

PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

RESULTADOS DEL PROYECTO:

Desarrollo de un proceso experimental de elaboración de espumas metálicas para su aplicación mediante tecnologías avanzadas

REFERENCIA Nº: IDI/2016/000286

Entidad beneficiaria:



Fecha inicio: 01/09/2016

Fecha fin: 31/08/2017

1. INTRODUCCIÓN

Las espumas metálicas base aluminio son las más demandadas actualmente en el mercado debido a la excelente combinación de propiedades físicas y mecánicas, tales como alta rigidez conjuntamente con un peso específico muy bajo. Debido a esto se empleó una aleación de aluminio como material base para las espumas metálicas elaboradas en el ámbito del presente proyecto.

El método empleado es el RP-infiltración. Este método consiste en un molde-reactor en el que se introduce un agente de relleno, como sal común, y la aleación de aluminio seleccionada (EN AW 6061). Se cierra el molde-reactor y se introduce en un horno eléctrico. El molde-reactor va conectado a una bomba de vacío y a una corriente de nitrógeno. Se fija la temperatura de la prueba por debajo de la temperatura de fusión del NaCl (801 °C) y superior o igual a la temperatura de fusión del aluminio (660 °C). Se mantiene el horno a esta temperatura durante aproximadamente dos horas con el molde en su interior y en condiciones de vacío. Una vez pasado el tiempo, se hace una sobrepresión con el objetivo de que el aluminio fundido se infiltre por la sal común, obteniendo como resultado una preforma. Para eliminar la sal común se realiza un proceso de disolución, eliminándose la sal de los intersticios y obteniéndose la espuma final.

En este proyecto se diseñó la marcha metalúrgica adecuada para elaborar una espuma metálica con buenas propiedades. Para ello se elaboraron diferentes espumas metálicas base aluminio y se llevó a cabo su caracterización. Posteriormente se desarrolló el equipamiento para conseguir aplicar las espumas metálicas mediante procesos de fabricación aditiva.

2. OBJETIVOS

- Obtención de espumas metálicas a partir del método RP-infiltración.
- Diseño y desarrollo del proceso de conformado.
- Diseño y desarrollo del sistema portátil que permita depositar el “hilo” de morfología celular sobre cualquier tipo de sustrato.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS. RESULTADOS.

H1. OBTENCIÓN DE ESPUMAS DE ALUMINIO POR INFILTRACIÓN.

T1.1. Selección del material base para la elaboración de espumas metálicas.

Durante 2016 se realizó una selección del material base para la elaboración de espumas metálicas para lo que se empleó el software CES SELECTOR®. De todas las calidades estudiadas, finalmente se selecciona la calidad EN AW 6061 como la más adecuada para la elaboración de espumas metálicas. Esta calidad posee una excelente aptitud al conformado lo que le convierte en una aleación idónea para emplear en el proceso de conformado que se diseñó en la anualidad 2017.

Esta aleación se desarrolló en Fundación ITMA en una planta piloto de fusión por inducción y se caracterizó química, microestructural y mecánicamente en 2016.

La tabla 1 muestra los resultados de los análisis químicos realizados sobre las muestras obtenidas objeto del estudio.

Tabla 1. Análisis químico (%peso).

Aleación / Elementos		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
6061	Objetivo	0.4-0.8	0.7 máx.	0.15-0.40	0.15 máx.	0.8-1.2	0.25 máx.	0.15 máx.	0.04-0.35
	AQ	0.42	0.6	0.36	0.11	1.15	0.15	0.20	0.22

Se observa que la aleación base es similar a la de la composición objetivo. Solamente el contenido de titanio fue ligeramente superior al referenciado.

La figura 3 contiene micrografías representativas de la microestructura de la muestra 6061.

Se aprecia la formación de compuestos intermetálicos de diferentes composiciones y morfologías: β -AlFeSi (posiblemente Al₅FeSi) con morfología de agujas, α -AlFeSi y Mg₂Si con morfología de escritura china.

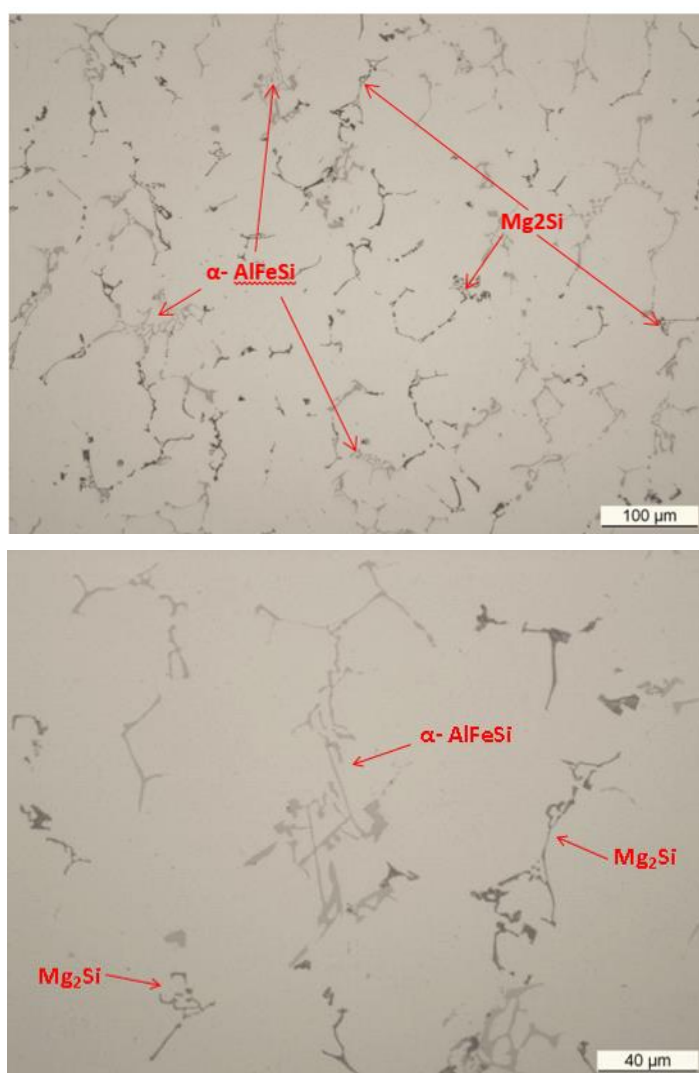


Figura 3. Calidad 6061. Estado de pulido.

En la tabla 2 se pueden observar los resultados de los ensayos de tracción realizados sobre la aleación base seleccionada.

Tabla 2. Resultados ensayo de tracción.

	Límite elástico 0.2% (MPa)	Carga de Rotura (MPa)	Alargamiento (%)
6061	72	150	4.2

Respecto a los análisis de dureza, el resultado obtenido para la aleación EN AW 6061 ha sido de 351 HB.

T1.2. Optimización del proceso RP-infiltración. Desarrollado de la marcha metalúrgica para la elaboración de las espumas seleccionadas mediante el método RP-infiltración.

Posterior a la selección de materiales se optimizó el proceso RP-infiltración, para ello se realizaron 10 pruebas empleando en todas, sal común como agente de relleno. Se consiguen espumas metálicas con una densidad un 56% menor que el aluminio.

