

Útiles de automatización en procesos de fabricación de piezas complejas de CFRP para la industria aeronáutica

Carlos Campos Garrido^{1,2,3}, Enrique Casarejos Ruiz^{1,2}, Abraham Segade Robleda¹, Jacobo González Baldonado¹, Sofía Suarez García¹

¹Grupo de Diseño y Simulación Numérica, CINTECX, Universidade de Vigo, Vigo, España. Email: e.casarejos@uvigo.es

²UTINGAL S.L., Parque Empresarial Areas, E-36711 Tui, España. Email: cacampos@uvigo.es

Resumen

Este trabajo presenta la implementación con éxito de tres operaciones automatizadas diferentes relacionadas con piezas complejas CFRP multicapa. En cada caso, se ha desarrollado un útil (end-effector o cabezal) específico que se acopla a un brazo robótico convencional. El primer caso está relacionado con el taladro de piezas híbridas multicapa (CFRP-metal), utilizando un taladrado con parámetros de proceso variables para adecuarse al material sin cambio de herramienta de corte. Otros dos cabezales resuelven las necesidades relacionadas con el mazizado estructural de paneles de celdas para instalar puntos de anclaje. El tamaño y forma compleja de la pieza requieren cabezales específicos para resolver el proceso, eliminando primero la piel de CFRP y luego inyectando la resina en las celdas. Los cabezales desarrollados incluyen visión artificial y sensores para guiar las operaciones. Los cabezales fueron desarrollados y ensayados en condiciones reales de proceso automático, mostrando su correcta funcionalidad.

Palabras clave: Brazo robótico. Mecanizado robotizado. Aeronáutica. CFRP. Fabricación.

Abstract

This paper presents the successful implementation of three different automated operations related to complex multilayer CFRP parts. In each case, a specific end-effector was developed, ready to be coupled to a conventional robotic arm. The first case is related to drilling holes in hybrid multilayer (CFRP-metal) parts, with variable process parameters to adapt to the material changes without changing the cutting tool. Two other tools solve the needs related to structural potting in honeycomb panels, to place anchor points. Both, the size of the part and the complexity of correct access, demand specific tools to solve the process requiring first removing the CFRP skin and then applying the resin in the cells. The end-effectors developed include machine vision and sensors to guide the operations. The end-effectors were developed and tested under real process conditions, showing their correct functionality for automation the processes.

Keywords: Robotic arm. Robotic machining. Aeronautics. CFRP. Manufacturing.

1. Introducción

Las piezas fabricadas con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) son imprescindibles en la industria aeronáutica actual, impuesto por la necesidad de limitar el consumo de energía para reducir tanto el coste operativo (esencialmente el consumo de combustible, directamente relacionado con el peso estructural) como la huella de carbono en todo el ciclo de vida de la aeronave. Los estudios de optimización del diseño abordan de manera sistemática el diseño global del avión empleando opciones basadas en CFRP

[1]. Este escenario obliga a reconsiderar toda la cadena de costes en el proceso de fabricación de los componentes, y los estudios sobre las grandes piezas del fuselaje fueron abordados tempranamente [2]. En los últimos años, las piezas de composites, consideradas de alto coste, están resultando rentables en diferentes campos de la industria [3-4], sobre todo gracias a la reducción del tiempo del ciclo de fabricación mediante la automatización de los procesos, y a pesar de los costes tanto del equipo asociado a producción como de la materia prima. El uso de piezas de CFRP ofrece la oportunidad y la

necesidad de reducir el número de uniones y de diseñar piezas más grandes, con el mejor ejemplo en el caso del fuselaje en aeronaves. Por otra parte, existe un problema recurrente en el sector aeronáutico relacionado con los tiempos de producción y las piezas de mayor tamaño pueden ayudar a reducir los plazos de producción. Sin embargo, la fabricación de piezas CFRP es un proceso manual, que requiere mucho tiempo y personal altamente cualificado, con un elevado balance de costes.

