

J. Justo, J. Reinoso, A. Blázquez, B. Gómez

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, ETS de Ingeniería, U. de Sevilla, Sevilla 41092, España

## Ensayos de pull-off sobre probetas con rigidizadores en T.

## 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

## Palabras clave:

Paneles rigidizados

Despegues

Delaminaciones

Uniones

En este artículo se muestran los resultados y conclusiones del análisis de una campaña de ensayos de pull-off sobre probetas constituidas por la unión de un rigidizador en T y un trozo de piel. Los ensayos pretenden reproducir, de forma aproximada, la configuración local simétrica que se produce en un panel rigidizado en régimen de postpandeo.

Se han considerado cuatro grupos diferentes formados por la combinación de dos geometrías y dos secuencias de apilado para rigidizador y piel. En total se han ensayado 10 probetas. Durante los ensayos, que han estado monitorizados con bandas extensométricas, se realizaron inspecciones visuales (especialmente después oír sonidos atribuibles a la aparición de daño) para detectar la presencia de despegues o delaminaciones y estudiar su evolución. Tras la rotura, se procedió al análisis visual y microscópico (óptico y electrónico) de las superficies de rotura.

Las inspecciones han mostrado la aparición de migraciones de las grietas desde la interfaz piel-rigidizador a interfaces internas de las primeras capas de la piel o viceversa, y se ha estudiado el efecto que la diferente configuración de cada probeta ha tenido sobre el lugar donde aparece el daño y la forma en la que progresa.

## Pull-off tests of single T-stiffened specimens.

## ABSTRACT

## Keywords:

Stiffened panels

Debonding

Delamination

Joints

Results and conclusions of the analysis of a campaign of pull-off tests of single T-stiffened specimens are shown in this paper. The test intend to reproduce in a specimen the symmetrical local deformation shape that occurs in a stiffened panel during its postbuckling evolution.

Four different groups have been considered combining two geometries and two stacking sequences for the skin and stringer. A total of 10 specimens have been tested. Tests were monitored with strain gauges. Visual inspections were performed during the process to detect the presence of debonding and/or delamination and to study the damage evolution. After the collapse, visual and microscopic analysis (optical and electronic) of the fracture surfaces were carried out.

Inspections have shown the appearance of migrations of cracks from the skin-stiffening interface to delaminations between the first layers of the skin or vice versa. The effect that the different configurations of each specimen had on the onset and development of the damage has also been studied.

## 1 Introducción

Los paneles rigidizados están constituidos por una piel, en general muy delgada, a la que se unen rigidizadores con la finalidad de aumentar la rigidez del conjunto y evitar inestabilidades a cargas bajas. Son elementos estructurales muy eficientes y como consecuencia están muy extendidos en estructuras aeroespaciales, así como en aplicaciones náuticas, automóviles e incluso en construcción.

El pequeño espesor de la piel la hace muy esbelta, lo que origina problemas de inestabilidad (pandeo) ante sollicitaciones de compresión, cortadura, presión o combinadas [1-7]. Habitualmente, estas inestabilidades afectan sólo a la porción de piel entre rigidizadores, permaneciendo estos prácticamente rectos. Estas inestabilidades no suponen el colapso de la estructura, que puede situarse para valores de la carga muy superiores a estas cargas de pandeo. El colapso del panel viene definido habitualmente por el despegue de los larguerillos y la piel [1-7] y en raras ocasiones por el pandeo de los larguerillos [3].

## 2 Descripción de los ensayos

Los ensayos realizados en este estudio se han diseñado con la intención de reproducir localmente la situación simétrica [6], véase Figura 1, que presentan los paneles rigidizados durante su evolución de postpandeo. En este trabajo se considera el caso sencillo en el que la curvatura a lo largo del larguerillo/rigidizador es pequeña.

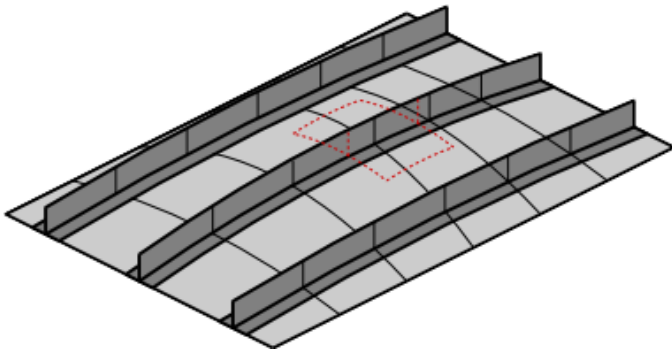


Figura 1. Porción del panel cuya configuración se desea reproducir.