El proceso consiste en introducir en un molde (reactor) de acero inoxidable diámetro 50 mm y longitud 250 mm con sal común como agente de relleno y como material la aleación base aluminio EN AW 6061. Se cierra el molde y se introduce en un horno eléctrico. El molde va conectado a una bomba de vacío y a una corriente de nitrógeno. Se fija la temperatura de la prueba a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión del NaCl ($T_{\text{fusión NaCl}} = 801^{\circ}\text{C}$) y superior o igual a la temperatura de fusión del aluminio ($T_{\text{fusión Al}} = 660^{\circ}\text{C}$). Se mantiene el horno a esta temperatura durante un periodo de tiempo según las distintas condiciones de pruebas con el molde en su interior y vacío. Una vez pasado el tiempo, se hace una sobrepresión con el objetivo de que el aluminio fundido se infiltre por la sal común obteniendo como resultado una preforma. Para eliminar la sal común se realiza un proceso de disolución. A continuación se muestra una tabla resumen con las condiciones empleadas en pruebas realizadas.

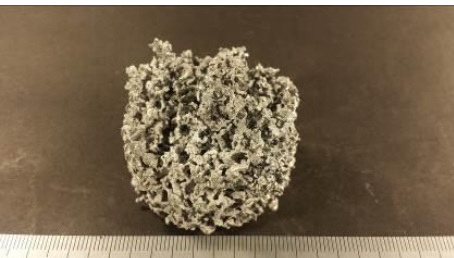
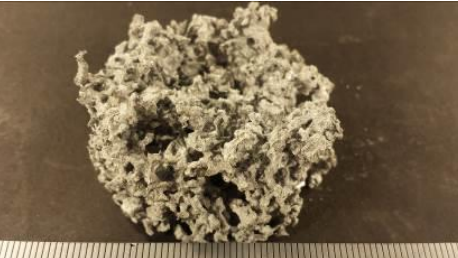
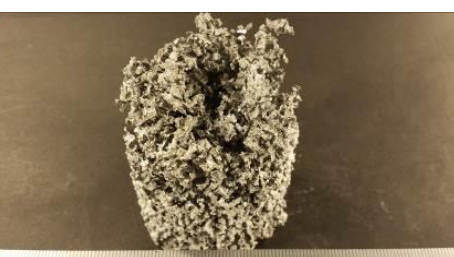
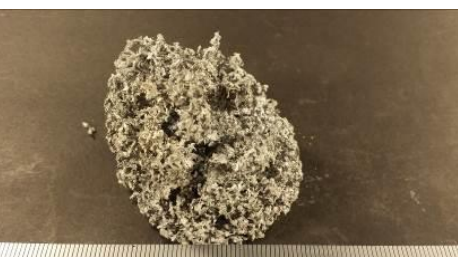
En la tabla siguiente se resumen las pruebas llevadas a cabo en 2016:

Tabla 1. Condiciones empleadas pruebas realizadas.

CONDICIONES	CODIFICACIÓN PRUEBA
Material de partida: EN AW 6061	
1 hora de vacío	1
Agente de relleno: Sal gruesa	6
Sobrepresión: 2 bares - 5 minutos	
Material de partida: EN AW 6061	2
2.5h hora de vacío	3
Agente de relleno: Sal gruesa	7
Sobrepresión: 2 bares - 5 minutos	8
Material de partida: EN AW 6061	
No vacío	4
Agente de relleno: Sal gruesa	5
Sobrepresión: 1.5 bares - 5 minutos	
Material de partida: EN AW 6061	
2.5h hora de vacío	9
Agente de relleno: Sal fina	

Sobrepresión: 2 bares - 5 minutos	
Material de partida: EN AW 6061 2.5h hora de vacío Agente de relleno: Sal mezcál (50% fina + 50% gruesa) Sobrepresión: 2 bares - 5 minutos	10

En las siguientes imágenes se muestran las espumas elaboradas en cada una de las pruebas llevadas a cabo:

Prueba	Espuma elaborada	Prueba	Espuma elaborada
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	

9		10	
---	---	----	--

Una de las mayores dificultades al trabajar con espumas es conseguir repetitividad a la hora de obtener las mismas con propiedades determinadas. Por ello, se llevaron a cabo pruebas para comprobar si era posible obtener espumas de características y propiedades semejantes siguiendo un procedimiento determinado.

Se selecciona la prueba 3 pues en ella se obtiene una espuma estable, para analizar si mediante este método hay repetitividad en los resultados. Para ello, siguiendo el mismo procedimiento, se elaboran varias espumas. En la figura 7 se observan dos espumas elaboradas con parámetros idénticos.



Figura 3. Muestra 7. Repetitividad.

En la figura 4 se muestran espumas realizadas variando el tiempo de vacío y granulometría de la sal.

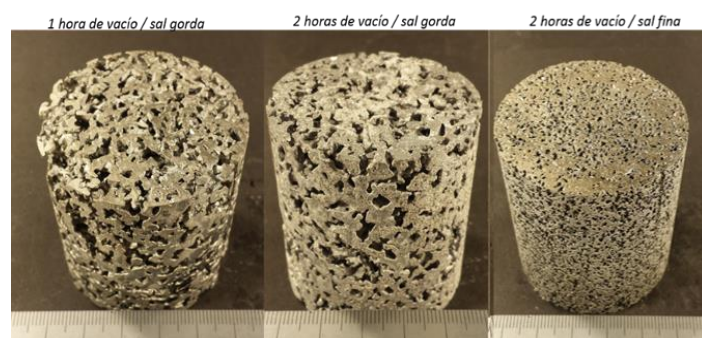


Figura 4. Espumas elaboradas: Pruebas 1, 7 y 9.

Como resultados cabe mencionar que se consigue la elaboración de espumas metálicas mediante el método RP-infiltración, con una densidad un 56% menor que el aluminio.

Las espumas en las que se emplea como agente de relleno la sal común con 50% de sal con granulometría fina y 50% de granulometría gruesa junto con un tiempo de vacío de 2.5 horas presentan un aspecto más consistente que las que se realizan con otras condiciones.

A continuación se procedió a la caracterización metalográfica y mecánica de las espumas desarrolladas.

En primer lugar se realizó el análisis composicional de las espumas metálicas elaboradas mediante espectrometría por fuente de plasma ICP-OES. Para ello se extrajeron virutas de cada muestra que se pusieron en disolución para el posterior análisis.

En la tabla 1 se muestra los resultados de los análisis químicos realizados sobre de las espumas metálicas elaboradas.

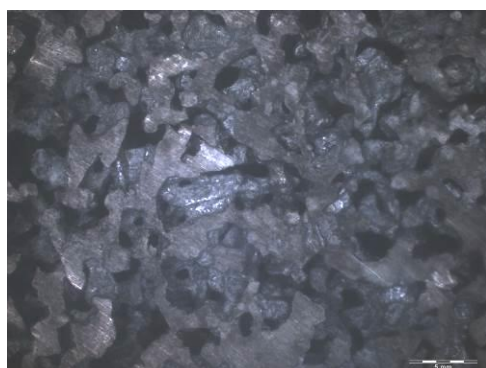
Tabla 2. Composición Química (% peso) de las espumas elaboradas.

