Cod. 9386 | Tecnología industrial | 3310.03 Procesos industriales

Nuevo proceso de fabricación de rigidizadores estructurales aeronáuticos a partir de rigidizadores rectos usando un molde adaptativo

A new manufacturing process of structural aeronautical stringers from straight stringers using an adaptative mould

Imanol Ansola-Arizmendiarrieta[1], Natalia Gutierrez-Perez-de-Eulate[1], Ibai Berrotaran-Saavedra[1], Peio Olaskoaga-Arrate[1], Koldo Gondra-Zubieta[2], Patricia Tabares-Fernandez[3] y Francisco-Javier Vallejo-Rasero[1]

[1] IDEKO (España)
[2] GAIKER (España)
[3] FIDAMC (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9386

Es sabido que la introducción de materiales compuestos de matriz polimérica en piezas estructurales de aviones, trenes y palas de aerogeneradores ha impulsado de manera significativa su eficiencia, principalmente por la importante disminución de peso, lo que implica ahorro en combustible y descenso del impacto medioambiental [1, 2, 3].

Sin embargo, en los últimos años se observan dificultades para incrementar la presencia de estos materiales, por ejemplo, en aeronaves, debido a que ya no es suficiente con la disminución de peso, sino que también debe suponer una reducción de los costes de fabricación y de los plazos de amortización de las inversiones [4, 5, 6]. Además, los procesos de fabricación de composites deben responder a tasas de fabricación y calidad muy altas, y deben facilitar en gran medida los requerimientos de mantenimiento y reparación.

Es por esto por lo que, los nuevos desarrollos de procesos de fabricación de piezas estructurales deben perseguir equilibrar los costes productivos, el nivel de inversión necesaria y la productividad. En los procesos actuales de fabricación de piezas estructurales, este equilibrio, no está correctamente balanceado, debido a que, en una etapa anterior del desarrollo de procesos de fabricación de composites, esto no era una prioridad.

Un ejemplo claro se da en los procesos de fabricación de los rigidizadores de alas y estabilizadores de aeronaves. Los rigidizadores son piezas que, adheridas a las pieles de ala, otorgan a estas, la rigidez requerida. Son piezas extremadamente esbeltas, hasta 24 m de longitud, con anchos y altos no superiores a 150 mm. Las secciones de dichas piezas pueden variar desde secciones en forma de C o T (Figura 1) hasta secciones en forma de Ω. Una característica muy importante de estas piezas es que tienen curvaturas variables, los ángulos de las secciones también son variables y presentan cambios de pendientes y de espesor para adaptarse a las geometrías de los laminados principales a los que van adheridos (piel del ala o estabilizador). Es decir, una piel de un ala de 4 m de ancho y 20 m de longitud, aproximadamente, podría contener 10 rigidizadores diferentes cuya única similitud es la forma general de la sección (C, T u Ω).

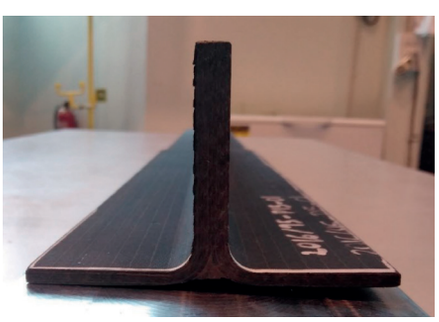


Figura 1: Rigidizador de pieza estructural aeronáutica con sección en T

Actualmente, el proceso de fabricación de estos rigidizadores implica disponer de un molde diferente para cada rigidizador, en el cual se laminan las telas en sus orientaciones determinadas de manera manual o en algunos casos, automatizada, pero de manera poco productiva utilizando procesos de Automated Tape Laying (ATL) o Automated Fiber Placement (AFP). Una vez están laminadas las telas en una parte del molde, por medio de aplicación de presión y temperatura con una membrana (Hot Forming) o contramolde se obliga a las telas a adaptarse a la forma del molde [3, 7]. Es evidente que la necesidad de disponer de moldes diferentes para cada tela supone un nivel de inversión no admisible en la actualidad.

