

## ANÁLISIS DE POS PANDEO EN PANELES LAMINADOS DE MATERIALES COMPUESTOS

M. A. Arbelo, S. F. M. de Almeida y M. V. Donadon  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA-CTA-IEM, Praça Mal. Eduardo Gomes, No. 50,  
São José dos Campos-SP, Brasil  
Email: marbelo@ita.br

### RESUMEN

*En este trabajo se propone la investigación experimental del comportamiento estructural de paneles reforzados laminados en materiales compuestos sujetos a cargas de cizallamiento en el plano. El objetivo es desarrollar un ensayo capaz de caracterizar el comportamiento en el régimen de pos pandeo de paneles reforzados sujetos a cargas de cizallamiento en el plano, proyectar el dispositivo de ensayo y cuantificar los desplazamientos fuera del plano del panel en pos pandeo utilizando instrumentos ópticos sin contacto (topogrametría). Una metodología de ensayo será propuesta con la finalidad de obtener resultados confiables y reproducibles. Serán establecidos: cuerpo de prueba, mecanismo de ensayo, instrumentación, metodología de adquisición y análisis de los resultados adquiridos. Resultados preliminares con la configuración estudiada indican que paneles reforzados laminados en materiales compuestos sujetos a cargas de cizallamiento en el plano tienen una considerable capacidad de carga pos pandeo.*

**Palabras clave:** Materiales Compuestos, Pos Pandeo, Topogrametría

### INTRODUCCIÓN

La evolución en la construcción de estructuras aeronáuticas utilizando materiales compuestos ha ido acompañando el crecimiento y expansión de la industria aeronáutica, comenzando con proyectos de componentes sujetos a bajos niveles de sollicitación estructural y evolucionando para conjuntos de piezas de importancia considerable para el correcto funcionamiento de la aeronave como son las diferentes superficies de control (alerón, flap, etc.) y finalmente la sustitución de conjuntos primarios, críticos para el desempeño de la aeronave, como cajón de torsión, alas, fuselaje, etc.

Los materiales compuestos ofrecen numerosas ventajas en relación a las estructuras metálicas tales como bajo peso, alta rigidez, resistencia a la corrosión y fatiga. Además, utilizando procedimientos de proyecto y procesos de fabricación adecuados, podemos conseguir una reducción de costo.

A pesar de estas ventajas, también debemos tener en cuenta que los materiales compuestos laminados presentan un desempeño relativamente bajo cuando son sujetos a cargas transversales, como cargas de impacto, debido a su comportamiento anisotrópico y su baja resistencia cuando es sometido a cargas transversales.

Paneles reforzados sujetos a cargas de flexión y cargas de cizallamiento en el plano son muy utilizados en aplicaciones estructurales aeronáuticas. En muchas de estas aplicaciones generalmente es permitido el pandeo del panel (*skin*) entre los refuerzos, para valores de carga menores que la carga límite; en realidad, en la mayoría de las situaciones prácticas el valor de carga de pandeo es bien menor que la carga límite.

El fuselaje de un avión es un ejemplo típico de proyecto con esta filosofía. Por lo tanto, la mayoría de los estudios de pandeo y pos-pandeo con cargas de cizallamiento en estructuras de materiales compuestos son asociados al proyecto de fuselajes.

El desenvolvimiento de piezas / componentes construidos con materiales compuestos que sean eficientes en peso y costo en comparación con piezas metálicas, implica la necesidad de tener un conocimiento profundo del comportamiento de estas nuevas estructuras cuando son sujetas a cargas de servicio.

## DISPOSITIVO DE ENSAYO

El dispositivo de ensayo fue proyectado con el objetivo de obtener un estado de carga resultante de cizallamiento puro sobre el eje de simetría del plano del panel reforzado. Otros puntos relevantes que fueron considerados en el proyecto son costo y viabilidad de fabricación, facilidad de manipulación y montaje del sistema durante el ensayo, seguridad, entre otros.

El dispositivo de ensayo denominado “sistema de viga empotrada con brazo de carga excéntrico” es mostrado en la Fig. 1 (a). Este tipo de configuración del sistema de carga adoptado permite obtener un momento flector nulo en la sección del panel correspondiente al eje de aplicación de carga. La Fig. 1 (b) presenta el diagrama de cargas resultantes en el cuerpo de prueba (CDP).