Prueba /Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
6061	0.4-0.8	0.7 Máx.	0.15-0.40	0.15. Máx.	0.8-1.2	0.25 Máx.	0.15 Máx.	0.04-0.35
P1	0.41	0.6	0.35	0.10	1.13	0.20	0.15	0.21
P6	0.43	0.62	0.36	0.10	1.15	0.15	0.14	0.22
P2	0.41	0.62	0.33	0.12	1.12	0.19	0.15	0.22
P3	0.48	0.61	0.35	0.11	1.13	0.18	0.14	0.21
P7	0.50	0.61	0.34	0.12	1.15	0.18	0.13	0.20
P8	0.42	0.63	0.36	0.11	1.09	0.15	0.11	0.19
P4	0.43	0.59	0.37	0.10	1.11	0.17	0.10	0.23
P5	0.49	0.59	0.36	0.13	1.08	0.17	0.15	0.19
P9	0.47	0.6	0.35	0.13	1.12	0.15	0.12	0.20
P10	0.41	0.62	0.36	0.10	1.13	0.14	0.12	0.23

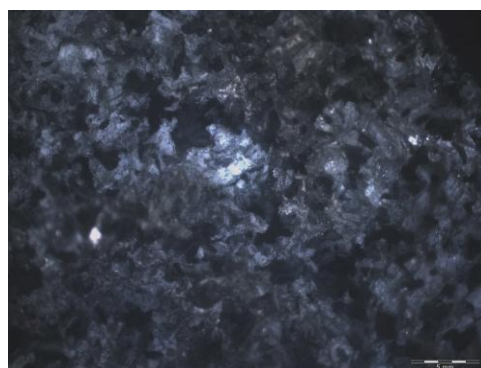
Se observa que todas las aleaciones base desarrolladas son similares a la de la composición objetivo.

Posteriormente se realizó el estudio microestructural y morfológico, inicialmente analizando las espumas mediante una lupa estereoscópica, y posteriormente, tras una preparación metalográfica mediante el uso del microscopio óptico.

A continuación se muestran las espumas elaboradas mediante la observación con lupa estereoscópica, para determinar la morfología de las espumas elaboradas:

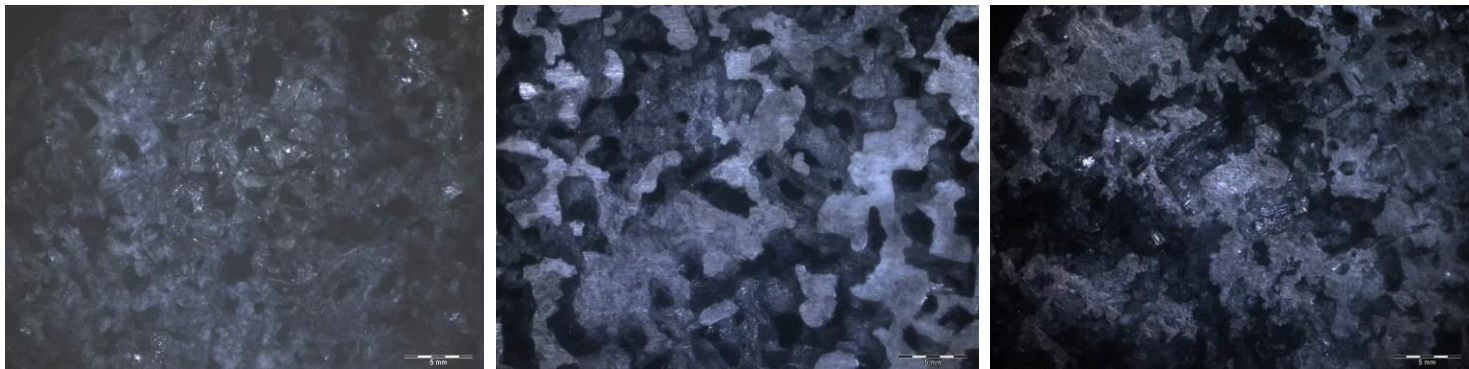


1



6

Figura 1. Espumas elaboradas. Lupa estereoscópica.

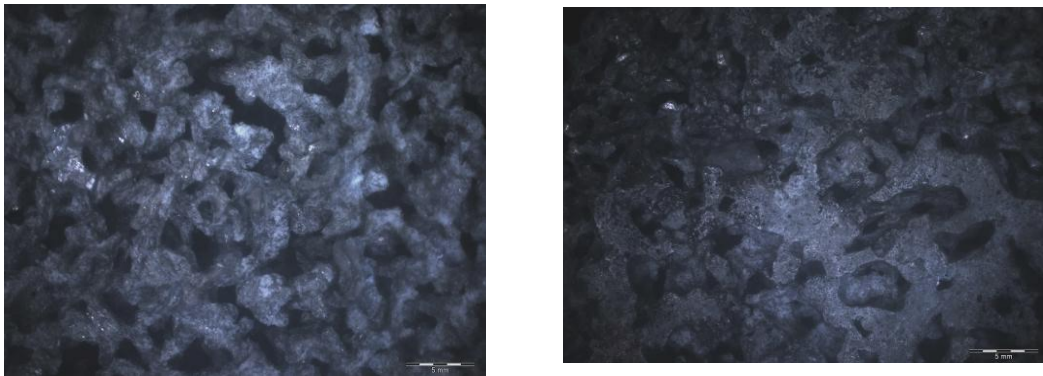


3

7

8

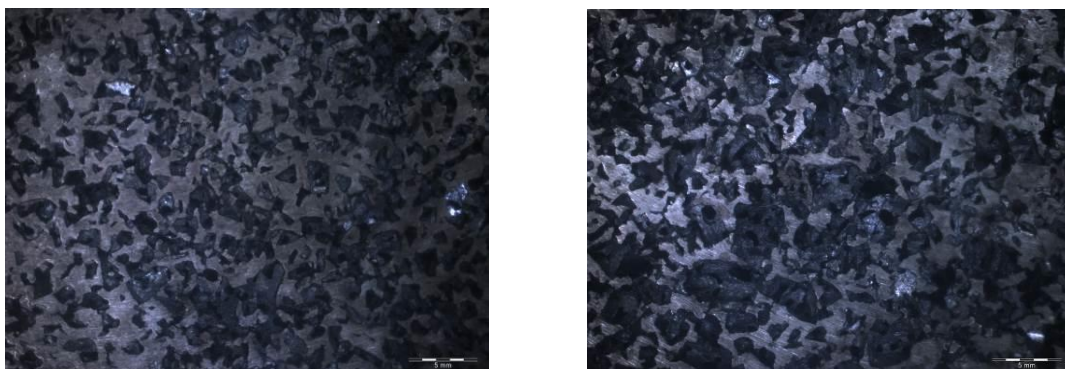
Figura 2. Espumas elaboradas. Lupa estereoscópica.



4

5

Figura 3. Espumas elaboradas. Lupa estereoscópica.



9

10

Figura 4. Espumas elaboradas. Lupa estereoscópica.

La muestra obtenida en la prueba 2 no se caracterizó morfológicamente debido a que no se consiguió una espuma metálica.

Tras el estudio morfológico puede concluirse que las espumas metálicas elaboradas presentan poro cerrado con una distribución homogénea de poro.

Se realiza la preparación metalográfica de las espumas obtenidas en las pruebas 1, 7, 10 y 9 para analizar su microestructura. Cabe mencionar que las espumas se embutieron en frío debido a que

se trata de un material con poros y con un procedimiento convencional no se consiguieron buenos resultados.

Las muestras obtenidas en el resto de pruebas, 2, 3, 4, 5, 6 y 8, no adquieren suficiente consistencia para poder ser preparadas metalográficamente.

En la figura 5 se muestra la microestructura de las pruebas 1, 7, 10 y 9. Se observan los intermetálicos típicos de la aleación base EN AW 6061.

