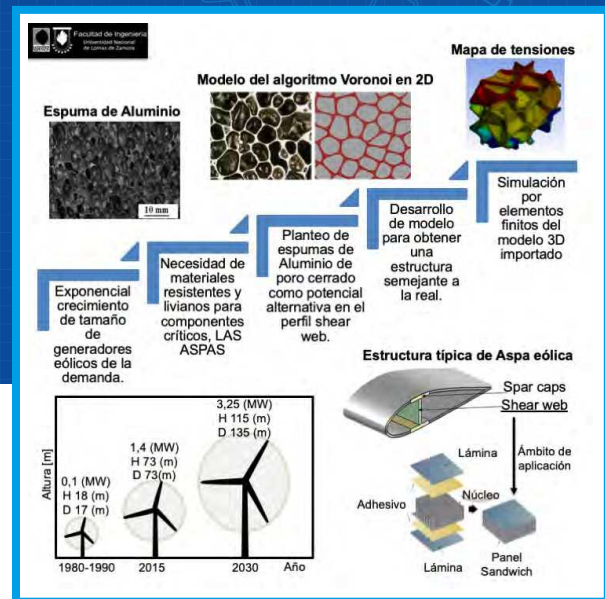


Modelado de espumas metálicas para su aplicación en aspas de aerogeneradores

Liz Cruz Villegas, Nahuel Micone y Marcelo Pelayo

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora

Contacto: cruzvillegasliz@gmail.com



RESUMEN

El acelerado crecimiento de la capacidad instalada y cantidad de parques eólicos y el exponencial aumento de las dimensiones de los aerogeneradores ha motivado la apertura de núcleos de investigación, principalmente relacionados al aumento de su eficiencia y flexibilidad de operación. Recientes reportes han confirmado la necesidad de analizar la aplicabilidad de materiales de baja densidad, alta resistencia mecánica y capacidad de reciclado para la fabricación de las aspas de dichas máquinas. En este marco de investigación, se ha planteado la utilización de espumas de aluminio como posible candidato. Debido al gran tamaño y complejidad de las mismas, resulta costoso y dificultoso llevar a cabo ensayos a escala. Por dicho motivo, se hace foco en el uso de diferentes softwares para el modelado y simulación del material antes mencionado.

Este artículo describe las principales fuerzas que actúan sobre las aspas, las estructuras típicamente utilizadas y las potenciales zonas de aplicación de las espumas de aluminio en ellas. Luego se introduce un análisis de literatura sobre el modelado de espumas metálicas. Por último, el modelo optimizado es importado en el entorno "Ansys" donde se procede a realizar una simulación por elementos finitos (2D y 3D generados). Resultados preliminares muestran que el modelo desarrollado tiene potencial para describir el comportamiento de espumas de aluminio bajo cargas de compresión.

ABSTRACT

The fast growth of installed capacity and quantity of wind farms, and the exponential increase of wind turbines' dimensions has motivated the opening of research topics, mainly related to the increase of their efficiency and operation flexibility. Recent reports have confirmed the need to analyze the applicability of materials with low density, high mechanical resistance and recycling capacity for the production of these machines' blades. In this research framework, it has been proposed the use of aluminum foams as a possible candidate. Due to the large size and complexity of the turbine blades, carrying out tests at real scale implies high costs and technical difficulties. For this reason, the present work focuses on the use of different software for modeling and simulation of the previously mentioned material.

This article describes the main forces applied to these blades, the structures typically used and the potential areas where metallic foams can be implemented. Then, some metallic foams modelling strategies are described. Finally, an optimized model is imported into "Ansys" where FEA is carried out. The obtained results are compared with available literature concluding that the developed model has potential to describe aluminum foam behavior under compressive loads.

Palabras clave: Espumas de Aluminio, Aspas Eólicas, Simulación, Ansys.

Keywords: Aluminum Foams, Wind Blades, Simulation, Ansys.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el compromiso de los gobiernos respecto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel internacional se ha incrementado. La Asamblea de la ONU para el Medio Ambiente [1], el Protocolo de Kioto [2], el acuerdo de París [3] y los Objetivos de Desarrollo Sostenible [4] son algunos de los principales impulsores en la proliferación de fuentes de energía alternativa.

Actualmente, Argentina es uno de los países comprometidos con el cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable propuestos por la ONU. Entre los objetivos a priorizar por el Gobierno Nacional, se encuentra el Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos [5].

A raíz de lo expuesto, las energías renovables son uno de los tópicos con mayor desarrollo y evolución en el país [6]. En Argentina, la eólica es una de las fuentes alternativas de energías más destacada debido principalmente a la alta dotación de recursos naturales asociados. A modo de ejemplo, el 70 % del territorio posee vientos de más de 6 m/s con una dirección y constancia tal que permiten obtener factores de capacidad del 35 % y superiores [7]. Los mismos contribuyen a obtener una gran disponibilidad y rentabilidad de los parques eólicos.

Los aerogeneradores, acompañando la demanda energética, han aumentado de tamaño superando límites no considerados décadas atrás [8]. Esto ha implicado la generación de códigos que establezcan criterios uniformes en el diseño y la fabricación de dichos componentes [9] lo que ha conllevado a la investigación de este tópico a fin de optimizar los principales criterios establecidos [10]. Sin embargo, un tema pendiente de desarrollo, es la utilización de materiales más resistentes y livianos en la fabricación de las palas de los aerogeneradores. Dichos componentes son considerados una parte crítica del conjunto, ya que son los encargados de adquirir la energía del viento y convertir el movimiento lineal en un movimiento de rotación. Esta energía es transmitida a un sistema de transmisión mecánica y de ahí al generador que transforma el movimiento de rotación en energía eléctrica.

Debido al tamaño, complejidad en su diseño y criticidad de las palas, el desarrollo de materiales específicos para su construcción es de gran aporte para el aumento de la eficiencia de estos equipos.