Una alternativa a este proceso viene de la mano de tecnologías que actualmente están en sus etapas finales de desarrollo como es el ADMP® de DANOBAT, tecnología por medio de la cual, se pueden laminar de manera altamente productiva tejidos multiaxiales, consiguiendo una tasa de laminación, en el peor de los casos, 10 veces superior a las tasas de laminación convencionales, conseguidas por el ATL o el AFP [8, 9]. Por medio del ADMP®, se podrán laminar a alta velocidad las telas necesarias para la fabricación de los rigidizadores y por medio de procesos sencillos de corte y conformado, se podría disponer de rigidizadores rectos de una manera altamente productiva.

Es en esta etapa del proceso donde se centra el presente trabajo, en el cual partiendo de un rigidizador recto y por medio de un molde adaptativo se consigue obtener la geometría final del rigidizador. En estudios previos con preimpregnados [10], y no con fibra seca como en el presente trabajo, se ha estudiado la viabilidad del paso de rigidizador recto a rigidizador curvo. Este nuevo proceso da lugar a un aumento de productividad y a una disminución del coste debido a la presencia de un único molde. El comportamiento de la preforma del rigidizador a estas variaciones se evaluará analizando la formación de arrugas tanto interna como externamente. Aunque la evaluación cuantitativa de las arrugas no está normalizada, un criterio objetivo comúnmente aceptado por los especialistas aeronáuticos es que una ondulación de las fibras es arruga, y por lo tanto es un defecto que hace que la pieza no sea válida, cuando la altura máxima de la ondulación de una capa de fibras es mayor que el espesor de la capa de fibras.

Para el desarrollo de la automatización de esta tecnología de preformado mediante molde adaptativo se diseñará y fabricará un prototipo a escala que constará de un molde seccionado con determinados actuadores capaces de deformar

el molde en las diferentes geometrías necesarias.

1. EXPERIMENTAL

1.1. MATERIALES

Los materiales de las preformas de los rigidizadores fueron tejidos uniaxiales y biaxiales de fibra de carbono de calidad aeronáutica en orientaciones 0, 90, 45 y -45 º, de Saertex. Todos ellos llevaban una ligera aplicación (2-5 g/m^2) de "binder" termoplástico (Epikote 05311, de Hexion) para la realización de la compactación. Para el estudio de las características del molde adaptativo se usaron siliconas de moldeo en frío (Elastosil M4470) y chapa de acero inoxidable de 1,5 mm de espesor. Para el cierre y deformación del molde se utilizó bolsa de vacío de referencia (NBF-740-LFT, de Airtech) sellada con masilla adhesiva (VBS-230, de Airtech). Para la validación en pieza acabada se realizaron infusiones con la resina RTM6.

1.2. GEOMETRÍA Y FABRICACIÓN DE RIGIDIZADOR RECTO

Los rigidizadores de las pieles del ala tienen principalmente dos características, curvatura y presencia de "staggers". La curvatura es la asociada a la geometría de la piel del ala en los dos planos y el "stagger" es un cambio brusco de pendiente debido a los cambios de espesor de la piel del ala. Teniendo en cuenta la geometría y dimensiones de un ala real se definieron las dimensiones de un demostrador de rigidizador recto en forma de "T" a escala, como se muestra en la siguiente Figura 2 junto con el diseño del demostrador del rigidizador.

El rigidizador recto se fabricó mediante el preformado independiente de dos L's rectas utilizando un molde calefactado a 120 ºC y aplicando la presión mediante bolsa de vacío consiguiendo una presión negativa de aproximadamente 0,985 bar. Una vez fabricadas, las dos L's se juntaron junto con un perfil uniaxial de fibras de carbono, denominado "rovin", que rellena el hueco que forman los radios exteriores de las dos L's.

1.3. VIABILIDAD DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN

Con el conjunto formado por las dos L's y el "rovin", se dispondría de un rigidizador recto que se deformaría para adaptarlo a su geometría final con un molde adaptativo. Teniendo en cuenta que este proceso es completamente novedoso se realizó un estudio de viabilidad del nuevo proceso de deformación de rigidizador recto. Se estudiaron principalmente 4 variables:

- Material del molde. Se trabajo desde materiales deformables como silicona hasta materiales rígidos seccionados, para otorgar deformabilidad al molde.
- Geometría del molde. En el caso de los moldes de silicona la geometría era muy simple albergando una cavidad para alojar el rigidizador con sección en T. En el caso de los moldes seccionados la geometría era mucho mas compleja para poder dar lugar a curvaturas cóncavas y convexas.
- Tipo de fuerza de cierre del molde. Se aplicaron fuerzas de manera mecánica en el cierre del molde. Se aplicó esta fuerza en cinco zonas de aproximadamente 150 mm. Asimismo, también se realizó el cierre del molde introduciéndolo en un film polimérico sellado del cual salía un tubo por medio del cual se realizaba vacío.
- Tipo de fuerza de deformación del molde. La deformación del molde se realizó desplazando los elementos mecánicos de cierre uno respecto del anterior en función de las diferentes formas requeridas. También se realizo la deformación del molde por medio de bolsa de vacío, obligando a adaptarse al molde a la forma de un utillaje rígido con la forma final mecanizada.