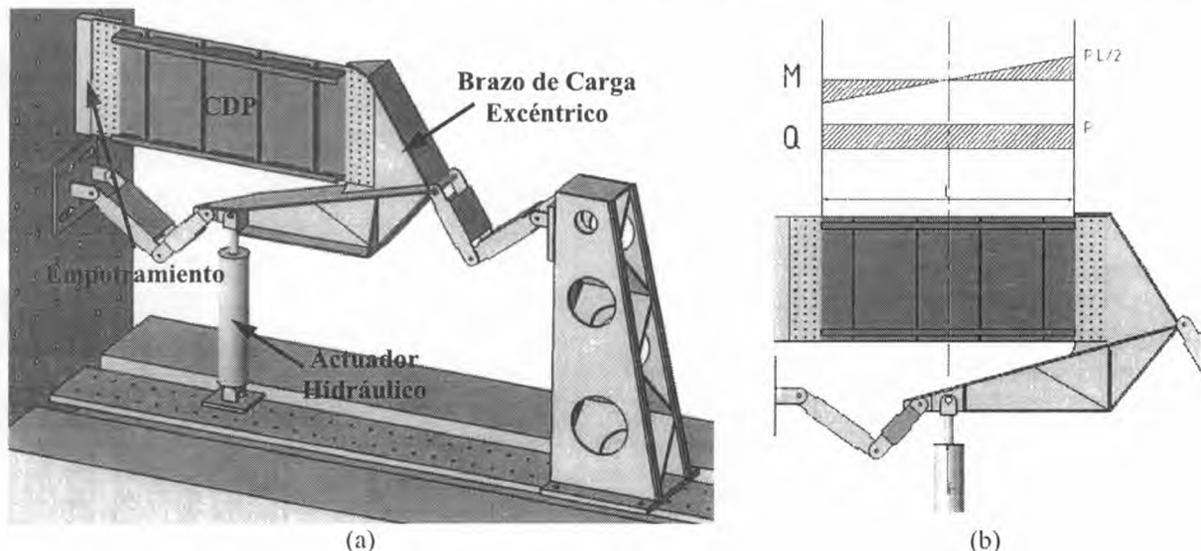


Figura 1. a) Proyecto del dispositivo de ensayo; b) Diagrama de cargas del CDP

Debido a la configuración del dispositivo adoptada para el ensayo, fueron tomadas una serie de medidas para evitar posibles desplazamientos transversales no deseados colocando soportes que restringen los grados de libertad fuera del plano del panel y que, al mismo tiempo, no interfieren con el esquema de cargamento propuesto.

## CUERPO DE PRUEBA

Tanto el panel como los reforzadores fueron laminados a partir de láminas de fibra de carbono pre-impregnadas con resina epoxi, convencionalmente fabricados y curados en autoclave. Los reforzadores para el caso estudiado fueron colados después de la cura del panel.

### Instrumentación: *Strain Gages*

Con el objetivo de obtener el campo de deformaciones y detectar el inicio del régimen de pos-pandeo en algunos puntos específicos del CDP, fueron colocados *strain gages* en el centro de los paneles laterales (en las dos caras) y en el centro del panel central (del lado reforzado) como muestra la Fig. 2. Los *strain gages* fueron colocados a 45, 90 y 135 grados respecto al eje longitudinal del panel y numerados en forma secuencial desde 00 hasta 14.

Adicionalmente, con el objetivo de validar la carga aplicada en el CDP por el dispositivo de ensayo fueron colados cuatro *strain gages* numerados en forma secuencial desde 15 hasta 18. Estos *strain gages* miden la deformación longitudinal del panel en los puntos seleccionados y permiten verificar si el diagrama de deformaciones es coherente con el estado de cargas teórico en el cual se basa el proyecto del dispositivo de ensayo. Teóricamente el dispositivo de ensayo es proyectado para cargar el CDP con un estado combinado de flexión / cizallamiento en el plano, con una carga resultante de

cizallamiento puro en la línea media del panel reforzado. Dado que la relación entre el momento flector y las deformaciones longitudinales del CDP pueden ser consideradas lineales en el régimen pre-pandeo, midiendo las deformaciones en los puntos seleccionados podemos verificar el tipo de cargamento propuesto. Los *strain gages* fueron posicionados de manera que todos deben indicar valores similares en magnitud, pero con signo opuesto de a pares, es decir, los *strain gages* 15 y 17 deben medir valores similares a los adquiridos con los *strain gages* 16 y 18, pero con el signo opuesto. Debemos resaltar que esta verificación es válida solamente en el régimen pre-pandeo, pues todas las consideraciones realizadas para verificar el sistema de carga no tienen en cuenta las no-linealidades geométricas que ocurren en el régimen pos-pandeo.

