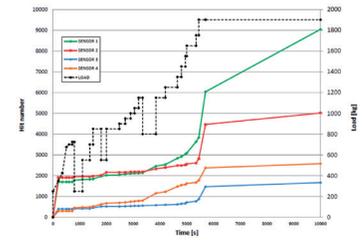


# Enfoque experimental para la toma de decisiones en el proceso de diseño de estructuras: caso de estudio



## Building Block Approach to support the decision-making process in structure design: a case study



Maialen Areitioaurtena<sup>1</sup>, Mireia Olave<sup>1</sup>, Iban Retolaza<sup>1</sup>, Jon Aurrekoetxea<sup>2</sup>, Izaro Zulaika<sup>3</sup>, Mario Javier Cabello<sup>1</sup> y Aitor Cenitagoya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IK4-Ikerlan Centro Tecnológico de Investigación. Area Fabricación Avanzada. Paseo Arizmendiarieta, 2 - 20500 Arrasate -Mondragón, Gipuzkoa (España).

<sup>2</sup> Universidad de Mondragón. Escuela Politécnica de Mondragón. Goiru Kalea, 2 - 20500 Arrasate, Gipuzkoa (España).

<sup>3</sup> Orona Elevator Innovation Centre S.Coop. Otalora. Azatza - 20550 Aretxabaleta, Gipuzkoa (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8977> | Recibido: 24/09/2018 • Inicio Evaluación: 28/09/2018 • Aceptado: 12/11/2018

### ABSTRACT

• A Building Block Approach design strategy is used in this work to develop a multi-material elevator base, starting from coupon-level tests and reaching the component level. Adhesives and glass-fiber composites are characterized and a multi-material bonded element is constructed in order to conduct the design process towards the best possible option. Once the structure is designed, the elevator base is subjected to loadings at different levels in order to evaluate its structural integrity. The proposed design-by-validation process allows to reach an optimum structure, where its components are validated during the process and not only after the preliminary design is completed. This methodology allows a proper decision-making process and enhances the obtained result as well as optimizing time and cost to reach a component that fulfils the requirements, reducing the number of design attempts to reach final products.

Correlation between simulations and experimental results show that the proposed criteria can be used to consistently predetermine the damage load and its location, especially when products of lower requirement or fewer reliability concerns are designed. The proposed method also allows failure type discrimination and gives structural behavior information, which might be interesting for further steps in the design process. As a result of the methodology application in the study case, a 50 % weight reduction is obtained in an elevator base structure, where the design is completely validated by component level tests, ensuring a proper load-bearing capacity.

• **Keywords:** Design process, Building Block Approach, Multi-material structures, Acoustic Emissions.

óptima con mayor rapidez, pudiendo evitar las iteraciones diseño-validación, reduciendo así los tiempos y costes necesarios para llegar a una estructura que cumpla las especificaciones.

Se ha realizado la correlación simulación-experimental, cuyos resultados muestran que el criterio de evaluación del daño propuesto puede ser utilizado para predecir la localización y la carga de inicio de daño. La metodología aplicada también permite discriminar los modos de fallo y ofrece información del estado de la estructura, pudiendo ser integrada en ésta para su posterior monitorización en uso. El resultado de la aplicación de la metodología en el caso de estudio seleccionado es una base de ascensor multimaterial en el que se ha reducido un 50% de peso respecto a la solución actual.

**Palabras clave:** Proceso de diseño, Building Block Approach, Estructuras multimaterial, Emisiones Acústicas.

### 1. INTRODUCCIÓN

La metodología del *Building Block Approach* (BBA) es una estrategia de diseño piramidal ampliamente utilizada en el sector aeronáutico y de automoción, donde el conocimiento sobre el material y el rendimiento del componente se adquiere paso a paso desde el nivel de probeta hasta el nivel de estructura final [1,2]. Este enfoque, aplicado a cualquier industria, permite acelerar los procesos de diseño y reducir el número de iteraciones de diseño necesarios para llegar a un componente final, dado que la evaluación se realiza desde las primeras etapas del proceso.

En este trabajo, se aplica la estrategia BBA en el caso de la base de un ascensor. Los ascensores son soluciones de transporte vertical que se mueven en el interior del eje donde están situadas y transportan cargas o personas a diferentes alturas. Un ascensor contiene varios ensamblajes que pueden ser móviles o inmóviles. Como en el resto de industrias del transporte, la industria del ascensor está avanzando hacia un producto más eficiente y, por lo tanto, más ligero. Al tratarse de un conjunto móvil dentro de la construcción del ascensor, la cabina es un componente al que se han dirigido numerosos esfuerzos, en términos de diseño ligero, en los últimos años.