En todos los casos el proceso de deformación se realizó a 120 ºC y el desmoldeo de la preforma a temperatura ambiente. El calentamiento se llevo a cabo mediante mantas calefactoras y el control de temperatura se realizó con termopares.

La evaluación de los resultados se realizó mediante el análisis microscópico de las ondulaciones de las capas de fibras presentes en le rigidizador. Las imágenes de microscopía óptica fueron tomadas con un microscopio modelo Eclipse LV150 de Nikon. Previamente, se llevó a cabo la preparación metalográfica de las muestras empleando una pulidora Buehler modelo Phoenix 4000. El desbaste se realizó utilizando una lija lubricada con agua y paños con partículas de diamante de 9 y 3 micras. Todas las imágenes se tomaron a 10 aumentos y las ondulaciones se caracterizaron midiendo tanto la longitud de estas, como su altura máxima.

1.4. DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE PROTOTIPO DEL MOLDE ADAPTATIVO

Se realizó el diseño completo desde el concepto hasta el despiece. Asimismo, se realizó la fabricación, el montaje y la validación del prototipo.

Característica	Ala Real	Demostrador
Longitud (m)	10-30	1,2
Espesor del alma (mm)	8-12	10
Altura del alma (mm)	50-75	75
Anchura del pie (mm)	50-100	50
Radio de curvatura (m)	>30	10
Altura de "stagger" (mm)	5-15	15
Rampa de "stagger"	1:20	1:20

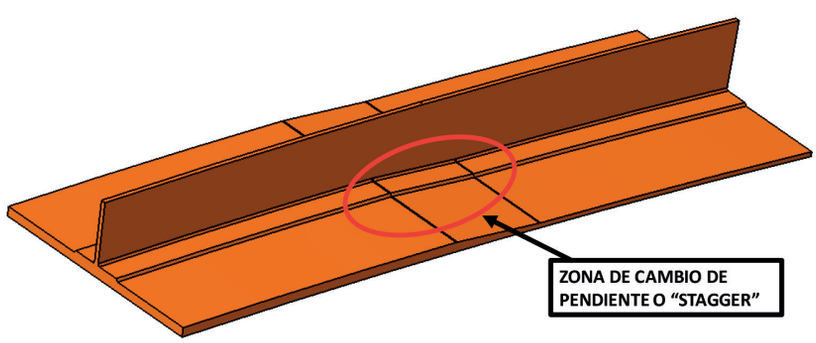


Figura 2: Especificaciones y diseño del rigidizador

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN DEL RIGIDIZADOR RECTO

2.1.1. Caracterización del rigidizador recto

La validación del nuevo proceso se llevó a cabo mediante la comparación de las ondulaciones de las fibras de la preforma infusionada en toda la sección de la pieza. Esta comparación se ha realizado entre el rigidizador recto de parti-

da y los rigidizadores resultantes de los diferentes procesos de deformación. Para ello se caracterizó el rigidizador recto (*Figura 3*), observándose una ondulación de aproximadamente 0,2 mm, equivalente al espesor de una capa uniaxial de fibra de carbono. Teniendo en cuenta que no se había aplicado ninguna deformación al rigidizador, se consideró que esta ondulación es inherente al material y cualquier ondulación superior a ésta, se considerará una ondulación o arruga generada en los procesos de deformación posteriores.

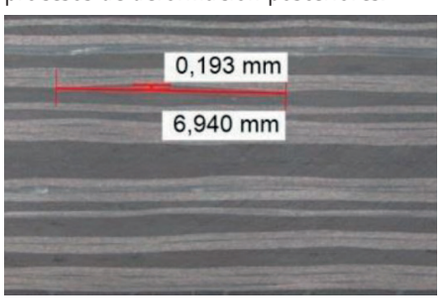


Figura 3: Micrografía de las ondulaciones de un rigidizador recto

2.1.2. ANÁLISIS DEL MATERIAL Y GEOMETRÍA DEL MOLDE ADAPTATIVO

El material del molde adaptativo debía ser lo suficientemente rígido para poder aplicar cierta presión a la preforma en el momento del cierre, pero lo suficientemente deformable en los planos de curvatura y de "stagger" para poder adaptarse a la forma final de rigidizador.

