

## **Análisis de postpandeo de un panel rigidizado de material compuesto sometido a carga de presión**

**A. Blázquez, J. Reinoso, F. París, J. Cañas**

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela Superior de Ingenieros,  
Universidad de Sevilla, España.

### **RESUMEN**

Para predecir el comportamiento de un panel curvo rigidizado ante una carga de presión por encima de la carga de pandeo se han realizado varias simulaciones numéricas con ABAQUS/Standard. Dada la influencia que las imperfecciones geométricas iniciales tienen en la citada evolución, se ha desarrollado una técnica que permite incluirlas en los modelos numéricos. El ajuste conseguido entre las predicciones numéricas y los resultados experimentales permiten validar el procedimiento.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Un panel rigidizado está compuesto por una lámina (piel), usualmente muy delgada y con curvatura (en una o las dos direcciones), a la que se añaden perfiles (rigidizadores) que incrementan la rigidez y resistencia del componente final. Los rigidizadores más comunes tienen secciones transversales en forma de T, I u  $\Omega$  y, habitualmente, van cocurados o copegados a la piel.

Su diseño viene condicionado por la aparición de abolladuras en la piel a cargas relativamente bajas (debido a su esbeltez). No obstante, numerosos trabajos han puesto de manifiesto la gran reserva de capacidad portante de estos elementos para cargas superiores a la carga crítica (Starnes et al. (1985), Stevens et al. (1995), Rouse y Ambur (1996), Zimmermann et al. (2006) entre otros). El colapso sobreviene de forma repentina, para cargas 3 o 4 veces la carga crítica (o incluso más), y originado por la inestabilidad global del componente (incluyendo los rigidizadores) o, lo que es más habitual, por despegues más o menos generalizados en la unión de los rigidizadores con la piel.

Para aprovechar esta reserva de resistencia se requieren procedimientos fiables y efectivos que permitan predecir el comportamiento de estos paneles en postpandeo. Uno de los aspectos más importantes para desarrollar estos procedimientos es la gran influencia que las imperfecciones iniciales del panel real tienen sobre su evolución (Hilburger y Starnes, 2002) para cargas superiores a la carga crítica; pudiendo aparecer diferencias notables incluso para valores inferiores. En el presente trabajo se considerará únicamente el efecto de las imperfecciones geométricas.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PANEL Y DEL DISPOSITIVO DE ENSAYO

La Figura 1 muestra un esquema del componente analizado. Se trata de un panel cilíndrico de 615 mm de arco, 595 mm de ancho y 1520 mm de radio; con dos rigidizadores circunferenciales con sección transversal en  $\Omega$ , de 55 mm de altura, separados 235 mm.

El panel está fabricado con laminados carbono-epoxi. En la Figura 1 se distinguen diversas zonas, siendo el laminado de cada una de ellas diferente, véase Tabla 1. Las láminas unidireccionales son de espesor 0.184 mm y propiedades mecánicas:  $E_{11}=131\text{GPa}$ ,  $E_{22}=9.75\text{GPa}$ ,  $\nu_{12}=0.3$ ,  $G_{12}=4.65\text{GPa}$ ; y el tejido es de 0.28 mm de espesor y propiedades mecánicas:

$E_{11}=E_{22}=61\text{GPa}$ ,  $\nu_{12}=0.05$ ,  $G_{12}=4.9\text{GPa}$ . Los rigidizadores están copegados con la piel, con una capa de adhesivo de 0.19 mm de espesor y propiedades mecánicas:  $E = 3.216\text{ GPa}$  y  $\nu = 0.3$ .

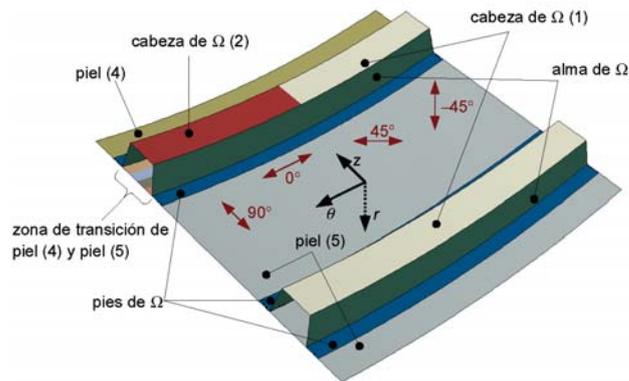


Fig. 1. Características del panel.

cabeza de $\Omega$ (1)	(45/0/0/0)\$
cabeza de $\Omega$ (2)	(45/0/0/0/0)\$
pies y almas de $\Omega$	(45/0)\$
piel (4)	(45/-45/0/90/90/-45/45/0/0)S
piel (5)	(45/-45/0/90)\$

Tabla 1. Laminados del panel (0, 45  $\equiv$  tejido; 0, 45, -45, 90  $\equiv$  unidireccionales).