Industrialmente, está ya aceptado que la manera de alcanzar las tasas de producción requeridas con costes limitados es automatizar de manera continuada los procesos de fabricación de piezas CFRP [5-6]. El éxito de la implantación de sistemas robotizados se basa tanto en el incremento de la productividad, reduciendo el tiempo de retorno de la inversión, como haciendo menos variable el tiempo del proceso de fabricación, y optimizando la agenda de producción. Otra razón de peso a favor de la automatización es la repetitividad inherente al proceso, que permite hacer más predecible la tasa de fallos, e incluso reducirla drásticamente. Por lo tanto, la automatización puede reducir directamente los costes de producción. La combinación de la automatización de la fabricación compleja y de las piezas de gran tamaño plantea retos específicos a los procesos de producción y requiere una planificación compleja que ha sido presentada por algunos autores como un 'orquestación de procesos' [7]. Estas soluciones incluyen brazos robóticos, fijos o móviles, para proporcionar ejes de mayor recorrido [8].

Se ha estudiado el uso de brazos robotizados dedicados al mecanizado de CFRP para el recorte y canteado [9] y fresado [10], y se cuantificó la calidad según los daños superficiales, delaminación y desviaciones de forma, en función de la velocidad de avance y de corte. La evaluación de la precisión general del fresado robotizado es analizada por diferentes autores [11-12]. La planificación del proceso, incluidos los brazos robóticos, ya está integrada en los paquetes de software de control, como en el caso de las normas ISO 14649 e ISO 10303-238 [13].

Las características estáticas y dinámicas específicas de los brazos robóticos requieren una planificación específica de las operaciones de mecanizado para mejorar la precisión mediante el uso de un mecanismo de compensación multi-eje [14], control de posición en función de la fuerza [15], el análisis cinemático del brazo [16-17], o la rigidez efectiva del brazo [18]. Alternativamente, un diseño específico de un brazo robótico para el mecanizado puede mejorar la rigidez y las propiedades dinámicas, así como los costes [19].

En las siguientes secciones se muestran tres herramientas desarrolladas para abordar dos procesos distintos. Por una parte, el taladrado de piezas híbridas

multicapa. Por otra, el relleno estructural de los panel de celdas. A continuación se describen las soluciones desarrolladas en cada caso y los resultados obtenidos.

2. Taladrado de piezas híbridas multicapa

La producción de componentes multi-materiales para el diseño de estructuras ligeras presenta nuevos retos para los procesos de fabricación. El sector aeroespacial tiene muchas piezas diferentes y conjuntos complejos. Entre ellos, los modelos modernos incluyen nuevas piezas híbridas con materiales CFRP y metal en varias capas combinadas. El proceso de taladrado de una pieza de esta características debe resolver la aplicación de las soluciones conocidas para fabricación de los diferentes materiales por separado, y hacerlo en una herramienta robotizada que pueda acceder de manera adecuada a la geometría extensa y compleja de los paneles de fuselaje. .

2.1. End-Effector de taladrado

El cabezal de taladrado debe permitir, por una parte, accionar la herramienta con una velocidad controlada y ajustada a la profundidad (según la capa de material). Y por otra parte, reposicionar la herramienta en dirección axial y ángulo de ataque a la superficie para optimizar el ajuste sin mover el brazo, situado en la posición nominal.

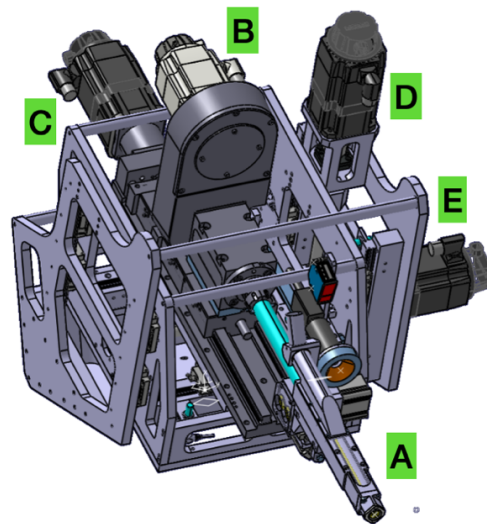


Figura 1. Cabezal de taladrado, con la herramienta de corte (A) actuada por el motor (B). La profundidad la regula el actuador (C) de la guía lineal, que se reposiciona con las guías actuadas (D)(E). Se pueden ver también la cámara de visión montada junto al porta-herramienta y el sensor laser sobre la misma, apuntando a la zona de trabajo.

El porta-herramienta se ha montado sobre una guía lineal que regula la profundidad y ésta, a su vez, está montada en una sub-estructura basculante sobre otras dos guías que permiten modular el ángulo y el desplazamiento axial, Figura 1. El accionamiento se ha desplazado de manera coaxial al eje de herramienta

para evitar alargar el cabezal con el consiguiente aumento de palanca del cabezal sobre el brazo, y para hacerlo más compacto. El conjunto se monta sobre una estructura que se acopla de manera directa al brazo robótico. Una cámara y un sensor de distancia laser apuntado a la zona de trabajo permite revisar y reajustar el proceso desde la posición fijada por el brazo, Figura 2.