Se fabricó un molde de silicona con cavidad en forma de T, y se fijaron flejes metálicos a las paredes exteriores del molde para poder deformarlos mediante un utillaje diseñado para tal fin. El utillaje se componía de cinco dispositivos de cierre de molde, los cuales ejercían más o menos presión en función de la tensión a la que sometíamos los muelles. En la Figura 4 se muestra el molde de silicona y el utillaje para su deformación. Con este molde y utillaje se realizó la deformación del rigidizador recto hacia una curvatura de radio 10 m. Los resultados obtenidos para una curvatura de 10 m de radio se muestran en la Figura 5. Como se observa en la micrografía, la distancia entre el punto más bajo y el más alto de la ondulación, es de 1,299 mm, aproximadamente 6 veces mayor que la ondulación inherente al material de partida en el rigidizador recto (0,2 mm).

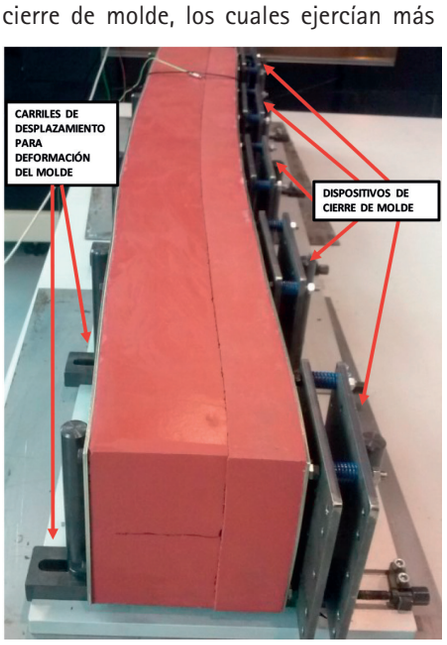


Figura 4: Molde de silicona y utillaje para deformarlo

Una de las razones más importantes de la aparición de arrugas en la preforma del rigidizador puede ser los distintos esfuerzos a los que se somete a las distintas capas de fibra en la deformación. La deformación del molde al curvarlo se puede comparar a la deformación de una viga apoyada sobre los extremos sometida a una carga. En estas condiciones aparecen dos zonas distintas según el esfuerzo que soportan. Una zona que soporta esfuerzos de tracción, y otra que soporta esfuerzos de compresión. La línea que separa estas dos zonas se denomina fibra neutra. Al curvar el rigidizador que contiene el molde descrito, estamos sometiendo a las fibras de carbono que se encuentran por debajo de la fibra neutra a esfuerzos de compresión. Estos esfuerzos de compresión generan arrugas en las fibras de carbono. Estas arrugas se producen en la zona donde el desplazamiento con respecto a la planitud es mayor, como se observa en la Figura 5.

Para evitar que se formen estas arrugas debemos diseñar un molde que asegure que todas las fibras de la preforma contenida en él, sufran esfuerzos de tracción. Para ello, se diseñaron moldes basados en chapas de acero inoxidable sin ningún tratamiento térmico seccionadas, unidas en los extremos como se muestra en la Figura 6.

Se diseñaron tres moldes seccionados. El primero para realizar curvatura convexa, es decir las secciones pivotan sobre la parte inferior del molde. La parte superior de cada sección no está unida, ni a la anterior ni a la siguiente, por lo que al deformar el molde de forma convexa desde la parte inferior a la superior únicamente se producen esfuerzos de tracción en las fibras del rigidizador.

El segundo, se diseñó para realizar un "stagger" en la parte central, es decir, curvatura convexa y cóncava en secciones adyacentes. Por lo tanto, la parte central se divide en dos partes. Las secciones de la primera parte pivotan en la parte de arriba y se separan en la parte de abajo y las secciones de la segunda parte se comportan al revés.