Generalmente hablando, las cabinas de ascensor constan de cuatro componentes principales. Uno de estos componentes principales es la base, que se apoya en el chasis y es la pieza a la que se ensamblan las paredes. Su función principal es la de soportar las cargas y los usuarios que viajan en la cabina y mantener la estructura de la misma.

### RESUMEN

La metodología de proceso basada en el *Building Block Approach* se ha utilizado en este trabajo para el desarrollo de una base de ascensor multimaterial. Se ha comenzado con ensayos a nivel probeta para la caracterización de los materiales, llegando hasta la validación del componente completo. En el primer nivel, se han caracterizado adhesivos y compuestos de fibra de vidrio. Posteriormente, se ha realizado un ensayo a nivel elemental para validar las uniones adhesivas multimateriales, aspecto que permite una correcta selección del adhesivo desde etapas iniciales del proceso de diseño. Una vez la estructura ha sido completamente diseñada y fabricada, se han realizado ensayos de carga a diferentes niveles para la validación de su integridad estructural. La metodología propuesta permite evaluar los materiales y sub-componentes durante el proceso de diseño, llegando a una estructura

Las estructuras como la base de un ascensor son componentes que tradicionalmente se han construido con materiales conservadores como el acero o el aluminio [3]. El diseño ligero es un factor muy importante para este tipo de estructuras, ya que permite, además de obtener componentes más eficientes energéticamente, reducir costes y tiempos de montaje asociados a mano de obra y equipos de manipulación.

Todos estos aspectos motivan el objetivo de este trabajo de rediseñar una base de ascensor, actualmente en uso, basado en criterios de ligereza. Para ello, se plantea reducir el peso de la base metálica de 56 kg introduciendo piezas de material compuesto de Fibra de Vidrio (FV). Para este fin, los materiales y su comportamiento y rendimiento se analizan desde las primeras etapas a nivel de probeta, reduciendo así los tiempos de diseño. También se estudia la viabilidad de las uniones adhesivas estructurales para este tipo de estructuras de carga multi-material. El enfoque experimental basado en el BBA mencionado anteriormente guía al ingeniero hacia una adecuada selección de materiales y diseños desde los pasos iniciales del proceso.

La metodología BBA que se muestra en la Fig. 1 del material complementario se utiliza como estrategia de diseño para este trabajo, donde los pasos piramidales han sido específicamente definidos para esta aplicación. La fase de diseño y verificación de la base comienza a nivel de probeta con varios ensayos (Single Lap Joint, flexión a tres puntos...) en adhesivos y componentes de Fibra de Vidrio. Después, el proceso se eleva al nivel de elemento, en el que los materiales ensayados previamente se unen para formar un único elemento con el que se estudia la adherencia y se verifica la unión. Los pasos anteriores proporcionan una amplia visión de las capacidades de los componentes y sus límites y facilitan el proceso de toma de decisiones en el camino hacia el diseño final.

Autores como [4] mencionan en su trabajo que el BBA tradicional podría ralentizar el proceso de diseño de los componentes que no requieran altas capacidades, tales como su objeto de estudio, una pequeña aeronave no tripulada de bajo coste. Sin embargo, dado que la base de un ascensor es un componente donde la fiabilidad estructural es indiscutible debido a su elevado impacto en la seguridad del producto, los autores decidieron que este enfoque podría ayudar al correcto desarrollo del componente, donde los materiales y las uniones están debidamente ensayados en diferentes niveles para la aplicación seleccionada. En otros trabajos como el que presenta [5], se discute el hecho de que la fiabilidad de la estructura es una cuestión que debe ser integrada en las primeras etapas del proceso de diseño.

Una vez que se alcanza el nivel de componente en el presente trabajo, el diseño de la base es verificada a escala real mediante ensayos destructivos y no destructivos. La técnica de Emisiones Acústicas es una de las técnicas de monitorización que se pueden utilizar para ensayos no destructivos de estructuras que contienen piezas de material compuesto.

La técnica de Emisiones Acústicas (AE, por sus siglas en inglés) es un método de Monitorización de Salud Estructural (SHM, *Structural Health Monitoring*) para la detección de daño. Los métodos SHM se pueden clasificar según la naturaleza de los sensores utilizados o el parámetro principal a estudiar. La técnica de Emisiones Acústicas, entre otras donde destaca, por ejemplo, la propagación de ondas de ultrasonido, es un método en el que se utilizan sensores piezoeléctricos para realizar las mediciones.

