia (típicamente a tracción y cortadura) de las interfases de unión entre los materiales. El uso de probetas estandar de tracción y cortadura con presencia de los dos



materiales, genera esquinas bimateriales que originan singularidades de tensión.

En el caso analizado en este trabajo uno de los materiales es fibra de carbono unidireccional (CFRP, AS4-8552) y el otro un adhesivo estructural (FM-73M0.6), cuyas propiedades mecánicas son, respectivamente:  $E_{11}=141.3$  GPa,  $E_{22}=E_{33}=9.58$  GPa,  $G_{12}=G_{13}=5.0$  GPa,  $G_{23}=3.5$  GPa,  $\nu_{12}=\nu_{13}=0.3$ ,  $\nu_{23}=0.32$  para el compuesto (donde el subíndice "1" para el material compuesto define la dirección de la fibra) y  $E=3.0$  GPa,  $\nu=0.35$  para el adhesivo.

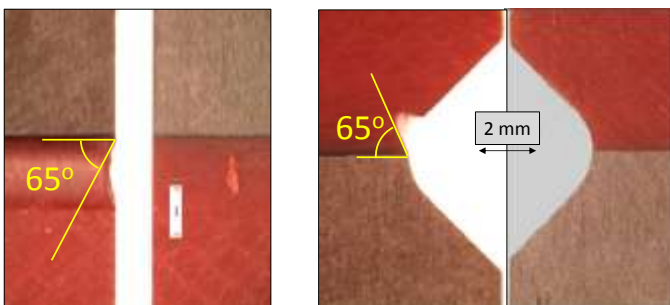
Tanto en la configuración del ensayo de tracción de la probeta bimaterial, como en el de la probeta losipescu, para el ensayo de cortadura, la esquina bimaterial consta, localmente, de dos sectores sólidos de  $90^\circ$  cada uno, uno del material compuesto con la dirección de la fibra perpendicular a la interfase de los dos materiales y otro del adhesivo.

Esta configuración presenta un único término singular en (1) con un valor del orden de la singularidad de  $\hat{\alpha}=0.219697$ .

Modificando el ángulo sólido del lado del adhesivo (por ser más fácilmente mecanizable que el material compuesto), se obtiene que para un ángulo de  $65^\circ$ , el orden de singularidad se hace nulo.

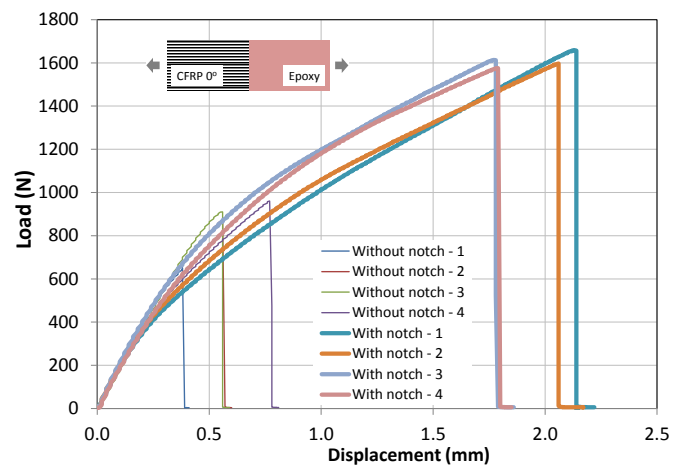
En la figura 1 se muestra un detalle de las configuraciones originales y modificadas de la interfase entre ambos materiales, con el ángulo de  $65^\circ$  en el lado del adhesivo (de color rojo), de las probetas de tracción (izquierda) y cortadura (derecha).

Este mecanizado sólo afecta localmente a la geometría de la esquina y no altera significativamente la geometría global de las probetas. En el caso de tracción, el mecanizado entra en la probeta unas décimas de mm, mientras que en la probeta de cortadura lo hace apenas un mm hacia el interior de la probeta, tal y como puede apreciarse en el detalle de la figura 1.



