

Introducción al uso de espumas de aluminio para la fabricación de aspas de generadores eólicos

Liz Cruz Villegas, Dr. Marcelo Pelayo y Dr. Nahuel Micone,
Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Buenos Aires
cruzvillegasliz@gmail.com, nahuelmicone@yahoo.com.ar, marcelo_pelayo@yahoo.com.ar

Resumen– Durante la última década el tópico “energías renovables” ha sido de gran interés a nivel internacional. Fomentada por el tratado internacional de París, la industria de generación de energía eólica ha crecido exponencialmente, como así también lo ha hecho el tamaño de los aerogeneradores conforme a la mayor demanda de energía eléctrica surgida durante este periodo.

Al presente, tanto geometría como reglas generales de diseño de dichas estructuras han sido investigadas. Sin embargo, un tema pendiente de desarrollo es la utilización de materiales más resistentes y livianos en la fabricación de partes de aerogeneradores. Esto podría ayudar a mantener la tendencia alcista en lo que respecta al tamaño de los mismos (y su potencia instalada).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la posible aplicación de las espumas de aluminio en la fabricación de aspas de aerogeneradores, tomando como referencia a los materiales utilizados tradicionalmente y las principales características requeridas para satisfacer el diseño de dichos elementos.

En base a lo anterior y a un estudio de literatura, una serie de aleaciones de aluminio y métodos de producción de espumas metálicas son presentados.

Finalmente, se identifica y evalúa críticamente las alternativas técnicamente más viables a fin de satisfacer el objetivo antes mencionado.

Palabras claves -Espumas de Aluminio, Paletas, Generadores Eólicos.

I. 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 [2-3], El acuerdo de París [4] y los Objetivos de Desarrollo Sostenible [5] 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” [6].

A raíz de lo expuesto, las energías renovables son uno de los tópicos con mayor desarrollo y evolución en el país [7-8]. 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 [9]. Estos factores de capacidad contribuyen a obtener una gran disponibilidad y rentabilidad de los parques eólicos.

Los aerogeneradores, acompañando la creciente demanda energética, han aumentado de tamaño, pasando límites que no eran siquiera considerados unas décadas atrás [10]. Esto ha implicado la generación de códigos que establezcan criterios uniformes en el diseño y la fabricación de dichos componentes [11-12], lo que ha conllevado a la investigación de este tópico a fin de optimizar los principales criterios establecidos [13].

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 de este 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.

Las espumas de aluminio son materiales cuyas propiedades físicas y mecánicas y su capacidad de reciclado son acordes con los parámetros requeridos para un eficiente diseño de las palas.

II. INTRODUCCIÓN AL FUNCIONAMIENTO DE LOS AEROGENERADORES

Las turbinas eólicas o aerogeneradores 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 (ver Fig. 1) y de eje vertical (ver Fig. 2) [14].



Fig. 1 – Aerogenerador de eje vertical: Tipo Giromill. Fuente: LBA INDUSTRIAL.



Fig. 2 – Aerogenerador de eje horizontal: Tipo Tripala.
Fuente: LBA Industrial.

En ambos casos el principio de funcionamiento es similar y se resume como: el aerogenerador es actuado por la rotación de un eje (ver Fig. 3) que gira por la acción del viento sobre las palas, es decir, que la energía cinética del aire en movimiento proporciona energía mecánica que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, convirtiéndola en energía eléctrica [15].



Fig. 3 – Funcionamiento de un generador de eje horizontal.

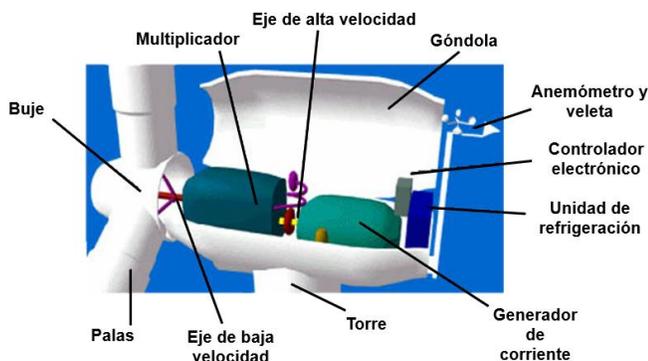


Fig. 4 – Góndola del generador eólico.
Fuente: Diseño de Aerogeneradores. ETSII Máquinas Hidráulicas

Tal lo expuesto anteriormente, las palas son un componente vital que inclusive guarda relación con la eficiencia de estos equipos [36]. Por ello, a continuación, se brinda una breve descripción de su forma constructiva.