La norma ASTM E1316 [6] define la técnica de AE como "la clase de fenómenos donde se generan ondas elásticas transitorias por la rápida liberación de energía desde fuentes muy localizadas en un material". La mayoría de las estructuras y los materiales

emiten energía en forma de vibración mecánica (emisiones acústicas) cuando ocurre un cambio o movimiento repentino. Esto sucede normalmente debido a los fenómenos relacionados con los defectos, como pueden ser grietas o deformación plástica. Estas emisiones acústicas se propagan desde la fuente a través de la estructura en una forma omnidireccional. Un sensor piezoeléctrico de emisiones acústicas en contacto con el material que está siendo monitorizado detecta la onda y la convierte en una señal electrónica que es amplificada por un pre-amplificador y procesada por la instrumentación de AE.

En resumen, se emite energía acústica desde diferentes localizaciones dentro de un material cuando se produce un daño localizado. Se han llevado a cabo numerosos trabajos sobre la monitorización por Emisiones Acústicas y técnicas de determinación de los daños producidos en los materiales basadas en los mecanismos de micro-fractura [7-18] para los materiales que se utilizan en el presente estudio, algunos de los cuales se resumen a continuación.

Varios autores han trabajado en ensayos AE para materiales compuestos, donde se han identificado mecanismos de rotura y daños prematuros, especialmente en ensayos de fatiga [7-9]. Estas obras identifican y discriminan los daños específicos sufridos por los componentes como, por ejemplo, delaminación, rotura de la interfaz fibra-matriz o rotura de matriz o fibra.

Los ensayos por Emisiones Acústicas han sido utilizados también para especímenes de aluminio con el propósito de identificar roturas en los componentes [10]. Otros trabajos como [11] muestran monitorización por AE para supervisar unas placas de aluminio que habían sido reparadas con parches de compuesto de fibra de vidrio. Los autores fueron capaces de discriminar entre fallas adhesivas y agrietamiento de aluminio basado en el análisis de la energía acústica producida.

La monitorización por Emisiones Acústicas es ampliamente utilizada en una variedad de industrias como pueden ser turbinas eólicas *offshore* y *Oil&Gas* [12-16] como para componentes más pequeños como engranajes y cojinetes [17,18] Sin embargo, los autores no han encontrado evidencias de monitorización por Emisiones Acústicas en componentes del sector de la elevación en la literatura.

Las uniones adhesivas ofrecen ventajas estructurales como un buen comportamiento hacia el impacto, vibraciones, fatiga, distribución homogénea de la carga... [19]. Para muchas aplicaciones estructurales, el adhesivo es un método más eficiente que las uniones mecánicas convencionales y su utilización y estudio es cada vez más frecuente en las aplicaciones industriales.

## 2. CASO PRÁCTICO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La propuesta de diseño de la nueva base de ascensor incluye composites de fibra de vidrio-epoxy (contenido de fibra del 60%) para la placa base y los perfiles de soporte centrales. En el material complementario se pueden encontrar una explicación más extensa del caso práctico y las características de la base multimaterial.

### 2.1. NIVEL DE PROBETA

Las pruebas a nivel de probeta incluyen la caracterización de los componentes de FV y ensayos en varios adhesivos estructurales de base PU para encontrar el más adecuado para la aplicación.

Los componentes de material compuesto se ensayaron separadamente. El material de la placa se ensayó a tracción y compresión uniaxial para obtener el módulo elástico, de cizalladura, módulo de Poisson y resistencia última a tracción y compresión. En la máquina de tracción universal se fijó la velocidad de ensayo en 1 mm/min y se utilizó la célula de carga de 300 kN para medir las fuerzas.

El desplazamiento de la probeta se midió mediante la técnica del Digital Image Correlation (DIC). El DIC es una técnica utilizada para medir el desplazamiento de un componente ampliamente utilizado cuando no se aconsejan o no se pueden utilizar otras técnicas de medición como extensómetros. Cuando se utiliza esta técnica, se toman imágenes de la probeta en intervalos de tiempo definidos por el usuario en base a la velocidad del ensayo. El software relaciona cada imagen y encuentra las diferencias entre las posiciones de los puntos de referencia, pudiendo calcular el desplazamiento de los mismos. A fin de utilizar la técnica del DIC, las probetas de ensayo se han de pintar en blanco y se han de generar pequeños puntos homogéneos (normalmente con ayuda de un spray o aerógrafo) con el fin de establecer una zona de puntos de referencia que el sistema debe monitorizar. La Fig. 3 del material complementario (izquierda) muestra el set-up del DIC para el ensayo de tracción uniaxial en la máquina universal.