Para aplicar la carga de presión se fabricó una caja hermética a la que se atornilló el panel como tapa (ver Figura 2). Un cordón de silicona aseguraba el correcto sellado del dispositivo.

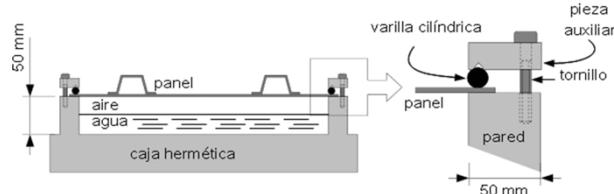


Fig. 2. Dispositivo

El plan de ensayo se diseñó en función de la primera carga de pandeo (0.1 bares aproximadamente) obtenida con el análisis numérico que se describe en las secciones 3 y 4. Se realizaron varios ensayos hasta cargas máximas de 0.1, 0.15, 0.2, 0.3 y 0.35 bares, comprobando al final de cada uno si se había producido daño; y un ensayo hasta la rotura, que se produjo a 0.44 bares.

### 3. MODELO NUMÉRICO

Para el modelo numérico se utilizó ABAQUS. Rigidizadores y piel se modelaron de forma independiente, incluyendo la capa de adhesivo entre ambos. Para la piel y los rigidizadores se utilizaron elementos S4R (lámina de 4 nodos e integración reducida) con los laminados correspondientes en cada zona. La capa de adhesivo se modeló con elementos C3D8R (hexaedro de 8 nodos e integración reducida), utilizando un elemento en el espesor. La malla resultante tenía 15400 elementos y 18281 nodos.

Los nodos de la piel y los rigidizadores se situaron en las superficies que se pegan, ver Figura 3, definiendo los *offsets* necesarios en cada parte. Así, los nodos de la piel y los rigidizadores ocupan las mismas posiciones (mallado conforme) que los nodos correspondientes de la capa de adhesivo, evitando de esta forma la superposición de materiales y facilitando la conexión de piel-adhesivo y rigidizador-adhesivo mediante restricciones tipo *tie* de ABAQUS.

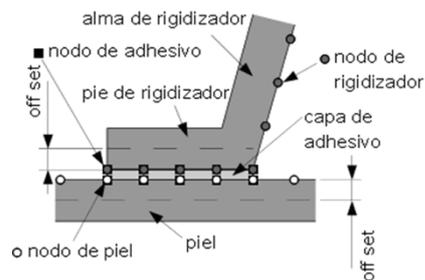


Fig. 3. Definición de los *offsets*.

Las condiciones de sujeción mostradas en la Figura 2 se modelaron como empotramientos, y la carga se consideró uniformemente distribuida.

### 4. ANÁLISIS DE PANDEO

Los resultados del análisis de pandeo se muestran en la Figura 4 para los primeros 6 modos. Los ensayos se diseñaron en función de la carga del primer modo de pandeo.

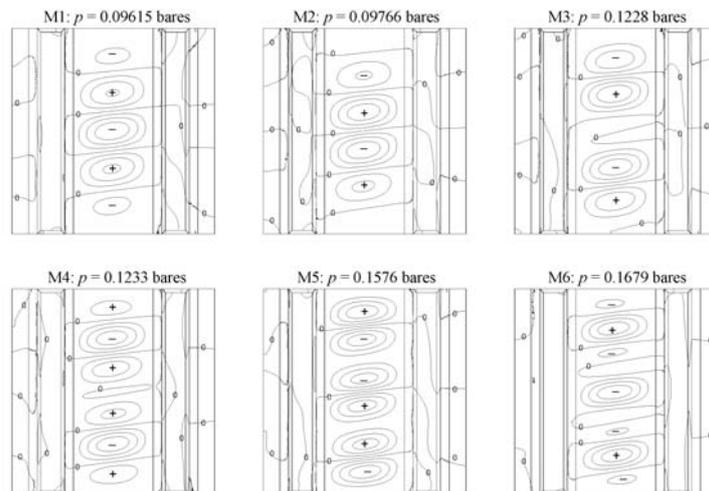


Fig. 4. Primeras cargas y modos de pandeo ( $u_r$ , ver Figura

En la Figura 4 se han marcado las líneas correspondientes al nivel 0, lo que permite distinguir las diferentes abolladuras que se producen (marcadas con los signos '+' y '-'). Los autovalores muestran varias abolladuras en dirección circunferencial pero solo una en dirección axial (aparecen autovalores con dos abolladuras axiales a partir del 9° modo, al que le corresponde una carga de 0.24 bares).