II.1 Generalidades de palas

Las palas son los elementos del aerogenerador encargados de captar la energía cinética del viento y transformarla en un movimiento rotativo. Debido a su tamaño, es uno de los componentes más críticos de la máquina, ya que, palas de mayor longitud permiten un mejor aprovechamiento de la energía [16-17]. Adicionalmente, son críticos en cuanto a costes y complejidad de diseño [18].

Las palas generalmente están construidas de la siguiente manera: una estructura central resistente (viga) más dos cubiertas exteriores (o conchas) que forman el perfil aerodinámico, de forma alabeada y ancho decreciente hacia la punta en dirección axial (ver Fig. 5).

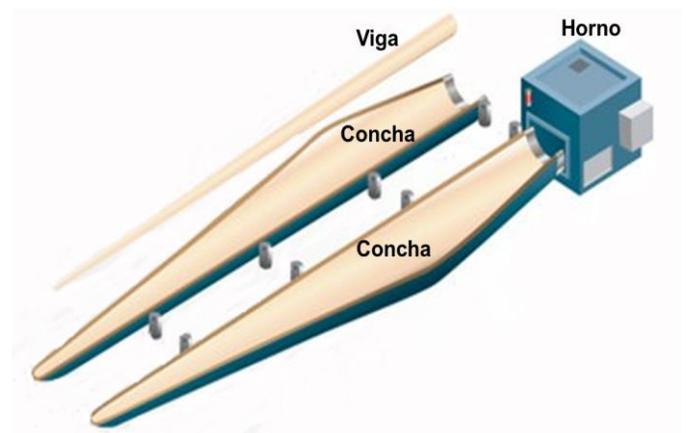


Fig. 5 – Estructura central y cubiertas externas de una pala eólica. Fuente: Iberdrola

Los requisitos que debe cumplir la pala para un eficiente diseño estructural son [19]:

- i. Resistencia estructural adecuada a las condiciones de trabajo a las que será sometida.
- ii. Resistencia a fatiga de alto número de ciclos (en particular a tensiones alternas debidas a vibraciones).
- iii. Bajo peso para reducir la carga en la torre y el efecto de fuerzas gravitatorias.
- iv. Suficiente rigidez como para garantizar la estabilidad de la forma y orientación aerodinámica optima de la pala durante su vida útil.
- v. Facilidad de fabricación.
- vi. Alta resistencia a agentes medioambientales (erosión, corrosión).

En su fabricación, los materiales más empleados son [20-21]:

1. **Aleaciones de acero y de aluminio.** Las mismas tienden a ser pesadas y por ellos su uso está restringido a aerogeneradores muy pequeños.

2. **Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster**, para la mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores.
3. **Fibra de vidrio reforzada con resina epoxi**, en forma de láminas pre impregnadas. Estas son palas ligeras, con mayor flexibilidad, menor deformación bajo temperaturas extremas y -excelente resistencia a la absorción de agua.
4. **Fibra de carbono o aramidás** (Kevlar 29 o Kevlar 49) como material de refuerzo en tiras. Las mismas poseen alta resistencia específica y bajo peso específico. Normalmente estas palas son antieconómicas para grandes aerogeneradores.
5. **Mixtos fibra de vidrio - fibra de carbono.**
6. **Materiales compuestos (composites)** de madera, madera-epoxi, o madera-fibra-epoxi. Los mismos aún no han penetrado en el mercado de las palas, aunque existe un desarrollo continuado en esa área.

La siguiente tabla resume las principales características de los materiales antes mencionados:

Tabla 1 – Principales características de los materiales empleados actualmente en las palas de aerogeneradores.

Tipo de materiales	Características			
	Peso específico ρ	Limite elástico σ_y	Resistencia a la fatiga $\times 10^8$ ciclos $\pm \sigma_A$	Módulo de elasticidad E [GPa]
Aleaciones de aluminio	2,7 g/cm ³	480 MPa	40 MPa	70 GPa
Aleaciones de acero	7.85 g/cm ³	520 MPa	60 MPa	210 GPa
Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster	1.8 g/cm ³	400 MPa	55 MPa	15 GPa
Fibra de vidrio reforzada con resina epoxi	1.7 g/cm ³	400 MPa	57 MPa	15 GPa
Fibra de carbono o aramidás	1.4 g/cm ³	550 MPa	58 MPa	44 GPa
Materiales compuestos de madera	0.58 g/cm ³	75 MPa	35 MPa	11 GPa

Basándonos en los datos detallados en esta tabla, los beneficios del uso de fibra de carbono se hacen evidentes. Con un bajo peso específico y alta resistencia mecánica, este material lidera dicha lista. También debe destacarse las

cualidades asociadas a las fibras reforzadas. Claro está que en ambos casos se posee una menor rigidez en comparación con los metales mencionados.

