



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i2.2682>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

Systematic analysis of composite structures (carbon-epoxy) sandwich type, used in aeronautical applications

Análise sistemática de estruturas compostas sanduíche (carbono-epoxy) para aplicações aeronáuticas

Jonathan Raphael Zurita-Caisaguano ^I
jrzurita1@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4286-7596>

Luis Angel Coello-Tapia ^{II}
lacoello@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1496-0331>

Fausto Andrés Jácome-Guevara ^{III}
fajacome1@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3470-5813>

Correspondencia: jrzurita1@espe.edu.ec

***Recibido:** 22 de marzo del 2022 ***Aceptado:** 1 de abril de 2022 * **Publicado:** 13 de abril de 2022

- I. Tecnólogo en Mecánica Aeronáutica mención Motores, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- II. Ingeniero Aeronáutico, Tecnólogo en Mecánica Aeronáutica mención Motores, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- III. Magíster en Ingeniería Mecánica mención Manufactura, Ingeniero Automotriz, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.

Resumen

El presente artículo tiene por objetivo analizar las ventajas y desventajas, que presenta una estructura tipo sándwich de materiales compuestos (carbono-epoxi) en aplicaciones aeronáuticas, así como su proceso de fabricación y el mantenimiento aplicado a las mismas. Una estructura de materiales compuestos tipo sándwich, es una estructura formada por la composición de dos placas de fibra de carbono embebidas en una matriz termoestable (resina epoxi), con un núcleo de alta resistencia y baja densidad (espuma de poliuretano, honeycomb, entre otros). Esta tecnología se basa en la absorción de grandes cargas de flexión, es sumamente ligera y ha sido empleada en un principio en superficies de vuelo primarias y secundarias de aeronaves, actualmente se ha incorporado a la estructura propia del fuselaje; por ende es importante conocer los procesos de fabricación y los tipos de mantenimiento periódicos a los que deben estar sometidas este tipo de estructuras para que las aeronaves se encuentren en condición óptimas y seguras para su operación.

Palabras clave: materiales compuestos; fibra de carbono; resina epoxi; aeronaves.

Abstract

The objective of this article is to analyze the advantages and disadvantages of a sandwich structure of composite materials (carbon-epoxy) in aeronautical applications, as well as its manufacturing process and the maintenance applied to them. A sandwich composite structure is a structure formed by the composition of two carbon fiber plates embedded in a thermosetting matrix (epoxy resin), with a high strength and low density core (polyurethane foam, honeycomb, among others). This technology is based on the absorption of large bending loads, it is extremely light and has been used in the beginning in primary and secondary flight surfaces of aircraft, nowadays it has been incorporated to the structure of the fuselage itself; therefore it is important to know the manufacturing processes and the types of periodic maintenance to which this type of structures must be subjected so that the aircraft are in optimal and safe condition for its operation.

Keywords: composite materials; carbon fiber; epoxy resin; aircraft.

Resumo

O objetivo deste artigo é analisar as vantagens e desvantagens de uma estrutura sanduíche feita de materiais compostos (carbono-epoxy) em aplicações aeronáuticas, assim como seu processo de

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

fabricação e a manutenção aplicada a eles. Uma estrutura composta de sanduíche é uma estrutura formada pela composição de duas placas de fibra de carbono embutidas em uma matriz termofixa (resina epóxi), com um núcleo de alta resistência e baixa densidade (espuma de poliuretano, honeycomb, etc.). Esta tecnologia é baseada na absorção de grandes cargas de flexão, é extremamente leve e tem sido utilizada inicialmente em superfícies de vôo primário e secundário de aeronaves, atualmente foi incorporada à estrutura da própria fuselagem; portanto, é importante conhecer os processos de fabricação e os tipos de manutenção periódica a que este tipo de estruturas deve ser submetido para que a aeronave esteja em condições ideais e seguras para sua operação.

Palavras-chave: materiais compuestos; fibra de carbono; resina epóxi; aeronaves.

Introducción

Alcance de los materiales compuestos

El estudio de los materiales compuestos es multidisciplinario e involucra disciplinas como: la ciencia de los materiales donde se desarrolla la fibra y la matriz para obtener las mejores propiedades físicas, la mecánica estructural donde se analiza la estructura, el diseño mecánico donde se diseña la estructura y por último la fabricación donde se busca un proceso de fabricación rentable. Detrás de todo esto están presentes cuestiones de negocios y economía.

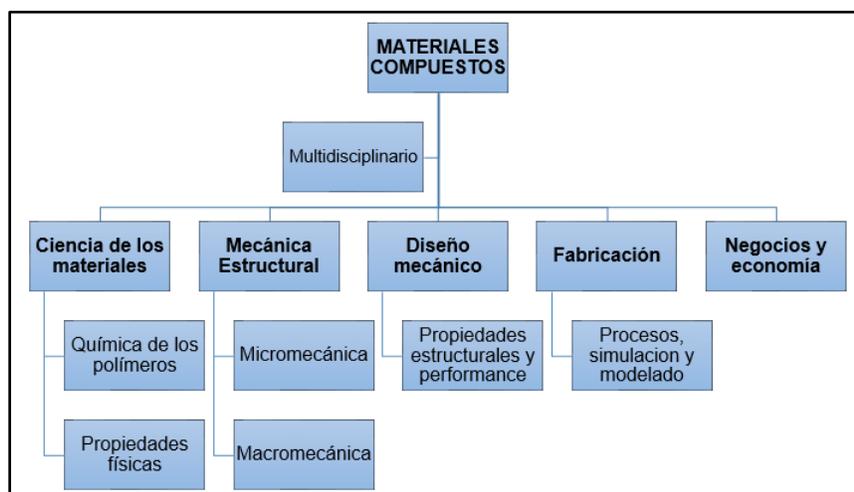


Figura 1. Alcance de los materiales compuestos.

¿Qué es un material compuesto carbono-epoxi?

Un material compuesto, es un sistema material que consiste en dos o más fases en una escala macroscópica, cuyo desempeño y propiedades mecánicas están diseñadas para superar a las de los constituyentes por separado (UNLP, 2022). En aplicaciones estructurales, generalmente se tiene una fase más rígida y resistente denominada REFUERZO (fibras de carbono), y una fase menos rígida y resistente denominada MATRIZ (resina epoxi) que se encarga de contener los refuerzos, protegerlos de daños químicos y mecánicos, además distribuye las cargas para equilibrar el conjunto. Por su característica heterogénea, los materiales compuestos suelen presentar un comportamiento altamente anisótropo; existe por lo tanto direccionalidad en el material que debe ser aprovechada por el diseñador (Gay, 2015).

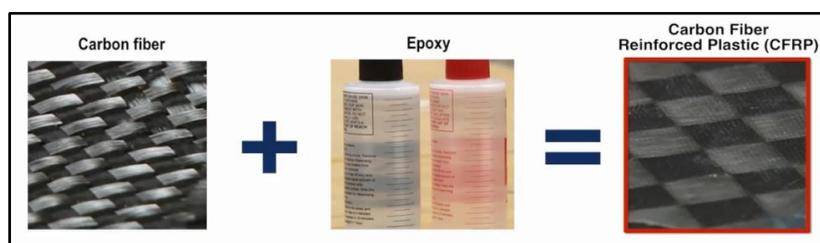


Figura 2. Definición de un compuesto.

Descripción de una estructura tipo sándwich

Una construcción tipo sándwich es un concepto de panel estructural que consiste, en su forma más simple, en dos láminas frontales (skin) relativamente finas paralelas unidas y separadas por un núcleo (honeycomb/foam) relativamente grueso y ligero (FAA, 2018).

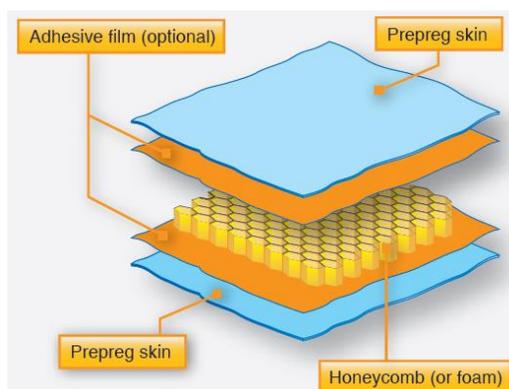


Figura 3. Descripción de un panel tipo sándwich.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

Como se mencionó, las placas sándwich se componen de laminados, que contienen un núcleo central de muy baja densidad y gran espesor. Dichas estructuras de materiales compuestos tipo sándwich se caracterizan por elevar notablemente la rigidez a flexión y torsión de la placa y debido al aumento de la rigidez a flexión (ver figura 4), por ende, son ideales para aumentar la estabilidad en compresión de placas (UPV, 2022).

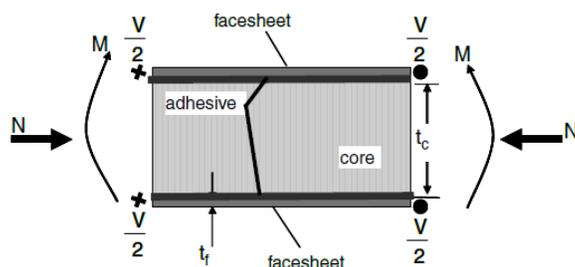


Figura 4. Configuración de un panel tipo sándwich.

Propiedades y materiales

Los laminados (skin) de las estructuras tipo sándwich pueden ser fabricados con fibras de vidrio, fibras de aramida (@Kevlar) o fibras de carbono embebidas en una matriz, la misma que puede ser poliéster, viniléster o epoxi. En las aplicaciones de interés en la presente investigación se analizó los laminados fabricados de fibras de carbono junto con una matriz epoxi, ya que son las más utilizadas en la industria aeronáutica. Por otro lado, también se tiene varias opciones de materiales utilizados en el núcleo (core) de los paneles, estos pueden ser espumas de poliuretano o núcleos hexagonales más conocidos como “honeycomb”, estos pueden estar fabricados de materiales metálicos, madera o a su vez de papel como se observa en la figura 5 (Kassapoglou, 2010).

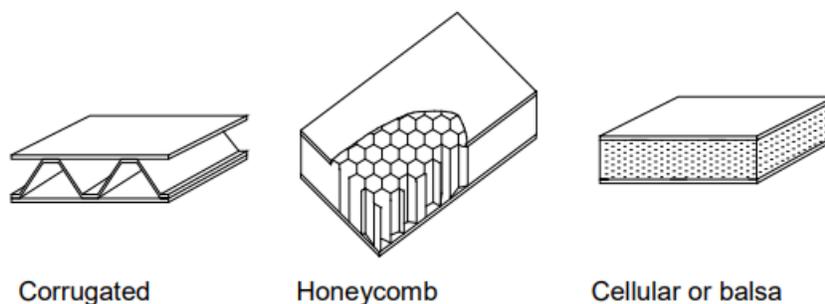


Figura 5. Núcleos utilizados en paneles tipo sándwich.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

La fibra de carbono se caracteriza por tener bajo peso, es muy resistente, tiene excelente resistencia química, están disponibles en diferentes rigideces y es un buen conductor eléctrico. Mientras que la resina epoxi ofrece mejores propiedades mecánicas y térmicas que otro tipo de resina, es de procesamiento sencillo, puede ser curadas a diferentes temperaturas y es muy eficiente en aplicaciones de alto desempeño expuestas a altas variaciones de temperatura y humedad como es el caso de las estructuras aeronáuticas (Sandwichpanels, 2008).



Figura 6. Solicitaciones de estructuras aeronáuticas.

Procesos de manufactura

Las estructuras de carbono-epoxi tipo sándwich, pueden ser fabricadas a través de diferentes procesos de manufactura, esto dependerá de la calidad y propiedades mecánicas finales que se desee obtener. El proceso más simple es Laminación Manual (ver figura 7), pasando a Infusión y sus variantes (ver figura 8) hasta llegar a Prepreg-Autoclave (ver figura 9) donde se obtienen las mejores propiedades, la mismas que en su mayoría se usa en la fabricación de componentes de aeronaves (Gurit, 2021).

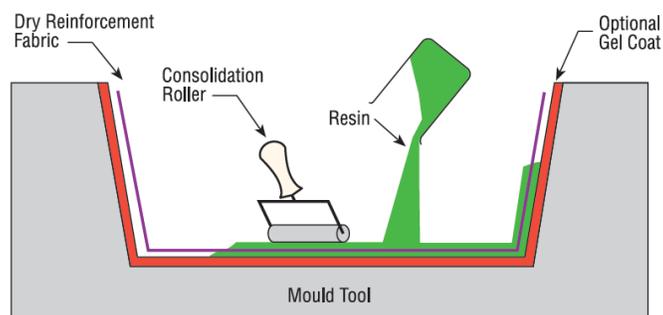


Figura 7. Laminación Manual.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

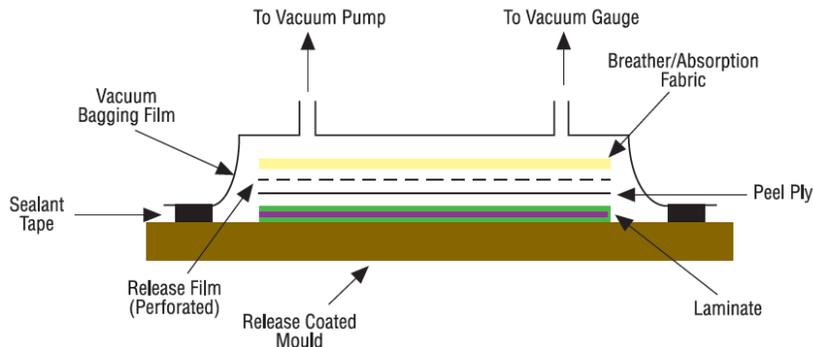


Figura 8. Infusión.

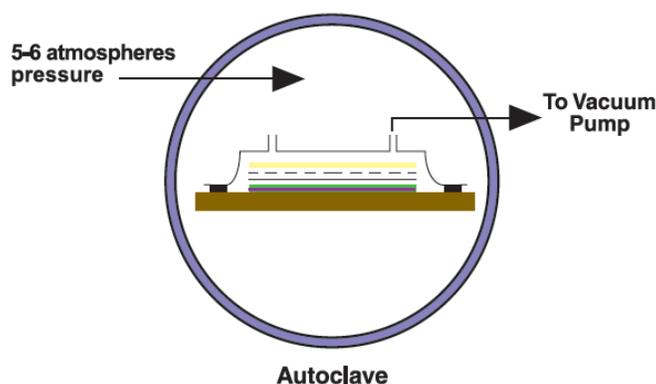


Figura 9. Prepreg-Autoclave.

Mantenimiento: Inspecciones y Reparaciones

Las regulaciones aeronáuticas de cada país especifican claramente el mantenimiento general de este tipo de estructuras de materiales compuestos, siendo a la vez de vital importancia consultar siempre el manual del fabricante de cada aeronave (SSM, 2017). El fabricante, de manera general recomienda realizar un mantenimiento anual y tener en consideración lo siguiente:

- Programar inspecciones periódicas a las estructuras y realizar jornadas de mantenimiento cuando sea necesario, esto permitirá preservar en el tiempo la funcionalidad de las mismas.
- Eliminar cualquier tipo de contaminantes y materiales acumulados en las superficies por el rozamiento del viento contra la aeronave en vuelo.
- Mantener en buen estado los insertos (ver figura 10) en los paneles, los mismos que pueden ser: remaches, pernos, bisagras entre otros.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

- Cada estructura requerirá de un mantenimiento periódico de acuerdo con las características locales a las que se encuentre expuesta: radiación solar, concentraciones de polvo o humos, ambientes corrosivos, etc.
- Utilizar solventes y jabones desengrasantes neutros, no abrasivos disueltos en agua y durante su aplicación, no dejas secar el jabón con el sol, esto puede generar manchas sobre la pintura de las estructuras.
- Si existe presencia de corrosión, es necesario seguir las recomendaciones sobre la limpieza del área corroída en base a las especificaciones del fabricante.

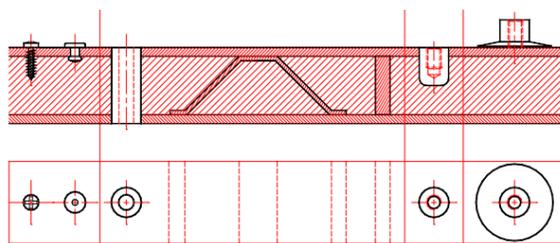
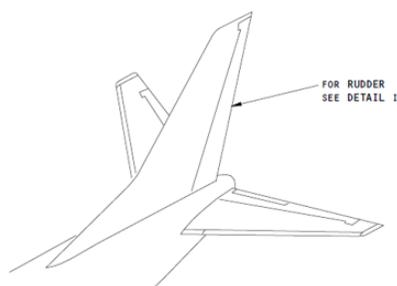


Figura 10. Insertos en paneles sándwich.

Cuando se suscite un incidente en algún componente estructural de material compuesto en las aeronaves, será necesario realizar una reparación ya sea mayor o menor. En todos los casos es importante respetar los requerimientos aerodinámicos. Dependiendo de la localización del daño y de las propiedades a restaurar, se deberá contar con la documentación técnica aplicable a cada aeronave, típicamente se lo encuentra en el Manual de Reparaciones Estructurales (SRM), el mismo que define los tamaños de daños admisibles y reparables, tipos de reparación, materiales a utilizar, procedimientos aceptables, herramientas, entre otros (Boeing, 2012).



ITEM	DESCRIPTION	GAGE	MATERIAL
1	SKIN PANEL - LH, RH SKIN CORE		GLASS/GRAPHITE/EPOXY HONEYCOMB SANDWICH [G] SEE DETAIL III NON-METALLIC HONEYCOMB PER BMS 8-124, CLASS IV, TYPE V, GRADE 3.0
2	COVERPLATE		
3	COVER PANEL - UPR, LWR	0.063	CLAD 2024-T3
4	HINGE COVER - FAIRING SKIN		GLASS/EPOXY LAMINATE [H] PREPREG GLASS FABRIC PER BMS 8-79, TYPE 120 OR 1581 [F]
5	GAP COVER - FAIRING	0.063	CLAD 7075-T6

Figura 11. Ejemplo SRM – Aeronave Boeing 737-400.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

Existen diversos métodos para realizar una reparación, la misión de cada uno de ellos es mantener los componentes en óptimas condiciones. Los tipos de reparaciones más frecuentes son reparaciones mediante uniones mecánicas y técnicas de reparación adhesivas o resinas (Callejo, 2012).

Regulaciones aeronáuticas

Las aeronaves son diseñadas contemplando todas las cargas a las cuales pueden estar sometidas en condiciones de vuelo, incluyendo combustible, pasajeros, equipajes, equipamiento, además por cuestiones de seguridad, sobrecargas por maniobras, aterrizajes bruscos, ráfagas de viento, etc. La autoridad aeronáutica de aviación civil de los Estados Unidos, a través del Código de Regulación Federal (CFR14: Aeronautics and Space), establece las regulaciones, a ser aplicadas para la certificación de aeronaves y partes de las mismas (FAA, 2022).

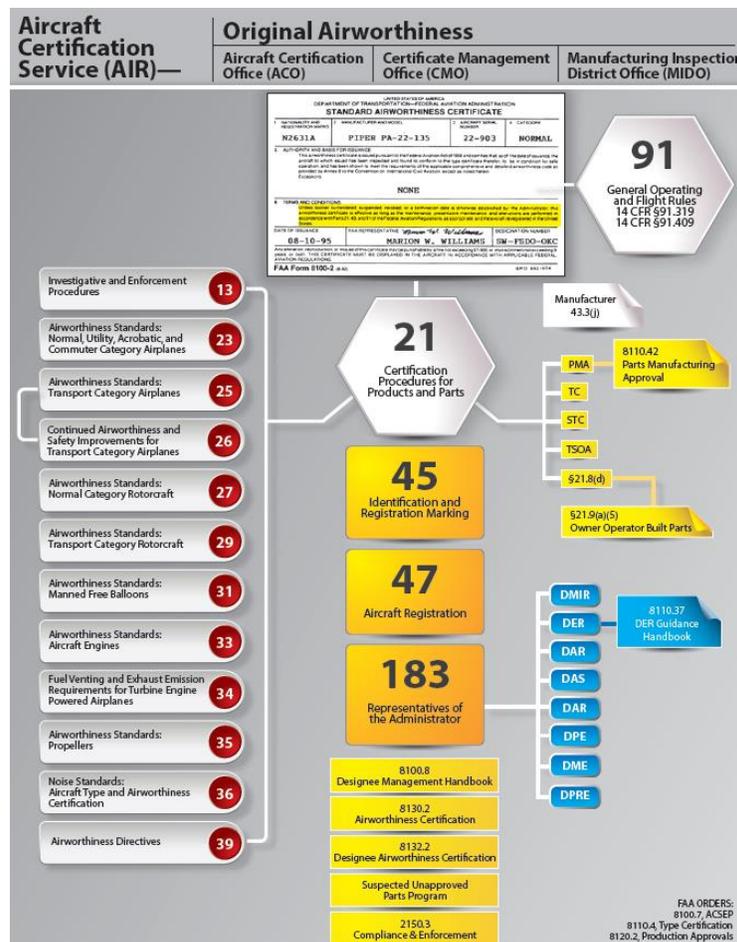


Figura 12. CFR 14: Código de Regulación Federal.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

Los estándares de aeronavegabilidad establecen las cargas, maniobras y ráfagas que debe soportar las aeronaves para una operación segura. Se establecen distintos factores de carga, de acuerdo a la categoría de la aeronave, donde los componentes estructurales de materiales compuestos se comporten de manera elástica, sufran daño o sufran falla; y así pueden ser certificados para su operación segura. Es así que se deben tener en consideración tres factores principales que podrían afectar a los paneles sándwich de carbono-epoxi en una aeronave:

- Límite elástico: La estructura se deforma al aplicar una carga. Cuando la carga cesa, la estructura toma su forma original.
- Daño: La estructura se deforma al aplicar una carga. Cuando la carga cesa, la estructura no vuelve a su forma original quedando con deformaciones permanentes.
- Falla: La estructura se rompe a la aplicación de una carga.

Estrategias metodológicas

Evolución de las estructuras tipo sándwich

El uso de estructuras de materiales compuestos tipo sándwich sigue aumentando rápidamente en aplicaciones que van desde satélites, aviones, barcos, automóviles, sistemas de energía eólica, etc. Las numerosas ventajas que proporciona este tipo de construcción, el desarrollo de nuevos materiales y la necesidad de estructuras de alto rendimiento y bajo peso aseguran que estas estructuras seguirán teniendo alta demanda en varias industrias (Thomsen, 2005).



Figura 13. Materiales compuestos tipo sándwich en diferentes industrias.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

El concepto de construcción en sándwich se remonta en Inglaterra en 1849, se utilizó esta clase de estructuras por primera vez en el bombardero nocturno Mosquito de la Segunda Guerra Mundial, que empleaba una construcción en sándwich de madera contrachapada. El primer artículo de investigación sobre la construcción de sándwiches fue escrito por Marguerre en Alemania en 1944 y trataba de los paneles sándwich sometidos a cargas de compresión en el plano. También a finales de la década de 1940, dos jóvenes veteranos de la Segunda Guerra Mundial crearon Hexcel Corporation, que a lo largo de las décadas ha desempeñado el papel más importante de cualquier empresa en el crecimiento de las estructuras tipo sándwich, empezando por los núcleos de nido de abeja “honeycomb”, hoy fabrican más del 50% de los materiales de núcleo para paneles de materiales compuestos en el mundo (Vinson, 2005).



Figura 14. Bombardero nocturno Mosquito.

A lo largo del tiempo se han venido incorporando las estructuras de materiales compuestos tipo sándwich a diferentes partes de aeronaves, en transbordadores, embarcaciones y casi todas las estructuras de los satélites se construyen en sándwich. Otro de los usos más importantes de estas estructuras durante la última década son los sistemas de energía eólica. GE Energy afirma que tiene 6900 instalaciones en todo el mundo y que su tasa de crecimiento es del 20% anual.



Figura 15. Sistemas de energía eólica.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

El futuro de la construcción de estructuras tipo sándwich parece realmente brillante, seguirá siendo la principal estructura para los satélites. En los aviones, la construcción en sándwich se utilizará cada vez más, sobre todo en los grandes aviones. Varios países están utilizando construcciones sándwich de materiales compuestos para los cascos de sus barcos. Sin embargo, uno de los mayores usos será la construcción de puentes. Existe un gran mercado internacional en los países en desarrollo que puede acoger las ventajas, dando así un salto en sus construcciones de puentes al siglo XXI sin todas las construcciones convencionales que se utilizan hoy en día en los principales países. Por último, con la creciente necesidad de fuentes de energía alternativas, se están desarrollando sistemas de molinos de energía eólica que dependen en gran medida de las construcciones de sándwiches compuestos. Así pues, los principales usos de la construcción en estructuras sándwich en el futuro serán las aeronaves, los cascos de los barcos, las estructuras de los puentes y los sistemas de energía eólica, éstos impulsarán la industria en todo el mundo (Castanie, 2020).

Ventajas y desventajas

Los materiales compuestos se han utilizado en estructuras durante gran parte de la historia de la humanidad. La combinación de dos materiales, un refuerzo y una matriz, proporciona un tercer material superior que puede adaptarse a los requisitos de la aplicación que se desee. Como resultado, los materiales compuestos se han utilizado en casi todas las industrias, por lo cual para una aplicación en específica se debe tener en consideración las ventajas y desventajas que nos brinda una estructura tipo sándwich frente a una estructura metálica (Kumar, 2017).

Tabla 1. Ventajas y desventajas de una estructura tipo sándwich frente a una estructura metálica.

Ventajas	Desventajas
Menor peso	Mayor costo
Resistencia a la corrosión	Mayor complejidad en el diseño
Menor desperdicio de material	Corrosión galvánica en contacto con metales
Reducción en la cantidad de partes	Degradación de las propiedades mecánicas con la temperatura y humedad extrema
Absorción de microondas de radar	Sensible a cargas puntuales
Coefficiente de expansión térmica muy bajo	Inspección complicada y costosa

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

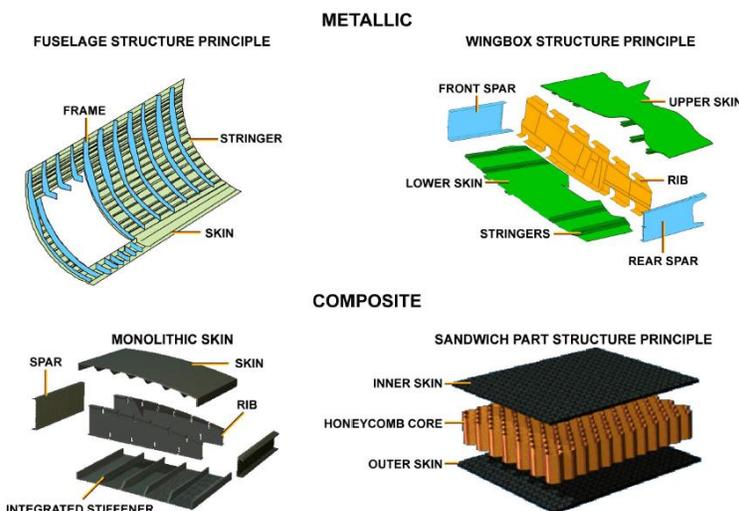


Figura 16. Estructura tipo sándwich frente a una estructura metálica.

Aplicaciones en la industria aeronáutica

Recientemente se han desarrollado métodos de fabricación más rentables, como el moldeo por transferencia de resina y la pultrusión, y la mejora de los sistemas de resina y fibra que proporcionan una mayor tenacidad están haciendo que los materiales compuestos sean candidatos muy fuertes para los nuevos diseños (AIMPLAS, 2018).

Como ejemplo, los dos fabricantes de aeronaves comerciales reconocidos a nivel mundial Boeing y Airbus, han seguido aumentando las aplicaciones de materiales compuestos en sus nuevos programas de aviones. En la aeronave Boeing 787 las aplicaciones de materiales compuestos suponen aproximadamente el 50% del total del fuselaje, mientras que en la aeronave Airbus A350 se tiene el 53%, como se observa en la figura 17 y 18 respectivamente.

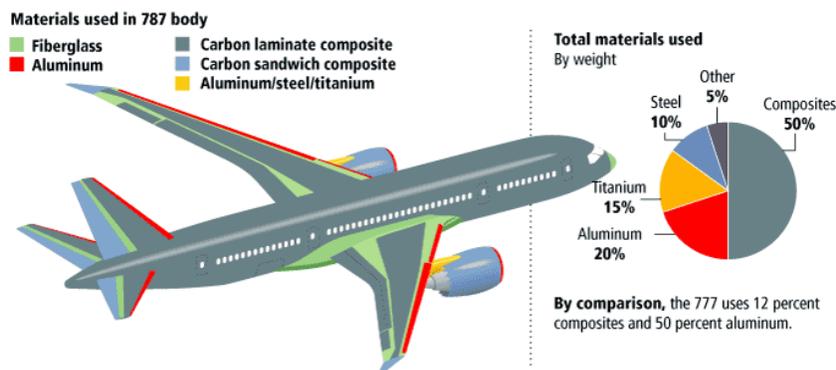


Figura 17. Aeronave Boeing 787.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas



Figura 18. Aeronave Airbus A350.

En el pasado, los diseños de los grandes aviones de transporte comercial tendían a limitar el uso de materiales compuestos tipo sándwich a las estructuras secundarias (alerones, flaps, elevadores y rudder), aunque recientemente, varios fabricantes de aviones comerciales han considerado y elegido materiales compuestos para otras estructuras primarias.

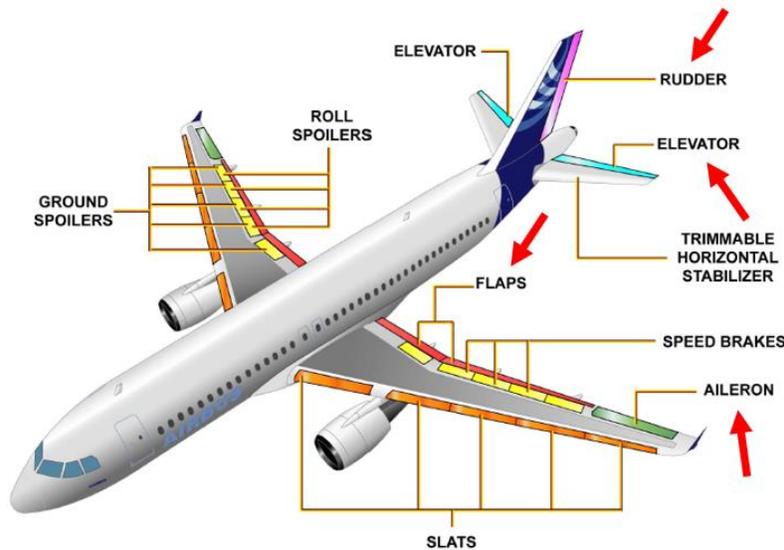


Figura 19. Superficies de control aeronave Airbus A320.

En el caso de las aeronaves Airbus que son las que utilizan en mayor medida materiales compuestos, se utilizan estructuras de carbono-epoxi tipo sándwich en diferentes componentes debido a las ventajas que ofrecen como se indicó en la tabla 1. Se utilizan principalmente en partes internas y

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

externas de los motores (ver figura 20), en los estabilizadores y elevadores (ver figura 21) (Airbus, 2011).

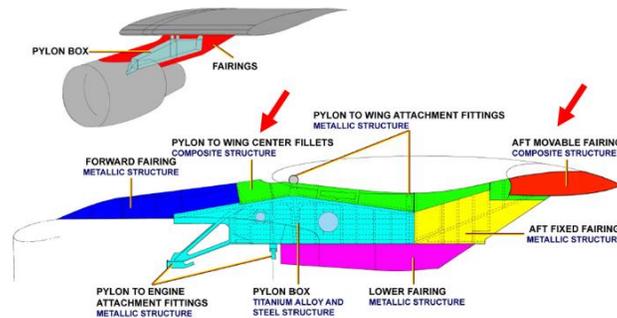


Figura 20. Partes internas y externas de los motores.

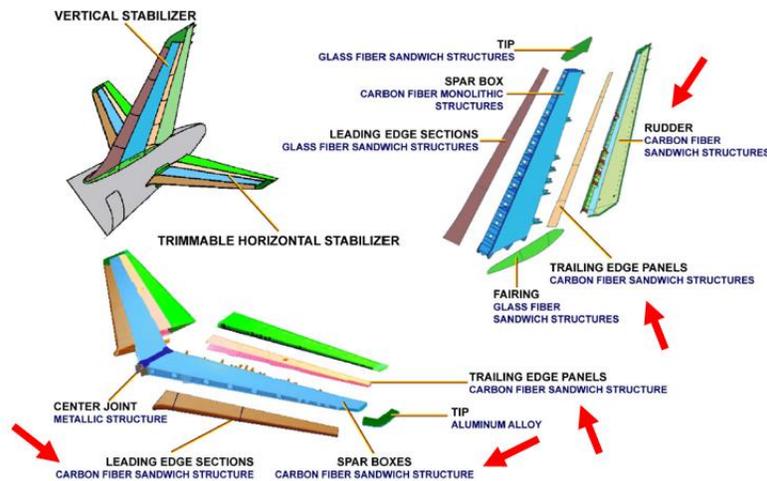


Figura 21. Estabilizadores y elevadores.

También se utilizan en la fabricación de componentes estructurales fijos y móviles de las alas de las aeronaves como se observa en la figura 22 y 23.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

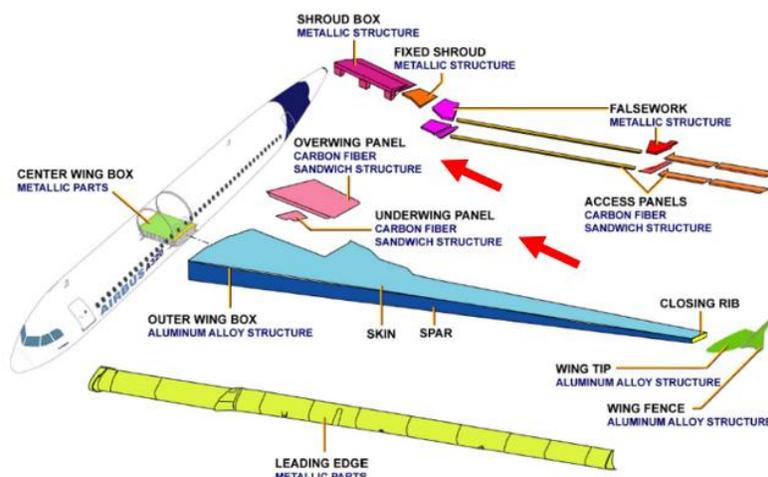


Figura 22. Componentes estructurales fijos de las alas.

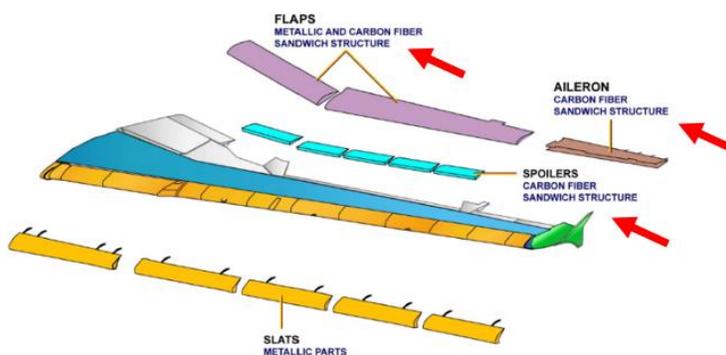


Figura 23. Componentes estructurales móviles de las alas.

En la figura 24 se puede observar de manera general las principales aplicaciones de estructuras de carbono-epoxi (color celeste) tipo sándwich en diferentes componentes de una aeronave Airbus A320, que es similar a los demás modelos de este fabricante. Además, se observa que existen otros componentes que son fabricados de materiales compuestos con otro tipo de fibras, en una cantidad mínima ya que satisfacen algún requerimiento especial (Airbus, 2011).

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

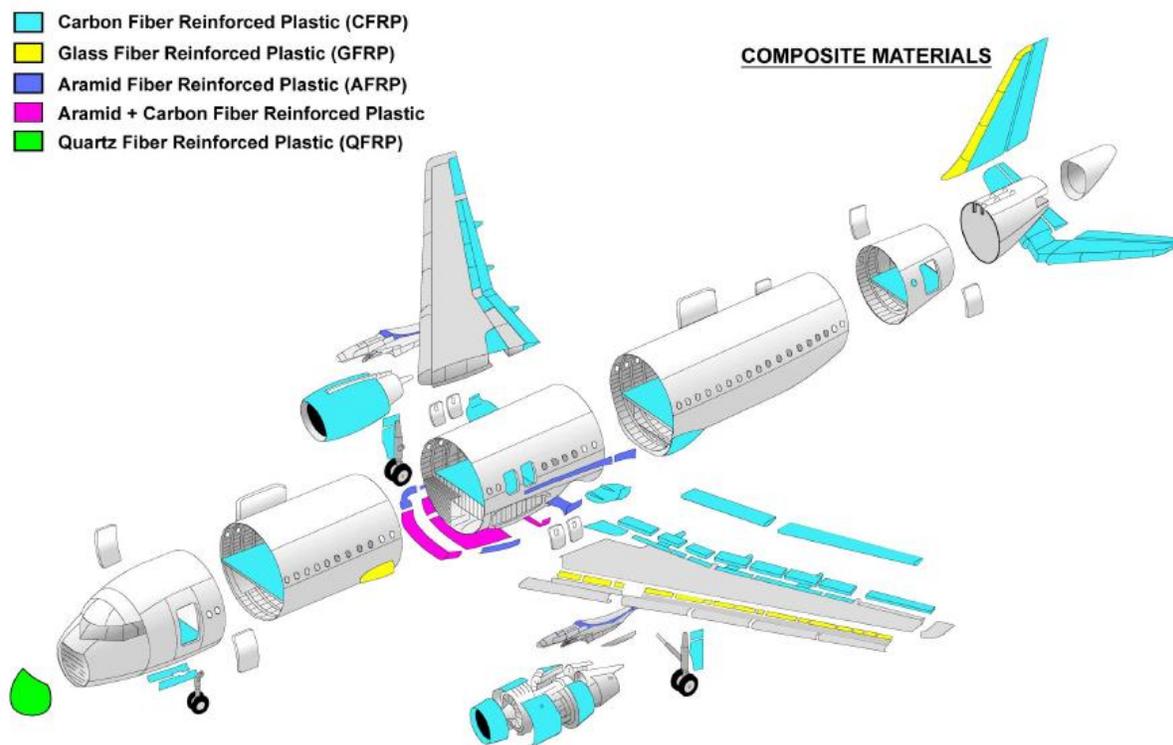


Figura 24. Estructuras de carbono-epoxi tipo sándwich – Airbus.

Discusión

La adopción de los materiales compuestos para las estructuras de las aeronaves ha sido más lenta de lo previsto inicialmente, a pesar del ahorro de peso y a las diferentes ventajas que ofrecen estos materiales. Entre las razones que explican este uso restringido se encuentran el elevado costo de la certificación y los mayores costes de materiales y producción. Tras algunos años de estancamiento, el uso de materiales compuestos en las estructuras de grandes aviones ha aumentado, ya que los fabricantes aprovechan las propiedades únicas de estos materiales y encuentran soluciones para reducir el costo de producción. Sin embargo, la ingeniería de los materiales compuestos es un proceso muy integrado; cada decisión de diseño debe tener en cuenta todos los aspectos, desde la mecánica del material hasta la fabricación y reparación. Omitir estas consideraciones puede dar lugar a un componente que no sea fabricable. Por ello, un diseño de materiales compuestos de calidad debe tener en cuenta los materiales, la fabricación, el análisis, el diseño, las pruebas, la inspección y la reparación. Si se incorporan con éxito todos estos parámetros que compiten entre sí, se obtendrá un diseño óptimo del material compuesto (AIMPLAS, 2018).

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

Los materiales compuestos de carbono-epoxi tipo sándwich, se comportan de forma muy diferente a las estructuras metálicas en muchos aspectos, principalmente en el peso de los componentes. Esto es muy importante en una aeronave ya que la reducción del peso de la estructura del avión conlleva a que se pueda llevar mayor carga útil (pasajeros + carga), por ende, la aeronave será más rentable, más eficiente y con un consumo de combustible menor lo que implica menos contaminación ambiental. También, hay que considerar que la fabricación de estructuras de materiales compuestos tipo sándwich es un campo muy diverso con múltiples métodos para lograr un objetivo singular. Para producir una pieza con éxito, es necesario cumplir los criterios de diseño conociendo los puntos fuertes y débiles de los materiales disponibles. Además, las consideraciones económicas pueden hacer que la decisión se aleje del material de mayor rendimiento y se decante por el mejor compromiso entre precio y rendimiento. Por último, es necesario comprender cómo el diseño de los materiales compuestos difiere del de los metales y cómo afecta esto a la metodología de diseño de los componentes utilizados en aeronaves.

Conclusiones

- Una estructura de materiales compuestos tipo sándwich, no necesariamente debe seguir la misma filosofía de análisis y diseño que las estructuras metálicas; aprovechando así de mejor manera las fortalezas que ofrece el material compuesto y aplicarlo de manera óptima en diferentes componentes de las aeronaves.
- A medida que avancen las tecnologías de fabricación de las estructuras de materiales compuestos y de aluminio, y con la experiencia de servicio, las opciones preferidas cambiarán con el tiempo; la tendencia de utilización de materiales compuestos va en aumento superando hoy en día ya el 50% de la estructura total de las aeronaves comerciales.
- Una vez que una estructura de carbono-epoxi está en servicio, deberá ser inspeccionada regularmente para encontrar cualquier posible daño. Las aeronaves, en particular, se examinan regularmente para garantizar la seguridad. Reconocer los peligros típicos en servicio y los daños asociados puede ayudar a detectar posibles daños con diferentes técnicas de inspección.

Referencias

1. AIMPLAS. (2 de marzo de 2022). *El presente y futuro de los materiales compuestos*. <https://www.aimplas.es/>
2. Airbus. (2011). Technical training manual general familiarization course. France.
3. Boeing 737-400. (2012). *Structural Repair Manual (SRM)*. Boeing commercial airplanes group, Seattle – Washington USA.
4. Boeing. (7 de enero de 2022). *Current Products & Services*. <https://www.boeing.com/>
5. Callejo V. (2012). *Optimización de reparaciones encoladas de materiales compuestos*. Madrid.
6. Caprino G., Teti R. (1989). *Sandwich Structures handbook*, Padua Italy.
7. Castanie B. (2020). *Review of Composite Sandwich Structure in Aeronautic Applications*. Toulouse, France.
8. Facultad de Ingeniería UNLP. (7 de febrero de 2022). *Introducción a los Materiales Compuestos*. <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/>
9. Federal Aviation Administration FAA. (2018). *Aviation Maintenance Technician Handbook—Airframe Volume I*. U.S. Department of Transportation.
10. Federal Aviation Administration FAA. (2018). *Aviation Maintenance Technician Handbook—General*. U.S. Department of Transportation.
11. Federal Aviation Administration FAA. (2022). *Code of Federal Regulations CFR*. U.S. Department of Transportation.
12. Galindo J. (2019). *Manufactura y caracterización mecánica de estructuras tipo sándwich fabricadas por infusión al vacío para componentes aeronáuticos*. Queretaro.
13. Gay. D. (2015). *Composite Materials. Design and Applications*. CRC press, Boca Raton FL.
14. Gurit. (2021). *Guide to composites*. United Kingdom.
15. Hasan Z. (2020). *Tooling for composite aerospace structures*. Elsevier.
16. Kassapoglou C. (2010). *Design and Analysis of Composite Structures*. Delft University of Technology, The Netherlands.
17. Kumar M. (2017). *Composite Structures*. Taylor & Francis Group.
18. MatWeb. (15 de febrero de 2022). *Material property data*. <http://www.matweb.com/>
19. Miravete A. (2007). *Materiales compuestos I*. México.

Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas

20. Moreno H. (2002). *Desarrollo de un material compuesto para aplicación estructural*. Instituto Politécnico Nacional. México.
21. Sandwich Panels. (12 de enero de 2022). *Example of Composite Sandwich Repair*. <https://http://www.sandwichpanels.org/>
22. SSM. (2017). *Composite Materials*. Butterworth-Heinemann.
23. Thomsen O. (2005), *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*. Springer. Netherlands.
24. Universidad Politécnica de Valencia UPV. (2 de febrero de 2022). *Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio*. <https://riunet.upv.es/>
25. Vinson J. (2005). *Sandwich structures: past, present, and future*. University of Delaware. USA.