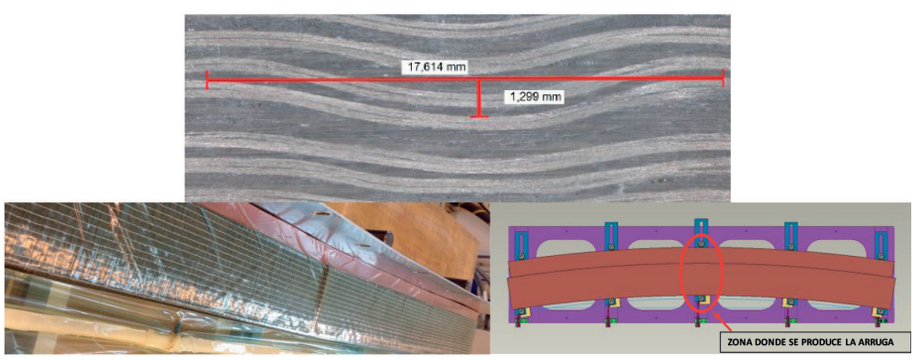


Figura 5: Micrografía de las ondulaciones del rigidizador deformado (arriba), arruga formada por las fibras de carbono sometidas a esfuerzos de compresión (izquierda) y detalle de la zona del molde deformado con el utillaje donde se produce la arruga (abajo)