### 2.1 Probetas

Las probetas se han fabricado en el laboratorio del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

El material utilizado, tanto para la piel como para el rigidizador, ha sido un prepeg unidireccional de denominación IMA/M21E, con espesor nominal 0.184mm. En el proceso de fabricación de las probetas se han seguido las siguientes etapas:

- (1) Se fabricó la piel apilando láminas sobre una superficie plana y curando el laminado en el autoclave según las especificaciones del fabricante (180°C y 9bar durante 2h).
- (2) Una vez fabricada la piel, se fabricó el rigidizador disponiendo las láminas sobre dos bloques de aluminio

para formar dos L invertidas. La zona del deltoide se rellenó con una lámina enrollada sobre sí misma. Sobre el conjunto se dispone la piel (precurada), insertando una capa de adhesivo entre ella y las alas de la T resultante de la unión de las dos L. El conjunto se curó poseriormente en autoclave.

- (3) Finalmente, los bordes se resanaron y se cortaron las probetas con un disco de diamante.

Consecuentemente, la unión de las L entre sí para formar el rigidizador es co-curada sin adhesivo intermedio, mientras que la unión del rigidizador con la piel es co-pegada con capa de adhesivo entre ambas piezas con espesor 0.2 mm.

Las propiedades de los materiales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

Material	$E_{11}$	$E_{22}$	$G_{12}$	$\nu_{12}$
IMA/M21E	154GPa	8.5GPa	4.2GPa	0.32
Adhesive	3.62GPa	-	-	0.3

La Figura 2 muestra un esquema de la geometría de las probetas, los valores de las dimensiones acotadas se detallan en la Tabla 2 para las dos geometrías analizadas en esta campaña de ensayos.

Tabla 2. Dimensiones geométricas de la probetas.

	$W$	$L$	$H$	$F$
A	200mm	60mm	110mm	20mm
B	150mm	150mm	110mm	45mm

Respecto de los laminados seleccionados, las dos combinaciones se describen en la Tabla 3, siendo las orientaciones las mostradas en la Figura 2.

Tabla 3. Laminados.

	Laminado 1	Laminado 2
Piel	[45/-45/90/0/-45/45] <sub>s</sub>	[45/90/-45/90/0/-45/0] <sub>s</sub>
L-izquierda	[45/-45/0/-45/45] <sub>s</sub>	[45/0/-45/0/90] <sub>s</sub>
L-derecha	[-45/45/0/45/-45] <sub>s</sub>	[-45/0/45/0/90] <sub>s</sub>

Dadas las orientaciones de las L izquierda y derecha, el laminado del alma del rigidizador es antisimétrico, pero se consigue que el laminado en ambos pies resulte el mismo, siendo la capa más externa (la que se pega con la piel) a -45° según la orientación mostrada en la Figura 2, mientras que la capa correspondiente de la piel es a 45°.

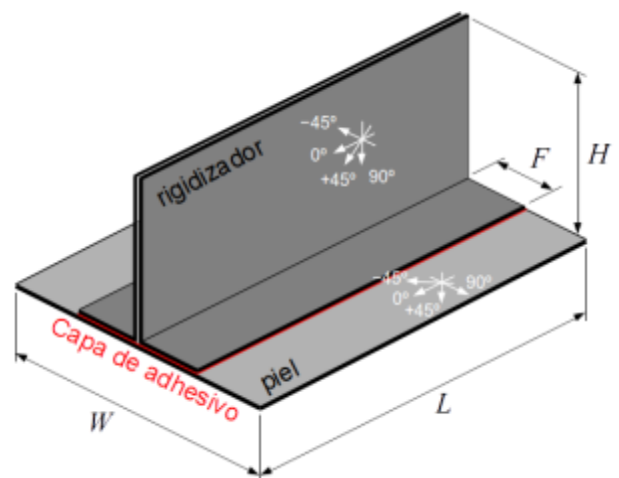


Figura 2. Esquema de las probetas.

Combinando las 2 geometrías y las 2 secuencias de apilado se obtienen 4 tipos de probetas, que se referirán: A1, A2, B1 y



B2. Dada la longitud,  $L$ , de las probetas tipo A1 y A2 (Tabla 2), de cada pieza fabricada se cortaron 3 probetas, mientras que sólo se cortaron 2 probetas de las tipo B1 y B2.

## 2.2 Ensayo

El ensayo se realizó en una máquina universal electromecánica INSTRON 4482. Los dos bordes longitudinales de la piel (paralelos al rigidizador) se anclaron a la mordaza inferior y el alma del rigidizador a la mordaza superior, Figura 3. Para medir la carga se han utilizado dos células de carga diferentes, de 5 y 10 kN (para las probetas A y B respectivamente). Los ensayos se realizaron a una velocidad de 0.5 mm/min.

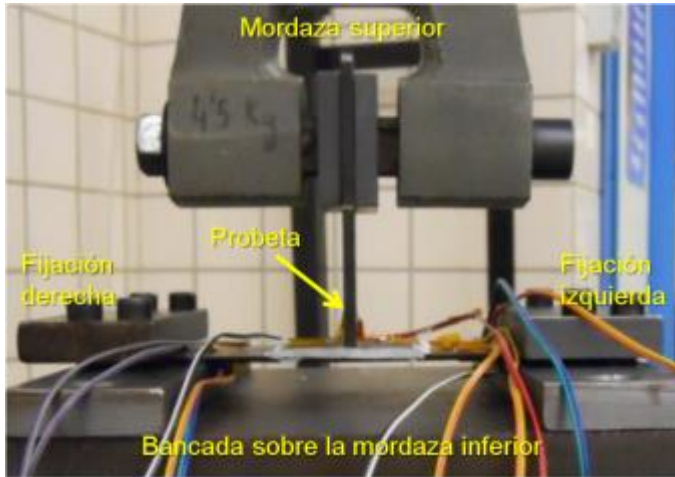


Figura 3. Dispositivo de ensayo.