Para la fabricación de las palas es de gran interés la aplicación de espumas de aluminio, ya que son materiales con propiedades físicas y mecánicas acordes a los parámetros requeridos para un eficiente diseño y rendimiento. Adicionalmente, tie-

nen un menor impacto ambiental ya que cuentan con una óptima capacidad de reciclado.

En función al análisis de literatura realizado previo al presente trabajo [11], se concluyó que las espumas de aluminio de poro cerrado satisfacen mejor las propiedades que las de poro abierto. Además, se propuso una serie de métodos de fabricación y algunas aleaciones de aluminio tentativas para dicha aplicación.

A raíz de la gran complejidad intrínseca a la estructura de espumas de aluminio, para llevar a cabo las experiencias planteadas y validar la hipótesis de aplicación de espumas de aluminio en palas eólicas (ensayos a escala), se requiere tener a disposición una amplia variedad de recursos, siendo el factor económico el de mayor influencia. Las investigaciones que se han ido desarrollando en este campo proponen como solución a esta problemática, la utilización de softwares específicos para el modelado y simulación del material. Por tal motivo, en el presente trabajo se recurre a este tipo de herramientas para el estudio de diferentes estrategias de modelado, el cual permitirá la simulación de algunas de las propiedades críticas a tener en cuenta para un eficiente diseño de las palas.

DESARROLLO

Las turbinas eólicas son máquinas empleadas para transformar la energía del viento en energía eléctrica. Estos se clasifican, en función de la orientación de las palas, en las de eje horizontal y de eje vertical (Figura 1) [12], [13].



Figura 1: Aerogenerador de eje vertical y eje horizontal [12],[13].

En ambos casos el principio de funcionamiento es similar y se resume como: el aerogenerador es actuado por la rotación de un eje que gira por la acción del viento sobre las palas [14]. Es decir, la energía cinética del aire en movimiento es convertida en energía mecánica que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, convirtiéndola en energía eléctrica. Por lo expuesto, las palas son un componente vital que

inclusive guarda relación con la eficiencia de estos equipos. A continuación, se brinda una breve descripción de su forma típica constructiva.

Perfil de aspas de aerogeneradores

Las palas consisten esencialmente en dos perfiles ensamblados, uno de succión y otro de presión. Internamente se encuentran reforzadas por unos perfiles con dos elementos principales, 'shear webs' y 'spar caps' (Figura 2) [15], [16].

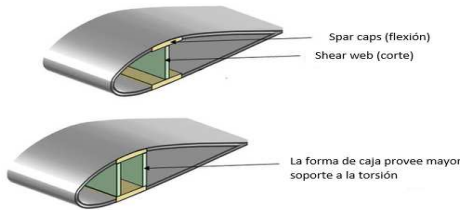


Figura 2: Componentes básicos del perfil estructural de un aspa de aerogenerador.

La distribución de los refuerzos estructurales puede adoptar diferentes configuraciones (Figura 3) que aportan mayor soporte, siendo las zonas amarillas los shear webs y las zonas negras los spar caps [17].



Figura SEQ Figura * ARABIC 3: Celdas con: a) refuerzos estructurales. b) un solo refuerzo superficial tipo caja. c) refuerzo superficial entre webs.

Desde el punto de vista aerodinámico, las fuerzas actuantes sobre un aspa son: sustentación y resistencia. La primera es la componente perpendicular a la corriente incidente, mientras que la segunda es la componente de igual dirección y sentido que la corriente actuante (Figura 4). Al actuar el viento (v) sobre un aspa se genera un gradiente de presiones entre ambas caras, resultando la fuerza F , conformada por la componente de las 2 fuerzas [18].

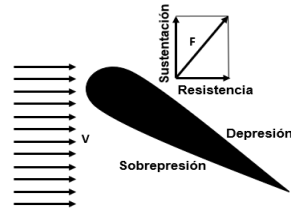


Figura 4: Fuerzas aerodinámicas actuantes sobre el perfil de un aspa.

Desde el punto de vista estructural, las aspas están sujetas a cargas de flexión, gravitacionales, o aquellas generadas por la aceleración. En lo referente a la flexión, existen dos direcciones a considerar: flapwise, perpendicular a la línea cordal, y edgewise, paralela a la línea cordal (Figura 5).



Figura 5: Direcciones de las fuerzas aplicadas sobre el aspa.

Las cargas causantes de la flexión en la dirección flapwise, son soportadas principalmente por el spar cap, mientras que los refuerzos, shear webs, resisten las fuerzas actuantes sobre la dirección cordal, edgewise [19].

Actualmente, los perfiles shear webs están realizados con materiales tipo sándwich, el cual consiste en un núcleo de sección de un material ligero recubierto por láminas de otro material (Figura 6). Este tipo de constitución proporciona un bajo peso y alta rigidez.[20].

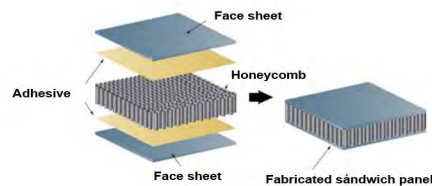


Figura 6: Esquema de estructura tipo sándwich con núcleo de colmena [38].

De acuerdo a lo expuesto hasta el momento, resulta de interés evaluar la posibilidad de utilizar la espuma metálica de aluminio como núcleo del material tipo sándwich de los refuerzos estructurales, principalmente los denominados shear webs, los cuáles son intermediarios entre ambas caras

del aspa. No obstante, en los últimos años se observa una tendencia a utilizar materiales sándwich en más secciones de las palas (Figura 7), principalmente para mejorar el comportamiento frente a cargas de pandeo (buckling) [21].

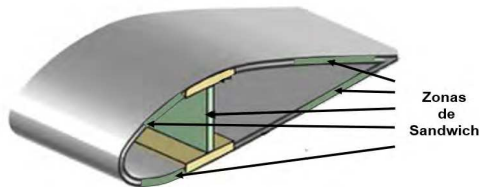


Figura 7: Zonas potenciales a aplicar materiales tipo sándwich en las palas de los aerogeneradores.