**Figura 1.** Detalle de la geometría local de la esquina bimaterial para las probetas de tracción (izquierda) y cortadura (derecha).

Los resultados del ensayo de tracción de las probetas con entalla (sin singularidad de tensiones) y sin entalla (con singularidad de tensiones) se muestran en la figura 2. Se observa con claridad cómo la resistencia a tracción de las probetas con entalla casi duplica el valor obtenido para las probetas sin entalla.



**Figura 2.** Resultados del ensayo de tracción de la configuración bimaterial sin entalla (trazo fino) y con entalla (trazo grueso).

Este es el resultado más llamativo del efecto de eliminar las singularidades en la esquina bimaterial de todos los ensayos llevados a cabo en este primer caso. También se llevaron a cabo ensayos de tracción con la parte del material compuesto teniendo la orientación de la fibra paralela a la interfase (no perpendicular, como el caso mostrado en la figura 2) así como ensayos de cortadura empleando el ensayo losipescu, tanto con la fibra perpendicular, como paralela a la interfase entre los dos materiales.

En la otra configuración del ensayo de tracción (con la fibra paralela a la interfase), el aumento de la resistencia a tracción observado fue inferior, pero también muy significativo, estando dicho aumento en torno a un 35%. Sin embargo, en los ensayos de cortadura, con independencia de la orientación de la fibra del lado del material compuesto (paralela o perpendicular a la interfase), no se observaron variaciones significativas del valor de la resistencia a cortadura.

El análisis en detalle de los resultados de ensayo de este problema se desarrolla en [3].

#### 4 Ensayo off-axis. Resistencia a cortadura intralaminar en materiales compuestos.

El ensayo off-axis, que puede emplearse para la determinación de la resistencia a cortadura intralaminar de materiales compuestos unidireccionales de fibra larga, es un ensayo ampliamente utilizado.

Es bien conocida la problemática asociada a este ensayo en lo que respecta a la influencia de las restricciones a los desplazamientos en los extremos de la probeta, que inducen un estado no uniforme de tensiones afectando a la zona central de la probeta (donde se sitúan los dispositivos de medida).

Existen diferentes enfoques para solventar estos problemas [4], entre los cuales destaca la propuesta de Sun y Chung [5] que consiste en el uso de tacos oblicuos en los extremos de la



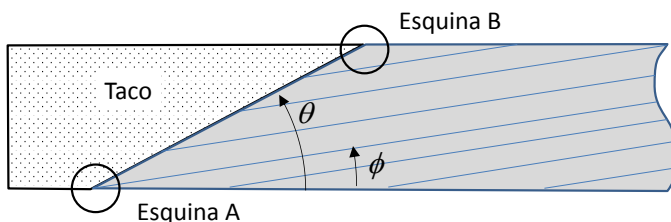
probeta, coincidiendo con las líneas de isodesplazamientos longitudinales de la probeta.

El problema es que la inclinación de estos tacos depende de las propiedades mecánicas del material bajo ensayo, incluyendo una de las propiedades que se pretende determinar en la propia realización del ensayo, el módulo de cortadura intralaminar  $G_{12}$ .

Además, la solución del problema, incluyendo las líneas de isodesplazamiento longitudinal, depende de la orientación de la fibra, que puede ser diferente a  $10^\circ$ .

Para cada orientación ( $\phi$ ) de la fibra fuera del eje de tracción, las líneas de isodesplazamiento, y por tanto el ángulo óptimo de los tacos ( $\theta$ ) es diferente.

Este hecho, que es bien conocido en la literatura, se va a justificar en el presente trabajo desde un enfoque de tensiones singulares. Suponiendo un empotramiento perfecto en todos los puntos del taco, el esquema del problema de la determinación de las singularidades de tensión se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Puntos con singularidades de tensión en los extremos de la probeta del ensayo off-axis.