El programa de trabajo de desarrollo del cabezal incluyó el análisis del tipo de herramienta de corte (material, recubrimiento, forma) y procesos de velocidad adecuados para adaptarse al caso de estudio (fuera del alcance de este trabajo), basados en trabajos previos y la experiencia del fabricante.

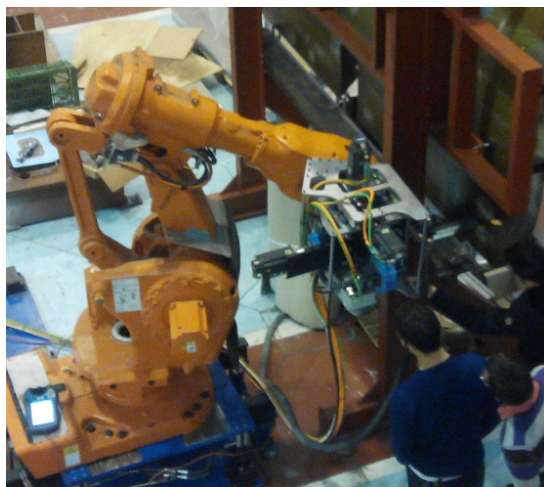


Figura 2. Ensayo del cabezal de taladrado montado sobre el brazo robótico y en posición para el taladrado del panel.

2.2. Resultados

El caso de estudio se hizo sobre un panel de grandes dimensiones y que estaba formado, en las zonas de taladrado por un conjunto híbrido multicapa mostrado en la Figura 3. El corte se ajustó preservando la integridad de las diferentes capas del panel (fuera del alcance de este trabajo), y se verificó también la tolerancia en concentricidad y perpendicularidad con valores adecuados al proceso especificado, Figura 4.

3. Mazizado estructural

Las puertas y escotillas de los aviones se fabrican con gruesos paneles sándwich de CFRP y nido de abeja y requieren el relleno de algunas regiones con resinas epoxi para hacer volúmenes monolítico para la fijación de elementos metálicos, proceso conocido como 'mazizado estructural'. La operación de mazizado es manual y quiere personal capacitado, suponiendo un cuello de botella tanto en las cadenas de producción como en los ratios de producción.

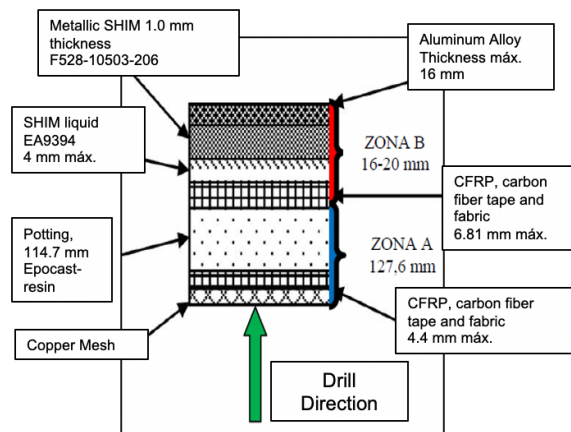


Figura 3. Esquema del material objeto de estudio, con 7 capas de materiales tipo CFRP y metálico.

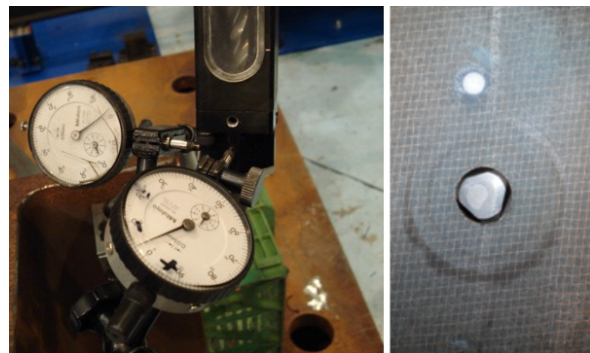


Figura 4. Verificación de las tolerancias de taladrado.