Para los perfiles de FV, se llevaron a cabo ensayos de compresión y flexión de tres puntos con el fin de obtener el módulo elástico y la resistencia última. El ensayo se realizó con una distancia entre puntos de 900 mm, tal y como muestra la Fig. 3 del material complementario (centro). También se realizaron ensayos de compresión en ambas direcciones de la sección del perfil.

Se ensayaron varios adhesivos estructurales para encontrar el más adecuado para las características de la estructura. Se escogieron cuatro adhesivos líquidos en base a su hoja de datos. Se realizaron ensayos de tracción para medir los módulos elásticos y las resistencias últimas de los adhesivos (la Fig. 3 del material complementario a la derecha muestra las probetas de ensayo una vez ensayadas). También se llevaron a cabo ensayos de Single Lap Joint (SLJ) con adherentes de FV y aluminio. El objetivo del ensayo de SLJ era encontrar la capacidad de adherencia de los adhesivos seleccionados con los adherentes, donde se prefería el fallo adhesivo al cohesivo. Para este ensayo también se utilizó el sistema DIC. Los adhesivos de base de poliuretano que se estudiaron son:

- Teroson® Terostat MS 9380 por Henkel®
- Betaforce. Por Dow 2850®
- Betaforce. Por Dow 7030®
- SikaTack® Drive de Sika®

Dos de los adhesivos ensayados (SikaTack Drive y Teroson 9380) demostraron tener las propiedades deseadas para la aplicación seleccionada y buena adhesión a ambos sustratos. Sin embargo, no se probó la unión multi-material, por lo que los autores decidieron no decantarse por uno de ellos y ensayar ambos en el siguiente nivel del BBA.

## 2.2. NIVEL DE ELEMENTO

Se diseñó un ensayo para el nivel de elemento con el fin de encontrar las diferencias relativas entre los dos adhesivos más adecuados. Para este ensayo, se pegaron perfiles de aluminio a una placa de FV, haciendo posible ensayar la unión multi-material. Esta unión se puede encontrar entre el perímetro y la placa base. En el ensayo, el elemento se colocó en la máquina de tracción amarrando los perfiles y los adhesivos se sometieron a tensiones de cizalladura. El set-up se muestra en la Fig. 4 del material adicional, donde el adhesivo superior es Teroson 9380 y el inferior es SikaTack Drive.

Se aplicó desplazamiento constante en el elemento y, como resultado, el perfil inferior se despegó de la placa de Fibra de Vidrio. La inspección visual posterior mostró que el fallo fue claramente adhesivo en la interfaz aluminio-SikaTack Drive. Por lo tanto, se seleccionó el adhesivo Teroson 9380 para la aplicación debido a su comportamiento en uniones multi-material.

## 2.3. NIVEL DE COMPONENTE

La base multi-material del ascensor se ensayó mediante Emisiones Acústicas. El ensayo, tal y como se ha presentado anteriormente, se diseñó para reproducir un caso crítico donde las tensiones máximas de los componentes están ligeramente por encima de su límite elástico. El ensayo se realizó mediante la aplicación gradual de cargas de 25 kg mientras se monitorizaba la respuesta de la estructura mediante AE, además de medir los desplazamientos en diferentes puntos de la base. Cada 100 kg de carga aplicada, se mantuvo la estructura cargada durante dos minutos para asegurar una correcta medición de los impactos o *hits*. Basado en la literatura y en la normativa ASTM, este tiempo de mantenimiento entre cargas permite la estabilización de los eventos acústicos. Si tras dos minutos de mantenimiento todavía se pueden medir eventos acústicos, significaría que ha ocurrido un daño permanente en la estructura. Se colocaron cuatro sensores piezoeléctricos a lo largo de la viga de FV más crítica (tal y como se muestra en la Fig. 5) y se midieron los desplazamientos en los perfiles y la placa base mediante varios medidores electrónicos. El caso de carga crítica diseñado se puede ver marcado en azul en la Fig. 5 (izq.).

Estos ensayos tenían dos objetivos principales:

- Correlación entre las simulaciones estáticas lineales y resultados experimentales según los desplazamientos medidos. Validar el modelo numérico.
- Validar la estructura y correlacionar las micro-fracturas y la detección temprana de daño permanente o fallos con predicciones de simulaciones.

El umbral para el ensayo se definió en 40 dB para eliminar ruidos ambientales y movimientos que pueden ser medidos por los sensores piezoeléctricos.