Espumas metálicas

Las espumas metálicas han sido estudiadas y analizadas por diversos autores [22]-[26]. Cárcel González [24], en su tesis doctoral llama espuma metálica a los materiales con una densidad relativa, es decir el peso respecto del material macizo, menor al 40% y con una definida estructura celular, la cual puede estar conformada por celdas o poros abiertos. Los últimos son los que caracterizan las esponjas, siendo las estructuras constituidas por celdas cerradas con las que se trabajará a continuación.

Dichas espumas pueden ser obtenidas mediante dos métodos de manufactura: fusión y pulvimetalurgia. La técnica utilizada para obtener la espuma, que se tomará de referencia para el desarrollo de este proyecto, se corresponde con el método de fusión, el cual consiste en expandir un gas dentro del metal fundido por inyección o descomposición de polvos para crear las celdas que, posteriormente a su solidificación, mantienen la estructura formada. Las celdas están conformadas por aristas, interceptados en nodos o vértices, y caras o paredes de celda que unen las aristas (Figura 8).

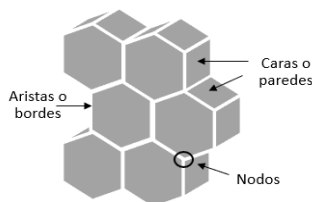


Figura 8: Esquema simplificado de los componentes de las celdas de una espuma.

La Figura 9 ilustra la estructura de una espuma de poro cerrado. Los materiales celulares, según sea el proceso de fabricación utilizado, poseen ta-

maños de poro en el rango de los 30mm hasta decimas de milímetros [27].

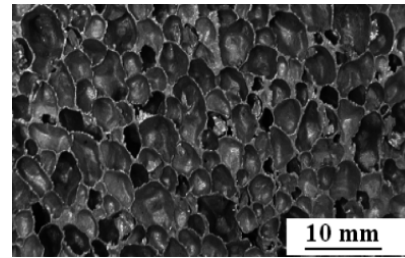


Figura 9: Espuma de aluminio de poros cerrados [28].

La diferencia entre las dimensiones de las celdas unitarias y los elementos constituidos por ellas, permite considerar al material homogéneo y ser descrito con un modelo de homogeneización. El modelo analiza la respuesta mecánica a nivel macro a partir de deformaciones a nivel micro, tomando ventaja de la periodicidad de la estructura del material y permitiendo estudiar el comportamiento interno del mismo [25],[26]. La respuesta mecánica macro rige por el comportamiento estructural de las celdas. Y a nivel micro, en la estructura celular los defectos generan concentraciones de tensión locales provocando pequeñas deformaciones plásticas, aun estando en el periodo de fluencia. Daxner [29], expone que este fenómeno ocurre principalmente alrededor de los vértices de las celdas. Por tal motivo, es necesario considerar en el modelo el comportamiento elasto-plástico del material independientemente de la carga a la cual es sometida.

A diferencia de un material macizo, el tensor de tensiones de las espumas está formado por la componente hidrostática, referido a un cuerpo sumergido en un fluido sometido a esfuerzos normales en todas sus caras, y la desviadora, referido a los esfuerzos de corte aplicados [31].

El modelo constitutivo aplicado, es decir el conjunto de ecuaciones que caracterizan cada tipo de material y su reacción macroscópica a las cargas aplicadas [30], define el tamaño, ubicación y forma de la superficie de fluencia afectado por las deformaciones plásticas acumuladas. Como resultado, la superficie de fluencia evoluciona con el tiempo y la deformación plástica resulta de superponer los efectos del comportamiento elástico y de fluencia. La Figura 10 ilustra las distintas etapas que atraviesa una espuma metálica por acción de un esfuerzo de compresión uniaxial cuasi estática [23].

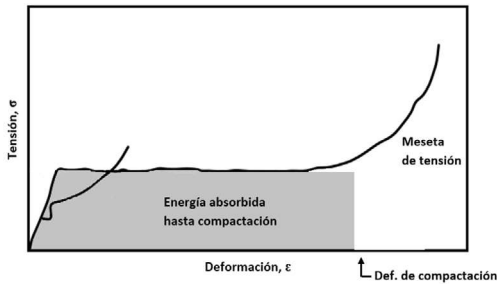


Figura 10: Curva tensión-deformación a compresión de una espuma metálica.

La meseta de tensión observada se caracteriza por el colapso sucesivo de las celdas, producido por pandeo elástico sobre las paredes de estas, generando deformación plástica prematura a tensión casi constante. A medida que se incrementa la carga, el pandeo elástico provoca el colapso de las celdas, con su consiguiente deformación y aumento de presión entre las paredes circundantes. Alcanzada determinada deformación, denominada deformación de compactación, se eleva abruptamente la tensión, produciéndose la compactación del material.

En general, se produce endurecimiento por deformación, ya que las celdas colapsadas resisten mayores esfuerzos de compresión, como consecuencia la pendiente de la meseta es más inclinada.

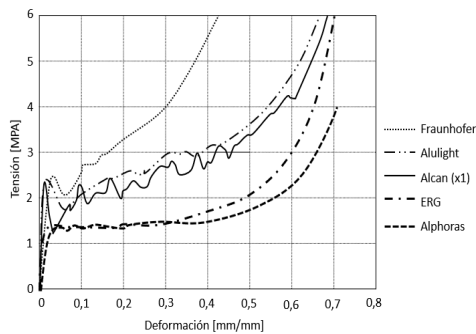


Figura 11: Curvas tensión-deformación nominal a compresión cuasiestática de espumas metálicas comerciales.

La Figura 11 ilustra las curvas correspondientes a distintas espumas metálicas comerciales. A modo comparativo, se observa la variación de las mesetas y pendientes según el material. También se observa que la configuración de espumas aumenta su resistencia durante el período plástico a compresión, siendo mucho menor la carga soportada en el período elástico.