En dicho problema aparecen dos puntos críticos (denominados “Esquina A” y “Esquina B” en la figura 3) en los que aparecen singularidades de tensión. Si bien, no se trata en este caso de una singularidad generada por la confluencia de varios materiales de propiedades mecánicas diferentes, la configuración generada en este caso por las condiciones de contorno (empotrado en el tacón, y libre en los bordes laterales de la probeta) también origina tensiones no acotadas en dichos puntos.

La presencia de estos puntos singulares en la configuración del ensayo puede afectar, sobre todo, a la determinación de la resistencia a cortadura del material. Un fallo prematuro, originado por la presencia de estas tensiones singulares puede enmascarar el valor real de resistencia del material.

El estudio llevado a cabo consiste en determinar, para cada orientación de la fibra ( $\phi$ ) el ángulo del taco ( $\theta$ ) para el cual la singularidad de tensión se hace nula.

Si bien, como se indicaba en la figura 3, existen dos puntos críticos con singularidades de tensión, la estructura interna del material hace que sólo los fallos originados en la esquina A puedan originar el fallo catastrófico de la probeta.

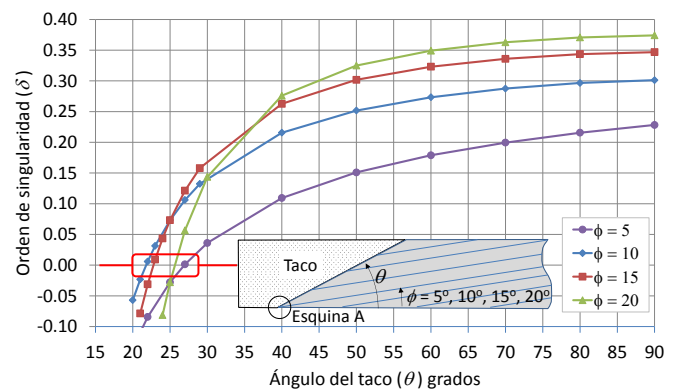
Si el fallo se inicia en la esquina A, éste puede progresar, por cortadura, a lo largo de la matriz (paralelo a la dirección de la fibra) y cruzar de lado a lado hasta provocar el fallo completo de la probeta.

Si el fallo se inicia en la esquina B, la progresión del mismo hacia el otro lado de la probeta no es factible en la práctica, pues implicaría el fallo de la fibra, cuyo valor de resistencia es como mínimo un orden de magnitud superior al del fallo de la matriz. Por tanto, en lo que sigue, sólo se presentan los resultados asociados a la esquina A.

En la figura 4 se muestran los órdenes de singularidad de tensiones en la esquina A para 4 configuraciones diferentes del ensayo con 4 orientaciones diferentes de fibras ( $\phi=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$  y  $20^\circ$ ).

Para cada orientación de la fibra, se calculan los órdenes de singularidad de tensiones para cada ángulo del taco oblicuo ( $\theta$ ).

Los ángulos de taco considerados, parten (en el extremo derecho de la figura 4) desde la configuración del taco recto ( $\theta=90^\circ$ ), hasta (viajando por el eje x hacia la izquierda) el valor de la inclinación del taco que hace que el orden de la singularidad se anule (señalado dentro de un marco rojo en la figura 4).



**Figura 4.** Resultados de las singularidades de tensión para el ensayo off-axis con tacos oblicuos.

Los valores de inclinación de los tacos para los cuales desaparecen las singularidades de tensión junto con los teóricos para las líneas de isodesplazamiento, se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Orientaciones teóricas, de singularidad nula y desviaciones angulares de los ángulos de los tacos.

$\phi$ ( $^\circ$ )	$\theta$ teórico ( $^\circ$ )	$\theta$ singularidad nula ( $^\circ$ )	Desviación ( $^\circ$ )
5	29.6	27.0	-2.6
10	23.1	22.0	-1.1
15	24.2	22.5	-1.7
20	27.5	26.0	-1.5

Las diferencias entre los valores del ángulo  $\theta$  de la solución teórica de las líneas de isodesplazamiento y las que conducen a un orden de singularidad nulo son pequeñas en todos los casos ( $<3^\circ$ ), siendo en cualquier caso mínima para la configuración de fibra a  $10^\circ$ . Por tanto, la configuración de





ángulo de fibra  $\phi=10^\circ$  y ángulo de taco  $\theta=22^\circ$  podría considerarse como la configuración óptima del ensayo.