Con respecto a la resistencia a la fatiga, podemos observar que tanto el aluminio como los materiales compuestos poseen una menor resistencia relativa. Sin embargo, cabe destacar que debido al gran número de aspectos a considerar para evaluar correctamente dicho parámetro (forma de onda, R-ratio, etc.), este trabajo se limitará a ponderar este factor únicamente a título informativo.

III. INTRODUCCIÓN A LAS ESPUMAS DE ALUMINIO

Las espumas de aluminio son consideradas materiales metálicos relativamente isotrópico muy poroso con una distribución aleatoria de los poros dentro de su estructura. Los poros, esencialmente esféricos y cerrados, ocupan del 50 al 90% del volumen total. Las propiedades mecánicas y físicas dependen fuertemente de la densidad, típicamente, en el rango de 0,4 a 0,8 gr/cm³ [24].

Las espumas se dividen en dos tipos de estructuras: de **poros cerrados**, que comúnmente se usa en aplicaciones estructurales, y de **poros abiertos**, que es utilizada por sus propiedades específicas (térmicas, superficiales, etc.). Las espumas de aluminio de poros cerrados (Fig. 6) se caracterizan por tener una gran rigidez. Pueden obtenerse por inyección directa de gases al metal fundido o mediante el uso de un agente espumante o un precursor espumable con el material en el intervalo sólido-líquido. Este tipo de estructuras se pueden fabricar partiendo del estado líquido, pulvimetalurgia, deposición química, etc. [25].

Las espumas de aluminio de poros abiertos poseen particulares propiedades térmicas y por ello son utilizadas para la disipación de calor. Adicionalmente son empleadas en filtros y catalizadores (Fig. 7). A diferencia de las espumas de poro cerrado, la fabricación de espumas de poro abierto está principalmente basada en la utilización de materiales de relleno que luego son eliminados.

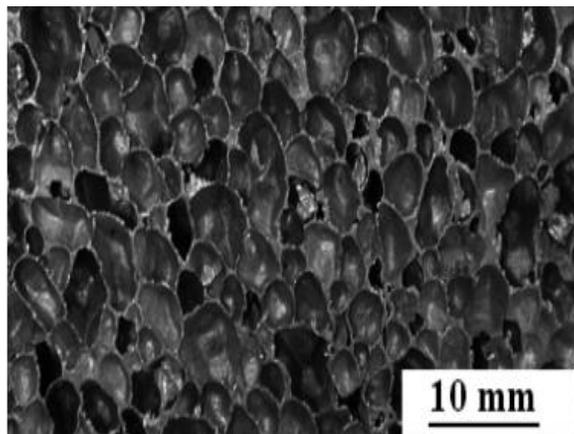


Fig. 6 – Espuma de Aluminio de poro cerrado. Fuente: Revista de metalurgia. [25]

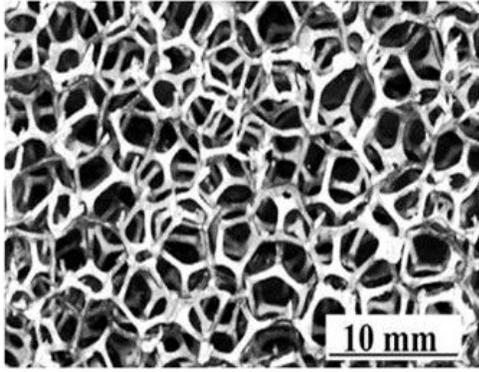


Fig. 7 – Espuma de Aluminio de poro abierto.
Fuente: Revista de metalurgia. [25]

Por lo antes expuesto, el enfoque de este trabajo se centra en estructuras de poro cerrado. Para un mejor entendimiento de las alternativas detalladas más adelante, los principales procesos de fabricación de espumas metálicas son esquemáticamente presentados a continuación.

III.1 El aluminio como candidato estructural

El aluminio es un material metálico de baja densidad (2,7 gr/ml), elevada conductividad térmica, de gran ductilidad a temperatura ambiente y tiene una baja temperatura de fusión (660°C) [26].

En términos generales, las aleaciones de aluminio son ligeras, resistentes, y poseen buena maquinabilidad para muchos procesos; son fáciles de ensamblar, fundir o maquinar y aceptan gran variedad de acabados. Por sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas, el aluminio se ha convertido en el metal no ferroso de mayor uso [27].

Los principales elementos de aleación son el cobre, el magnesio, el silicio, y el zinc [28], donde para cada tipo de aleante corresponde una serie determinada. Algunos ejemplos son: Serie 2000 (aleación de Cobre), Serie 5000 (Aleación de Magnesio) y la Serie 6000 (Aleación de Silicio y Magnesio). Estas son las alternativas preseleccionadas para su utilización en la fabricación de aspas metálicas, ya que las 3 poseen buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. Respecto a la resistencia a la tracción, las serie 5000 representa mayores valores que las otras.