El mazizado consiste básicamente en inyectar resina epoxi en los paneles. Es una actividad muy exigente en cuanto a procedimientos manuales, que requiere mucho tiempo y que implica la manipulación de productos químicos. La calidad del proceso depende en gran medida de las habilidades del personal. La posibilidad de automatizar este proceso reducirá inmediatamente el tiempo del proceso, el material desperdiciado y la tasa de rechazo. Al mismo tiempo, aumentará la repetitividad y la seguridad de la manipulación. La automatización requiere la integración de las operaciones de mecanizado para eliminar la piel de CFRP y a continuación, la inyección de resina en las celdas de panel. El procedimiento incluye operaciones agresivas (fresado) y complejas (inyección) ya que los núcleos gruesos tienen también diferentes formas, tamaños y profundidades de celdas.

3.1. End-Effector para fresado

Eliminar las capas de piel de material CFRP mediante un brazo robótico requiere un control preciso del posicionamiento del cabezal. Además de la calibración de la posición de las trayectorias del brazo, es imprescindible incluir en el cabezal un sensor para

marcar el nivel de la superficie de manera precisa. La posición nominal en el plano de proyección se alcanza en una tolerancia de 0.08mm, proporcionada por el control de la trayectoria del brazo. Sin embargo, debido a la superficie curvada y a las tolerancias de fabricación, la profundidad no está bien definida para eliminar la piel y no comprometer la integridad del panel.

El cabezal incluye una husillo compacto y un sensor de desplazamiento (resolución 0.01mm) que toca y marca la referencia de la superficie para definir la profundidad de entrada de herramienta. El brazo reubica la herramienta de corte según la marca de referencia actualizada. El diseño del cabezal se ha hecho en una configuración de 90° para husillo y sensor. El husillo está ajustado de forma normal a la brida de enlace de la muñeca robótica, para proporcionar la máxima rigidez al conjunto, ver Figuras 5, 8 , 9.

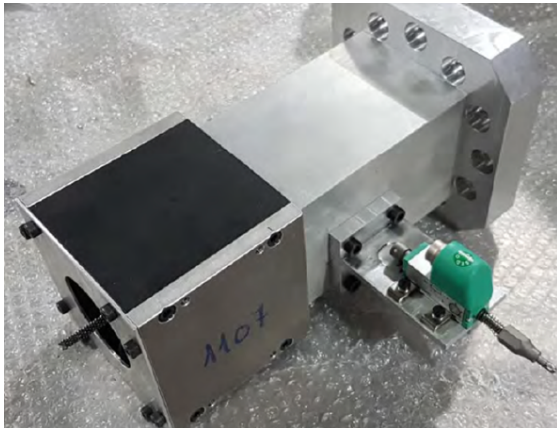


Figura 5. Cabezal de fresado, con la herramienta de corte y el sensor situados a 90°. La carcasa de aluminio se acopla directamente a la brida del brazo. El peso total de 27kg.

3.2. End-Effector para inyección

La necesidad de rellenar las celdas con resina evitando cualquier hueco que reduzca la resistencia estructural, invita a considerar la inyección directa en cada celda individual, como se hace de manera manual. En el desarrollo del programa de automatización se han probado diferentes alternativas de inyección para una y múltiples celdas, y con diferentes prototipos. La mejora inmediata a una inyección individual por celda es un inyector multi-celda. El tiempo necesario se reduce directamente por el número de celdas llenadas simultáneamente.

La resina puede ser inyectada directamente en una región de la superficie con la boquilla que recubre todo el patrón de celdas bajo ella. El útil de inyección se reduce a la cámara de resina con un pistón eléctrico o neumático y la boquilla. La definición fina de la posición del cabezal no limita el proceso al utilizar un

diámetro de boquilla algo mayor que el orificio de la piel. Todas las celdas situadas debajo de la boquilla estarían llenas, y la propia piel definiría el límite de inyección de la boquilla.

El llenado del panel depende sólo del flujo forzado desde un lado. La boquilla no ayuda a la distribución del fluido, al contrario de lo que ocurre cuando se utilizan cánulas para la inyección. El efecto general es que se pueden crear más fácilmente huecos, causados por la viscosidad de la resina y el efecto 'pegajoso' en las paredes de las celdas. Para mejorar la distribución de la resina, se coloca una boquilla de vacío en el lado opuesto del panel. De este modo, la resina se encuentra bajo el doble efecto de la presión de inyección en un lado y la sub-presión en el lado opuesto de cada celda. El prototipo es un cabezal de inyección multi-celda asistida por vacío, mostrado en la Figura 6.