## 5 Determinación de la resistencia a compresión en laminados de gran espesor.

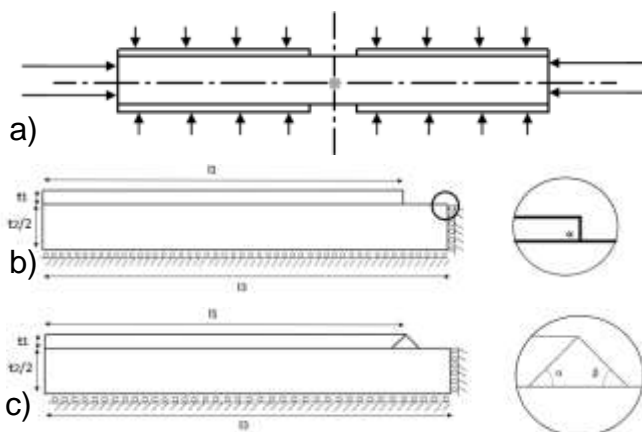
El tercer ejemplo donde la aplicación del enfoque de la eliminación de configuraciones que dan lugar a tensiones singulares ha sido significativo es el ensayo de compresión en laminados de gran espesor.

En este problema, además de la compresión directa en los extremos de la probeta, es necesaria la introducción de carga de compresión mediante cortadura a través de unos tacos pegados en los extremos de la probeta, para lo cual además, se hace necesaria la compresión lateral de las mordazas para aumentar en la medida de lo posible, dicha transmisión de esfuerzos por cortadura.

Este método de ensayo fue propuesto y analizado experimentalmente por el Imperial College London, para más detalles ver [6].

La problemática asociada a la realización del ensayo consistía básicamente en el fallo prematuro que la compresión lateral ejercida sobre los tacos, provocaba en la probeta sometida a compresión justo en el borde del taco. Los tacos de fibra de vidrio, originalmente con un acabado recto, generaban en su pegado con la probeta de ensayo, una configuración de esquina bimaterial que presentaba singularidad de tensiones. La propuesta de modificación consistía en alterar localmente la geometría del taco.

En la figura 5 se muestran, a) un esquema general del ensayo de compresión, b) un detalle de la configuración local del taco en la situación de partida, con el acabado recto, c) el mismo detalle de la modificación propuesta, empleando un relleno con adhesivo.



**Figura 5.** a) Configuración del ensayo de compresión, b) detalle de la terminación original del taco, c) detalle de la terminación propuesta.

En la figura 5a se observa la compresión directa a través de los extremos de la probeta, así como la compresión lateral a través de los tacos. En la situación original (figura 5b) la

terminación recta ( $90^\circ$ ) de la configuración del taco de fibra de vidrio, genera una singularidad de tensión con valor próximo al que aparece en una grieta de un material isótropo ( $\approx 0.5$ ).

En la configuración final propuesta en [6] (figura 5c), se modifica localmente la terminación del taco, para que forme  $45^\circ$  y además se rellena el hueco que surge con adhesivo, que a su vez también forma  $45^\circ$  con la probeta de ensayo (ver detalle en figura 5c).

Del ensayo de las configuraciones original y modificada, presentados en [6], se desprende que la terminación propuesta mejora (aumenta) los valores de resistencia a la compresión del material bajo ensayo ( $T300/914$ ,  $E_{11}=129$  GPa,  $E_{22}=E_{33}=8.4$  GPa,  $G_{12}=G_{31}=4.2$  GPa,  $G_{23}=3$  GPa,  $\nu_{21}=\nu_{31}=0.02$ ,  $\nu_{32}=0.4$ ) justificando dicho aumento por la disminución de las tensiones generadas en la terminación del taco. La justificación de esta modificación se realiza mediante un análisis de elementos finitos.