III.11 Potenciales aleaciones de aluminio

La siguiente tabla muestra las aleaciones de aluminio más comercializadas (dentro de las series definidas). De la misma se deduce que aquellas con propiedades acordes a las necesarias para la fabricación de espumas de aluminio son los de la serie 5052. Principalmente debido su elevada resistencia a la tracción, elevada resistencia a la fatiga y baja densidad respecto a las otras dos aleaciones.

Tabla 2 – Cuadro comparativo de propiedades mecánicas de los aluminios más comercializados [29].

Propiedades mecánicas \ Serie de aleaciones	2024	5052	6061
ASTM	A92024	A95053	A96061
Densidad	2,76 g/cm ³	2,68 g/cm ³	2,71 g/cm ³
Límite Elástico a la tracción (Convencional 0.2%)	75-394 MPa	89-250 MPa	55-275 MPa
Resistencia máxima a la tracción	186-496 MPa	193- 290 MPa	124-310 MPa
Resistencia a la Fatiga a 5x10 ⁸ Ciclos	89-125 MPa	110-138 MPa	62-97 MPa
Módulo de elasticidad E [GPa]	73 GPa	70 GPa	68 GPa
Dureza Brinell	47-130 HB	47-77 HB	30-95 HB

Observando la tabla 2, se confirma que la aleación de aluminio más apta para la fabricación de aspas de aerogeneradores es la 5052, teniendo en cuenta la relación densidad y propiedades mecánicas. Sin embargo, la más usual para la fabricación de espumas de aluminio en general es la 6061.

III.111 Procesos de obtención de espumas de aluminio

i. Proceso Hydro/Alcan

Las espumas Alcan, de poro cerrado, son producidas en estado líquido (ver Fig. 8). En este caso, se inyecta un gas al interior de la aleación de aluminio fundido, mezclado con partículas cerámicas utilizadas para estabilizar la espuma (normalmente SiC o Al₂O₃).

Normalmente, la fracción volumétrica de estas partículas cerámicas esta entre el 5% y 15%. El tamaño de poro de las espumas producidas bajo este proceso oscila entre los 3 y 30 mm [23-24]. En términos generales podemos mencionar que es un proceso económico y de producción continua. Sin embargo, presenta dificultad para la dispersión de gas y el tamaño de los poros, ya que pueden ser de grandes dimensiones ocasionando una disminución de sus propiedades mecánicas. Además, requiere de la adición de partículas cerámicas que limitan los tipos de aleaciones a ser producidas y solo planchas de espuma pueden ser fabricadas [25].

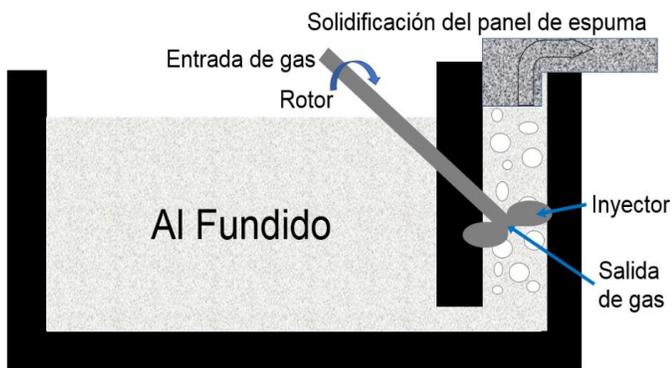


Fig. 8 – Fabricación de espumas de aluminio por método Alcan.

ii. Proceso Aporas

Las espumas Alporas, de poro cerrado, son producidas bajo un proceso en estado líquido (ver Fig. 9), el cual consiste en añadir calcio en polvo desde 0.2 % hasta 8% e hidruro de titanio en polvo entre 1 % y 3% (porcentaje en peso del aluminio fundido) en una cámara que permanece a presión constante. El calcio ayuda a incrementar la viscosidad de la fundición, mientras que el hidruro de titanio provee el hidrógeno gaseoso, el cual causa que la fundición se expanda como una espuma. Este proceso es capaz de producir espumas con tamaños de poro entre 2 y 10 mm [23,24-25]. En términos generales podemos mencionar que la espuma obtenida presenta un tamaño celular uniforme, con poros más pequeños y más homogéneos que las espumas Alcan. Debido a los aditivos utilizados es un método costoso y su geometría se encuentra limitado por el recipiente expansor [25].