Figura 6. Inyección multi-celda asistida por vacío. Arriba: Diseño del conjunto de inyección por pistón y boquilla de vacío sobre el panel. Abajo: proceso de inyección con el brazo y asistido por una cámara.

3.3. Resultados

La calidad de la pieza depende críticamente tanto de la posible delaminación y daños producidos en las capas de la piel CFRP, como de la correcta integridad de las celdas y del relleno sólido de las celdas, sin huecos, que comprometería la resistencia estructural.

El caso de estudio considerado corresponde al mazizado de la puerta principal del tren de aterrizaje del modelo Airbus A320. La puerta tiene dimensiones 1750mm x 1680mm, 60mm de grosor y pesa cerca de 6 kg. El núcleo del panel está hecho de polímero de meta-aramida impregnado con resina fenólica y curado (NOMEX) preferido en aplicaciones aeronáuticas, aeroespaciales, automoción, etc. [20]. La puerta esta recubierta a un lado por una piel CFRP compuesta por 1 capa de tejido de poliéster peel-ply (100g/m²) y 1

capa de pre-preg biaxial (sarga) 12K (400g/m²). La pieza se somete a múltiples operaciones con el fin de ubicar las piezas metálicas en ella. Además de otras acciones, hay 107 operaciones mazizado en regiones de 39mm de diámetro, Figura 7.

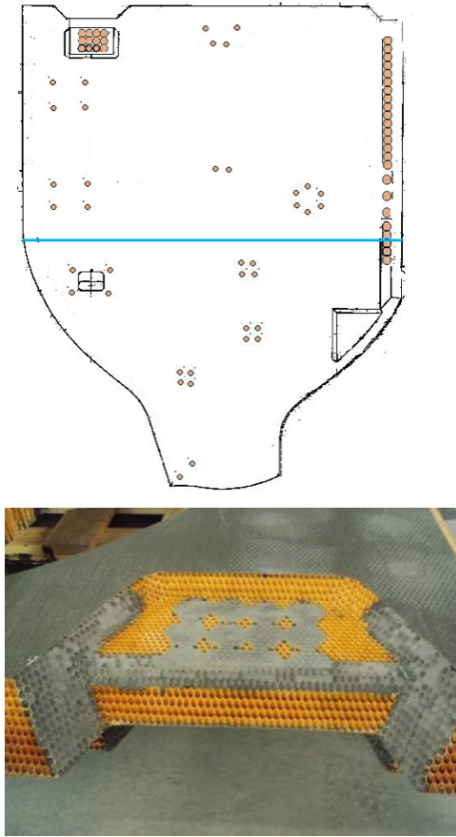


Figura 7. Arriba: Esquema de la puerta estudiada (1750mm x 1680mm x 60mm). Los puntos en color son zonas de mazizado (Ø 39mm). Abajo: Detalle de una zona después del mazizado.

El ensayo de automatización del proceso se hizo montando los cabezales sobre un brazo industrial convencional, Figura 8, y realizando las operaciones de fresado e inyección, para su posterior análisis. Ese resultado de producción sirve de verificación de la validez del proceso.

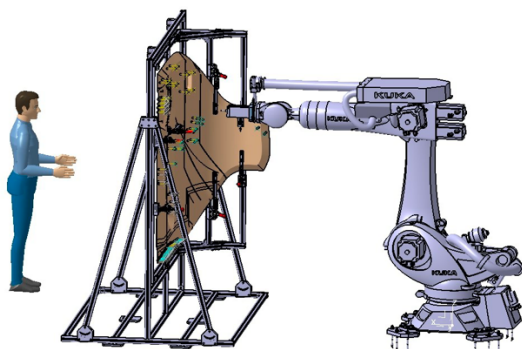


Figura 8. Montaje de operación de procesado de una puerta.

3.3.1. Fresado

El cabezal montado en el brazo robótico proporciona una rigidez limitada en comparación con un centro de fresado convencional. Además, los parámetros de fresado, principalmente el rango de par-velocidad de la herramienta, son mucho más limitados. El cabezal debe resolver el caso específico de tipo de piel, diámetro y profundidad considerado. En este caso de estudio, se trata de 107 operaciones iguales de fresado de cajera eliminando una piel fina (0.6mm, 2 capas) pegada al panel, y 39mm de diámetro. El corte se realizó por interpolación circular al diámetro específico

Al realizar esta operación es posible dañar las capas por delaminación y también es posible dañar el núcleo del panel si las paredes de las celdas son arrastradas por la herramienta de corte y se rompe la continuidad de la red de celdas. También hay que eliminar las rebabas, si las hay. Estos detalles son muy sensibles al control de la profundidad de fresado, que se ajusta cuidadosamente con el indicador de posición.