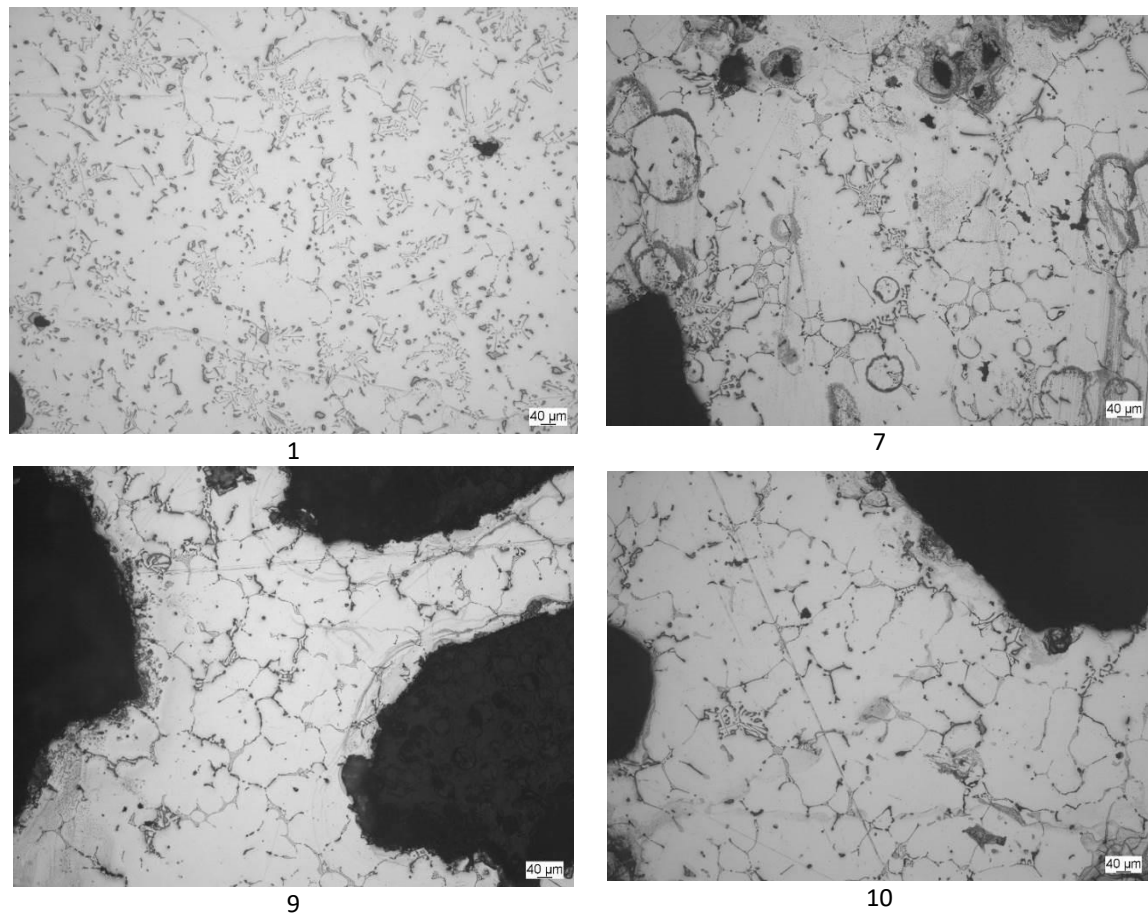


Figura 5. Espumas elaboradas: Pruebas 1, 7, 9, 10.

A continuación se detallan en la tabla 2 las densidades de las espumas más estables.

Tabla 3. Densidades (gr/cm³).

1	0.93
7	1.38
9	1.30
10	1.12

Una vez llevada a cabo la caracterización microestructural, se realizan ensayos para caracterizar mecánicamente las espumas. En la siguiente imagen se refleja una de los ensayos:



Figura 6. Ensayo de compresión.

En la figura 7 se muestra un gráfico en el que se indica la resistencia a la compresión de las espumas más representativas.

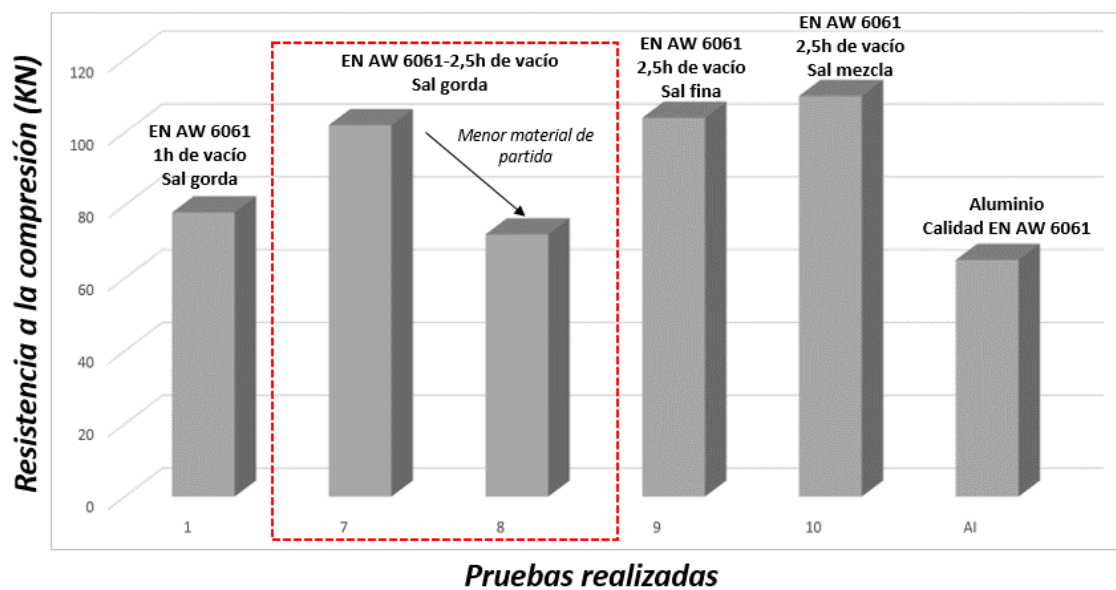


Figura 7. Resistencia a la compresión.

Se observa que las espumas metálicas que presentan mayor resistencia a la compresión son las que emplean como agente de relleno la sal común con 50% de sal con granulometría fina y 50% de granulometría gruesa (ensayo nº 10). También se observa que con un tiempo de vacío de 2.5 horas se consigue una espuma con mayor resistencia a la compresión que con un tiempo de vacío menor (ensayos 1 y 7).

Cabe mencionar que no se realizaron ensayos de impacto debido a las dimensiones de las espumas metálicas obtenidas y la dificultad para la mecanización de probetas.

Las espumas metálicas elaboradas poseen mayor resistencia a la compresión que la calidad EN AW 6061.

Se consiguen espumas metálicas con una densidad un 56% menor que el aluminio (2.7 gr/cm³).

No se observa una relación clara entre la densidad y la resistencia a la compresión.

Para conseguir una espuma estable con buenas cargas a la compresión se debe seguir la siguiente marcha metalúrgica:

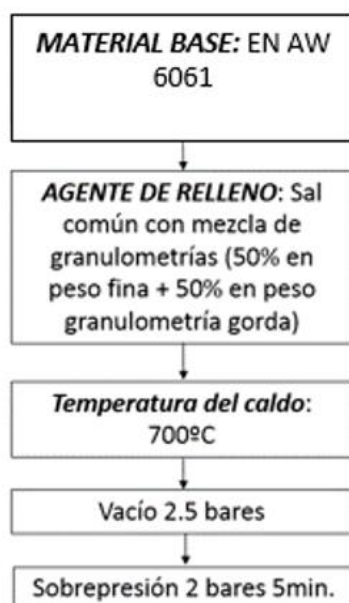


Figura 8. Marcha metalúrgica RP-infiltración

El objetivo, una vez definida la marcha metalúrgica, fue la **optimización del proceso de fabricación RP-Infiltración**. Teniendo en cuenta que el sistema para la aplicación de las espumas mediante fabricación aditiva necesitará hilos celulares de pequeño diámetro, se considera necesario partir de espumas de diámetro 5 mm aproximadamente. Por tanto, se plantea usar un nuevo molde de inoxidable que permita trabajar en estos diámetros.