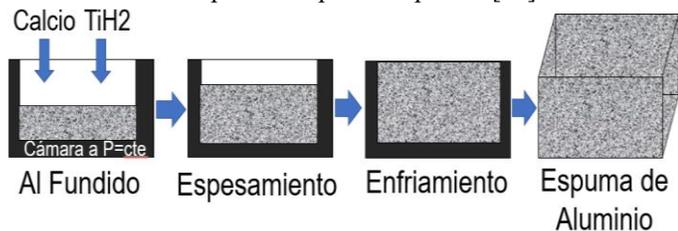


Fig. 9 – Fabricación de espumas de aluminio por método Aporas.

iii. Proceso Formgrip

Este proceso consta de dos etapas. En la primera, los polvos de hidruro de titanio pre-tratado se mezclan con polvos de Al-12Si. El mencionado pre-tratamiento consiste de una secuencia de oxidación, cuyo fin es (una vez agregado al baño líquido) generar una capa de dióxido de titanio en la superficie que funcione como barrera para inhibir la difusión de hidrogeno. La mezcla de polvos se dispersa en un compuesto fundido de Al-9Si/SiC (Duralcan) mientras este se enfría gradualmente, mediante agitación. Las partículas de SiC adicionadas previamente al Al-9Si, incrementan la viscosidad del compuesto, para lograr estabilidad de la estructura celular. La cantidad de agente espumante incorporado es de 1.5 % en peso de la masa del compuesto. Este procedimiento produce materiales precursores, teniendo porosidades (P) relativamente

bajas, por ejemplo, entre $10\% < P < 23\%$ en volumen de SiC [33].

En un segundo paso, el precursor se coloca en un molde (de cualquier forma) y se calienta a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de fusión de la aleación de aluminio (típicamente a 680 °C). El hidruro de titanio se descompone, emite hidrógeno y forma una espuma que expande el precursor hasta llenar el molde.

Ajustando el tiempo de producción, se pueden obtener espumas con porosidades entre 50 y 95 %, con tamaños de poro entre 1 y 10 mm y piel exterior sólida.

En términos generales podemos mencionar que las espumas producidas presentan una estructura homogénea y controlada, permitiendo fabricarse piezas con geometrías variadas debido a que el precursor puede calentarse dentro de cualquier molde complejo para producir dimensiones exactas. La principal restricción es la económica dado que los materiales utilizados (especialmente las partículas cerámicas o de SiC), para reforzar la viscosidad son costosos [33].

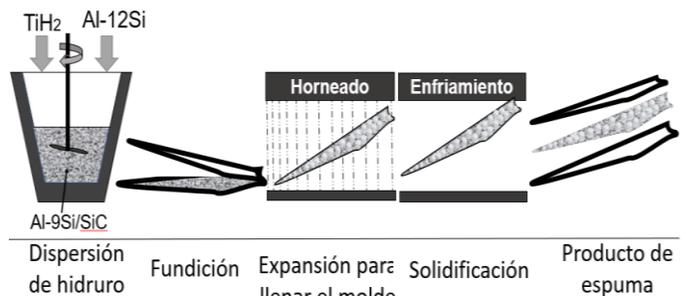


Fig. 10 – Fabricación de espumas de aluminio por método Formgrip.

iv. Precursor espumable producido por técnicas de pulvimetalurgia

Este método es utilizado por Foaminal [34] y Alulight International [35] para producir espumas de aluminio con porosidades de entre 63 y 89 % y tamaños de poros del orden de los 3 milímetros. La técnica también se ha utilizado para producir espumas de acero, y estructuras tipo sándwich y perfiles espumadas en un solo paso. El proceso consiste en producir un precursor ‘espumable’ resultado de mezclar partículas metálicas con un agente espumante y un elemento reforzante para aumentar la viscosidad del metal fundido [36].

En primer lugar, se comprime los polvos en un bloque sólido para que cuando tenga lugar el espumado, el gas no escape del material, el cual se logra por medio de una extrusión en frío. La fricción entre las partículas durante la extrusión destruye las capas de óxido y las une. Alternativamente, la mezcla de polvo puede estar compactada en caliente a una temperatura por debajo de la que provoca la descomposición del agente espumante. En un paso siguiente, el precursor se funde dentro de un molde y se calienta a la temperatura de descomposición del agente espumante. La estructura celular de la espuma producida con estos precursores es estrechamente dependiente de la temperatura, la presión, el tiempo de cocción y la aleación usada.