Cada probeta se monitorizó con 10 bandas extensométricas dispuestas por parejas en caras opuestas. 8 bandas se distribuyeron longitudinalmente sobre la piel a ambos lados del rigidizador (lo que permitiría detectar posibles efectos 3D) y 2 bandas se situaron en el alma del rigidizador (para detectar posibles desalineamiento de la carga). Todas las bandas se dispusieron en la dirección 90° mostrada en la Figura 2.

Para facilitar la inspección visual, el borde de las probetas fue pintado de blanco.

## 3 Resultados experimentales

Durante los ensayos se realizaron inspecciones visuales para detectar el inicio de los despegues (Sección 3.1), se grabaron los desplazamientos, las cargas (Sección 3.2) y las medidas de las bandas extensométricas mediante un sistema de adquisición de datos (Sección 3.3) y, tras la finalización del ensayo, se procedió a la inspección visual y microscópica de las superficies de fractura (Sección 3.4).

### 3.1 Inspecciones visuales

En la Tabla 4a se resumen los resultados de las inspecciones durante los ensayos para las probetas A1 y A2, y en la Tabla 4b se resumen los resultados para las B1 y B2. La columna  $F_i$  es la carga a la que se observó la primera evidencia de daño y la columna  $F_u$  es la carga máxima alcanzada en el ensayo.

Las cargas  $F_i$  son muy parecidas entre las probetas del mismo grupo (geometría y laminado), siendo las variaciones respecto del valor medio inferiores a 7.7% (el máximo es para A1). Las

variaciones en la  $F_u$  son mayores (el máximo es 19.3% para A1). En cualquier caso, la dispersión para el tipo A1 es ligeramente mayor que para el tipo A2 y ambas mayores que las de los tipos B1 y B2. La diferencia más destacable entre los tipos A y B es el ratio  $F_u/F_i$ , que en los tipos A resultan muy superiores a los tipos B (que para la probeta B1(2) es 1).

Tabla 4. Resultados de la inspección visual:

(a) Probetas A1 y A2			(b) Probetas B1 y B2		
	$F_i$	$F_u$		$F_i$	$F_u$
A1(1)	1043N	2177N	B1(1)	6000N	6741N
A1(2)	1200N	2107N	B1(2)	6500N	6500N
A1(3)	1100N	2828N	B2(1)	7250N	8480N
A2(1)	1600N	1939N	B2(1)	7275N	7295N
A2(2)	1700N	2639N			
A2(3)	1555N	2127N			

En las probetas tipo A el daño siempre se inició en el extremo de una de las alas y progresó hacia el centro. Salvo en una de las probetas A1 (la numerada como 3), en el resto de las probetas tipo A, al alcanzarse el centro sobrevino el fallo. En cambio, en la probeta A1(3), se pudo detectar un despegue adicional en el extremo del ala opuesta, que progresó hacia el centro antes del fallo del componente.

Por el contrario, en las probetas tipo B el daño se inició en el centro de la probeta, debajo del deltoide, y progresó hacia los extremos.

### 3.2 Evolución carga-desplazamiento

En la Figura 4 se muestran las distintas evoluciones carga-desplazamiento para una selección de probetas (una probeta de cada grupo) junto con un esquema indicando el daño detectado en la inspección visual. Por motivos comparativos, se representan los valores unitarios de las cargas, es decir, por unidad de longitud de la probeta ( $L$  en la Figura 2). En [8] se muestran las evoluciones para todas las probetas de esta campaña.

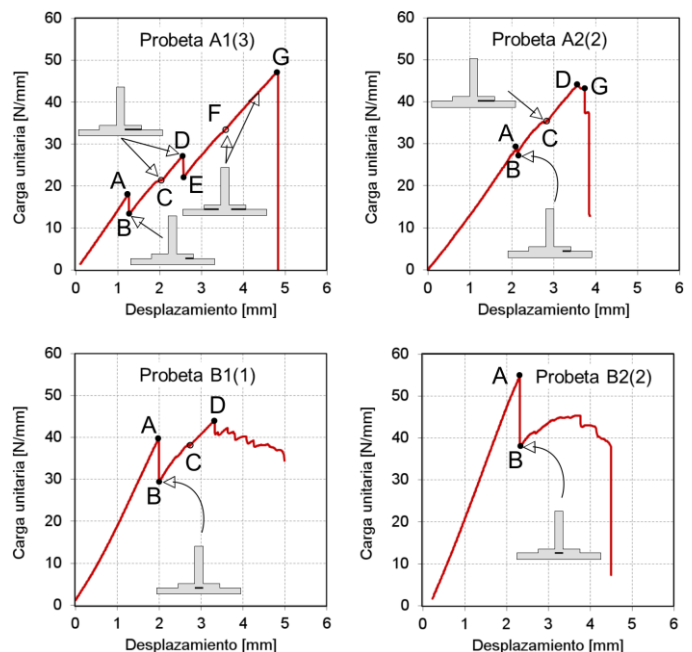


Figura 4. Evoluciones carga-desplazamiento para una selección de probetas.