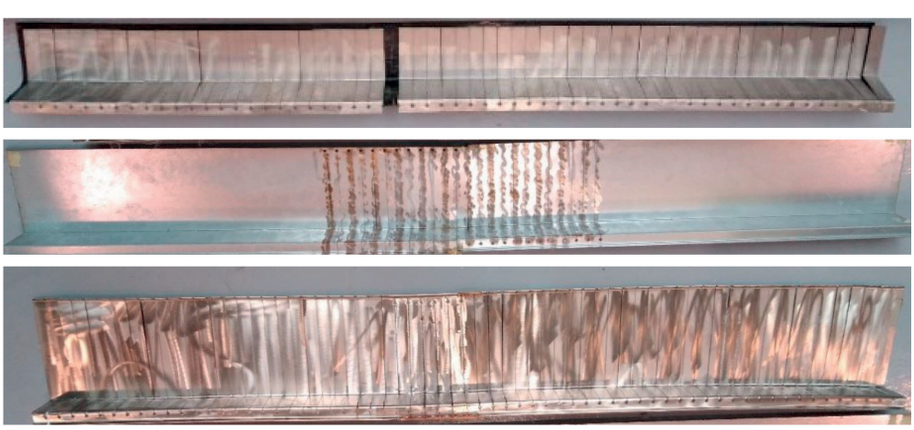


Figura 6: Moldes de acero seccionado

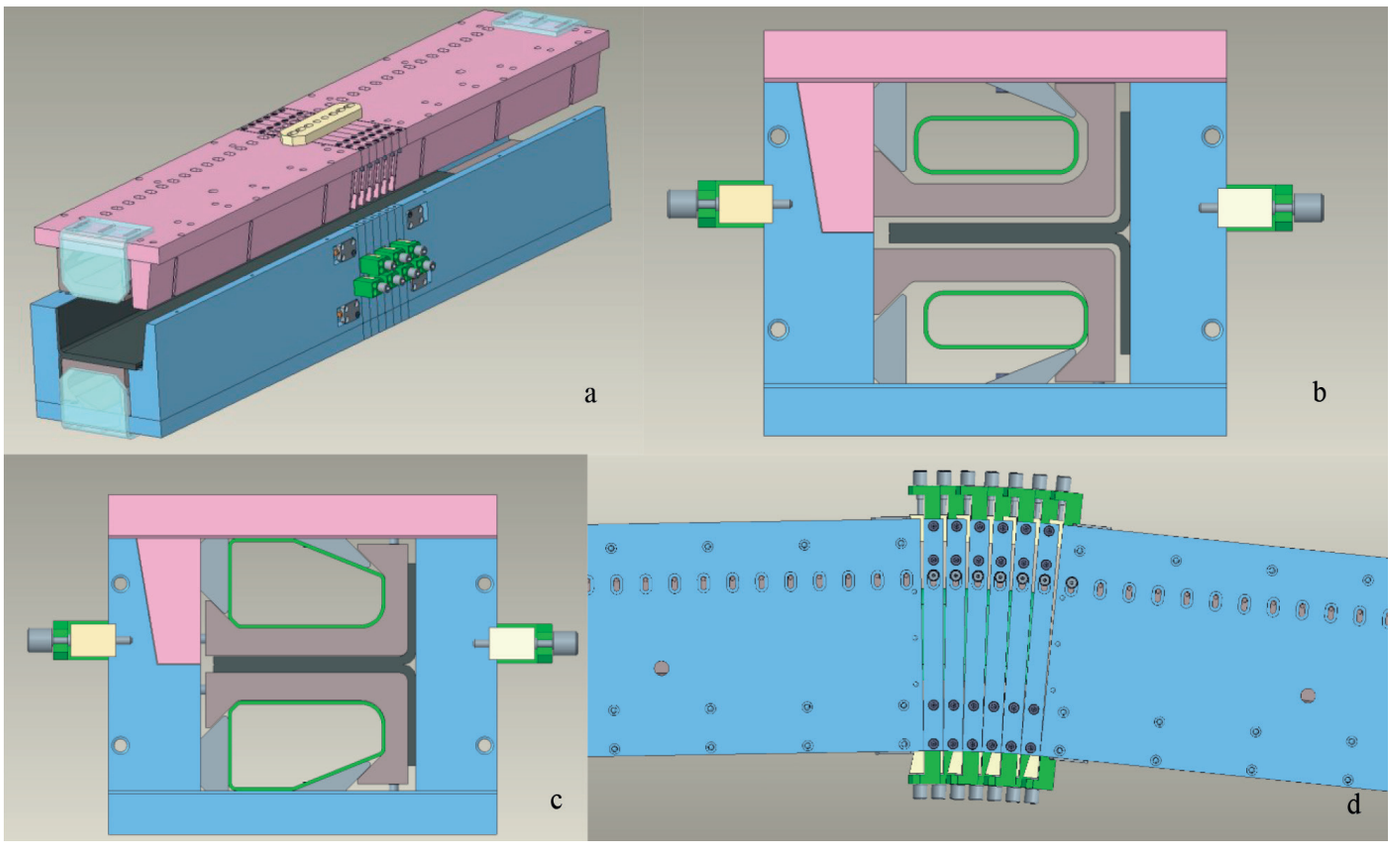


Figura 7: Diseño del molde adaptativo (a). Sección en posición molde abierto (b). Sección en posición molde cerrado (c). Molde en posición de deformación (d)

El tercer molde se diseñó para realizar un "stagger" y curvatura simultáneamente, por lo tanto, el molde tiene cuatro partes. Los dos extremos están dispuestos para hacer curvatura convexa y la parte central para hacer un "stagger" como en el caso anterior.

La incorporación al proceso de estos moldes disminuía en gran medida la aparición de arrugas, sin embargo, no se pudieron erradicar por completo.

2.1.3. Análisis de fuerzas de cierre y curvado del molde

Se estudiaron diferentes formas de ejercer las fuerzas de cierre y de deformación del molde. Fundamentalmente, se comparó el comportamiento ejerciendo fuerzas mecánicas elevadas con peso y sargentas, lo que daba lugar a zonas con importantes diferencias de presión, con fuerzas más bajas pero homogéneas conseguidas con vacío. Se observó, que el vacío tanto para cerrar el molde recto como para deformarlo eliminaba por completo la aparición de arrugas. Esto era debido, principalmente, a la homogeneidad de la presión. Esta desaparición de arrugas se comprobó en rigidizadores tanto con curvatura como con "stagger" utilizando el molde seccionado, cerrado y deformado por bolsa de vacío. La ondulación observada, 0,186 mm, era incluso menor que la definida como inherente al material, 0,200 mm.

2.2. DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACION DE PROTOTIPO DE MOLDE ADAPTATIVO

Una vez estudiada la viabilidad del proceso de deformación del rigidizador recto se pasó a diseñar un molde adaptativo automatizable para deformar el rigidizador recto basado en las conclusiones a las que se llegó en el apartado anterior.