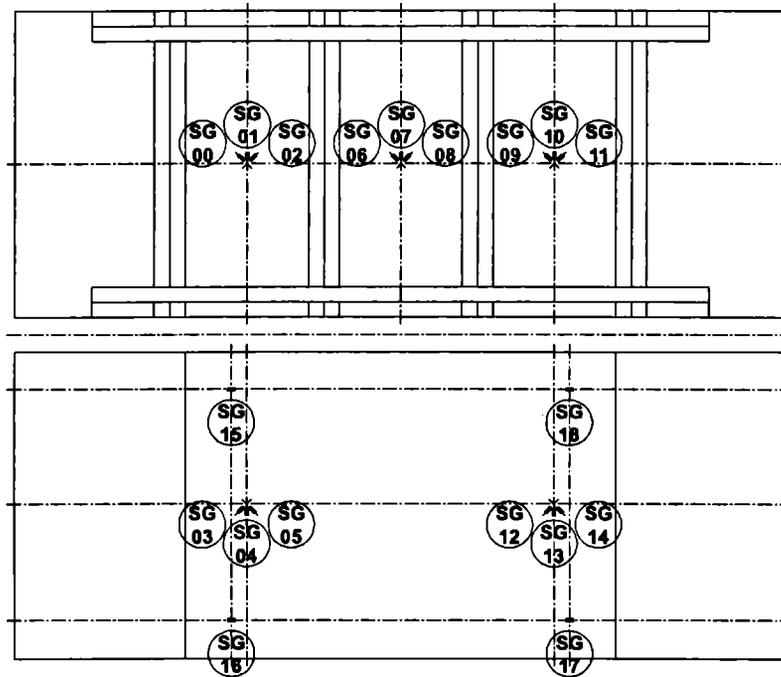
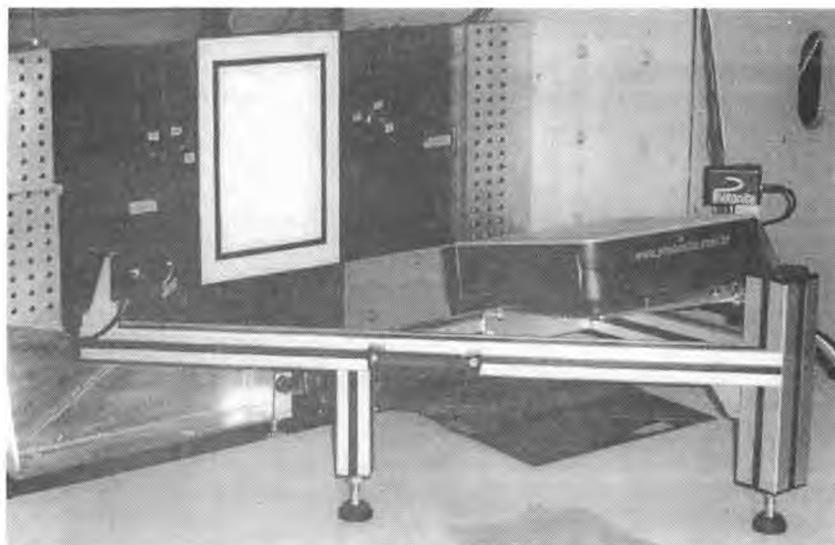