Una vez que se llevaron a cabo los ensayos por Emisiones Acústicas, se ejecutó un último ensayo destructivo. Ambos ensayos se llevaron a cabo por separado puesto que un ensayo destructivo podía dañar los sensores piezoeléctricos debido al colapso de la estructura. Se utilizó un cilindro hidráulico de 7 toneladas para aplicar carga de forma continua en el centro de la base. Se evitó la aplicación de la carga localizada en un punto mediante el uso de un perfil rectangular que distribuía la carga en todo el ancho de la base. Para el ensayo, la base se ensambló a una estructura soldada que simulaba el chasis de un ascensor real. El set-up del ensayo incluía una célula de carga de 30 kN para medir la fuerza aplicada y galgas de deformación unidireccional ubicadas en el perfil central y la placa base. El set-up completo se puede ver en la Fig. 5 (derecha).

Se realizaron simulaciones estáticas lineales utilizando un software comercial de elementos finitos. Se modelaron la base y el caso de carga específico y se introdujeron las propiedades de los materiales en base a los datos obtenidos experimentalmente a nivel probeta. Los adhesivos se introdujeron en el modelo como componentes individuales con su correspondiente espesor y se definieron contactos en las intercaras adhesivo-sustrato. Los autores analizaron diversas técnicas de modelado de adhesivos para este tipo de estructuras en un trabajo previo [20], concluyendo que el adhesivo debía ser modelado como un componente independiente para el tipo de adhesivo y caso de carga correspondiente al ensayo diseñado. El modelado del adhesivo permite determinar con mayor exactitud la rigidez de la estructura y, por lo tanto, mejorar la predicción de deformaciones de la estructura completa. Las simulaciones predijeron el colapso de la estructura por encima de los 2800 kg de carga aplicada para el ensayo, basado en el criterio de Von Mises.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 del material complementario recoge los principales resultados de las pruebas de nivel de probeta para los componentes de FV y adhesivos. Se muestran valor medio y desviación estándar cuando están disponibles.

La Fig. 6 muestra los resultados del ensayo de AE no destructivo a nivel de componente. El número de *hits* acumulado se muestra en la figura, así como las cargas escalonadas que se aplicaron. Las cargas progresivas hasta los 3600 segundos no mostraron ningún daño considerable. Sin embargo, a partir de este punto de aproximadamente 1100 kg, los eventos acústicos comenzaron a estar más presentes entre cargas. El rango entre 1350 kg y 1550 kg es la carga en la que la estructura comienza a sufrir daños permanentes. Un estudio más exhaustivo de los resultados del ensayo por AE se puede ver en el material complementario (Fig. 7).

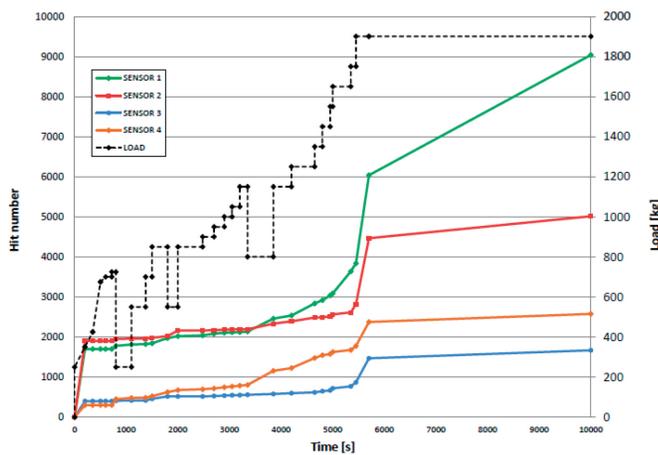


Fig. 6: Resultados de la prueba de emisiones acústicas según número acumulado de hits

En resumen, puede concluirse que la estructura sufrió daños permanentes a partir de aproximadamente 1350 kg a 1550 kg, aunque no se observaron daños visibles una vez terminado el ensayo. Las simulaciones predijeron la iniciación del daño a unos 1400 kg, que se encuentra dentro del rango de medida. El criterio utilizado para predecir la iniciación de daño permanente fue el límite elástico de cada material. Se consideró el punto de iniciación del daño la carga en la que el componente más tensionado llega a su límite elástico.

La Fig. 8 muestra los valores de frecuencia pico para el ensayo de AE. En la figura puede observarse que la mayoría de los *hits* se encuentra en el rango de 75 a 120 kHz. Al llegar a las cargas de iniciación de daño, comienzan a aparecer frecuencias más elevadas, en el intervalo de 140 a 180 kHz. En el momento en el que se colocó la carga final y la estructura fue monitorizada con 1900 kg durante una hora, aparecen algunas frecuencias pico aproximadamente a 280 kHz.