En la Figura 7 se muestra el diseño de molde adaptativo, el detalle de una sección, en modo de molde abierto y en modo de molde cerrado y el molde adaptativo en posición de deformación convexa. Este dispositivo se compone de 6 secciones independientes unidas únicamente por un hilo tórico. A cada lado de las secciones se encuentra una pieza para darle la longitud del demostrador definido (1200 mm). Cada sección consta de un marco compuesto por piezas que se pueden separar para introducir la preforma del rigidizador. Este marco contiene las piezas que componen el molde en forma de "T" que pueden desplazarse en el plano vertical. Este desplazamiento y el cierre del molde ocurre por el hinchamiento del tubo

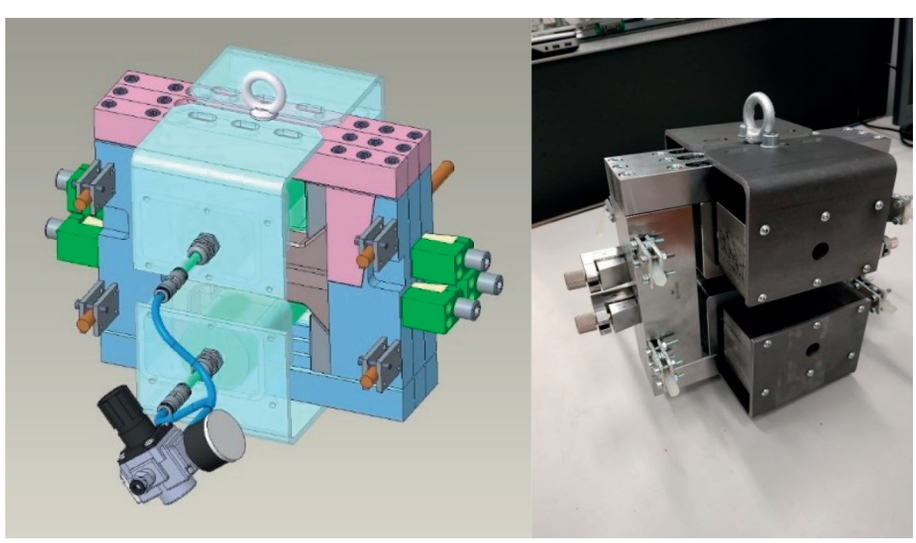


Figura 8: Dispositivo formado por tres secciones, fabricado y montado

neumático que está alojado en la cavidad adyacente al molde en T, en cada uno de los lados. Para desplazar una sección con respecto a la otra aplicando únicamente esfuerzos de tracción en todas las fibras de la preforma, se dispone de una cuña que se introduce entre las secciones haciendo que se separen solo en uno de los lados. De esta manera podemos producir curvaturas convexas o cóncavas en función de las necesidades en todo el largo del molde.

Para validar los conceptos de diseño se necesitaba comprobar experimentalmente tres hipótesis:

- El hinchamiento de los tubos neumáticos proporciona a las piezas en forma de "L" que forman el molde en forma de "T" un movimiento de cierre uniforme y simétrico que da lugar al cierre del molde.
- La fuerza de cierre del molde proporcionada por el tubo neumático no debía generar ninguna componente longitudinal que fuera superior a la fuerza necesaria para deformar el hilo tórico que mantiene unidas las diferentes secciones. De esta manera, el cierre del molde no provoca desplazamientos entre secciones.
- El desplazamiento de las cuñas da lugar a un movimiento de las secciones que provocan únicamente esfuerzos de tracción en las fibras del rigidizador.

Para comprobar estas tres hipótesis se fabricaron tres secciones junto con cuatro alojamientos para los extremos de los tubos neumáticos como se observa en la Figura 8. El hilo tórico empleado de 6,5 mm de diámetro se tensó utilizando el dispositivo de plaquitas que se observa en la Figura 8. Se fabricaron dos tubos neumáticos cerrados de 150 mm de longitud y 80 mm de diámetro. El espesor de la pared del tubo era de 3 mm. Se realizaron experimentos de hinchamiento desde 0 hasta 3 bar, y se comprobó que el desplazamiento de las piezas que formaban la cavidad del molde era uniforme y simétrico. Asimismo, el hinchamiento de los tubos no generaba desplazamientos entre las secciones. Por último, se comprobó que una vez que el hilo tórico estaba tensado, y el molde cerrado, la entrada de las cuñas en el hueco entre dos secciones provocaba un desplazamiento controlado y medible.

3. CONCLUSIONES

La caracterización de la ondulación inherente al material se puede realizar por microscopia, considerando que una ondulación es una arruga no admisible en un componente aeronáutico, cuando la cresta de esa ondulación es superior al espesor de la capa de material que forma la ondulación. En el caso del material del que se compone el rigidizador recto caracterizado en el presente trabajo, la ondulación observada es inferior a 0,2 mm, mientras que el espesor de cada capa es aproximadamente 0,25 mm.