Figura 2. Posicionamiento de los *strain gages* para medición de deformaciones

## MEDICIÓN POR TOPOGRAMETRIA

El equipamiento utilizado para medir los desplazamientos transversales del CDP es un sistema óptico para medición de formas continuas. El sistema utilizado está optimizado para medir superficies de  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  aproximadamente, con un desvío máximo de  $0,01 \text{ mm}$ . Este dispositivo utiliza el principio de topogrametría con proyección de franjas sobre la superficie que se desea medir. La imagen reflejada en la superficie es capturada por dos cámaras y enviadas a un computador el cual calcula los desplazamientos de la superficie a partir de la diferencia entre dos nubes de puntos medidos en estados de carga diferente. El sistema compuesto por las dos cámaras y el proyector es mostrado en la Fig. 3. Para realizar la medición sobre la superficie del panel central del CDP con este sistema, es necesaria una preparación previa de la superficie, ya que para que el sistema de adquisición funcione es necesario que la superficie sea blanca. Por esto, en el área donde será efectuada la medición utilizando el dispositivo de topogrametría realizamos un trabajo previo de limpieza y pintado. La superficie preparada para el ensayo es mostrada en la Fig. 3.



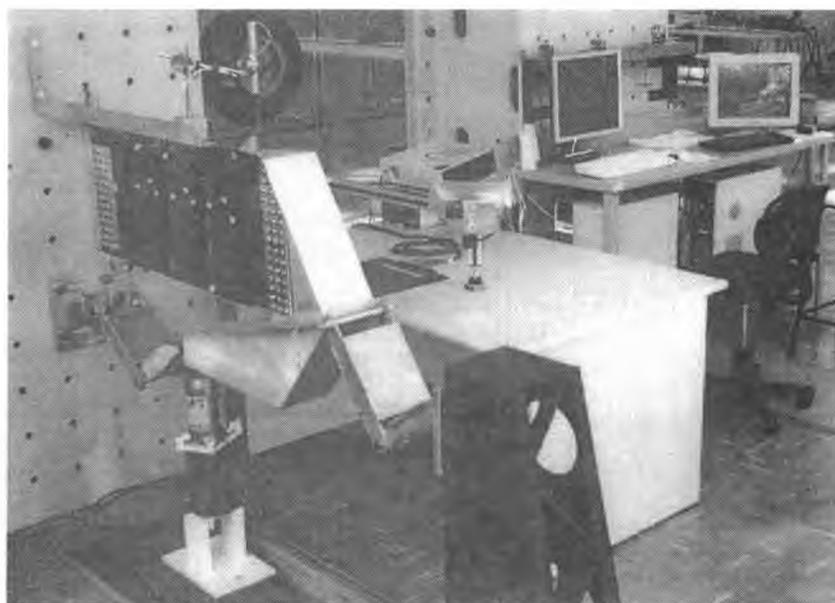
**Figura 3.** Sistema de medición del desplazamiento transversal por topografía

### IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO

La metodología de ensayo fue desarrollada con la finalidad de obtener resultados confiables y repetitivos, de forma que los mismos puedan ser comparados para caracterizar el comportamiento en el régimen pos-pandeo.

Para aplicar la carga con el dispositivo de ensayo fue utilizado un actuador hidráulico manual de 10 Ton. de carga máxima. El mismo fue modificado para permitir un correcto acoplamiento con la celda de carga utilizada para medir la carga aplicada durante el ensayo y el brazo de aplicación de carga del sistema de ensayo.

Para levantar la curva de carga  $\times$  desplazamiento del extremo del CDP fue colocado un sensor LVDT (*Linear Voltaje Differential Transformer*) que mide el desplazamiento vertical en el extremo del CDP como muestra la Fig. 4.



**Figura 4.** Vista general del dispositivo de ensayo

Todos los *strain gages*, la celda de carga y el LVDT son conectados a un sistema de acondicionamiento de señal y adquiridos en tiempo real mediante un computador utilizando una placa de adquisición. La interfase entre el sistema de adquisición y el usuario fue especialmente desarrollada para este ensayo utilizando el programa Labview 8.2 y el lenguaje de programación DAQmx. Este programa permite controlar todos los parámetros de cada canal independientemente. Por ejemplo, en los canales usados para adquirir la señal de un *strain gage* es posible configurar todos los valores característicos del mismo como resistencia eléctrica, *gage factor*, cociente de *Poisson*, tipo de conexión utilizado, voltaje de alimentación, entre otras. Los datos adquiridos son mostrados en el monitor en tiempo real y almacenados simultáneamente en un archivo para posterior procesamiento.