El operación y su resultado se muestra en la Figura 9. El corte se realizó por interpolación circular y dura 15.4 segundos (Ø39mm). La comprobación posterior a la operación se realizó mediante inspección visual, asistido por la cámara integrada. Las numerosas pruebas realizadas mostraron que el resultado del fresado es perfectamente adecuado a los requisitos de calidad. No se observó delaminación utilizando herramientas afiladas. La medida realizada con el sensor permitió ajustar la profundidad de corte para evitar rebabas apreciables y preservar la integridad del panel.

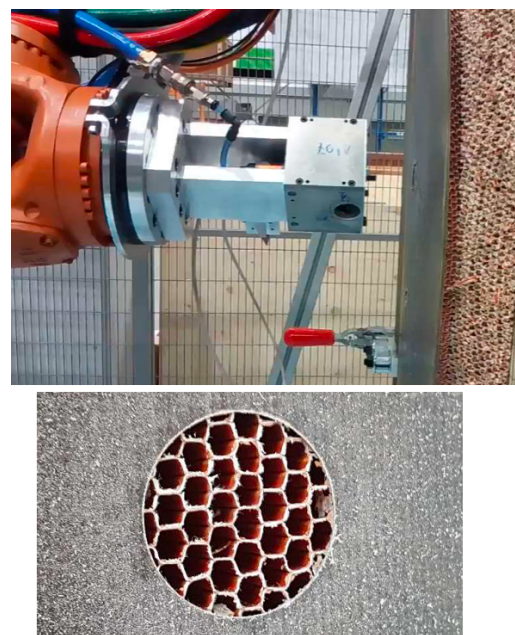


Figura 9. Fresado del panel: cabezal montado y posicionado y resultado del fresado (\varnothing 39mm).

3.3.2. Inyección

Desde los primeros trabajos [21] sobre inserciones mazizadas (1998), se utilizan ensayos y modelos numéricos (concretamente modelos de elementos finitos) para estudiar la resistencia a la extracción de las inserciones metálicas en núcleos rellenos de resina [22-28]. Basándose en el mismo tipo de análisis, otros autores desarrollaron análisis paramétricos para dimensionar el inserto al panel para ayudar en la etapa de diseño [29-30].

La calidad del mazizado para una prueba de aceptación se define no en base a pruebas de carga para probar, por ejemplo, la resistencia a la extracción de la fijación, sino en aspectos prácticos del proceso de fabricación, concretamente las características de la resina utilizada, el control del proceso de curado y el correcto relleno de las celdas. En lo que respecta a la evaluación para este estudio, la comprobación crítica es sobre el correcto llenado de las celdas, ya que la resina y el curado son especificados por el cliente (EADS-AIRBUS).

Los puntos de mazizado son posiciones para taladrar puntos de fijación. La integridad estructural de dicho punto de fijación requiere que no existan celdas vacías cerca del taladro central, ni grietas o huecos en dicho volumen. La resina debe rebosar para evitar este llenado parcial de las celdas. Para este tipo de comprobación se puede utilizar una imagen de cámara óptica. Pero esta inspección visual no ayuda a controlar el estado del volumen interno.

Los paneles deben ser examinados y calificados individualmente, por lo que deben aplicarse métodos No Destructivos para preservar la integridad la pieza. En este estudio se ha elegido la técnica de imagen radiográfica de rayos-X. La escala de grises observada en una imagen plana (2D) está relacionada con la radiodensidad de los materiales implicados y sus espesores. Los materiales implicados (piel, panel y resina de relleno) son esencialmente carbonados, con una radiodensidad similar. Dado que la proyección 2D del mazizado (pared de celdas, relleno y piel) es muy homogénea, el nivel de la escala de grises es un índice directo de la materia total atravesada. Por lo tanto, si hay huecos en las celdas, aire, la cantidad cambiará el valor de la escala de grises en la imagen, debido a la diferente (radio)densidad con respecto a la resina.