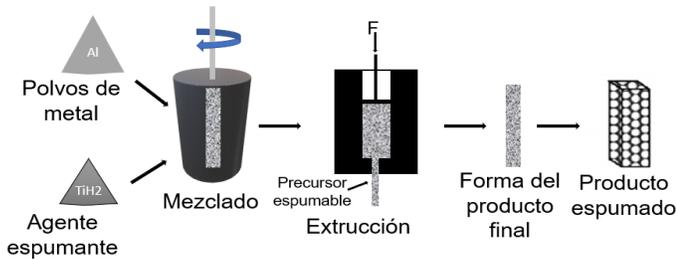


Fig. 11 – Fabricación de espumas de aluminio por métodos de Pulvimetalurgia.

v. Proceso Foamcarp

El proceso FOAMCARP, desarrollado por V. Gergely [37], tiene la capacidad de generar espumas de poro cerrado con celdas finas (diámetro < 1 mm) y una estructura de celdas uniforme. Adicionalmente ofrece valores de porosidad en las espumas que van desde el 77 al 86 %, usando carbonato de calcio como agente espumante.

El proceso se basa en fundir el metal llevándolo a una temperatura aproximada de 650 °C. Después, una mezcla de polvos de agente espumante y Al-12Si se introduce en el metal fundido y se agita. Cuando la agitación termina, el compuesto semisólido se vacía en un molde que se encuentra a temperatura ambiente. La cantidad de carbonato a introducir es aproximadamente de 3.5 % de la masa total del compuesto [33]. En una última etapa, el molde con el precursor se introduce en un horno, el cual esta precalentado a una temperatura más alta que la temperatura de descomposición del agente espumante (650°). El calentamiento provoca la descomposición del agente espumante y el gas liberado (CO2) provoca que el metal fundido se espume. Finalmente, después de un periodo específico, el molde con el material espumado se extrae y se enfría en aire [37].

En términos generales el proceso es relativamente costoso, debido a la necesidad de producir, mezclar y manejar polvos de metales finos.



Fig. 12 – Fabricación de espumas de aluminio por método Foamcarp

IV. ANÁLISIS CRÍTICO Y COMPARATIVO

De lo descrito en secciones anteriores, las características más importantes que deben poseer las aspas son: bajo peso y alta resistencia. Con respecto al primero, el largo de las aspas va de 35 a 80 metros teniendo pesos de entre 5 y 35 toneladas respectivamente (considerando materiales compuestos) [38].

Con respecto a su resistencia mecánica, las aspas son sometidas a tensiones máximas de por ejemplo 90 MPa [39]. Claro está que con paredes más gruesas dichas tensiones se reducirán, pero a expensas de aumentar el peso de dicho componente.

Un tema aún no expuesto es la falta de capacidad de reciclado de los materiales convencionalmente utilizados. Si pensamos en una vida útil de 30 años, en cuestión de años tendremos una gran cantidad de aspas que han salido de servicio y que no son reutilizables. Esto ratifica la necesidad de encontrar materiales alternativos a esta aplicación.

Las espumas de aluminio poseen baja densidad permitiendo estructuras ultraligeras con elevada resistencia y rigidez relativa. Adicionalmente estas pueden ser recicladas.

A modo de referencia, la siguiente tabla muestra las principales propiedades de las espumas obtenidos por los métodos previamente descriptos.

Tabla 3 – Cuadro comparativo entre los diferentes métodos de obtención de espumas de aluminio (poro cerrado) [25-34 y 37]

Proceso	Tamaño de poros	Valor de porosidad	Peso específico	Límite elástico σ_y	Módulo de elasticidad E
Hydro/Alcan	3-30 mm	80-98 %	0.07–0.56 g/cm ³	0.04–7.0 MPa	0.002 – 2 GPa
Alporas	2-10 mm	84-95 %	0.2–0.25 g/cm ³	1.5–1.8 MPa	0.4 – 1 GPa
Formgrip	1-10 mm	50-95 %	0.1-0.23 g/cm ³	1.6–2.0 MPa	0.45 – 1.5 GPa
Técnicas de Pulvimetalurgia	3 mm	63-89 %	0.3–1.0 g/cm ³	2.0-20 MPa	1.7 – 12 GPa
Foamcap	<1 mm	77-86 %	0.5–1.2 g/cm ³	2.1-2.3 MPa	1.8 – 12 GPa

Debido a la relación presente entre el radio de giro de las hélices y la potencia generada, el tamaño de las paletas es un factor crítico para aumentar su eficiencia. De manera tal, el tamaño de las mismas es directamente proporcionales a su peso.