En el presente trabajo dicho análisis se ha realizado, como en los casos anteriores mediante un enfoque basado en el cálculo de los órdenes de singularidad de tensiones que aparecen en las distintas configuraciones.

Para ello y tomando como base la configuración de la modificación propuesta, se hizo un análisis paramétrico para ver cuál era la influencia de cada parámetro geométrico y mecánico sobre el valor de las singularidades de tensión.

Si bien las propiedades mecánicas del material bajo ensayo no pueden ser modificadas para tratar de disminuir las singularidades en las esquinas que aparecen, sí se pueden incluir en el análisis paramétrico las propiedades mecánicas de los elementos auxiliares, tales como el adhesivo de relleno ( $E=2.87$  GPa,  $\nu=0.27$ ) y el propio material empleado (tejido de fibra de vidrio) para la fabricación del taco ( $E_{11}=27$  GPa,  $E_{22}=29$  GPa,  $E_{33}=7$  GPa,  $G_{12}=7.4$  GPa,  $G_{23}=G_{31}=4$  GPa,  $\nu_{21}=0.2$ ,  $\nu_{31}=\nu_{32}=0.3$ ).

Por razones de simplicidad y brevedad, sólo se presentará el análisis realizado sobre la esquina trimaterial que forman en la configuración modificada (figura 5b) la confluencia del material de ensayo, el material del taco y el adhesivo de relleno.

En la figura 6 se muestran los órdenes de singularidad de tensiones de la esquina trimaterial (el punto crítico del ensayo) variando el ángulo ( $\alpha$ ) que forman el taco y el adhesivo y también el valor de la rigidez del taco (se han supuesto las tres rigideces  $E_{ii}$  ( $i=1,2,3$ ) con un valor mitad del original).

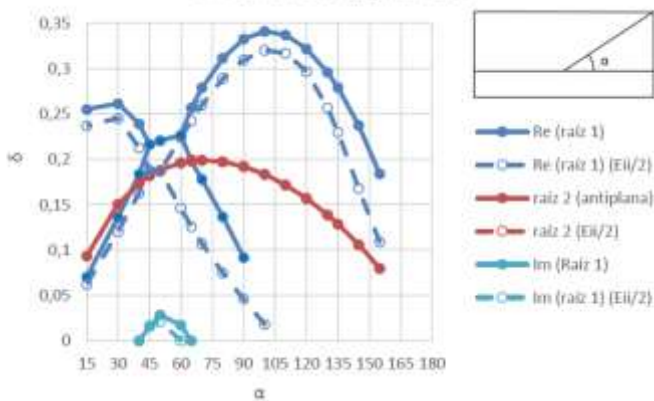
Si bien el programa de cálculo de órdenes de singularidad calcula los valores asociados al estado plano y al antiplano, éste último (marcado en rojo en la figura 6) no debe tenerse en cuenta, dado que las acciones actuantes están todas contenidas en el plano y no activan dicho modo.

Si nos quedamos con los valores máximos de la figura 6 (el trazo azul continuo), se observa que existen dos configuraciones que presentan mínimos locales de los valores máximos de los órdenes de singularidad.

El primero se produce cuando  $\alpha=45^\circ$ , exactamente el valor usado en [6]. El segundo se produce para  $\alpha=155^\circ$ , máximo ángulo contemplado como factible para ser llevado a cabo en la fabricación de bordes de los tacos de la probeta.



Para  $\alpha=45^\circ$  el orden de singularidad toma un valor de  $\delta \approx 0.22$ , menos de la mitad del valor que aparecía en la configuración original de taco recto ( $\alpha=90^\circ$ ) y sin relleno de adhesivo, cuyo valor ya indicamos que estaba en el entorno del valor para una configuración de grieta de un material isotrópico ( $\delta \approx 0.5$ ).