Las muestras se analizaron con un tubo de rayos X de 160 kV y las imágenes se registraron con un panel plano de 1024x1024 píxeles, con un tamaño de píxel de 1x1 μm^2 . En la Figura 10 se muestran el resultado de una zona de mazizado. El análisis cuantitativo de la escala de grises permite definir las desviaciones en el

valor de llenado. Se observan algunas celdas con desviaciones en el rango 4-15,4%. Las desviaciones pueden afectar a una región de la célula (casos 1, 2, 3, 5), o a al relleno global de la célula (caso 4).

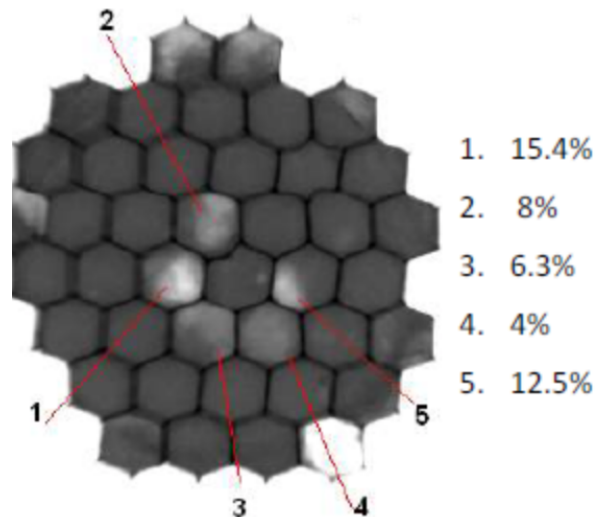


Figura 10. Imagen radiográfica de una zona mazizada. Los valores muestran el nivel de falta de resina en algunas celdas.

Como se desprende de los múltiples ensayos hechos rara vez quedan huecos en el volumen interno de la célula si la velocidad de inyección se mantiene constante, adaptada a la viscosidad de la resina, y la mezcla de la resina está libre de burbujas. Las múltiples pruebas desarrolladas en este programa, permitieron demostrar que es factible lograr un procedimiento de inyección repetitivo y totalmente exitoso, ajustando el caudal de inyección.

4. Conclusiones

El aumento de los índices de producción con coste limitado en la industria aeronáutica requiere la automatización de los procesos de fabricación relacionados con grandes piezas de CFRP. En este trabajo hemos desarrollado prototipos de cabezales (end-effectors) para montar sobre brazos robóticos convencionales y que permiten automatizar dos tareas complejas: el taladrado de piezas híbridas multicapa y el mazizado estructural de paneles de celdas. Se hicieron prototipos de los cabezales diseñados para realizar ensayos en condiciones de producción y se analizaron los resultados de los procesos.

- El cabezal de taladrado para partes híbridas multicapa demostró que puede realizar el proceso con unas especificaciones de tolerancia correctas, sin dañar la integridad de los diferentes materiales, seleccionando la herramienta de corte y con un control de la velocidad de corte adaptada al material encontrado en el avance.

- El cabezal de fresado para la eliminación de la piel CFRP demostró realizar la operación de manera adecuada, siendo la rigidez del brazo robótico suficiente para garantizar la calidad del fresado. Las pruebas realizadas no mostraron defectos por delaminación del CFRP, y se preservó la integridad del núcleo (células).
- La operación de inyección de resina se hizo con un cabezal multi-celda y se asiste con una boquilla de vacío. La combinación de inyección y vacío demostró, en las inspecciones radiográficas realizadas en las muestras, que es posible obtener la calidad de llenado adecuada con solo el control de caudal de resina si está libre de burbujas.

La posibilidad de automatizar estas operaciones complejas taladrado híbrido multicapa y mazizado estructural de grandes paneles aeronáuticos se ha probado como factible con los cabezales desarrollados y ensayados en este trabajo.