En el caso de la probeta A1(3) en el instante correspondiente al instante A se oyó un sonido, el ensayo se paró y se proce-



dió a inspeccionar la probeta visualmente detectándose un despegue entre rigidizador y piel en el extremo de una de las alas. Se continuó con el ensayo prestando atención a la evolución de este daño. Entre los instantes B y C se comprobó un aumento relativamente continuo de la grieta hacia el centro de la probeta (la rigidez de la probeta disminuye progresivamente). En C la grieta se paró, aunque la carga siguió aumentando (la rigidez de la probeta se mantiene constante). En D se oyó otro sonido y se comprobó a aparición de otro despegue en el extremo del ala opuesta. Este nuevo daño siguió una evolución similar al daño inicial. En el tramo F-G las dos grietas están aparentemente paradas (la rigidez de la probeta se mantiene constante). Finalmente se produce la separación completa del rigidizador y la piel para la carga correspondiente al punto G.

La evolución de la probeta A2(2) fue muy similar a la comentada para la probeta A1(3), con la salvedad de que no parecía evidente el tramo E-F-G. El resto de las probetas A mostraron una evolución cualitativamente igual a la de A2(2). Las únicas diferencias destacables han sido que el nivel de carga del punto A (daño inicial) fue mayor en las probetas A2 (Tabla 4) y que el salto A-B fue mayor en las probetas A1.

En el caso de las probetas B1 y B2 la identificación del inicio y la evolución del daño resultan más complicadas. Inicialmente, el daño apareció debajo de la zona central del rigidizador (deltoide) y progresó hacia los extremos. Durante los ensayos, en algunos casos, parecía que antes de la rotura se iniciaba un despegue en el extremo de las alas del rigidizador, pero resultaba complicado de identificar.

### 3.3 Bandas extensométricas

Los comentarios de la sección anterior fueron corroborados con las medidas de las bandas extensométricas. Por motivos de brevedad, en la Figura 5 se muestran las medidas de 3 parejas de bandas de la probeta A2(3): dos parejas estaban situadas sobre la piel, una a la izquierda (5-11) y otra a la derecha (2-8) del rigidizador y relativamente cerca del extremo del ala (a 10mm); y la tercera pareja (6-7) estaba situada en el alma del rigidizador, relativamente cerca del ala (a 20mm). El esquema de cada gráfica indica la posición de cada banda.

Analizando la evolución de la pareja situada en el alma del rigidizador, dado que hasta el punto A los efectos de flexión son poco importantes, puede concluirse que la aplicación de la carga estaba suficientemente bien alineada (esto fue lo habitual en todos los casos ensayados). A partir de A el alma se

curvaba hacia la derecha, lo que indicaba un incremento de la flexibilidad de ese lado de la probeta, justificada por la aparición de un despegue en el extremo de esa ala (véase los esquemas mostrados en las evoluciones de la Figura 4). El efecto del despegue es más evidente si se comparan las evoluciones de las parejas de bandas situadas en la piel.

Por otro lado, comparando los resultados entre parejas de bandas situadas en diferentes posiciones a lo largo de la longitud de las probetas ( $L$  en la Figura 2), se concluyó que los efectos tridimensionales eran poco importantes.

Del análisis de las medidas de bandas en las otras probetas se obtuvieron conclusiones similares a las aquí mostradas.

### 3.4 Inspección de las superficies de fractura

En las Figura 6 y 7 se muestran fotografías de las superficies de fractura de dos probetas del tipo A. En estas figuras puede apreciarse cómo se distribuían las bandas extensométricas longitudinalmente.

Todas las probetas de este tipo mostraron un aspecto similar, en todas ellas se apreciaba claramente la existencia de dos zonas: una central y dos laterales separadas por un contorno recto nítido. En las zonas 2 se detectaron restos de adhesivo, mientras que en la zona central el daño venía caracterizado por delaminaciones de las primeras láminas (1 o 2) de la piel (en algunos casos, como el mostrado en la Figura 7, incluso un trozo de la capa más externa quedó adherida al rigidizador).

El hecho de que el límite entre estas zonas sea recto apoya la hipótesis, ya adelantada por las medidas de las bandas extensométricas, de que los efectos tridimensionales son poco importantes. Por lo tanto, puede admitirse que la propagación del despegue ocurrió manteniendo el frente de grieta paralelo al eje del rigidizador.