**Figura 6.** Órdenes de singularidad de la esquina trimaterial del problema del ensayo de compresión.

Si bien en este caso no se ha podido anular el orden de singularidad de tensiones, su disminución ha mostrado experimentalmente ser efectiva en la determinación realista de la resistencia a compresión de estos laminados de gran espesor.

También se observa (en la línea de trazos) que una disminución de las propiedades de rigidez del material que se emplea como taco, produce también un efecto global de disminución del valor de los órdenes de singularidad.

Dada la actuación, muy local, realizada sobre los bordes del material empleado como taco de la probeta y su influencia sobre los valores de resistencia del laminado, cabría esperar que la resistencia real del material (en ausencia completa de tensiones singulares inducidas en los tacos) fuese aun mayor que la obtenida en los ensayos recogidos en [6].

Debe pues tomarse el valor obtenido como un valor de resistencia que está del lado de la seguridad, al ser probablemente el valor real, superior.

## 6 Conclusiones.

En el presente trabajo se han mostrado tres evidencias, en tres problemas distintos con presencia de materiales compuestos, de cómo una actuación local sobre la configuración geométrica, y de las propiedades de los materiales (siempre que eso sea posible) de puntos críticos, donde se generan estados tensionales no acotados, influye significativamente sobre la determinación de valores de resistencia que se miden en dichos ensayos.

En particular, con la eliminación de las singularidades en dos de los tres casos presentados, y con la disminución significativa en el tercero, se ha mostrado que:

a) en los casos en los que hay disponibles resultados experimentales, se obtienen resultados de resistencia claramente superiores a los obtenidos en presencia de las singularidades de tensión.

b) en los casos en los que no se ha dispuesto de resultados experimentales, se concluye que las configuraciones definidas en la literatura como óptimas, tienen una justificación asociada a que dicha configuración presenta estados tensionales libres de tensiones singulares o con valores de las singularidades en un mínimo.

Cabe pues concluir que en aquellos ensayos que presenten fallos prematuros en el entorno de los tacos en los extremos de las probetas, cabría la posibilidad de verificar si dichos fallos prematuros están inducidos por tensiones singulares generadas por el pegado de los tacos a la probeta de ensayo, para proceder a su eliminación, permitiendo una determinación más realista de las resistencias de los materiales bajo ensayo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración en este trabajo de Bernd Lauke (Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden) por la ayuda prestada en la fabricación de las probetas losipesco, a Silvestre Pinho (Imperial College London) por facilitar los datos del problema de la determinación de la resistencia a compresión de laminados gruesos, y a la estudiante Isabel Quirós, por su ayuda durante la realización de su Trabajo Fin de Grado en el estudio numérico de este mismo problema.

## Referencias

- [1] A. Barroso, V. Mantič, F. París, *International Journal of Fracture* **119**, pág. 1-23 (2003). DOI: 10.1023/A:1023937819943.
- [2] V. Mantič, A. Barroso, F. París, *Singular elastic solutions in anisotropic multimaterial corners. Application to composites*. Capítulo 11 del libro: *Mathematical methods and models in composites*. pág. 425-495. (2014). Imperial College Press. ISBN 978-1-84816-784-1. Editor: V. Mantič.
- [3] A. Barroso, B. Lauke, V. Mantič, F. París, *Composites Science and Technology* **124**, pág 81-88 (2016). DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.01.003.
- [4] J.C. Marín, J. Cañas, F. París, J. Morton, *Composites Part A* **33**, pág 87-100 (2002). DOI: 10.1016/S1359-835X(01)00065-3
- [5] C.T. Sun, I. Chung, *Composites*. **24**, 8, 1993, pág. 619-623 (2012). DOI: 10.1016/0010-4361(93)90124-Q.
- [6] J. Dogra, J.M. Hodgkinson, P. Robinson, S.T. Pinho, *Development of a compression test for thick composite laminates: finite element analysis*. 16<sup>th</sup> International Conference on composite materials, Kyoto, Japan, (2007).