Propiedades de las espumas metálicas

Para simular las espumas metálicas es necesario desarrollar un modelo que capture su geometría real y sus características determinantes. Las propiedades de las espumas metálicas dependen de las características de los poros constitutivos, entre ellas, el tipo, forma, tamaño, porcentaje, uniformidad y área. Las mismas presentan una gran variabilidad de acuerdo al método con el que se fabrica la espuma [28]. Este proyecto en particular se centra en el estudio de las espumas obtenidas a partir del proceso Alphoras [25].

A continuación, se presentan los parámetros más relevantes que describen la morfología de las espumas metálicas.

Geometría de las celdas

Observaciones experimentales indican que la estructura real es normalmente una combinación de diferentes poliedros no regulares. Es necesario aclarar que la distribución y el tamaño de celda es aleatoria, y varía en gran medida respecto al método de fabricación [22].

Densidad relativa

Es el parámetro físico más importante para definir las propiedades mecánicas, térmicas o eléctricas de una espuma metálica en relación con las propiedades del sólido. Si bien no define el tipo de geometría de la estructura, es relevante para el cálculo del espacio ocupado por un gas dentro de la misma.

Para una geometría de celda dada, el conocimiento del tamaño de poro o de las longitudes de las aristas, el espesor de las paredes y el espesor de los bordes, permite predecir de manera precisa el valor de la densidad relativa de la espuma.

En [25] se ha evaluado la conexión entre la variación de la densidad de las espumas con su comportamiento elástico y su absorción de energía. La cuantificación de estos valores se realiza mediante la determinación de una serie de parámetros geométricos: número de poros por unidad de superficie (N_a), el área de los poros por unidad de volumen (S_v) y el volumen de poros por unidad de volumen (V_v). Estos valores, al ser representados respecto a la variación de densidad, muestran cómo al incrementar la densidad, disminuye V_v y aumentan N_a y S_v (Figura 12) [32].

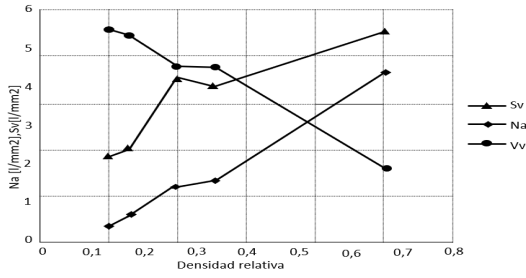


Figura 12: Variación de la densidad relativa en función al número de poros por unidad de superficie (NA), área de poros por unidad de volumen (SV) y el volumen de poros por unidad de volumen (VV). Modificado de [19].

Cuando la densidad aumenta, también lo hace el espesor de las paredes y el volumen de los poros disminuye [22]. Es decir, cuanto mayor sea la densidad, el tamaño del poro es menor, las paredes son más gruesas y la estructura tiende a ser más homogénea (Figura 13).

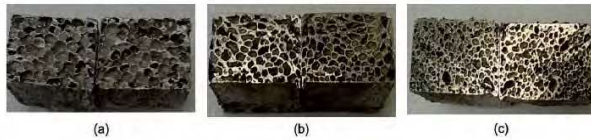


Figura 13: Tamaño de poro de las espumas de aluminio de densidad (a) 0,56 g/cm3 (b) 0,66 g/cm3 (c) 0, 73 g/cm3 [22].

La densidad relativa es la propiedad que tiene mayor influencia sobre el comportamiento a compresión de las espumas metálicas [23], debido a su relación directa con el tamaño y la distribución de los poros. En las Figura 14 y 15 se observa que las espumas de aluminio de mayor densidad presentan mayor resistencia [36]. Puede observarse que el aumento de la densidad en las espumas incrementa el valor de las cargas en los ensayos de compresión, de impacto y tracción.

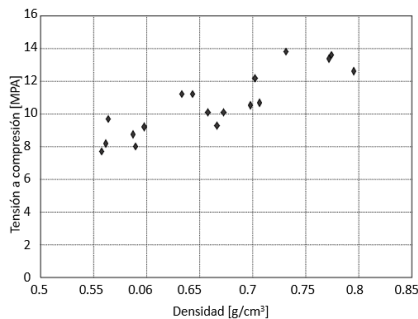


Figura 14: Comportamiento a compresión de espumas de aluminio de diferentes densidades. Modificado de [32].

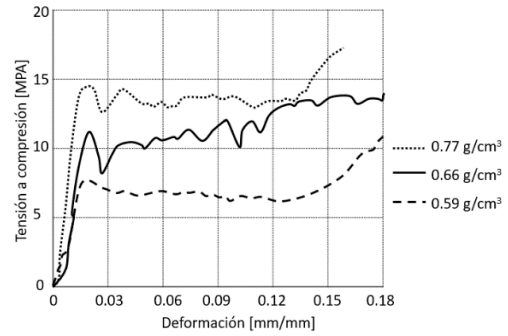


Figura 15: Curvas de tensión-deformación a compresión de tres espumas de aluminio con diferente densidad. Modificado de [32].

Anisotropía estructural

Las espumas obtenidas a partir del proceso Alporas, presentan tamaños de poro variables en el rango de 2mm a 10mm [11]. Otro parámetro relevante, es la forma de las celdas. Celdas equiaxiales imponen propiedades isotrópicas, mientras que, si son alargadas en una dirección preferente, las propiedades varían de forma muy importante según la orientación de la espuma en la que se midan (anisotropía) [33]. La anisotropía presente será producto de la aleatoriedad y variabilidad del proceso de fabricación. Esta variabilidad dentro de la espuma se ve reducida cuanto mayor sea la densidad de la espuma fabricada, ya que la geometría de la celda tiende a ser más homogénea y esférica [26]-[34].

Métodos de modelado de espumas metálicas

Para representar la estructura de las espumas, en una primera instancia, se ha desarrollado un modelo simplificado, el cual se ha procurado que cuente con una determinada periodicidad respecto de su geometría para que su modelado sea más sencillo. Entonces se ha propuesto celdas unitarias de material homogéneo con una o más cavidades, como las mostradas en la Figura 16, las cuales poseen simetría cúbica. Las dimensiones de dicha celda pueden ser parametrizadas y es posible modificar sus dimensiones geométricas, el tamaño de los poros y su valor de porosidad.