Observando la tabla 3 podemos destacar la baja densidad de las espumas de aluminio. Si bien varían en función del proceso utilizado, aun así, son hasta 8 veces inferior a la densidad de algunos de los actuales materiales utilizados para la fabricación de las palas eólicas con excepción de los materiales compuestos que en la actualidad son utilizados para generadores eólicos de baja potencia, por ejemplo 100 W - 150W (ver Tabla 1),

En particular, los procesos Foamcarp y Pulvimetalurgia poseen las más altas propiedades mecánicas (hasta 20

N/mm²). Claramente dicha magnitud es menor que el valor reportado en la tabla 1 para materiales compuestos con fibra de vidrio. Es necesario aclarar que debido a la reducción de peso producto de utilizar espumas metálicas, las tensiones a las que serán sometidas estas palas se reducirían sensiblemente y por ende la resistencia reportada podría ser suficiente. De no serlo, aleaciones desarrolladas para esta aplicación en particular serían necesarias, potencialmente utilizando sistemas híbridos con espumas metálicas y materiales compuestos.

Otro punto que vale destacar es que de entre todos estos procesos, el más flexible desde el punto de vista técnico es el Formgrip. Esto se debe a que presenta una gran cantidad de posibles combinaciones entre tamaño de poro y porosidad. Además, presenta una distribución homogénea de celdas lo que conllevaría a pensar en que se puede disminuir el grado de anisotropía.

V. CONCLUSIONES

De este análisis de literatura se concluye que:

- Las dimensiones de las palas son un aspecto crítico en generadores de alta potencia. A mayor potencia, mayor tamaño requerido y mayor peso involucrado.
- Debido a su bajo peso específico y capacidad de reciclado, las espumas de aluminio son materiales con potenciales beneficios para la producción de palas de generadores eólicos.
- Las posibles variantes de propiedades de la espuma de aluminio serie 5000/6000 son ideales para encontrar el punto de equilibrio entre la densidad y las características mecánicas que requieren las aspas eólicas de grandes dimensiones (>80m).

Tras un análisis cuantitativo de las propiedades las espumas reportadas en literatura, el proceso que ofrece el producto con mayor flexibilidad es el Formgrip. Sin embargo, las que proveen mayor resistencia mecánica son las obtenidas por técnica de pulvimetalurgia y por el proceso foamcarp.

Más allá de los beneficios expresados en términos de reducción de peso, se hace evidente que la resistencia mecánica ofrecida por las espumas metálicas evaluadas es menor que la de los materiales utilizados actualmente. Por lo tanto, se concluye que un estudio dedicado es necesario para evaluar técnica y prácticamente la forma de aumentar dicho valor sin influenciar seriamente la reducción de peso propuesto como uno de los principales beneficios de utilizar espumas de aluminio para la fabricación de palas de aerogeneradores.

Para afirmar la hipótesis planteada, es necesario ensayos y pruebas sobre las espumas de aluminio seleccionadas, las cuales se sugieren ser obtenidas mediante el proceso Formgrip.

Cabe mencionar que el trabajo actual del grupo de investigación está enfocado en continuar esta investigación, no limitándose únicamente a aspectos prácticos sino también abarcando análisis por elementos finitos de espumas metálicas.