Las frecuencias pico obtenidas se pueden asociar a diversos modos de fallo que numerosos autores han estudiado previamente. Cuando se habla de materiales compuestos, las frecuencias bajas (de 0 a 150 kHz, aproximadamente) pueden asociarse con delaminación y con agrietamiento de la matriz. Las frecuencias medias, aproximadamente de 200 kHz a 300 kHz, generalmente están relacionadas con rotura de la interfaz fibra-matriz. Las frecuencias a partir de 400 kHz, por otro lado, se asocian con roturas de fibra hasta los 500 kHz y problemas de arranque de fibra hasta 600 kHz [21].

En el caso de piezas de aluminio, se han relacionado dos rangos de frecuencias diferentes (70 kHz a 200 kHz y 350 kHz a 500 kHz) la rotura de componentes de aluminio reparados (por lo general piezas de aluminio reparadas con material compuesto adhesivado) [11]. La rotura del aluminio no reparado comienza normalmente a partir de 500 kHz [10].

Mediante la correlación de los datos obtenidos y los daños identificados en la literatura, puede verse que las frecuencias de

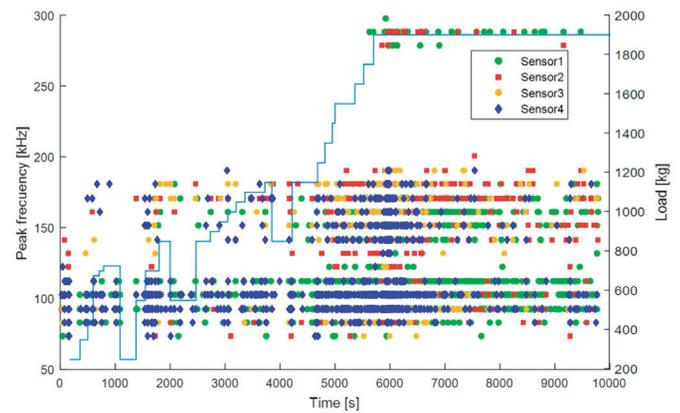


Fig. 8: Frecuencias pico y cargas aplicadas en el ensayo de AE

bajo nivel iniciales pueden estar asociadas al agrietamiento de la matriz del composite y a delaminación. Sin embargo, como se ha mencionado previamente, no se han detectado daños permanentes en los primeros 4.000 segundos del ensayo. Estos picos podrían haber ocurrido debido a los pequeños *hits* que pudieron ocurrir durante la colocación manual de las cargas.

A partir de aproximadamente 4800 segundos, puede verse que la densidad de *hits* en el segundo rango identificado aumenta. Esto puede estar asociado a pequeñas delaminaciones que podrían haber comenzado. Las frecuencias más críticas se pueden encontrar a partir de aproximadamente 5800 segundos, momento en el que se introduce la última carga de 1900 kg. Esta frecuencia muestra que podría haber comenzado la rotura de la interfaz fibra-matriz.

El ensayo destructivo demostró coherencia con las simulaciones. La Fig. 9 muestra la distribución de carga y tensión en el perfil central a lo largo del tiempo. En aproximadamente 3100 a 3200 kg, se observó una grieta final y la carga sufrió una descenso, no pudiendo mantener el aumento en la carga aplicada a pesar de que el cilindro hidráulico todavía estaba en movimiento. Este es un signo de que la estructura sufrió un daño grave y se redujo su capacidad de soportar la carga. El primer componente que sufrió el daño crítico fue el perfil central y le siguieron los otros dos perfiles de FV. No se encontró daño visual en el perímetro de aluminio, así como en el adhesivo ni en la placa base de FV.

La simulación numérica predijo correctamente el primer componente en sufrir daños y su ubicación. Las predicciones mostraron que el perfil central de FV rompería a aproximadamente 2800 kg debido a las fuertes tensiones en el área donde el perfil se apoya en la estructura de la cabina. Aunque el agrietamiento definitivo se produjo en 3100 kg, el daño se inició mediante grietas más pequeñas a cargas inferiores. Sin embargo, es difícil definir, con los datos experimentales medidos, la carga de iniciación de la primera grieta en los componentes.