Por otro lado, dado que el aspecto de las dos zonas laterales es el mismo, es razonable pensar que la progresión del daño en ambas alas debió ser muy similar. Es decir, todas las probetas de la serie A debieron seguir una evolución como la descrita anteriormente para la probeta A1(3). Lo que ocurre es que el tramo E-F-G, que es muy claro en esta probeta, debió transcurrir muy rápidamente en el resto, siendo ello debido posiblemente a que la carga a la que se inició el daño en el extremo del otro ala (punto D) estaba ya muy cerca de la carga de colapso (como muestra la Figura 4 en la evolución de la probeta A2(2)).

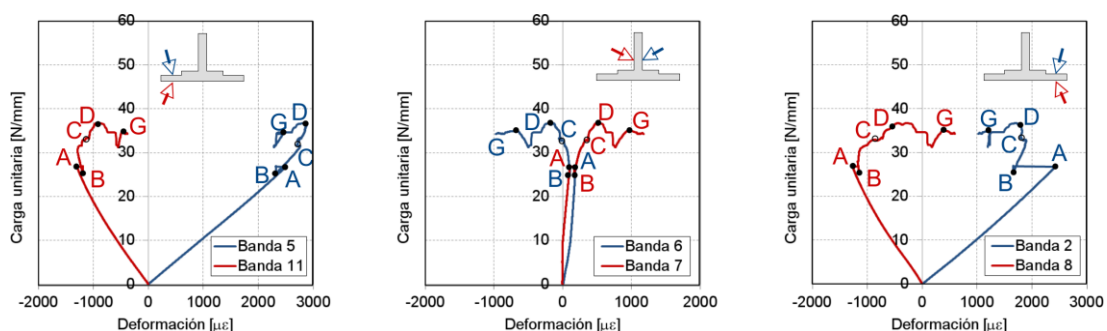
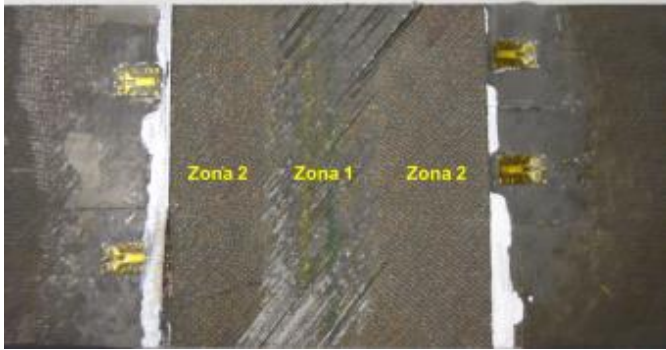


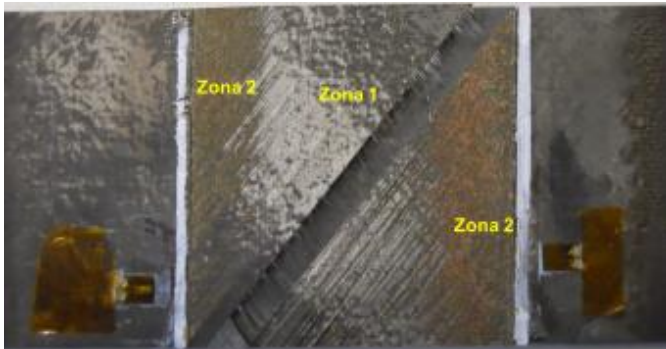
Figura 5. Evoluciones de las medidas de 3 parejas de bandas para la probeta A2(3).







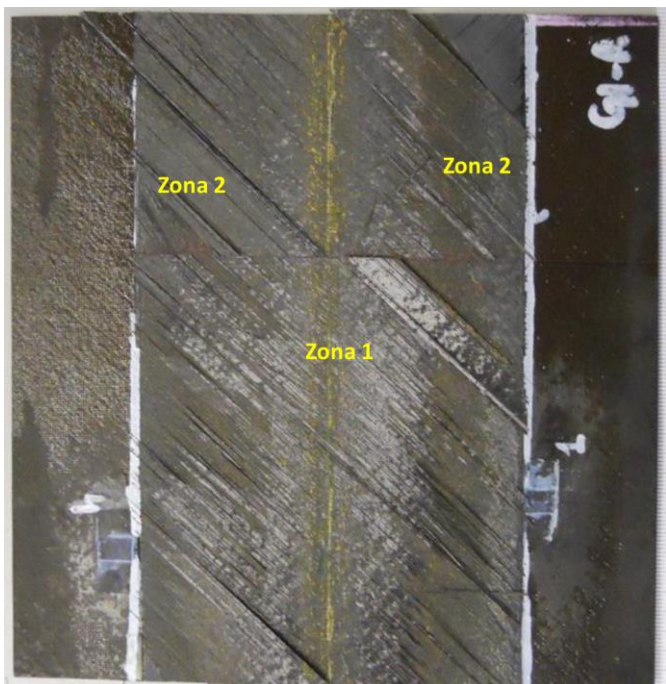
**Figura 6.** Superficie de fractura de la piel de la probeta A1(3).