Por tanto, la primera prueba realizada consistió en emplear la marcha metalúrgica desarrollada por ITMA previamente para la elaboración de espumas metálicas mediante RP-infiltración, tratando de conseguir desarrollar espumas de diámetro 5 mm.

La figura 9 muestra una imagen representativa del procedimiento, pudiendo apreciarse el empleo del molde metálico/reactor de acero inoxidable indicado, que es introducido en un horno eléctrico de resistencias.



Figura 9. Elaboración de espumas en molde metálico mediante RP-infiltración. Molde acero inoxidable de 5 mm.

Las pruebas realizadas empleando moldes metálicos de tan pequeño diámetro, han revelado una problemática: la operación de desmoldeo resulta muy compleja y las espumas elaboradas resultan dañadas durante dicho proceso, tal y como se muestra en la figura 10.

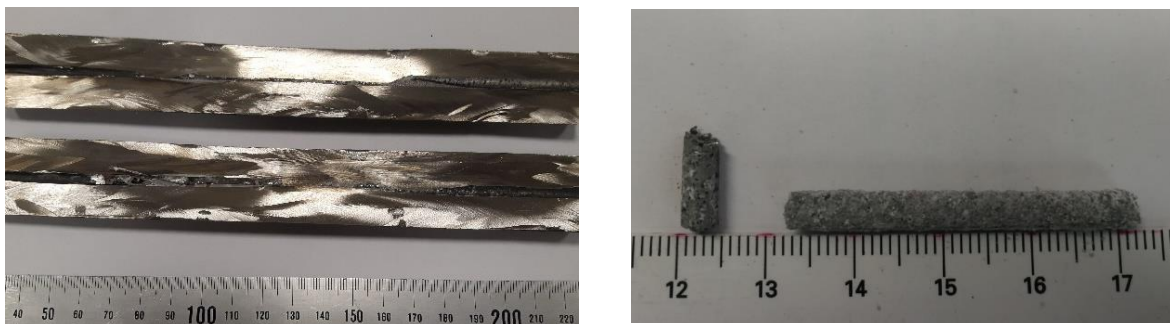


Figura 10. Desmoldeo de espumas metálicas de pequeño diámetro infiltradas en molde metálico.

Para evitar la problemática detectada durante la operación de desmoldeo, y optimizar el proceso de RP-infiltración, se ha procedido a diseñar y fabricar un equipamiento que permita la elaboración de las espumas metálicas mediante el empleo de un molde de cuarzo, calentado mediante una resistencia eléctrica acoplada exteriormente.

Inicialmente, se planteó elaborar espumas de diámetro 5 mm, análogas a las elaboradas en el molde metálico/reactor. Sin embargo, las pruebas preliminares realizadas con esos moldes detectaron problemas durante el proceso de infiltración, por lo que se decidió incrementar el

diámetro hasta 22.5 mm y que esté se redujese posteriormente mediante el proceso de conformado mediante extrusión en caliente.

La figura 11 muestra imágenes representativas del citado equipamiento (moldes de cuarzo) optimizado para los menores diámetros iniciales (izquierda) y para los últimos, de mayor tamaño que serán posteriormente reducidos mediante extrusión en caliente (derecha).

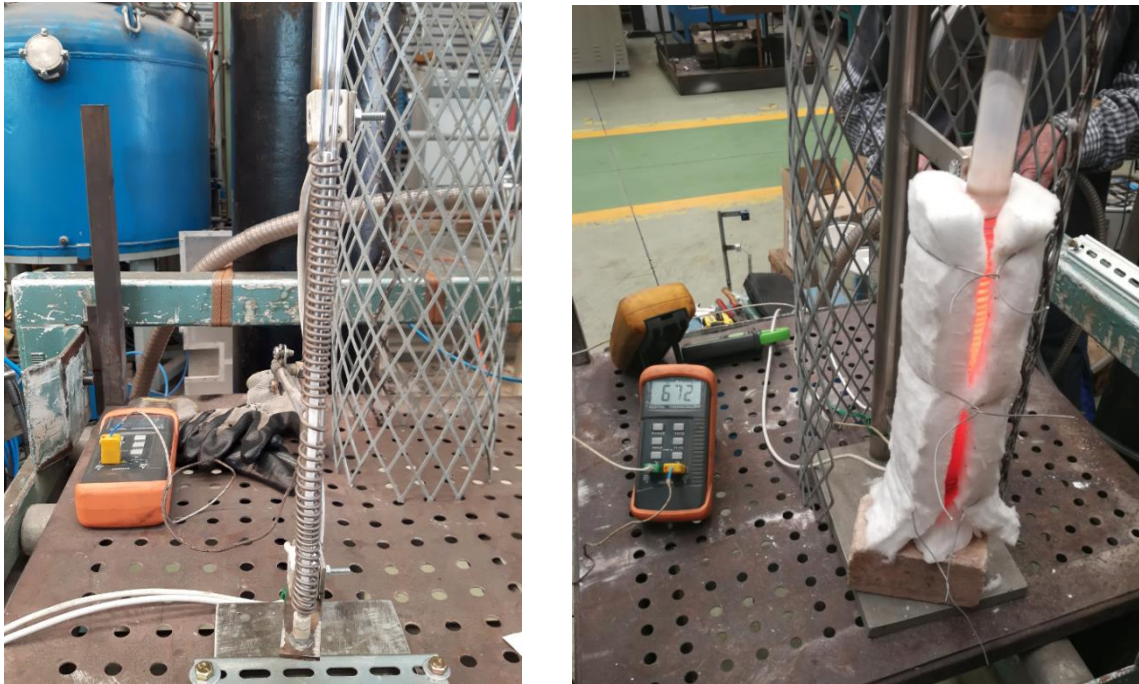


Figura 11. Desmoldeo de espumas metálicas de pequeño diámetro infiltradas en molde de cuarzo.

En la figura 12 se observa la carga empleada en los tubos de cuarzo.



Figura 12. Carga de las pruebas realizadas con tubo de cuarzo.

En la figura 13 se muestran los tochos obtenidos que posteriormente reducidos mediante extrusión en caliente.



Figura 13. Tochos obtenidos.

H2. DESARROLLO DE PROCESOS ORIENTADOS A LA APLICACIÓN DE ESPUMAS POR FABRICACIÓN ADITIVA.

T2.1. Diseño y desarrollo del proceso de conformado de las espumas elaboradas.

El proceso de conformado de las espumas elaboradas requiere del diseño de un molde idóneo para realizar el proceso de extrusión en caliente del material, así como la realización de un diseño de experimentos para poder identificar los parámetros óptimos del proceso de conformado, especialmente la temperatura de operación.

Una vez diseñado el acoplamiento del sistema de calentamiento y fabricado el molde la extrusión, tras la realización de las pruebas preliminares orientadas a verificar la viabilidad técnica del proceso e identificar los parámetros de operación, se procedió a realizar el conformado mediante extrusión en caliente de las espumas desarrolladas previamente.