A partir la celda definida se pueden generar varias matrices para crear la espuma de aluminio. Si se modifican las dimensiones de la celda, automáticamente se actualizan los valores en toda la matriz.

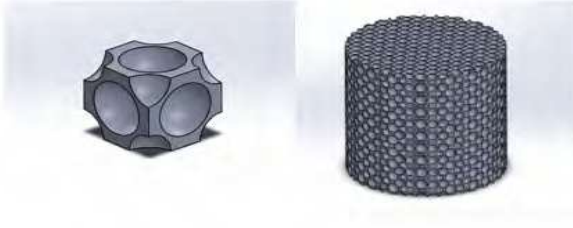


Figura 16: Modelado de celda unitaria.

Si bien el modelo de celda unitaria simplifica el modelado, no es aplicable al corriente estudio, ya que presenta importantes limitaciones y puede dar lugar a interpretaciones erróneas sobre las prestaciones estructurales de las espumas de poro cerrado. Esto ocurre ya que se trata de una estructura con un elemento continuo y se hace muy complejo reproducir la densidad relativa de la espuma. Además, es esperable que no represente el comportamiento estructural debido a que no considera la intrínseca inhomogeneidad de las espumas en términos de espesor de pared y tamaño de poro.

Por estas razones, se ha continuado el análisis en búsqueda de alternativas. El siguiente paso ha sido recurrir a elementos tipo placa o Shell. Estos elementos son utilizados para modelar estructuras en las que el espesor de pared es significativamente más pequeño que el resto de las dimensiones, permitiendo obtener un modelo de celda unitaria con menor densidad relativa.

Partiendo de una observación visual de la estructura de las espumas metálicas de celda cerrada e intentando obtener una celda unitaria fácil de delinear, con simetría cúbica, se ha tomado el modelo desarrollado por Irausquin [23] (Figura 17).

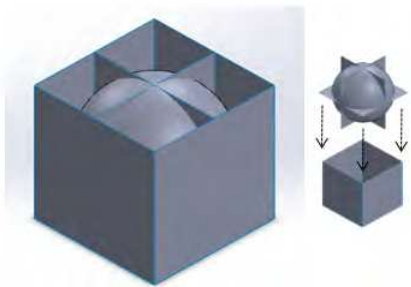


Figura 17: Modelo tipo Shell.

El modelo de celdas tipo Shell también es desestimado, ya que, si bien los resultados de las simulaciones se asemejan a la respuesta mecánica de las espumas, la curva tensión deformación presenta muchas diferencias. Y se llega a la conclusión de que el modelo propuesto es incapaz de reproducir la compactación progresiva durante el proceso de deformación, en el ensayo de compresión.

En la Figura 18 se puede observar la comparación entre la curva tensión-deformación del modelo Shell con una espuma experimental, evidenciando las diferencias entre ambas. Existe una similitud en la zona elástica, tanto en su extensión como en el valor de la rigidez. El endurecimiento tiene una pendiente creciente que se asemeja al de la espuma experimental, aunque se diferencia a partir de la compactación y no muestra el pico de tensión al comienzo de la plastificación.

Esto resulta previsible, ya que la aparición del pico de tensión en la curva está asociada a la fractura y colapso masivo de bandas de celdas en la espuma y el modelo analizado tiene una sola celda.

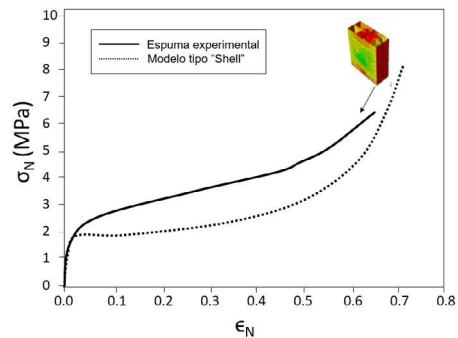


Figura 18: Comparación de la curva tensión-deformación del modelo Shell con la curva de una espuma experimental [23].

Dadas las diferencias presentadas en la curva tensión/deformación, se ha decidido desestimar momentáneamente el mismo, con el objetivo de encontrar otro que se asemeje en mayor grado al comportamiento experimental.

Por lo antes expuesto, se ha procedido a utilizar otra clase de estructuras que capten la aleatoriedad intrínseca que caracteriza a las espumas metálicas. De este modo, se ha buscado plantear un algoritmo que considere los parámetros más importantes para el modelado de la espuma de aluminio.

Cuando se simulan un gran número de celdas, también suele utilizarse un modelado de estructuras periódicas compuestas por múltiples celdas generadas por algoritmos de Voronoi y distribuidas al azar (Figura 19) [35].

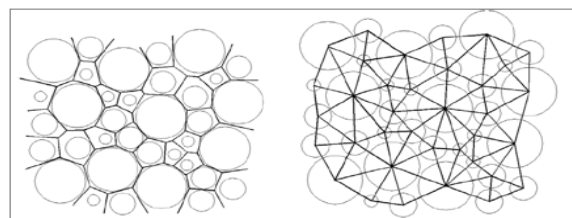


Figura 19: Diagramas de Voronoi [35].

La ventaja de este método es que proporciona una adecuada representación de la geometría celular aleatoria de las espumas a una escala que incluya un gran número de celdas, pero requiere mucho tiempo de cálculo computacional y el desarrollo de un robusto algoritmo para representar de forma realista dichas celdas.

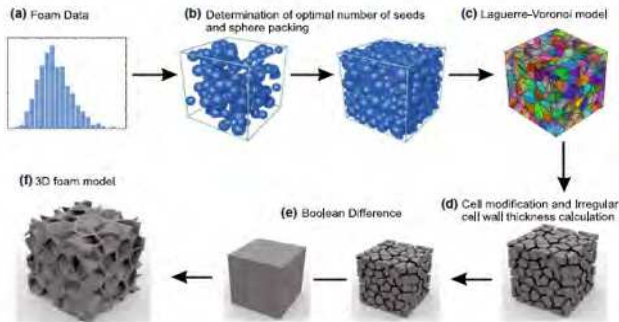


Figura 20: Desarrollo de la celda mediante algoritmos [33].