**Figura 7.** Superficie de fractura de la piel de la probeta A2(1).

En la etapa final, parece que la grieta migró hacia capas internas de la piel, originando delaminaciones. De ahí es aspecto deshilachado de las zonas centrales.

En el caso de las probetas tipo B, aunque también eran identificables las zonas de delaminación (central) y de despegue (laterales), la separación entre ambas no resultaba tan claramente identificable, véase el ejemplo de la Figura 8. Todas las probetas de este tipo presentaban un aspecto similar.

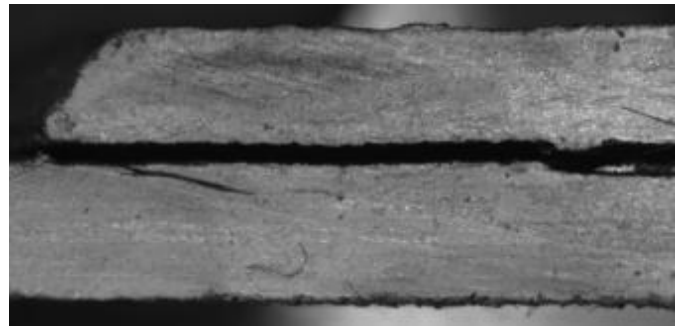


**Figura 8.** Superficie de fractura de la piel de la probeta B1(1).

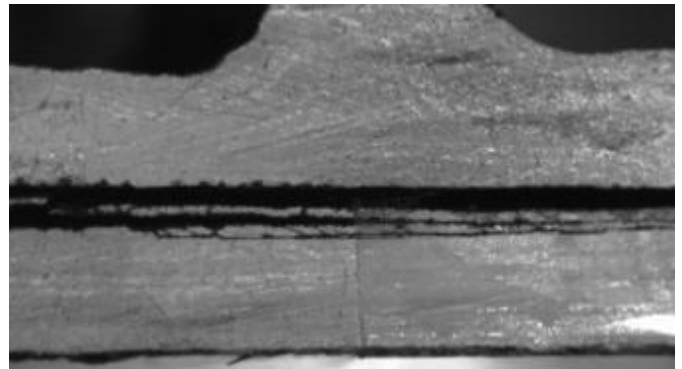
En la zona central, al igual que en las probetas de la serie A, el daño también vino originado por delaminaciones de las primeras capas de la piel. Este daño creció desde la zona central hacia los extremos. Es evidente que la separación completa del rigidizador y la piel exige que dicho daño migre hacia la superficie. El hecho de que las capas externas de la piel fueran capas a  $45^\circ$  dificultó que dicha migración se produjera en una línea paralela al rigidizador. No obstante, en ocasiones este límite es bastante claro (nótese el aspecto de la zona 2 situada a la derecha en la imagen de la Figura 8); lo que debió ser debido a la presencia en esa zona de un despegue del ala y la piel previo a la migración.

Para corroborar estas hipótesis, se procedió a una inspección con microscopio óptico y electrónico. Unos ejemplos de las imágenes obtenidas se muestran en la Figura 9–10.

La Figura 9 muestra una micrografía de la zona del extremo del ala de la probeta A1(2). En ella se aprecia con claridad el despegue sin delaminaciones (ni en la piel ni en el ala del rigidizador) que fue el primer daño detectado. En la Figura 10 se muestra la zona central de la misma probeta. Aquí son claras las delaminaciones de las capas a  $45^\circ$  (la más externa) y  $-45^\circ$  del correspondiente laminado. La siguiente capa en el apilado es una lámina a  $90^\circ$ .



**Figura 9.** Micrografía de la zona de inicio de daño de la probeta A1(2).



**Figura 10.** Micrografía de la zona central de la probeta A1(2).

Analizadas las micrografías correspondientes al resto de las probetas, las conclusiones fueron idénticas. Sólo resulta destacable el hecho de que la delaminación, en la zona central, de las probetas A2 se produce sólo en la primera lámina (la segunda es a  $90^\circ$ ).

En la Figura 11 se muestra la imagen SEM de la zona central de la probeta B2(2). En ella se identifican con claridad las láminas del rigidizador, de la piel y zona del deltoide. También se muestra con claridad el despegue (final) del rigidizador y la piel y (con algo de dificultad) la delaminación de la primera



capa de la piel. Adicionalmente también se detecta en esta micrografía la presencia de una grieta que progresa entre la L que conforma la parte izquierda del rigidizador y el deltoide y, más arriba, entre las almas de las dos L.