A continuación, las figuras 14 y 15 muestran un esquema del molde, así como un detalle de los diversos componentes que lo constituyen.

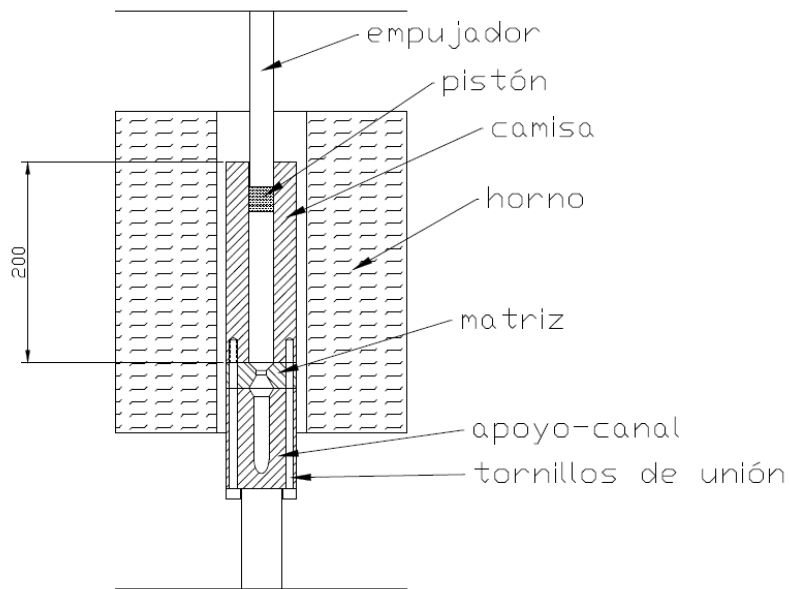


Figura 14. Esquema general del molde de extrusión en caliente.

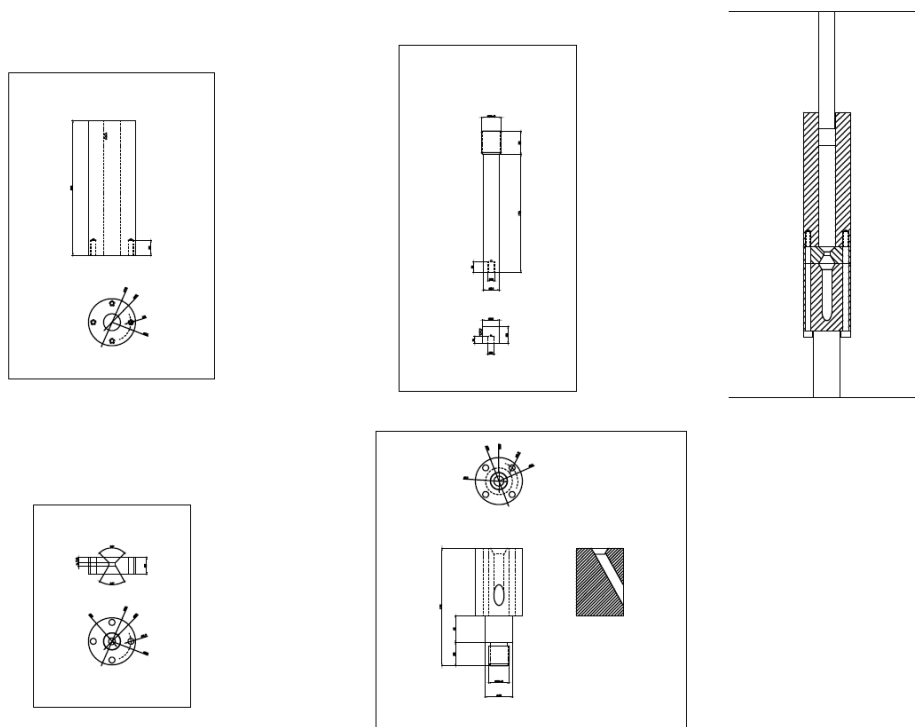


Figura 15. Detalle de los componentes del molde de extrusión en caliente.

El molde ha sido fabricado en acero inoxidable AISI 316, y si bien se valoró el empleo de aceros u otras calidades refractarias metálicas, su uso se descartó para evitar complicaciones durante la fabricación mediante mecanizado y el posterior ensamblaje de todos los componentes.

Las dimensiones principales del sistema de extrusión vienen dadas por las dimensiones del equipo de ensayos mecánicos que estaba disponible (esto limita la longitud total del equipo) y del horno que se utiliza en la misma (esto limita el diámetro exterior de la camisa y su longitud). El diámetro interno está fijado por el diámetro de los “lingotes” de espuma obtenidos.

Se diseñó en 4 piezas (pistón, cilindro, matriz y base) para poder reutilizar la base en otros diámetros de lingote, así como para hacer la extrusión en varias etapas fabricando los otros 3 componentes con el diámetro ajustado al material de partida.

Una vez disponible el molde, se procedió a realizar las pruebas preliminares de conformado mediante extrusión en caliente. A continuación, la figura 17 muestra dos imágenes de la configuración del molde de extrusión en caliente en el interior del horno, disponible en la máquina de ensayos universales INSTRON de capacidad de carga 100 kN, empleada durante todas las investigaciones experimentales desarrolladas en el presente proyecto.

La figura de la izquierda muestra el molde durante su instalación con el horno abierto y la de la derecha se corresponde a un momento del ensayo con el horno ya cerrado durante la fase de calentamiento.



Figura 17. Detalle de los componentes del molde de extrusión en caliente.

El diseño de experimentos se ha realizado desarrollando 4 pruebas a diversas temperaturas: 400, 450, 500 y 600°C.

En las dos primeras pruebas (400°C y 450°C) no se consiguió extruir en caliente el material, y en la tercera la velocidad de extrusión resultó muy lenta. En las dos primeras la máquina no tiene suficiente potencia para extruir el material a esas temperaturas y en la tercera (500°C) está en el límite, por lo que se decidió hacer una cuarta prueba a 600°C, que resultó exitosa.

Se realizaron varios experimentos con cargas menores a la carga máxima de trabajo de la máquina (100 kN) y se observa que es imposible conseguir la extrusión de las espumas metálicas a no ser

qué se trabaje a la carga máxima (100 kN) aunque estemos trabajando durante largos periodos de tiempo (48 horas). Debido a esto se fija como carga de trabajo 100 kN y se varían las temperaturas.

Se descartó emplear otras máquinas disponibles de ensayos universales dotadas de mayor capacidad, porque requieren el diseño y fabricación de otros utillajes, lo cual retrasaría el desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, no resulta recomendable incrementar mucho más la temperatura de extrusión, para evitar aproximarse a la temperatura de fusión del aluminio (660°C).

La figura 18 muestra el resultado de la extrusión realizada a 600°C, pudiendo apreciarse la ausencia de anomalías superficiales en el material.

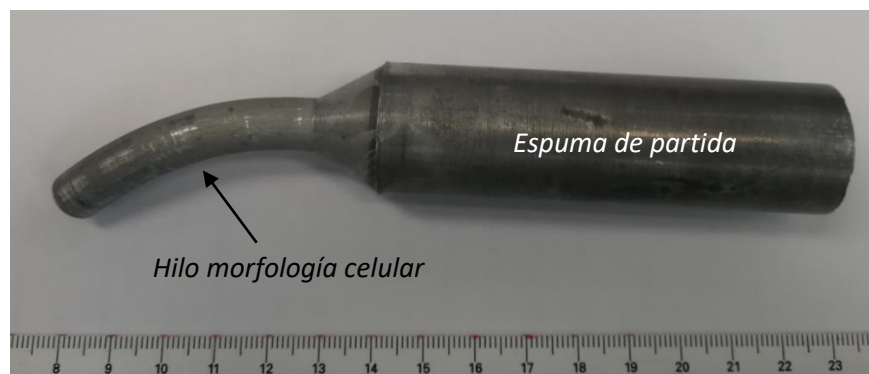


Figura 18. Muestra conformada mediante extrusión en caliente (600°C).