## RESULTADOS

Los resultados del ensayo pueden ser separados considerando un punto de vista global, mediante la curva de carga  $\times$  desplazamiento en el extremo del CDP y un punto de vista local, mediante las curvas de deformación resultantes de la medición con *strain gages* así como los desplazamientos transversales del panel central medidos con el dispositivo de topogrametría.

El ensayo fue repetido 10 veces para evaluar la repetibilidad de los datos adquiridos. Dado que la correlación es muy buena y debido a la gran cantidad de datos adquiridos, en los resultados expuestos a seguir, solamente algunos de estos datos serán presentados, adoptando estos como representativos de las mediciones realizadas, permitiendo así una mejor visualización gráfica.

### Curva de Carga $\times$ Desplazamiento

En la Fig. 5 está representada la curva de carga  $\times$  desplazamiento del extremo del CDP obtenida durante el ensayo [1]. Podemos notar la buena repetibilidad de los resultados obtenidos entre las diferentes curvas, lo que permite suponer en primera instancia que el CDP no sufrió alteración de rigidez (debido a la presencia de daño en cualquiera de las formas posibles) y que el sistema de carga resiste adecuadamente los esfuerzos sometidos durante el ensayo.

Es evidente el comportamiento geoméricamente no lineal del CDP a partir de 4000 – 6000 N aproximadamente de carga aplicada.

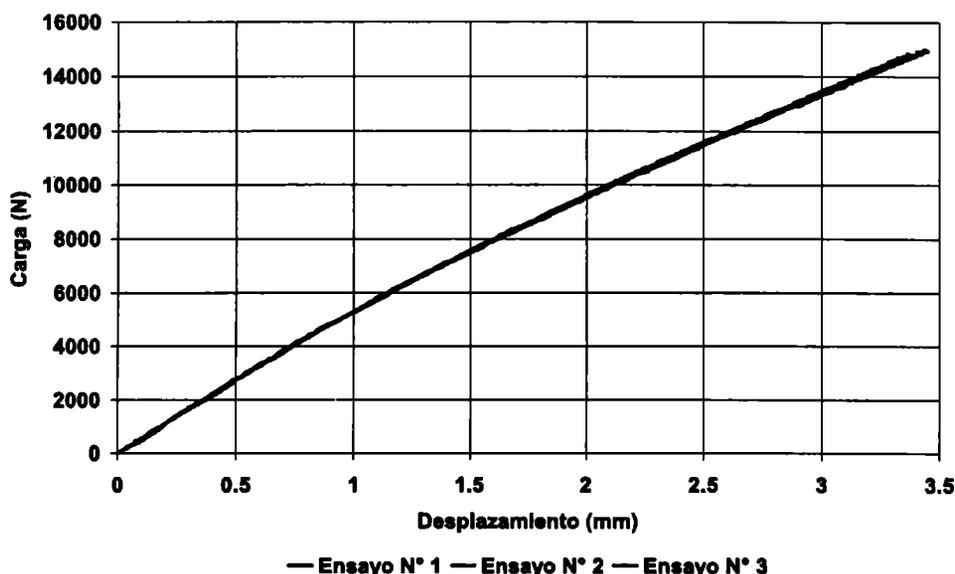


Figura 5. Curvas de carga  $\times$  desplazamiento del extremo del CDP

### Deformaciones

Las deformaciones medidas con los *strain gages* utilizados para caracterizar el campo de deformaciones en los puntos donde fueron colados en el CDP son presentadas en las Figs. 6 – 9 [1]. Las deformaciones obtenidas fueron agrupadas considerando el panel donde fueron colocados los *strain gages*. Notar que la unidad de deformación es  $\mu\epsilon$  (micro strain).

Los gráficos presentan altos niveles de deformación no lineal a partir de un valor de carga de 3000 N aproximadamente. En particular, observando los resultados obtenidos de los paneles laterales (Fig. 6 y 8) podemos apreciar que los efectos de flexión en los paneles comienzan a ser significativos en un rango de carga de 3000 a 5000 N lo que sugiere el inicio de pandeo local en los puntos de medición.