Para continuar con el desarrollo del modelo por medio del diagrama de particiones de Voronoi, se ha decidido utilizar Grasshopper el cual es un plug-in que corre dentro de la aplicación CAD Rhinoceros 3D. Este software utiliza un lenguaje de programación visual para el diseño de algoritmos generativos que permiten manipular y crear geometrías. Además, cuenta con un comando que se centra específicamente en el desarrollo de modelos Voronoi, tanto en 2D y 3D.

En una primera aproximación para obtener el modelo de la espuma en 2D dentro del software Rhinoceros, es necesario determinar los inputs del algoritmo a generar. Se ha tomado como entrada el tamaño de la muestra, la cantidad de poros y su aleatoriedad, de forma tal, que se pueda determinar el porcentaje de porosidad y por último se fija un rango dentro del cual tienen que estar dichos parámetros. Con las variables mencionadas se genera el algoritmo de Voronoi, a partir del cual se puede precisar el tamaño de los poros y el espesor de las paredes. Luego de dicho desarrollo, se ha propuesto analizar los límites del algoritmo desarrollado.

Considerando fijas las variables de entrada, si se modifica el porcentaje de porosidad podemos llegar a dos situaciones particulares (ver Figura 21). En el primer escenario se busca el menor porcentaje de porosidad, considerando la variabilidad de los poros, podemos observar que los granos de menor tamaño tienden a desaparecer, generando errores en el modelado. En el segundo caso al aumentar el porcentaje de porosidad, se produce un error en el modelo ya que los espesores tienden a desaparecer. Dado que el modelo

sobre el cual estaremos trabajando no se aproxima a los límites que presenta el algoritmo seguiremos con su desarrollo.

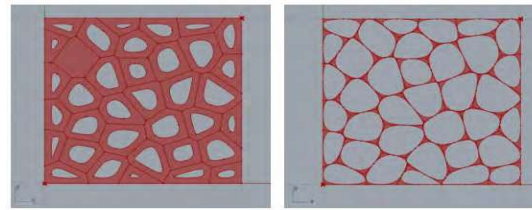


Figura 21: Simulación del algoritmo en 2D.

En la Figura 22 se puede observar la comparación entre el modelo generado y una espuma de baja densidad relativa. Para realizar la comparación se tuvo en cuenta el tamaño de la muestra, espesor de las paredes, la cantidad de poros y su tamaño. En la imagen se puede observar que el algoritmo no llega a captar totalmente la variabilidad propia de una espuma de baja densidad y que tiende a representarla de forma más homogénea.

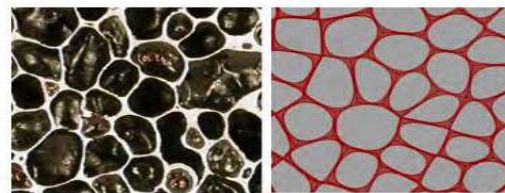


Figura 22: Comparación del modelo con una espuma de aluminio de baja densidad relativa.

En la Figura 23, el modelo planteado es modificado para que pueda adaptarse a la estructura de una espuma de mayor densidad, siendo posible cambiar sus características para que los poros sean más homogéneos, de menor tamaño y aumente el espesor de las paredes.

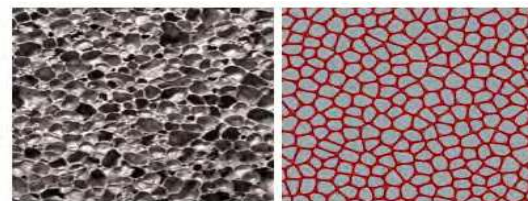


Figura 23: Comparación del modelo con una espuma de aluminio de baja densidad relativa.

Aunque el modelo capta la aleatoriedad intrínseca de las espumas, el algoritmo tiende a reproducir modelos homogéneos. Por ende, se concluye que no es capaz de generar espumas con densi-

dades relativas muy bajas. Es decir, las espumas modeladas presentan un menor rango de variación de los tamaños de poro.

Dado que, se ha tomado como hipótesis para este proyecto la finalidad de generar una espuma homogénea, se concluye que el algoritmo es capaz de desarrollar modelos que se aproximen a la estructura planteada.

Una vez obtenido el modelo en 2D, se ha procedido con el desarrollo de la espuma en 3D, siendo necesario determinar los inputs adicionales del algoritmo de Voronoi a generar. Se toman como entradas el tamaño de la muestra, la cantidad de poros y su aleatoriedad, fijando un rango dentro del cual tienen que estar dichos parámetros.

Al trabajar en 3D es necesario crear en paralelo otra geometría del mismo tamaño de la muestra y superponerla con el algoritmo para que se pueda hacer una diferencia de sólidos y así generar la espuma.

Por último, se refina el modelo para aportar una variación al espesor de las paredes, permitiendo que la geometría tenga una mejor aproximación a la estructura real de una espuma. En la Figura 24 se observa los pasos que va desarrollando el algoritmo y en la Figura 25 se encuentra el modelo 3D terminado.

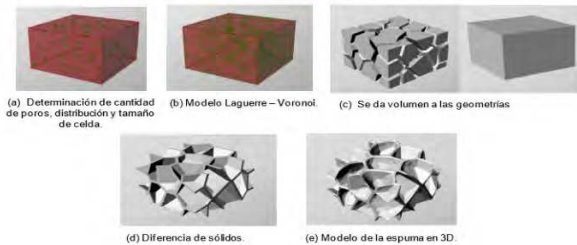


Figura 24: Desarrollo del algoritmo para el modelado de la espuma 3D en Rhinoceros.