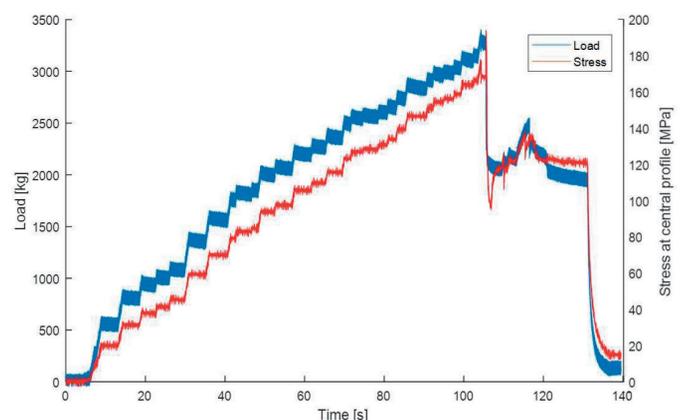


Fig. 9: Carga (kg) y tensión en el perfil central (MPa) para el ensayo destructivo

#### 4. CONCLUSIONES

El método de BBA es una estrategia de diseño muy útil que puede aplicarse a una amplia variedad de componentes y estructuras. Los ensayos de nivel de probeta y elemento proporcionar una mejor visión global y mejoran el proceso de diseño hacia una estructura más optimizada de forma más rápida. El resultado de este trabajo es una metodología de diseño con un enfoque experimental que puede seguirse para estos tipos de estructuras multi-material, donde se proponen ensayos a nivel probeta, elemento y componente. La correlación con los resultados de la simulación numérica muestran que el inicio de daño puede predecirse si se aplica el criterio del límite elástico. El uso de los criterios propuestos en los modelos numéricos podría reducir el número de ensayos necesarios para el desarrollo y la validación de un diseño, especialmente en componentes de bajo riesgo.

La metodología que se ha seguido en este trabajo ha conducido el proceso de rediseño hacia una reducción del 50% del peso de una base de ascensor para 8 personas, pasando de 56 kg a 23 kg sin comprometer la capacidad de carga de la estructura. Este hecho permite confirmar la viabilidad de estructuras multi-material con uniones adhesivas en la industria de la infraestructura. Sin embargo, se han de dirigir mayores esfuerzos en el rediseño de otros componentes para las cabinas de ascensor de nueva generación, obteniendo así un producto considerablemente más eficiente.

El aligeramiento de estructuras como la base de una cabina de ascensor permite un montaje más rápido y simple y, por lo tanto, permite reducir el tiempo y el coste de ensamblaje, ya que puede reducir el tamaño de los equipos necesarios para ensamblar las piezas, así como ofrecer la oportunidad de reducir el número de técnicos necesarios para las operaciones de montaje.

Los adhesivos demuestran ser una verdadera solución para unir estructuras multi-material, especialmente cuando los casos de carga actúan en su sentido más favorable. Los autores concluyen que tanto los ensayos experimentales a nivel probeta como a nivel de elemento son muy importantes en adhesivos, ya que la adherencia a diferentes materiales no está garantizada por los fabricantes. El papel de la caracterización de estos materiales, así como de los componentes de material compuesto de FV, ha demostrado ser muy valiosa para el desarrollo de un modelo numérico capaz de predecir correctamente el comportamiento estructural.

Los ensayos no destructivos por Emisiones Acústicas han demostrado ser no solamente un ensayo muy útil, sino una buena estrategia para monitorizar estructuras y discriminar entre los posibles fallos que puedan ocurrir en la misma. Los ensayos destructivos, por otro lado, proporcionan información sobre el comportamiento del componente hacia la fractura total.

Es importante mencionar que los resultados de Emisiones Acústicas muestran que la estructura ha sufrido daños como la rotura de la interfaz fibra-matriz o delaminación, que pueden estar asociados a la micro-fractura y a pérdidas de resistencia y rigidez en los componentes, respectivamente. La acumulación de micro-grietas puede derivar en la generación de una macro-grieta con mayor rapidez. Por lo tanto, se puede concluir que el ensayo destructivo se llevó a cabo en una estructura que podría presentar daños previos debido al ensayo por AE. El daño producido en el primer ensayo no se cuantificó, aunque pudo haber comprometido la estructura favoreciendo la iniciación de la grieta en el segundo ensayo. Por lo tanto, es posible que una estructura sin un daño previo pudiese presentar mejores propiedades.

Tanto el ensayo por Emisiones Acústicas como el ensayo destructivo muestran una buena correlación con las simulaciones numéricas para la carga de iniciación de daño como para la localización de la zona de fallo último. Una vez alcanzada la rotura de la estructura, la base del ascensor es aún capaz de soportar cargas considerablemente grandes

por debajo de este umbral, puesto que el hecho de que el perímetro de aluminio, las uniones y la placa estén intactas, además de la estructura de chasis inferior, rigidizan aún la estructura.