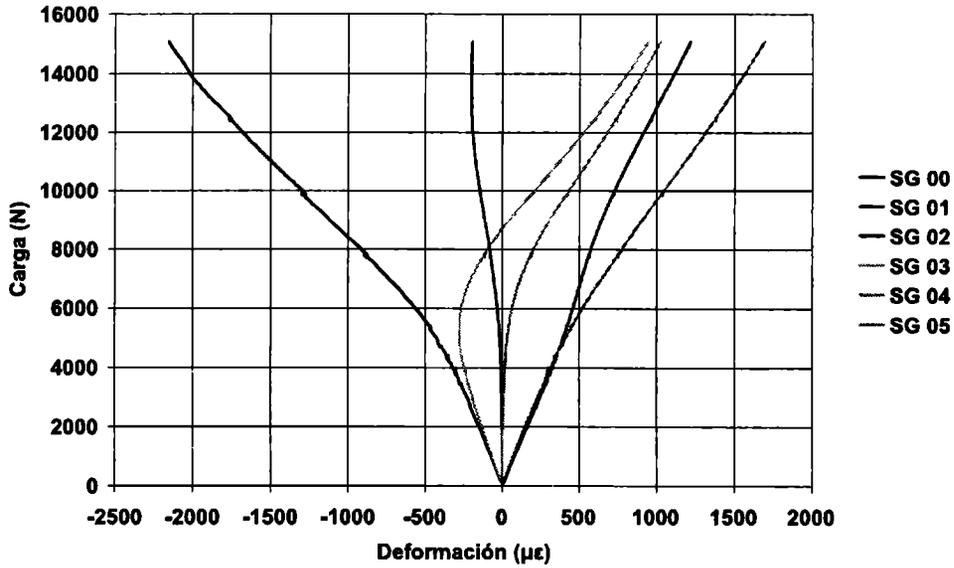


Figura 6. Curvas de deformación medidas en el panel del lado empotrado del CDP

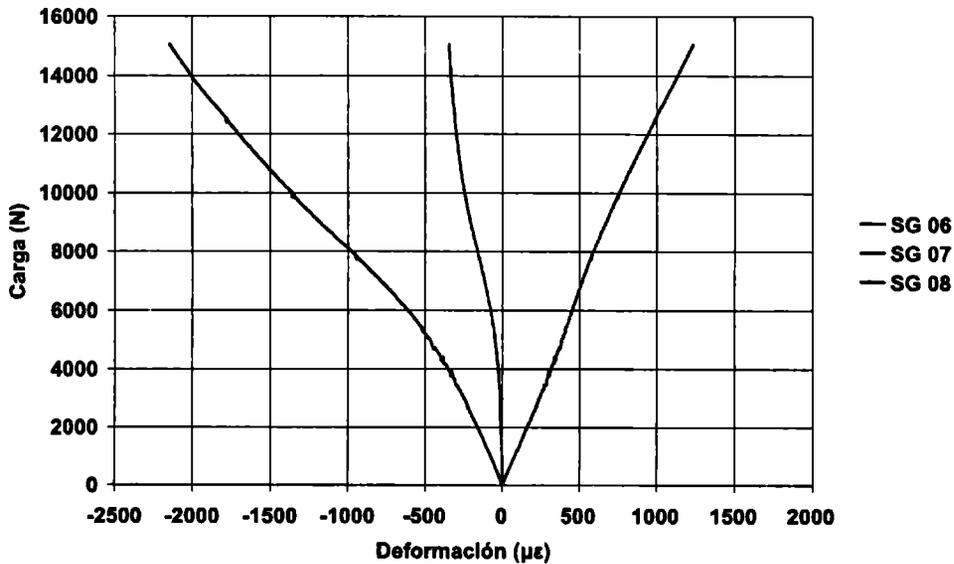


Figura 7. Curvas de deformación medidas en el panel central del CDP

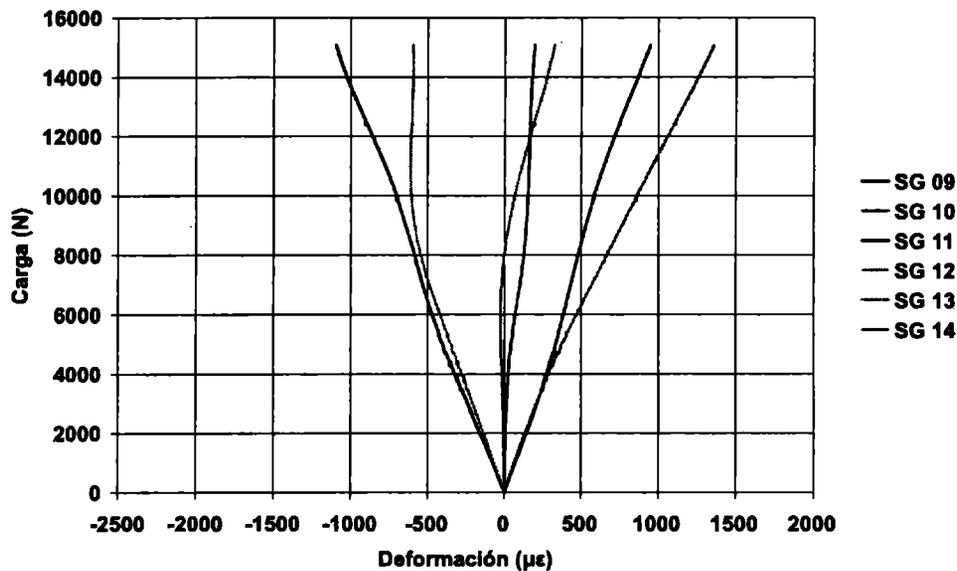


Figura 8. Curvas de deformación medidas en el panel del lado de carga del CDP

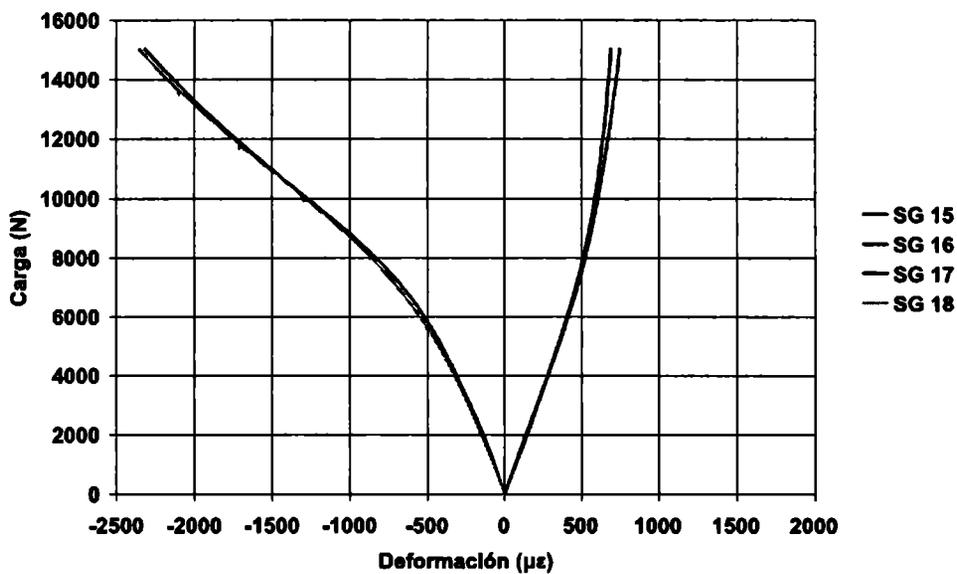


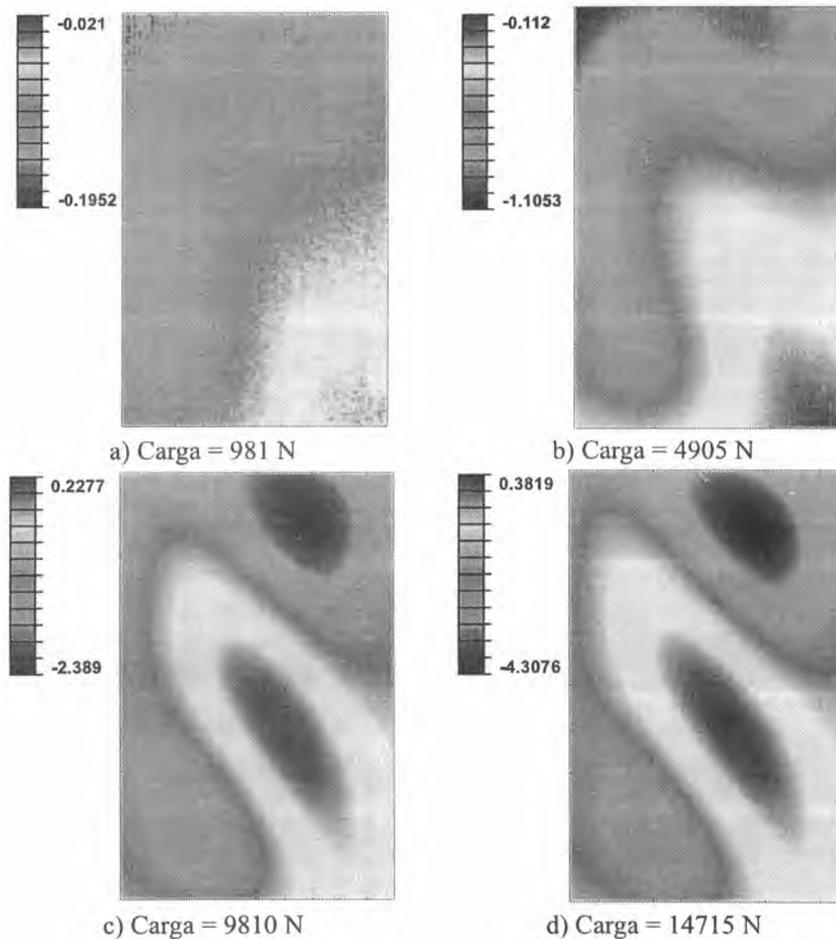
Figura 9. Curvas de deformación medidas en los puntos para verificación del cargamento aplicado en el CDP

Del gráfico mostrado en la Fig. 9 podemos verificar que para valores de carga bajos, donde los efectos de no linealidad geométrica son todavía despreciables, las deformaciones medidas por los *strain gages* 15 y 17 son de igual magnitud y signo contrario a las deformaciones medidas por los *strain gages* 16 y 18. Esta igualdad es mantenida hasta 3500 N aproximadamente, donde el desvío entre los valores obtenidos es del 10 %. Desde este punto, al aumentar la carga las lecturas comienzan a diverger de a pares debido al pandeo del panel en los puntos de medición.