## 5. DETERMINACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES INICIALES

La consideración de imperfecciones iniciales se ha realizado perturbando la geometría nominal del panel (superficie de referencia) con una combinación de modos de pandeo:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \sum_{n=1}^N C_n \mathbf{u}_n \quad (1)$$

donde  $\mathbf{x}$  representa el vector de posición actualizado para cada nodo;  $\mathbf{x}_0$  el vector de posición del nodo en la superficie de referencia;  $C_n$  es el coeficiente correspondiente al modo de pandeo  $n$ ;  $N$  es el número de modos de pandeo utilizados en la combinación, y  $\mathbf{u}_n$  el vector desplazamiento del nodo, correspondiente al modo  $n$  obtenido numéricamente.

Los coeficientes  $C_n$  se han calculado mediante un ajuste por mínimos cuadrados de la combinación (1) a una serie de medidas geométricas realizadas al panel montado en el dispositivo de ensayo.

Dado que los modos de pandeo no afectan significativamente a los rigidizadores, perturbando la geometría de la forma indicada en (1) resulta muy difícil ajustarse a la geometría real de estos. Ello condiciona el proceso en dos aspectos fundamentalmente:

- Por un lado, las mediciones deben realizarse suficientemente lejos de los rigidizadores (de no ser así, podrían obtenerse valores de  $C_n$  anormales). Las citadas mediciones se han realizado a lo largo de 4 líneas paralelas a los rigidizadores situadas a 82, 35, 0 y -58 mm de distancia de la línea central (distancias medidas en la dirección  $\theta$  respecto del plano  $rz$  de la Figura 1; el extremo del pie de cada rigidizador se sitúa a 122.5 mm de la línea central).
- Y por otro lado, la elección de la superficie de referencia ( $x_{0i}$ ) con la que proceder al análisis de mínimos cuadrados, debe realizarse en función de la posición de los rigidizadores. Para ello, justo en el extremo del pie de uno de los rigidizadores, se ha medido otra línea que, mediante otro ajuste por mínimos cuadrados, permite situar el eje de la superficie de referencia.

La Tabla 2 muestra los  $C_n$  obtenidos para combinaciones de los 2, 5 y 10 primeros modos. Del análisis de dicha tabla se observa que las imperfecciones iniciales pueden ser del orden del 50% del espesor de la piel.

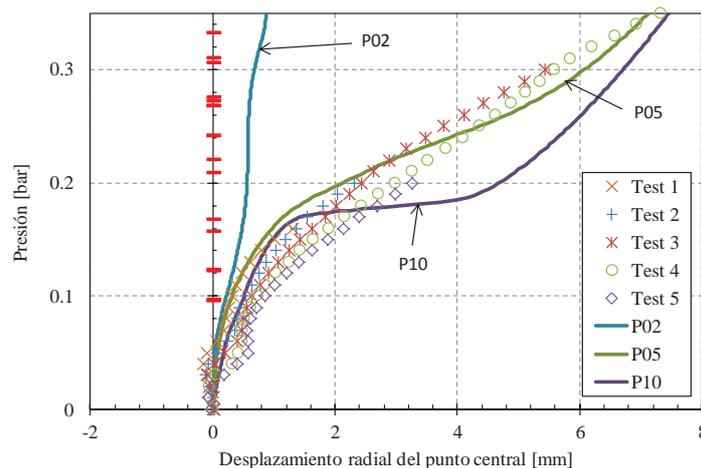
$N$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
2	-4.02e-4	4.09e-4								
5	-4.59e-4	2.52e-4	-6.59e-4	-1.55e-4	2.14e-4					
10	-4.24e-4	2.00e-4	-5.76e-4	-2.17e-4	2.85e-4	4.59e-4	3.45e-4	1.81e-4	7.44e-4	-5.09e-4

**Tabla 2. Coeficientes para combinaciones con los 2, 5 y 10 primeros modos.**

## 6. EVOLUCIÓN EN POSTPANDEO

En el análisis de postpandeo del modelo descrito en la Sección 3 se ha activado la opción *stabilize* de ABAQUS, la cual introduce en el material un comportamiento pseudoviscoso que facilita la convergencia del proceso, especialmente para la combinación con 10 modos, que sin la citada opción finaliza para 0.165 bares. Se ha comprobado que la inclusión de dicha opción afecta muy ligeramente a la energía de deformación almacenada en el sistema (la energía disipada por este efecto es el 1.2% de la energía de deformación total para el caso de 10 modos, 0.7% para 2 modos y 0.5% para 5 modos) y a la evolución de las variables hasta la carga final del análisis no lineal.