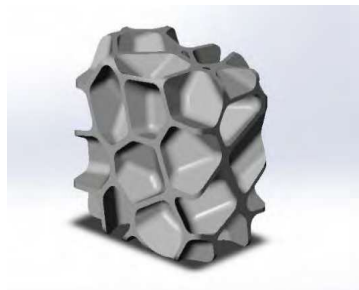


Figura 25: Modelo 3D de la espuma obtenida.

Simulación de espumas de Aluminio

Obtenido el modelo 3D más semejante, se ha proseguido con la simulación mediante el uso del

software Ansys Workbench para evaluar el comportamiento de las espumas metálicas.

Para la modelización, se consideró los materiales preseleccionados en [11], los cuales son las aleaciones de aluminio 2024, 5052 y 6061. A modo de presentación preliminar, se muestra en la tabla 1 las propiedades de la aleación AL 6061 recocido.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio 6061 en estado recocido [36],[37].

Propiedades	6061
Módulo de Young – E [MPa]	68900
Módulo de rigidez – G [MPa]	26000
Coefficiente de Poisson – ν	0,33
Densidad – ρ [kg/m ³]	2700
Límite elástico – $\sigma_{0,2}$ [MPa]	55
Tensión máxima – $\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	124
Deformación – ϵ [%]	25

+Inicialmente se simuló modelos de malla metálica en 2D (Figura 26).

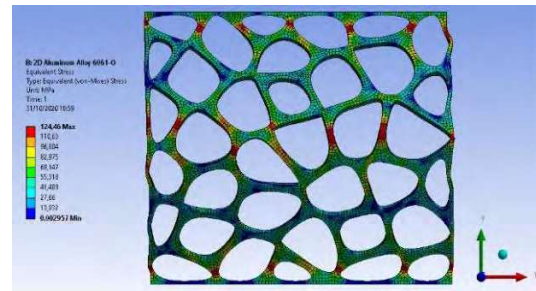


Figura 26: Tensiones locales equivalentes de Von Mises de la espuma de aleación 6061-O tras una compresión de 7mm.

De lo obtenido se observa que para que la simulación de una sección en 2D sea representativa debería definirse una tercera dimensión ampliamente mayor en magnitud. Si se opta por adoptar esta configuración, se pierde entonces la geometría porosa, pasando a ser una barra con distintos perfiles de orificios que la atraviesan en su longitud.

Por lo expuesto, una vez analizada la malla en 2D y descartada como representativa, se ha procedido al análisis en 3D. Con este fin, se ha importado el modelo 3D de la espuma, de 20mm de ancho, 20mm de alto y 13mm de profundidad (ver Figura 25). Se ha aplicado un desplazamiento en la dirección vertical hasta una deformación global del 14%, preestablecida arbitrariamente. Se han considerado condiciones de borde de continuidad.

En la figura 27 se observa la deformación total del cuerpo luego de la compresión aplicada (a), la distribución de las tensiones sufridas (b) y el error

estructural (c), con el cual se evidenciar un correcto mallado.

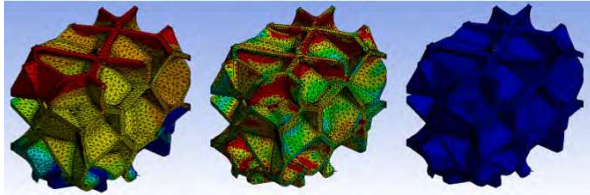


Figura 27: Resultados de la simulación a compresión de una espuma de aleación de aluminio 6061 -O: (a) deformación; (b) tensión equivalente; (c) error estructural.

Con los datos obtenidos se ha graficado la curva tensión-deformación de la espuma simulada bajo cargas de compresión. En la Figura 28 se observa la comparación entre la curva obtenida por la simulación y la curva de la espuma comercial obtenida por el método Alporas (Figura 11). En base a lo observado se verifica que los parámetros utilizados brindan resultados esperados. No obstante, los resultados obtenidos continúan siendo analizados, por lo que la curva obtenida es preliminar y cualitativa.

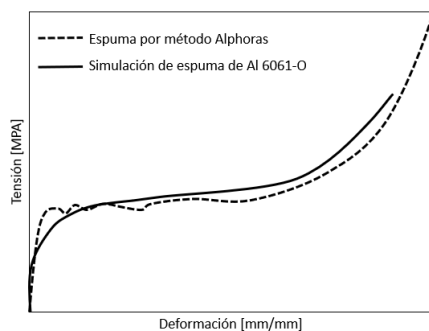


Figura 28: Curva tensión-deformación de una espuma de aleación de aluminio 6061-O con cantos suavizados.

[1] CONCLUSIONES

En relación al análisis de literatura disponible se concluye que los modelos de celda unitaria y los elementos tipo “Shell”, son más simples, pero presentan importantes limitaciones en cuanto a su representatividad. Por ende, se concluye que las mismas pueden dar lugar a interpretaciones erróneas sobre las prestaciones estructurales de las espumas.

En cuanto al algoritmo desarrollado, el mismo logra captar la aleatoriedad intrínseca de las espumas, pero tiende a reproducir modelos homogéneos, de forma tal, no es capaz de generar espumas con densidades relativas muy bajas. Parte del trabajo a futuro se ha planteado en optimizar dicho algoritmo con el fin de que sea más robusto.

En lo referente a las simulaciones llevadas a cabo, se ha podido verificar que el método de elementos finitos mediante un software es funcional a la resolución de espumas metálicas de aluminio sometidas a compresión. En este contexto, se ha demostrado que considerando como input la curva de tensión–deformación del material base y el modelo de espuma desarrollado, se obtiene una nueva curva con comportamiento similar a esta última.

Cabe destacar que este desarrollo aún está “on-going” y, por lo tanto, si bien la comparación realizada cualitativamente es prometedora, un análisis más profundo de los resultados obtenidos y su comparación con ensayos dedicados queda pendiente. Luego se procederá a recrear la sección de la estructura del aspa propuesta en este marco de investigación.