5. Referencias

- [1] R. Ghadge, R. Ghorpade, S. Joshi, Multi-disciplinary design optimization of composite structures: A review. *Composite Structures*, 280, 14875, 2022
- [2] C. Kassapoglou, Minimum cost and weight design of fuselage frames Part B: cost considerations, optimization, and results. *Composites Part A*, 30, 895-904, 1999
- [3] M.K. Hagnell, M. Akermo, A composite cost model for the aeronautical industry: Methodology and case study. *Composites Part B*, 79, 254-261, 2015
- [4] M.S. Sarfraz, H. Hong, S.S. Kim, Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study. *Composite Structures*, 266, 113864, 2021q
- [5] A. Mills, Automation of carbon fibre preform manufacture for affordable aerospace applications. *Composites Part A*, 32, 955-962, 2001
- [6] A.A. Campos, E. Henriques, C.L. Magee, Technological improvement rates and recent innovation trajectories in automated advanced composites manufacturing technologies: A patent-based analysis. *Composites Part B*, 238, 109888, 2022
- [7] C. Frommel et al., Automated manufacturing of large composites utilizing a process orchestration system. *Procedia Manufacturing*, 51, 470-477, 2020
- [8] C. Moller et al., Machining of large scaled CFRP-Parts with mobile CNC-based robotic system in aerospace industry. *Procedia Manufacturing*, 14, 17-29, 2017
- [9] M. Slamani, J.F. Chatelain, Assessment of the suitability of industrial robots for the machining of carbon-fiber reinforced polymers. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 177-195, 2019
- [10] E.G. Melo et al., Evaluation of carbon fiber reinforced polymer machining by applying industrial robots. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28, 285-298, 2021
- [11] A. Klimchik, A. Ambiehl, S. Garnier, B. Furet, A. Pashkevich, Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 12-29, 2017
- [12] M.F. Zaeh, F. Schnoes, B. Obst, D.Hartmann, Combined offline simulation and online adaptation approach for the accuracy improvement of milling robots. *CIRP Annals*, 69, 337-340, 2020
- [13] S. Zivanovic, N. Slavkovic, D. Milutinovic, An approach for applying STEP-NC in robot machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 361-373, 2018
- [14] F. Schnoes, M.F. Zaeh, Model based Planning of Machining Operations for Industrial Robots. *Procedia CIRP*, 82, 497-502, 2019
- [15] J. Lee, T. Hong, C-H. Seo, Y.H. Jeon, M.G. Lee, H-Y. Kim, Implicit force and position control to improve drilling quality in CFRP flexible robotic machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1123--1133, 2021
- [16] B. Gonul, O.F. Sapmaz, L.T. Tunc, Improved stable conditions in robotic milling by kinematic redundancy. *Procedia CIRP*, 82, 485-490, 2019
- [17] C. Sun, P.L.F. Kengne, A. Barrios, S. Mata, E. Ozturk, Form Error Prediction in Robotic Assisted Milling. *Procedia CIRP*, 82, 491-496, 2019
- [18] C. Chen et al., Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 55, 29-40, 2019
- [19] B. Denkena, B. Bergmann, T. Lepper, Design and optimization of a machining robot. *Procedia Manufacturing*, 14, 89-96, 2017

[20] S. Ahmad, J. Zhang, P. Feng, D. Yu, Z. Wu, M. Ke, Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review. *Composite Structures* 250, 112545, 2020

[21] O.T. Thomsen, Sandwich plates with 'through-the-thickness' and 'fully potted' inserts: evaluation of differences in structural performance. *Composite Structures* 40, 159-174, 1998

[22] K-I. Song et al., An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures. *Composite Structures* 86, 107-113, 2008

[23] K-H. Nguyen, Y-B. Park, J-H. Kweon, J-H. Choi, Failure behaviour of foam-based sandwich joints under pull-out testing. *Composite Structures* 94, 617-624, 2012

[24] B. Smith, B. Banerjee, Reliability of inserts in sandwich composite panels. *Composite Structures* 94, 820-829, 2012

[25] Y-B. Park, J-H. Kweon, J-H. Choi, Failure characteristics of carbon/BMI-Nomex sandwich joints in various hygrothermal conditions. *Composites Part B* 60, 213-221, 2014

[26] R. Roy et al., Testing and modeling of Nomex honeycomb sandwich Panels with bolt insert. *Composites Part B* 56, 762-769, 2014

[27] R. Seemann, D. Krause, Numerical modelling of partially potted inserts in honeycomb sandwich panels under pull-out loading. *Composite Structures* 203, 101-109, 2018

[28] J.D. Rodriguez-Ramirez, B. Castanie, C. Bouvet, Experimental and numerical analysis of the shear nonlinear behaviour of Nomex honeycomb core: Application to insert sizing. *Composite Structures* 193, 121-139, 2018

[29] J. Wolff, M. Brysch, C. Huhne, Validity check of an analytical dimensioning approach for potted insert load introductions in honeycomb sandwich panels. *Composite* 202, 1195-1215, 2018

[30] J.D. Rodríguez-Ramírez, B. Castanie, C. Bouvet, Insert of sandwich panels sizing through a failure mode map. *Composite Structures* 234, 111724, 2020