Por último, la figura 20 muestra la gráfica de la carga ejercida por la máquina de ensayos universales a 600°C para extruir en caliente la muestra.

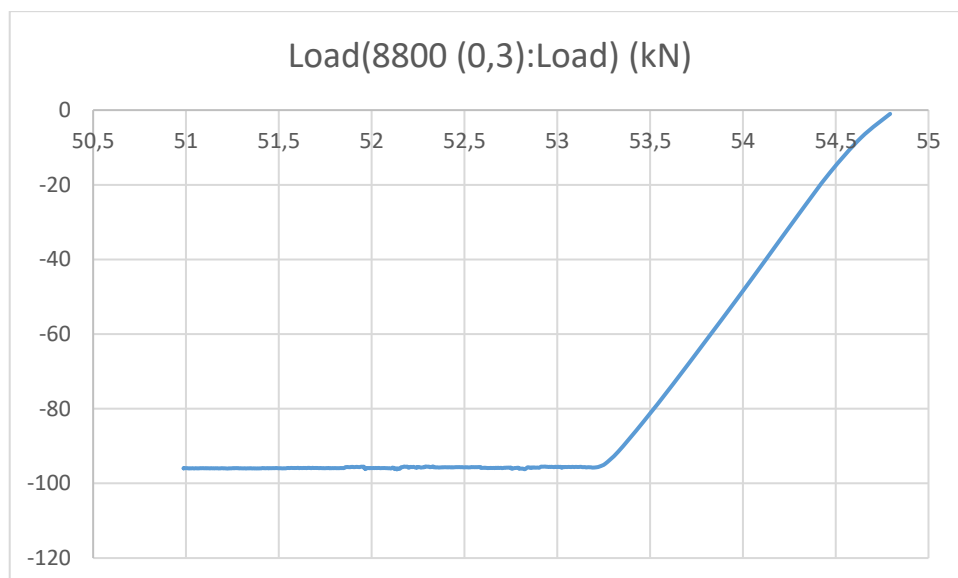


Figura 19. Detalle del ensayo de conformado en caliente (600°C).

Una vez validado el proceso termomecánico de extrusión en caliente, se detalla la etapa final de aplicación de las espumas sobre diversos sustratos.

T2.2. Diseño y desarrollo del dispositivo para la aplicación mediante fabricación aditiva de las espumas metálicas sobre diferentes sustratos.

La complejidad inherente a la elaboración de las espumas metálicas, que ha impedido hasta el momento su industrialización, motiva la inexistencia de bibliografía reseñable acerca de su procesamiento mediante fabricación aditiva. Únicamente existen investigaciones reseñables acerca de sus procesos de elaboración experimentales y las correspondientes caracterizaciones metalográficas, mecánicas, etc.

El diseño del dispositivo, para la aplicación mediante fabricación aditiva de las espumas experimentales desarrolladas previamente mediante el proceso de infiltración resulta fundamental para alcanzar los objetivos del presente proyecto. Este sistema requiere de 2 componentes fundamentales: el sistema de alimentación del material y el equipo de calentamiento.

El dispositivo de alimentación de la varilla ha sido diseñado mediante la incorporación de unas ruedas de arrastre accionadas con un motor eléctrico de corriente continua y velocidad ajustable, que permitirá procesar formatos de hasta 200 o 300 mm de longitud en varios espesores a partir de los 2 mm.

Para este diseño se ha partido del sistema de alimentación de hilo a las máquinas semiautomáticas de soldadura (MIG-MAG). La alimentación en el caso objeto del estudio es en forma de varilla “hilos de morfología celular” que es arrastrado por un sistema de ruedas moleteadas y lo empuja hacia un tubo rígido de la medida adecuada.

La limitación en la longitud de los formatos es debida a la disponibilidad del material elaborado en las espumas experimentales desarrolladas en la presente investigación, si bien una optimización posterior del proceso de elaboración de las espumas no requiere modificaciones destacables de este sistema de alimentación para procesar el material en continuo.

El sistema de alimentación está dotado de un sistema de ruedas moleteadas, que permiten transmitir el movimiento a la varilla haciéndola avanzar por el conducto hasta la zona de fusión, a la vez que actúa de boquilla de dosificación para la aplicación de las espumas metálicas mediante fabricación aditiva.



Figura 20. Sistema de alimentación.

Una vez diseñado el sistema de alimentación y aplicación del material se precisa de un equipo de calentamiento que permita fundirlo para aplicarlo sobre diferentes sustratos.

La temperatura de fusión del aluminio es de 660°C, si bien para fundir las espumas metálicas la aportación de energía será variable en función de la porosidad del material, así como de sus dimensiones.

Debido a la complejidad de este proceso de fusión, se ha decidido evaluar dos sistemas de calentamiento alternativos: mediante arco eléctrico en atmósfera inerte (TIG) y mediante resistencia eléctrica.

El sistema de fusión mediante arco eléctrico en atmósfera inerte requiere la modificación de un equipo convencional de soldadura TIG, adaptándolo para instalarle el sistema de alimentación del material descrito previamente, alcanzado así una elevada velocidad de fusión del material.

La figura 21 muestra la configuración del dispositivo aplicando la fusión mediante arco eléctrico en atmósfera inerte.

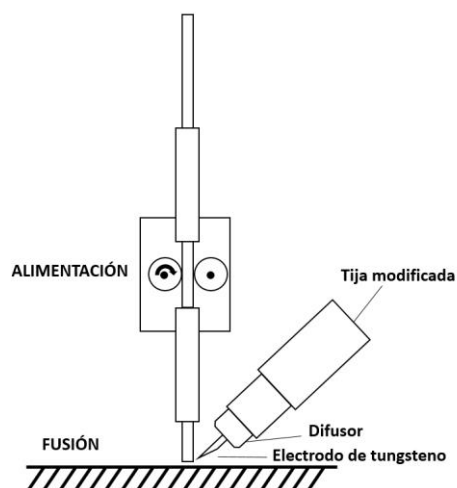


Figura 21. Dispositivo para la aplicación de espumas metálicas mediante calentamiento por arco eléctrico en atmósfera inerte.

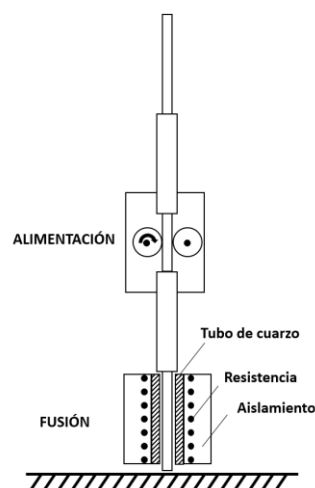


Figura 22. Dispositivo para la aplicación de espumas metálicas mediante calentamiento por resistencia eléctrica.

La opción de fundir el material mediante calentamiento por resistencia eléctrica de hilo de Khantal sobre un tubo de cuarzo, aunque no permite alcanzar las velocidades de calentamiento y fusión de la opción anterior, sí que permite acoplar el sistema de alimentación diseñado, resultando un equipamiento compacto, tal y como se muestra en la figura 22.