### Desplazamientos transversales del panel central

Los desplazamientos transversales medidos por topogrametría en el panel central son mostrados en la Fig. 10. Los desplazamientos fueron medidos en intervalos de 981 N (100 Kgf) hasta la carga máxima de ensayo que fue 14715 N (1500 Kgf). Los resultados obtenidos son presentados en la Fig. 10 para algunos valores de carga aplicada [1].

Podemos constatar que el panel está completamente pandeado a partir de 8800 N de carga aplicada. También se observa que el modo de pandeo no cambia durante el ciclo de carga, registrando un aumento de amplitud de los desplazamientos transversales a medida que la carga es aplicada.



**Figura 10.** Desplazamientos transversales medidos en el panel central del CDP

## CONCLUSIONES

Una investigación experimental detallada del comportamiento en el régimen pos pandeo de paneles reforzados laminados en materiales compuestos con cargamentos de flexión / cizallamiento en el plano fue presentado y discutido en este trabajo. Una metodología de ensayo fue definida, testada y validada. Algunas conclusiones del trabajo presentado son:

Logramos caracterizar el comportamiento estructural de componentes aeronáuticos del tipo panel reforzado desde un punto de vista global, mediante la curva de carga  $\times$  desplazamiento y también desde un punto de vista local, midiendo las deformaciones en puntos predefinidos mediante *strain gages* y los desplazamientos transversales del panel central mediante el sistema de topogrametría. Verificamos con los resultados obtenidos que este tipo de estructuras presenta una considerable capacidad de carga en el régimen de pos pandeo antes de la falla catastrófica. En particular, el CDP ensayado en este trabajo alcanzó una carga máxima 3 veces superior a la carga de pandeo sin indicios de falla.

## REFERENCIAS

1. M. A. ARBELO, Comportamento Estrutural de Painéis Laminados em Materiais Compósitos Sujeitos a Cargas de Cisalhamento no Plano. 2008. pp 203. Tesis de Maestría – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil.