

Tesista: Juan Pablo Vitale

Título al que aspira: Doctor en Ciencia de Materiales, UNMdP

Tema: "Diseño y comportamiento mecánico de núcleos ultra-livianos basados en CFRP para uso en estructuras sandwich"

Director de tesis: Dr. Adrián Stocchi

Co-director: Dr. Gastón Francucci

Lugar de Trabajo: Facultad de Ingeniería, UNMdP

Fecha de Defensa: 11 de abril de 2022

Jurados:

Dra. Analía Vázquez (UBA)

Dr. Ing. Philipp Höfer (Universität der Bundeswehr München, Alemania)

Dr. Adrián Cisilino (CDS, UNMdP)

Resumen

El uso de materiales base ligeros, como los compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP), puede mejorar la eficiencia energética de los vehículos de pasajeros entre un 6% y un 8% por cada 10% de reducción de peso, lo que aplicado a vehículos eléctricos e híbridos fomentaría una mayor competitividad y atracción hacia la nueva generación del transporte. Dentro del grupo de estructuras más eficientes que ofrecen muy bajo peso y buenas propiedades mecánicas, se destacan las estructuras tipo sándwich. Normalmente éstos se componen de un par de placas de cubierta, llamadas pieles, de polímeros reforzados con fibras o de aluminio, y núcleos celulares de muy baja densidad (por ejemplo, espumas, Nomex® o núcleos tipo panal de abeja o *honeycomb* de aluminio). En la actualidad, el uso de materiales de tipo celular para núcleos ha ganado mayor atención y es tendencia en el área de los diseñadores de materiales. En este contexto, las estructuras celulares ultraligeras de diseño utilizan los principios de carga orientada con el material base, aprovechando su anisotropía, como es el caso de los núcleos honeycomb 3D y los reticulados o *lattices* basados en CFRP.

El objetivo principal de este trabajo fue contribuir a la investigación en diseño y estudio del comportamiento mecánico de nuevos materiales de tipo núcleo celular, a través de diferentes enfoques. El trabajo se centra en núcleos de muy baja densidad para aplicaciones sándwich ($\rho_c < 48 \text{ kgm}^{-3}$), basados en CFRP, presentando mayor rigidez y resistencia en comparación con sus contrapartes comerciales. En estos términos, el alcance de este trabajo se dirigió a tratar tres puntos focales:

1. Explorar el diseño y la fabricación de nuevos tipos de núcleos sándwich ultraligeros: se propusieron enfoques originales de diseño: (a) *núcleos honeycomb 3D*, desarrollando el método fabricación por enclavamiento mecánico; (b) *núcleos reticulados*, con foco en su diseño a partir de materiales prefabricados. En ambos casos, la función objetivo fue lograr núcleos de ultrabajo peso y, a su vez, obtener un panel sándwich completo, alcanzándose buena calidad de terminación y repetibilidad.

2. Estudiar el comportamiento de los núcleos propuestos por casos de carga típicos, identificando y prediciendo sus modos principales de falla: Se estudió la relación morfológica de los núcleos y sus propiedades mecánicas, a partir de las geometrías de las celdas unitarias que los componen y de las propiedades mecánicas del material base, con el fin de desarrollar modelos analíticos para predecir y

estudiar los modos de falla de las estructuras obtenidas. Estos modelos fueron complementados por simulaciones por elementos finitos (FE) con buena correlación. Así, se perfilaron los modos principales de falla para evaluar el comportamiento del material previo a los ensayos. Como primera etapa, el trabajo se centra en el estudio de los núcleos en compresión fuera del plano y cizallamiento de placa, para luego complementarse con una investigación en flexión en 4 puntos, evaluando el panel sándwich como conjunto, siendo la rigidez de los núcleos y los espesores de piel las variables.

3. Caracterizar el comportamiento mecánico de los núcleos y de los paneles sándwich, propuestos para la retroalimentación de modelos: se llevaron a cabo una serie de ensayos mecánicos cuasiestáticos, en base a los estados de carga previamente establecidos. Se correlacionaron los datos experimentales y las predicciones de los modelos, proporcionando una retroalimentación para su validación. Los datos experimentales se encuentran en buena correspondencia con los modelos de predicciones.

Los núcleos honeycomb 3D presentaron densidades de $38,67 - 47,64 \text{ kgm}^{-3}$; mientras que los núcleos reticulados, densidades de $8,66 - 49,7 \text{ kgm}^{-3}$. El rango menor de densidad representa un tipo de núcleos que aun no ha sido explotado. Ambos núcleos exhibieron avances en el desempeño mecánico específico en comparación con otros materiales de núcleos conocidos, por ejemplo, en algunos casos superando en compresión en 35,5 % en términos de resistencia y en 124,6 % en términos de rigidez al mejor material competidor; y en cizallamiento, con módulos de corte de 5 a 6 veces, e índices de resistencia de 2,7 a 4,5 veces mayores que los núcleos competidores de arquitectura cuadrada.