La Figura 5 muestra la evolución del desplazamiento radial (eje  $r$  en la Figura 1) del punto central del panel para las 3 combinaciones consideradas (con 2, 5 y 10 modos de pandeo). Se incluyen también los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. Para facilitar el análisis, en el eje de ordenadas se han señalado las cargas de pandeo. En primer lugar, la repetitividad obtenida en los resultados experimentales permite confirmar el resultado negativo de la inspección de posibles daños tras cada ensayo.



**Fig. 5. Evolución del desplazamiento radial del punto central del panel.**

Las predicciones numéricas con 5 se ajusta muy bien con los resultados experimentales en todo el rango de cargas considerado; con 10 modos se ajusta muy bien hasta cargas del orden de 1.6 veces la primera carga crítica; mientras que el límite para la combinación con solo dos modos se sitúa por debajo, en torno a 1.1 veces la primera carga crítica (esta diferencia parece estar justificada por el valor de  $C_2$  para esta combinación).

No obstante, para cargas superiores y al contrario de lo que sería esperable, la combinación con 10 modos se ajusta peor que la combinación con 5 modos. Ello es debido a que mientras que en los primeros 6 modos la máxima distorsión aparece en la línea central (en la que sí se toman medidas); en los modos superiores, por el contrario, la máxima distorsión aparece desplazada (en puntos en los que, en general no se dispone

de medida experimental). Así, dado que sólo se han utilizado 4 líneas, cuando en la combinación entran modos superiores al 6º, se pueden producir distorsiones de la geometría que no se corresponden con la realidad. Si se desea mejorar el ajuste, incluyendo para ello más modos de pandeo, será necesario realizar más mediciones de la geometría (más puntos en dirección axial para el caso aquí presentado) para evitar estas distorsiones ficticias. En el análisis realizado, la combinación con 5 modos de pandeo permite representar con suficiente precisión la evolución del panel en todo el rango de postpandeo de interés.

## 7. CONCLUSIONES

Se ha analizado el comportamiento en postpandeo de un panel rigidizado ante carga de presión. Para ello se ha realizado un modelo de elementos finitos en el que se han incluido las imperfecciones geométricas mediante una combinación de modos de pandeo. Los coeficientes asociados a cada modo se calculan mediante un ajuste por mínimos cuadrados entre las medidas de la geometría tomadas del panel real y los correspondientes puntos de la superficie de referencia. Dado que los primeros modos de pandeo no afectan a la geometría de los rigidizadores, dicha superficie de referencia se define en función de medidas tomadas cerca de los mismos.

Finalmente, las predicciones numéricas obtenidas combinando diferentes modos se han comparado con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. Ello ha permitido concluir que, en el caso aquí presentado, el mejor ajuste se consigue cuando se utilizan los 5 primeros modos de pandeo. La consideración de combinaciones con modos de mayor orden, solo proporcionará mejores resultados si las mediciones de la geometría se realizan de forma que se eviten distorsiones ficticias en la geometría ajustada, lo que, para el caso aquí estudiado, exigirá la consideración de más puntos en la dirección axial.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la ayuda prestada por D. Carlos Arellano y D. Diego Canales, de la empresa TEAMS, en la fabricación del dispositivo experimental y la realización de los ensayos.

## REFERENCIAS

- HILBURGER M.W., STARNES Jr. J.H. (2002) Effects of imperfections on the buckling response of compression-loaded composite shells. *Int J Non-Linear Mech*, 37, pp. 623-643.
- ROUSE M., AMBUR D.R. (1996) Damage tolerance and failure analysis of a composite geodesically stiffened compression panel. *J. Aircraft*, 33, pp. 582-588.
- STARNES Jr. J.H., KNIGHT Jr. N.F., ROUSE M. (1985) Postbuckling behavior of selected flat stiffened graphite-epoxy panels loaded in compression. *AIAA Journal*, 23, pp. 1236-1246.
- STEVENS K.A., RICCI R., DAVIES G.A.O. (1995) Buckling and postbuckling of composite structures. *Composites*, 26, pp. 189-199.
- ZIMMERMANN R., KLEIN H., KLING A. (2006) Buckling and postbuckling of stringer stiffened fibre composite curved panels - Tests and computations. *Comp. Struct*, 73, pp. 150-161.