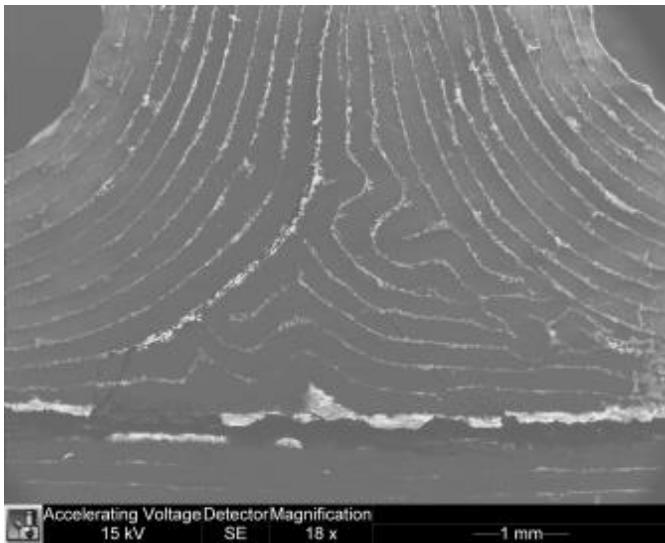


Figura 11. Micrografía SEM de la zona central de la probeta B2(2).

## 4 Discusión

A la vista de las evidencias mostradas, la evolución del daño en el caso de las probetas A1 y A2 debió ser muy similar, y se resume en la Figura 12.

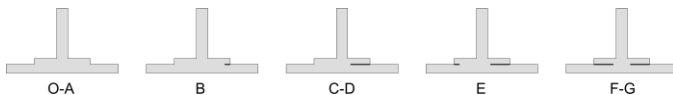


Figura 12. Evolución del daño en una probeta de la serie A.

El daño comenzó en el extremo de una de las alas (B). Dada la disposición de los laminados (Tabla 3) a ambos lados del rigidizador las láminas de la piel y de las alas resultan perpendiculares entre sí, por lo que el hecho de que el daño se inicie en un extremo u otro debe atribuirse a la presencia de defectos, desalineamiento de la carga, etc.

Una vez iniciado el daño en una de las alas, la rigidez de esa zona disminuye, con lo que, para el mismo desplazamiento impuesto, las deformaciones aumentan, lo que hace que la severidad de las condiciones sobre este extremo aumenten mientras que sobre el extremo de la otra ala disminuya, evitando la aparición de daño en esta localización, y haciendo que la grieta inicial progrese hacia el centro (C-D).

Cuando esta grieta inicial se va acercando al centro las tensiones interlaminares en la piel aumentan dando lugar a delaminaciones, que apantallan y frenan a la grieta inicial. No obstante, dado que la carga ha ido aumentando, llega un momento en el que las condiciones en el extremo sano originan un despegue en esa zona (E) que progresa hacia el centro (F-G) más o menos rápidamente dependiendo de las condiciones de cada caso.

El caso de las probetas de las series B1 y B2 es muy diferente, y se resumen en la Figura 13.

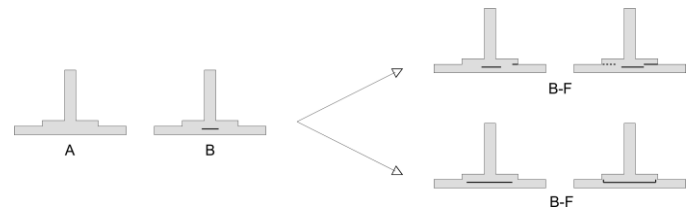


Figura 13. Evolución del daño en una probeta de la serie B.

En estas probetas el daño se inició en la zona central, en las interfaces de las primeras láminas de la piel (B), y progresó hacia los extremos de las alas. En algunos casos las condiciones en el extremo de alguna de las alas (o ambas) originaron una grieta que progresó hacia el centro (B-F superior) y finalmente se unió con la delaminación central. En otros casos la delaminación central parece haber progresado hasta muy cerca de los extremos de las alas, produciéndose la migración hacia la superficie prácticamente sin despegue de la interfaz ala-piel (B-F inferior). A la vista de las superficies de fractura de estas probetas, parece que estas situaciones pudieron darse incluso en diferentes secciones de una misma probeta, o lo que es equivalente, la migración o coalescencia de la delaminación y el despegue no fue uniforme longitudinalmente.

Para entender estas evoluciones, en [8] se elabora un modelo de barras sencillo en el que el rigidizador y la piel se consideran barras cuyas propiedades de rigidez equivalente ( $EA$  y  $EI$ ) se determinan según la Teoría Clásica del Laminado. Las barras se unen en 3 puntos: uno situado en el centro y los otros dos en los extremos de las alas, como muestra la Figura 14. Variando la posición del punto de unión situado en uno de los extremos se puede analizar cualitativamente el efecto que la aparición de un daño en esa zona tiene sobre el sistema.

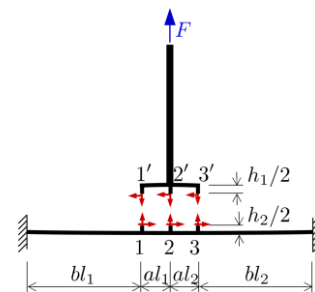


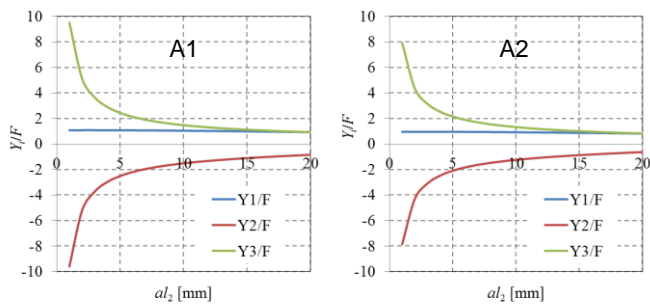
Figura 14. Modelo de barras para el análisis de las uniones en T.