Esta disertación brinda nuevos enfoques para la obtención de núcleos celulares de ultrabajo peso, cuyas características de celda abierta, además ofrece potenciales aplicaciones multifuncionales (por ejemplo, transferencia de calor, capacidad de refuerzo con espumas, o la incorporación de cables o electrónica). Los núcleos de estudio representan una alternativa atractiva a los núcleos celulares tradicionales metálicos y/o poliméricos y, al mismo tiempo, siendo materiales sencillos de fabricar. Los modos de falla predichos por los resultados analíticos brindan una herramienta de interés para diseñadores de materiales en diferentes aplicaciones, pudiéndose conocer las propiedades mecánicas del panel sándwich antes de su fabricación.

Abstract

The use of lightweight base materials, such as carbon fibre reinforced composites (CFRP), can improve the energy efficiency of passenger vehicles by 6-8% for every 10% reduction in weight, which, when applied to electric and hybrid vehicles, would make them more competitive and attractive to the new generation of transport. Within the group of more efficient structures offering very low weight and good mechanical properties, sandwich structures stand out. These typically consist of a pair of cover plates, called skins, made of fibre-reinforced polymers or aluminium, and very low-density cellular cores (e.g., foams, Nomex® or aluminium honeycomb cores). Nowadays, the use of cell-type materials for cores has gained increased attention and is a trend in the area of material designers. In this context, ultra-lightweight cellular design structures use the principles of oriented loading with the base material, taking advantage of its anisotropy, as in the case of CFRP-based 3D honeycomb cores and lattices.

The main objective of this work was to contribute to the research in design and study of the mechanical behaviour of new cellular core-type materials, through different approaches. The work focuses on very low-density cores for sandwich applications ($\rho_c < 48 \text{ kgm}^{-3}$), based on CFRP, presenting higher stiffness and higher strength compared to their commercial counterparts. In these terms, the scope of this work aimed to address three focal points:

1. To explore the design and fabrication of new types of ultra-lightweight sandwich cores: original design approaches were proposed: (a) *3D honeycomb cores*, developing the

fabrication method by mechanical interlocking; (b) *lattices* cores, with focus on their design from prefabricated materials. In both cases, the objective function was to achieve ultra-low weight cores and, at the same time, to obtain a complete sandwich panel, achieving good finish quality and repeatability.

2. To study the behaviour of the cores proposed for typical load cases, identifying, and predicting their main failure modes: The morphological relationship of the cores and their mechanical properties was studied, based on the geometries of the unit cells that create them and the mechanical properties of the base material, in order to develop analytical models to predict and study the failure modes of the structures obtained. These models were complemented by finite element (FE) simulations with good correlation. Thus, the main failure modes were profiled to evaluate the behaviour of the material prior to testing. As a first stage, the work focuses on the study of the cores in out-of-plane compression and plate shear, and then complemented by a 4-point bending investigation, evaluating the sandwich panel as a whole, with core stiffness and skin thicknesses as variables.

3. To characterise the mechanical behaviour of the cores and sandwich panels, proposed as model feedback: a series of quasi-static mechanical tests were carried out, based on previously established loading states. Experimental data and model predictions were correlated, providing feedback for validation. The experimental data are in good correspondence with the model predictions.

The 3D honeycomb cores presented densities of $38.67 - 47.64 \text{ kgm}^{-3}$; while the lattices cores showed densities of $8.66 - 49.7 \text{ kgm}^{-3}$. The latter lower density range represents a type of core that has not yet been exploited. Both cores' cases exhibited advances in specific mechanical performances compared to other known core materials, for example, in some cases outperforming the best competing material in compression by 35.5 % in terms of strength and 124.6 % in terms of stiffness; and in shear, with shear moduli 5 to 6 times, and shear strengths 2.7 to 4.5 times higher than competing cores with square architecture.

This dissertation provides new approaches to obtain ultra-lightweight cell cores, whose open cell characteristics also offer potential multifunctional applications (e.g., heat transfer, foam reinforcement capability, or the incorporation of wires or electronics). The studied cores represent an attractive alternative to traditional metallic and/or polymeric cell cores while being simple to fabricate. The failure modes predicted by the analytical results provide a tool of interest for material designers in different applications, being able to know the mechanical properties of the sandwich panel before its fabrication.