REFERENCIAS

- [1] Organización de las Naciones Unidas, Asamblea General, *Energía Sostenible para todos*. (2011). Disponible en: www.seforall.org.
- [2] Organización de las Naciones Unidas, Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (11 de diciembre 1997). Kioto, Japón.
- [3] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Protocolo de Kioto. *Status of Ratification*. (14 de enero de 2009). Kioto, Japón.
- [4] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, *Acuerdo de París*. (12 de diciembre del 2015). París, Francia.
- [5] Programa de las Naciones Unidas, *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. (25 de septiembre de 2015). Nueva York, EEUU.
- [6] Objetivos de Desarrollo Sostenible, *Energía Asequible, Segura, Sostenible y Moderna para todos*. (25 de septiembre de 2015). Nueva York, EEUU.
- [7] Ley N°25.019, *Régimen Nacional de Energía Eólica y solar*. Boletín Oficial de la República Argentina. (23 de septiembre de 1998) Buenos Aires, Argentina.
- [8] *Objetivos de Gobierno*. Casa Rosada, Presidencia de la Nación. (diciembre del 2015). Buenos Aires, Argentina.
- [9] Izzi Marcelo, Desarrollo Sostenible: Energías Renovables en Argentina, PwcArgentina. (2017). Argentina.
- [10] Fernández Munguía, Sergio y Noya Carlos. *Cuando hablamos de energía eólica el tamaño importa*, Energía Eólica, Diario Renovables. (2018). España.
- [11] Standard det Norske VERITAS, Design and Manufacture of wind turbine blades, offshore and onshore wind turbines.
- [12] IEC61400-3. Norma de requisitos mínimos de diseño para turbinas eólicas.
- [13] Schubel, Peter J.; Crossley, Richard J. (2012). Wind Turbine Blade Design. Open Access Journal, Energies. Basilea, Suiza.
- [14] Hau, E. (2006). Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd ed.; Springer: Berlin, Germany.
- [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. Mexico D.F.
- [16] Glauert H. (1937). *The elements of Aerofoil and Airscrew Theory*. Cambridge University Press.
- [17] Hütter U., The Aerodynamic Layout of Wing Blades of Wind Turbines with High Tip-speed Ratio, Proc. U. N. Conf. New Sources of Energy, Roma 7.
- [18] Bastianon, Ricardo A. (2008). Calculo y diseño de la hélice óptima para Turbinas eólicas. Academia.edu.
- [19] Hedenberg, P. and Gatenholm, P. 1995. Conversion of plastic/cellulose waste into composites. J. Appl. Polym. Sci. 56:641- 651.
- [20] Ya-Jung, Lee; Yu-TiJhana; Cheng-Hsien, Chungb. (2012). *Fluid-structure interaction of FRP wind turbine blades under aerodynamic effect*. Composites, ScienceDirect.
- [21] OpexEnergy - Empresas del Grupo de Desarrollo y Gestión (DEENMA), dedicada a la operación y mantenimiento de plantas industriales.
- [22] Elwin L. Rooy. (1992). *Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys*. Volume 2 Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose materials. ASM International, The materials Information Company.
- [23] Funes Ruiz, Jose F. (2009). Análisis simplificado de la respuesta estructural de una pala de aerogenerador. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España.
- [24] Santalla Blanco, Luis. (2012). Espuma de Aluminio. Construcción, teoría y aplicación: materiales, normativa de edificación, sistemas constructivos. Teoría de construcción.
- [25] Gutiérrez-Vázquez, J.A. y Oñoro, J. (2008). *Espumas de aluminio: fabricación, propiedades y aplicaciones*. Revista de Metalurgia. 44(5):457-476.
- [26] E. Andrews, W. Sanders, and L. J. Gibson. (1999) *Compressive and tensile behaviour of aluminum foams*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 270, No. 2, 113–124.
- [27] A. E. Simone and L. J. Gibson. (1998). *Aluminum foams produced by liquid-state processes*. Acta Materiales, Vol. 46, No. 9, pp. 3109–3123.
- [28] Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S. y Kitahar, A. (2000). *ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications*. Advanced Engineering Materials. 2(4):179-183.

- [29] Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM HANDBOOK. Vol. 2. ASM International, The Materials Information Company.
- [30] Propiedades químicas del Aluminio - Efectos del Aluminio sobre la salud-Efectos ambientales del Aluminio. Lenntech. Los países Bajos. www.lenntech.es
- [31] Zamora Rojas, Ricardo (2013). Aleaciones de Aluminio. RZR Factory.
- [32] Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio forjado. Propiedades de materiales. Ingemeccánica. Ingeniería, consultoría y formación.
- [33] Gergely, V. y Clyne, B. (2000). *The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors*. Advanced Engineering Materials. 2(4):175-178.
- [34] Fraunhofer IFAM, Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials Shaping and Functional Materials. (2001). Bremen, Alemania.
- [35] Alulight GmbH, Empresas de espumas metálicas y sus materiales precursores. Lach, Alemania.
- [36] P. Fernández, L. J. Cruz, J. Coletto. (2009) *Procesos de fabricación de metales celulares*. Parte I: Procesos por vía líquida", Revista de Metalurgia, Vol. 44, No. 6.
- [37] Gergely, V., Curran, D.C., Clyne, T.W. (2003). The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors. Composites Science and Technology. 63(16):2301–2310.
- [38] Mølholt F.; Ensen J.; Bladena, Denmark; Branner K. (2013). *Introduction to wind turbine blade design*. Technical University of Denmark. Denmark.
- [39] Fernandez, Garbiñe; Usabiaga, Hodei; Vandepitte, Dirk. (2017). *An efficient procedure for the calculation of the stress distribution in a wind turbine Blades under aerodynamic loads*. Journal of Wind Engineering e Industrial Aerodynamics.
- [40] Irausquín Castro, Ignacio A; Pérez castellanos, José Luis. (2012). *Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III DE Madrid. Madrid, España.
- [41] Rubio, Manuel; Aitor, Martin; Reneses, Avaro; Barrio, Agustín; Durán, Alfonso; Urquijo, Emilio. Diseño de Aerogeneradores. ETSII. Máquinas Hidráulicas.
- [42] *Tipo de aerogeneradores verticales y sus aplicaciones*. Energía limpia y Tecnología Inteligente. LBA INDUSTRIAL 2019.
- [43] Asociación danesa de la industria eólica. (2003). *Generadores, tamaño de turbinas*. Danish wind industry association. Dinamarca.