Casos de estudio como el mostrado en este trabajo muestran que el diseño ligero se puede aplicar a mercados tradicionales como la industria de la elevación. El criterio de ligereza aplicado en este trabajo para la base del ascensor podría expandirse a la cabina completa, reduciendo drásticamente el peso total de la estructura, además de tiempos y costes de montaje. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que el proceso de desmontaje y, por lo tanto, el aspecto medioambiental, se ven comprometidos por el uso de adhesivos para las uniones. Aparte del enfoque experimental presentado en este trabajo, se pueden utilizar otras metodologías de diseño como el diseño para el desmontaje (Design for Disassembly) o el diseño para el medioambiente (Design for Environment) que permitan evaluar estos aspectos cuando se proponen soluciones más ligeras utilizando materiales compuestos y uniones adhesivas.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Carello, N. Amirth, A. G. Airale, et al. Building block approach for structural analysis of thermoplastic composite components for automotive applications. *Applied Composite Materials*, 2017, vol. 24, n° 6, p.1309-1320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-017-9592-x>
- [2] N. A. Jayasree, A. G. Airale, A. Ferraris, et al. Process analysis for structural optimisation of thermoplastic composite component using the building block approach. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 126, p.119-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.007>
- [3] Elevator made out of composite materials (January 15, 2017) Retrieved from <https://www.apastyle.org/learn/faq/web-page-no-author>
- [4] J. W. Baur, D. J. Hartl, G. J. Frank, et al. Experimental mechanics for multifunctional composites and next generation uavs. In *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2018, vol.6, p.215-221. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63408-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63408-1_21)
- [5] B. M. O'Halloran, B. Haley, D. C. Jensen, et al. The early implementation of failure modes into existing component model libraries. *Research in Engineering Design*, 2014, vol. 25, n° 3, p.203-221. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00163-014-0175-7>
- [6] ASTM International. *Astm standard e 1316. standard terminology for nondestructive examinations*, 2006.
- [7] C. Barile and C. Casavola. Fracture behavior of unidirectional composites analyzed by acoustic emissions technique. In *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2018, vol. 7, p.121-127. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62831-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62831-8_17)
- [8] N. Zalameda, E. R. Burke, M. R. Horne, et al. Large area nondestructive evaluation of a fatigue loaded composite structure. In *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2017, vol. 9, p. 21-28. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42255-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42255-8_4)
- [9] M. Diakhate, E. Bastidas-Arteaga, R. M. Pitti, et al. Probabilistic improvement of crack propagation monitoring by using acoustic emission. In *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2017, vol. 8, p.111-118. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42195-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42195-7_16)
- [10] P. A. Vanniamparambil, U. Guclu, and A. Kotsos. Identification of crack initiation in aluminum alloys using acoustic emission. *Experimental Mechanics*, 2015, vol. 55, n° 5, p.837-850. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-015-9984-5>
- [11] A. Maleki, M. Saeedifar, M. Ahmadi Najafabadi, et al. The fatigue failure study of repaired aluminum plates by composite patches using acoustic emission. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2017.12.034>
- [12] P. Ziehl and M. ElBatanouny. Acoustic emission monitoring forcrosion damage detection and classification. *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, 2016, p.193 - 209. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-381-2.00010-9>
- [13] Jialin Tang, Slim Soua, Cristinel Mares, et al. An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades. *Renewable Energy*, 2016, vol. 99(Supplement C), p.170 - 179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.048>
- [14] N.H. Faisal, M.G. Droubi, and J.A. Steel. Corrosion monitoring of offshore structures using acoustic emission sensors. *A journal of the Institute of Corrosion*, September/October 2017, vol. 139.
- [15] Jeremy Van Dam and Leonard J. Bond. Acoustic emission monitoring of wind turbine blades. Sandia National Laboratory, 2015.
- [16] G.P.W. Lapoutre. Acoustic emission monitoring of offshore wind turbine support structures for detection and localization of fatigue crack growth, TU Delft, 2017.
- [17] R. B. Sharma and A. Parey. Modelling of acoustic emission generated by crack propagation in spur gear. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 182, p.215-228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2017.07.030>
- [18] R. B. Sharma and A. Parey. Modelling of acoustic emission generated due to pitting on spur gear. *Engineering Failure Analysis*, 2018, vol. 86, p.1-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2017.07.030>
- [19] P. Schurter, T. Lim, and M. Mirdamadi. A new approach to lightweight steel doors. 2014.
- [20] I. Retolaza, N. Corujo, M. Areitioaurtena, et al. (in press). Diseño de soluciones estructurales con uniones adhesivas, aportación del modelado de la unión. AEMAC, 2018.
- [21] R. Gutkin, C.J.Green, S.Vangrattanachai, et al. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, vol. 25, p.1393-1407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.014>

#### MATERIAL ADICIONAL

[http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/\\_adic/8977-1.pdf](http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8977-1.pdf)