REFERENCIAS

- [2] Organización de las Naciones Unidas, Asamblea General. (2011). Energía Sostenible para todos. Disponible en: www.seforall.org
- [3] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Protocolo de Kioto. (2009). *Status of Ratification*. Japón.
- [4] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2015). *Acuerdo de Paris*. Paris, Francia.
- [5] Programa de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. EEUU.
- [6] Objetivos de Desarrollo Sostenible. (2015). *Energía Asequible, Segura, Sostenible y Moderna para todos*. Nueva York, EEUU.
- [7] Boletín Oficial de la República Argentina. (1998). *Ley N°25.019, Régimen Nacional de Energía Eólica y solar*. Bs. As., Argentina.
- [8] Iezz, Marcelo. (2017). *Desarrollo Sostenible: Energías Renovables en Argentina*. PwCArgentina. Argentina.
- [9] Fernández Munguía, Sergio; Noya, Carlos. (2018). *Cuando hablamos de energía eólica el tamaño importa*. Energía Eólica. Diario Renovables. España.
- [10] IEC61400-3. *Norma de requisitos mínimos de diseño para turbinas eólicas*.
- [11] Schubel, Peter J.; Crossley, Richard J. (2012). *Wind Turbine Blade Design*. Open Access Journal, Energies. Basilea, Suiza.
- [12] Cruz Villegas, Liz; Micone, Nahuel; Pelayo Marcelo. (2019). *Aplicabilidad de las espumas de Aluminio en palas eólicas*. Reporte de Investigación. EVC-CIN. Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
- [13] LBA INDUSTRIAL. (2019). *Tipo de aerogeneradores verticales y sus aplicaciones: energía limpia y Tecnología Inteligente*.
- [14] José Félix Funes Ruiz. (2009). *Análisis simplificado de la respuesta estructural de una pala de aerogenerador*. Proyecto de Fin de Carrera, Ingeniería Industrial,

- Tecnologías energéticas. Universidad de Madrid, España.
- [15] Villanueva S., Iván; Viniegra H., Fermín A.; Roman R., Carlos. (2010). *Análisis dinámico de palas de un aerogenerador en un túnel del viento*. Instituto Politécnico Nacional. México D.F.
- [16] J. F. Rodríguez, Buenestado. (2017). *Análisis y Diseño de un aerogenerador mediante simulación 3D de dinámica*. Universidad Carlos III de Madrid. España.
- [17] J.-F. Funes. (2009). *Análisis simplificado de la respuesta estructural de una pala de aerogenerador*. 91.
- [18] K. Singh; T. Thomas; V. Warudkar. (2013). *Structural design of a wind turbine blade: A review*. Int. J. Chem-Tech Res., vol. 5, no. 5, pp. 2443–2448.
- [19] Zvanik, M.; Hartman, D. (2004). *Wind Turbine Blade Trends and Issues*. SAND2008-24-25. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- [20] C. E. González; I. H. Arriaga; J. Guadalupe; R. Espino. (2017). *Criterios para el diseño de un banco de pruebas estructurales de aspas de turbinas eólicas de pequeña y mediana potencia*. pp. 180–187.
- [21] D. Giovanni Moraga Ramón. (2016). *Estudio técnico-económico de diseño y desarrollo de una pala de mini aerogenerador fabricada con material compuesto*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [22] Griffin, D.A. (2008). *Blade Design with Engineered Cores Materials*. SAND2008-12-14. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- [23] J. M. Jarillo. (2009). *Modelización del comportamiento mecánico de una espuma metálica*. Universidad Carlos III de Madrid. España.
- [24] I. A. Irausquín Castro. (2012). *Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía*. Universidad Carlos III de Madrid. España.
- [25] Cárcel González B. (2015). *Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenidas por fusión, aplicación en absorbentes de energía*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [26] J. A. Gutiérrez Vázquez; J. Oñoro. (2008). *Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones*. Vol. 44, no. 5, pp. 457–476.
- [27] P. J. Schubel; R. J. Crossley. (2012). *Wind turbine blade design*. Energies, vol. 5, no. 9. MDPI AG, pp. 3425–3449, doi: 10.3390/en5093425.
- [28] Gibson y Ashby. (1999). *Cellular Solids-Structure and Properties*.
- [29] Properties and Selection: *Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM HANDBOOK. Vol. 2. ASM International. The Materials Information Company.
- [30] T. Daxner. (2014). *Plasticity of Cellular Metals (Foams)*. In Plasticity of Pressure-Sensitive Materials, Berlín: Springer.
- [31] P. Prat. (2006). *Ecuaciones Constitutivas elasticidad y plasticidad*.
- [32] J. E. Ing. Marco Belfiore. *Apunte Completo de Resistencia de Materiales*. Ingeniería Civil -UTN BA. Bs. As., Argentina.
- [33] J. A. Gutiérrez Vázquez; J. Oñoro. (2010). *Fabricación y comportamiento de espumas de aluminio con diferente densidad a partir de un precursor AlSi12*. Rev. Metal., vol. 46, no. 3, pp. 274–284, doi: 10.3989/revmetal.0841.
- [34] H. S. Abdullahi; Y. Liang; S. Gao. (2019). *Predicting the elastic properties of closed-cell aluminum foams: a mesoscopic geometric modeling approach*. SN Appl. Sci., vol. 1, no. 4, doi: 10.1007/s42452-019-0382-y.
- [35] J. Bravo Castellero; R. Guinovart Díaz; G. López; R. Rodríguez; F. Sabina. (2013). *Acerca de la homogeneización y propiedades efectivas de la ecuación del calor*. Visión electrónica, no. 1, pp. 149–159, doi: 10.14483/22484728.4393.
- [36] C. Expósito Rodríguez. (2011). *Generalizaciones de los diagramas de Voronoi*.
- [37] V. Drossou-Agakidou et al. (1998). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM HANDBOOK Vol 2. vol. 157, no. 7.
- [38] *Atlas of Stress-strain Curves*. (2002).
- [39] *Aviation Online Magazine*. Laminated structures.