Para las probetas de las series A1 y A2 el modelo predice compresiones en el centro ( $Y_2 = -0.84F$  y  $Y_2 = -0.44F$  respectivamente) y tracciones en los extremos ( $Y_1 = Y_3 = 10.43F$  y  $Y_1 = Y_3 = 0.82F$  respectivamente), mientras que para las probetas B1 y B2 se predicen tracciones tanto en los extremos ( $Y_1 = Y_3 = 0.34F$  y  $Y_1 = Y_3 = 0.27F$  respectivamente) como en el centro ( $Y_2 = 0.33F$  y  $Y_2 = 0.46F$  respectivamente), siendo además la resultante en el centro prácticamente igual a la que hay en los extremos para el caso B1 e incluso mayor para el caso B2. Estos resultados permiten justificar el hecho de que el daño comience en los extremos en las primeras probetas y por el centro en las segundas, a la vez que avalan la validez (al menos cualitativamente) del modelo analítico.

A su vez, el modelo permite predecir que, para las probetas tipo A, la aparición de un despegue en el extremo de un ala incrementa las sollicitaciones sobre dicho extremo, mientras que en el ala opuesta se mantienen constantes o crecen lige-



ramente. Las evoluciones para los modelos de las probetas A1 y A2 se muestran en la Figura 15.



**Figura 15.** Evolución de las acciones en la intercara, según el modelo de barras, para las probetas de las series A1 y A2.

## 5 Conclusiones

La campaña de ensayos realizada en este trabajo ha pretendido analizar la influencia que la geometría y las secuencias de apilado tienen sobre la evolución hasta el colapso de uniones de un rigidizador en forma de T y una piel. Los ensayos han pretendido simular de una forma económica y eficiente una de las situaciones que se originan en los paneles rigidizados en régimen de postpandeo.

La geometría está asociada con la distancia entre los largueros del hipotético panel rigidizado. En este sentido, unos largueros muy próximos permiten incrementar las cargas de pandeo, haciendo que los fenómenos de inestabilidad aparezcan a cargas más elevadas. No obstante, esta situación se correspondería con las probetas tipo B, con lo que el daño tiende a aparecer en la zona central de la unión (resultando, por lo tanto, muy difícil de detectar). Por el contrario, unos largueros más espaciados permitirían garantizar que el daño aparezca en el extremo de alguna de las alas, lo que sería relativamente fácil de detectar y permitiría tomar las medidas adecuadas. Como contrapartida, las cargas de pandeo serían más bajas.

La secuencia de apilado afecta especialmente a la carga a la que aparece el daño inicial. Se ha comprobado que esta carga se incrementa si la lámina perpendicular al rigidizador (a 90° en la orientación utilizada en este trabajo) está situada cerca de la interfaz ala-piel. Ello es así, porque esta lámina dificulta que el daño migre entre la superficie y capas internas. No obstante, las cargas máximas parecen variar sólo ligeramente con la secuencia de apilado.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los proyectos MAT2015-71036-P y MAT2015-71309-P del Ministerio de Economía y Competitividad/FEDER y a los proyectos TEP-7093 y P12-TEP-1050 de la Junta de Andalucía.

## Referencias

- [1] Starnes Jr, JH, Knight Jr, NF, Rouse, M. *AIAA Journal*, **23**, pág. 1236-1246 (1985).  
<http://dx.doi.org/10.2514/3.9072>

- [2] Stevens, KA, Ricci, R, Davies, GAO. *Composites*, **26**, pág. 189-199 (1995).  
[https://doi.org/10.1016/0010-4361\(95\)91382-F](https://doi.org/10.1016/0010-4361(95)91382-F)
- [3] Falzon, BG, Stevens, KA, Davies, GO. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **31**, pág. 459-468 (2000).  
[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00085-8)
- [4] Meeks, C, Greenhalgh, E, Falzon, BG. *Composites: Part A*, **36**, pág. 934-946 (2005).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.12.003>
- [5] Zimmermann, R, Rolfes, R. *Composite Structures*, **73**, pág. 171-174 (2006).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.11.041>
- [6] Orifici, AC, Shah, SA, Herszberg, I, Kotler, A, Weller, T. *Composite Structures*, **86**, pág. 146-153 (2008).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.022>
- [7] Reinoso, J, Blázquez, A, París, F, Cañas, J, Meléndez, JC. *Composite Structures*, **94**, pág. 1533-1543 (2012).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.12.014>
- [8] Justo, J, Reinoso, J, Blázquez, A. *Composite Structures*, en prensa (2017).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.070>