Cuando sometemos a las fibras que componen el rigidizador a una deformación convexa aparecen ondulaciones de 1,3 mm, es decir arrugas no admisibles en componentes aeronáuticos. Estas arrugas aparecen en la parte inferior del rigidizador. Una de las principales razones de la aparición de arrugas es que las fibras están sometidas a esfuerzos de compresión debido a que el molde presenta la fibra neutra aproximadamente en la mitad de la cavidad donde se aloja el rigidizador, por lo que comprime las fibras que se encuentran por debajo.

El uso de dispositivos mecánicos para cerrar el molde y deformarlo, proporciona fuerzas no uniformes en el molde, de esta manera se concentran en ciertos puntos del rigidizador presiones altas mientras otras partes del rigidizador están sometidas a presiones leves. Estas diferencias de presión originan arrugas.

La utilización de moldes seccionados de chapa de acero diseñados para que la fibra neutra siempre se encuentre por debajo de la cavidad que aloja al rigidizador, asegura que todas las fibras que lo componen estén sometidas a esfuerzos de tracción, y no aparecen ondulaciones superiores a las ondulaciones inherentes al material.

El vacío proporciona fuerzas uniformes de cierre y de deformación del molde. El cierre del molde por medio del vacío se consiguió envolviéndolo en un film sellado en el cual se realizaba vacío. Para conseguir la forma final del rigidizador se deformo el molde envolviendo éste junto con un útil de la forma final en un segundo film sellado, al cual también se le aplicaba vacío. De esta manera se conseguían rigidizadores con curvatura y "stagger" con ondulaciones similares a las ondulaciones inherentes al material.

La posibilidad de automatización de este nuevo proceso se ha validado mediante el diseño y fabricación de un prototipo compuesto de tres secciones independientes, demostrándose la capacidad de desplazar una sección con respecto a la otra originando únicamente esfuerzos de tracción, así como la capacidad de generar presiones de cierre uniformes e incluso superiores a 1 bar por medio de tubos neumáticos.

4. LÍNEAS FUTURAS

Se fabricará el prototipo completo compuesto por seis secciones y una parte fija a cada extremo para completar la longitud del demostrador de rigidizador definido. En este prototipo se incorporarán los sensores adecuados para monitorizar las variables del proceso fundamentalmente destinadas a controlar la temperatura y las presiones a las que sometemos al rigidizador. Asimismo, se trabajará en el desarrollo de métodos de inspección no destructiva para evaluar la calidad del rigidizador tanto detectando y cuantificando las ondulaciones de las fibras como analizando la orientación de estas.

REFERENCIAS

- Balasubramanian M, Composite Materials and Processing, CRC, 2014
- Campbell FC, Manufacturing Processes for Advanced Composites, Elsevier 2004
- Breuer UP, Commercial Aircraft Composite Technology, Springer, 2016
- Hagnell MK, Åkermo M, A composite cost model for the aeronautical industry: Methodology and case study, Composites Part B. 2015. Vol. 79. P. 254-261. DOI: https://10.1016/j.compositesb.2015.04.043
- Soares BA, Henriques E, Ribeiro I, Freitas M, Cost analysis of alternative automated technologies for composite parts production, International Journal of Production Research. 2018. P 1-14. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1508903
- Schubel PJ, Cost modelling in polymer composite applications: Case study – Analysis of existing and automated manufacturing processes for a large wind turbine blade, Composites: Part B. 2012. Vol. 43. P. 953–960. DOI: https://10.1016/j.compositesb.2011.11.036
- Fauster F, Schillfahrt C, Hueber C, Schledjewski R, Automated profile preforming for structural components, Sci Eng Compos Mater. 2016. P. 1-20. DOI: https://doi.org/10.1515/secm-2015-0377
- Proving viability of dry fabrics, infusion for large structures, Composites Word, April 2019- P. 18-21.
- Automation of dry fibre composites materials: current state and future possibilities. Buelga R, Moreno JA, Rubio L, SAMPE Europe Conference 2018 Southampton.
- Chamorro FJ, Mora M, http://revista.aemac.org/, Vol 2, nº3, pag. 115-118.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ministerio de economía y competitividad por su apoyo por medio del proyecto Famast (RTC-2016-5148-4), con el que se ha podido financiar parte de esta investigación.