El diseño y fabricación de estos dos sistemas de calentamiento permite evaluar la influencia de ambos, arco y resistencias, sobre el material de partida, identificando las posibles diferencias existentes en las deposiciones sobre los diferentes sustratos.

A continuación se describen las características de cada sistema:

- Dispositivo para la aplicación de espumas metálicas mediante calentamiento por arco eléctrico en atmósfera inerte:
 - fusión instantánea: ventaja a la hora de hacer la aportación, el aluminio se funde instantemente.
 - el arco afecta al sustrato: inconveniente debido a que al hacer capas sucesivas se funde la última capa depositada más la anterior afectando continuamente a la base.
- Dispositivo para la aplicación de espumas metálicas mediante calentamiento por resistencia eléctrica:
 - buen control de la temperatura a la que se funde la varilla “hilos de morfología celular”.
 - baja velocidad de fusión.
 - no afecta al sustrato. Al depositar una capa sobre otra solo afecta a la última capa, de decir a la depositada.

T2.3. Validación del dispositivo para la aplicación mediante fabricación aditiva de las espumas metálicas sobre diferentes sustratos.

Se inician las pruebas con el sistema de fusión mediante resistencia eléctrica adaptando un sistema de arrastre de un equipo de soldadura comercial al sistema de calentamiento con un tubo de cuarzo como guía y una resistencia eléctrica de hilo de kanthal, empleando el mismo sistema de control de potencia utilizado en los ensayos de fabricación de las espumas.

Las pruebas no son satisfactorias porque no se consigue ajustar la velocidad de arrastre con la potencia de la resistencia, se producen aportaciones de material sin fundir y “descuelgues” de material fundido desde la boquilla de cuarzo. En total se realizan 10 pruebas variando los parámetros descritos en la tabla 3 y partiendo de varilla obtenida en el conformado de 3,5 mm.

Tabla 3. Parámetros empleados.

Pruebas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Velocidad (mm/s)	4	4	4	4	3	3	2	2	1	1
Corriente (A)	8	10	15	20	20	15	20	10	15	5

En las figuras 23, 24 y 25 se muestra el sistema de fusión mediante resistencia eléctrica.



Figura 23. Sistema de fusión mediante resistencia eléctrica.

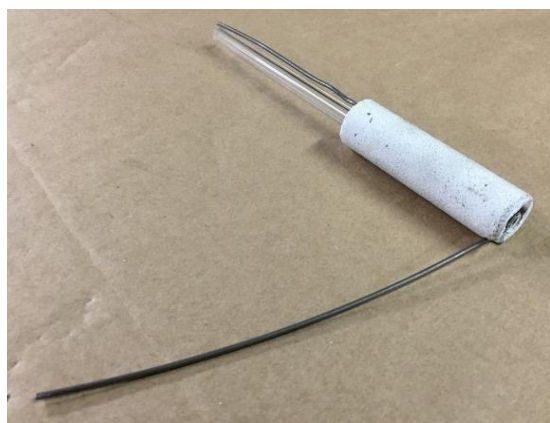


Figura 24. Sistema de fusión mediante resistencia eléctrica.



Figura 25. Sistema de fusión mediante resistencia eléctrica.

Tras los malos resultados obtenidos con las pruebas realizadas empleando el sistema de fusión mediante resistencia eléctrica se hacen pruebas con el sistema de arco en atmósfera protegida aportando el material de forma manual para no introducir más variables.

En las pruebas con el sistema de fusión mediante arco en atmósfera protegida se consigue la fusión de la varilla en el momento de accionar el dispositivo, pero no se consigue la uniformidad adecuada debido, posiblemente, a la falta de uniformidad en el material.

En total se realizan 5 pruebas variando los parámetros descritos en la tabla 4 y partiendo de varilla obtenida en el conformado de 3.5 mm. Se emplea una fuente de corriente alterna con pulsos ajustados a 10Hz.

Tabla 4. Parámetros empleados.

Pruebas	P1	P2	P3	P4	P5
Corriente (A)	80	120	160	180	200

La conclusión obtenida de las pruebas de fusión realizadas parece apuntar a que no será posible ajustar el sistema de fusión por resistencia debido a la longitud del material que está bajo la acción de la resistencia lo que hace muy crítica la velocidad de aportación de la varilla y serían muy complicadas las paradas y arrancadas.

Es más prometedor el sistema de fusión por arco en atmósfera controlada, pero para conseguir unos resultados homogéneos en la capa aportada se debe conseguir mayor uniformidad en el material de aportación que evite las grandes diferencias en la fusión observadas en las pruebas.

4. CONCLUSIONES

- Selección del material base para elaboración de espumas metálicas de base aluminio, tras hacer un estudio bibliográfico se determina que la calidad EN AW 6061 es la más apta para su incorporación en un proceso de fabricación aditiva por elevada aptitud al conformado.
- Elaboración de 10 espumas metálicas experimentales base aluminio mediante la ruta RP-infiltración, de todas ellas se seleccionan 3 que son las que generan repetitividad en los resultados con las siguientes composiciones:
 - Materia Prima: 0.32 kg de EN AW 6061 + 50% en peso de sal gruesa (0.16kg).

- Materia Prima: 0.64 kg de EN AW 6061 + 50% en peso de sal gruesa (0.32kg).
- Materia Prima: 0.64 kg de EN AW 6061 + 50% en peso de sal fina + gruesa (0.32kg).
- Diseño de la marcha metalúrgica para la fabricación de espumas metálicas mediante la ruta RP-infiltración, consiguiendo, como se decía para las espumas seleccionadas, repetitividad en la fabricación de las espumas metálicas empleando la marcha metalúrgica diseñada. En concreto esa marcha es la siguiente:
 1. Uso como material base: EN AW 6061.
 2. Utilizar como agente de relleno: Sal común con mezcla de granulometrías (50% en peso fina+ 50% en peso sal gruesa).
 3. Temperatura del caldo: 700 °C.
 4. Vacío: 2,5 bares.
 5. Sobrepresión: 2 bares durante 5 minutos.
- Caracterización de las espumas metálicas elaboradas mediante el método RP-infiltración. Se han conseguido espumas estables, con una densidad un 56% menor que la densidad del aluminio y con resistencia a la compresión superior a la aleación base empleada EN AW 6061.
- Diseño y elaboración de dispositivos y procedimiento para el conformado de las espumas metálicas. Se diseña un molde en acero inoxidable AISI 316 de 4 piezas. Consiguiendo estructuras estables y con buen acabado superficial a una temperatura de 600 °C y una carga de 100 kN.
- Se diseña el dispositivo para la aplicación de espumas mediante fabricación aditiva. Por un lado el sistema de alimentación y boquilla de dosificación, consistente en una varilla tipo 'hilos de morfología celular' en un sistema de ruedas moloteadas para su movilización. Por otro, se plantean dos posibles sistemas de calentamiento: por arco eléctrico, que aporta una mayor velocidad de fusión, o por resistencia eléctrica con hilo khantal, con menores velocidades, resultando, en contraposición, un equipo más compacto.
- Aplicación mediante fabricación aditiva de espumas sobre sustrato. Con las pruebas realizadas parece que el mejor método puede ser el de fusión por arco en atmósfera controlada. No obstante, los resultados obtenidos muestran que el proceso desarrollado está aún en una fase inicial. Sería necesario la realización de una serie de tareas que permitiesen una mayor uniformidad en el material de aportación.