



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE
INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS**
LICENCIATURA EN INGENIERÍA METALÚRGICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“FABRICACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS DE ALEACIÓN
(58%ZN-%2CU-40%AL) Y SU CARACTERIZACIÓN”

OPCIÓN CURRICULAR

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO EN INGENIERÍA METALÚRGICA

PRESENTA:

Juan Pablo Badillo Ayala

ASESORES:

Dr. Víctor Hugo Gutiérrez Pérez

Dra. Seydy Lizbeth Olvera Vázquez



Zacatecas, Zacatecas a noviembre de 2022



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Unidad Profesional Interdisciplinaria
de Ingeniería Zacatecas

Folio

UPIIZ/ESA/574/2022

2022, Año de Ricardo Flores Magón

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

50 Aniversario de la UPIICSA

50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"

25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto

DESIGNACIÓN DE ASESORES

Zacatecas, Zac., a 25 de noviembre de 2022

C. JUAN PABLO BADILLO AYALA

INGENIERÍA METALÚRGICA

BOLETA: 201867133199

GENERACIÓN: 2017-2022

PRESENTE

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica y este Departamento aceptan que el **Dr. Víctor Hugo Gutiérrez Pérez**, y la **Dra. Seydy Lizbeth Olvera Vázquez**, sean sus **Asesores**, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción de titulación **Curricular**, con el título y contenido siguiente:

"Fabricación de espumas metálicas de aleación (58%Zn-2Cu-40%Al) y su caracterización".

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN
SEGUIMIENTO ACADÉMICO

L.C. María Monserrat Saldaña Noriega
Jefa del Departamento de Evaluación
y Seguimiento Académico



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
S E P
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

MCC. Roberto Oswaldo Cruz Leija
Subdirector Académico Interino
de la UPIIZ





EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Unidad Profesional Interdisciplinaria
de Ingeniería Zacatecas

Folio

UPIIZ/ESA/578/2022

2022, Año de Ricardo Flores Magón

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

50 Aniversario de la UPIICSA

50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"

25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

C. JUAN PABLO BADILLO AYALA

INGENIERÍA METALÚRGICA

BOLETA: 201867133199

GENERACIÓN: 2017-2022

PRESENTE

Zacatecas, Zac., a 28 de noviembre de 2022

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

"Fabricación de espumas metálicas de aleación (58%Zn-2Cu-40%Al) y su caracterización".

El departamento de Evaluación y Seguimiento Académico, así como sus asesores, determinaron que el citado Trabajo de Titulación, reúne los requisitos para autorizar la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y comentarios que al respecto se hicieron.



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN
Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO

L.C. MARÍA MONSERRAT SALDAÑA NORIEGA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN
Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO

DR. VÍCTOR HUGO GUTIERREZ PÉREZ
ASESOR

DRA. SEYDY LIZBETH OLVERA VÁZQUEZ
ASESORA



Autorización de uso de obra

Autorización de uso de obra INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe **Juan Pablo Badillo Ayala**, estudiante del programa de ingeniería Metalúrgica, con número de boleta 201867133199 adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "Fabricación de espumas metálicas de aleación (58%ZN-%2CU-40%AL) y su caracterización", en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el Artículo 27 Fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al Instituto Politécnico Nacional, en adelante el "IPN", autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "El Trabajo de Titulación" por un periodo indefinido contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso al "IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, el "IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis o El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis o El Trabajo de Titulación", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis o El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad al "IPN" en caso de que el contenido de "La Tesis o El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 25 de noviembre del 2022

Atentamente


Juan Pablo Badillo Ayala

AGRADECIMIENTOS

Dicen que las personas que pasan por nuestras vidas pasan por una razón, porque son nuestros maestros de vida o porque son el enlace entre el creador y uno mismo para llegar a recibir un aprendizaje. En virtud de esta expresión, me gustaría agradecer a aquellas personas que hicieron de alguna forma u otra, unas más, otras menos, pero de igual importancia, que yo pudiera culminar mis estudios profesionales, en la máxima escuela de ingenieros en el país.

Gracias Dios por los planes de vida que tienes preparados para mí, por la salud y la abundancia, gracias por permitirme llegar hasta donde he llegado y hasta donde solo tú sabes que quiero llegar, gracias señor por no dejarme y estar siempre a mi lado.

Gracias a mis padres, Roberto Manuel Badillo Partida y Ma Engracia Ayala Ayala, por entregarse en cuerpo y alma para que su hijo pudiera culminar sus estudios, gracias por enseñarme siempre a que el amor es la clave de todo en la vida. Esto es por y para ustedes.

Gracias a mis hermanos, Roberto Manuel Badillo Téllez, Emiliano Badillo Téllez y Davian Paulina Badillo Ayala, sin duda ustedes son maestros de vida para mí, gracias por todo el cariño, siempre estaré para ustedes, los amo.

Gracias también a toda mi demás familia que, aunque no siempre estaban presentes, siempre me motivaban a echarle ganas y nunca desistir de mi sueño.

Agradezco a cada uno de mis maestros durante mis 4 años en la carrera de ingeniería metalúrgica, a los ayudantes y encargados de cada uno de los laboratorios, a la maestra Gali, al maestro Emanuel, al maestro Erik, a la maestra Angelica, al maestro Ramon, al maestro Joaquín, al maestro Alfonso, a la maestra Brisa, a la maestra Maricela, al maestro Borjón, al maestro Horacio, y sobre todo a mis maestros de toda la carrera y asesores en mi proyecto terminal de culminación de carrera, a la maestra Seydy y el maestro Víctor, muchas gracias por brindarme apoyo en todo momento y mostrar siempre interés en mi desarrollo personal. Gracias, maestros.

También agradezco a mis compañeros y amigos, gracias por estos 4 años de convivencia, de apoyo y de alegrías, deseo que cada uno de ustedes logre sus propósitos en la vida y espero coincidir en un futuro con todos ustedes, nada de esto hubiera sido posible sin amigos como ustedes.

Para terminar, quiero agradecer a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Zacatecas (UPIIZ) del Instituto Politécnico Nacional por darme la oportunidad de ser un estudiante más de sus filas, siempre procuré dar lo mejor de mí, enalteciendo los valores que permean sobre nosotros, gracias por crear en mi esa ética politécnica que nos distingue y nos diferencia del resto de las instituciones. ¡Huélum, Huélum! ¡Gloria!

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE CUADROS	IV
RESUMEN	5
ABSTRAC	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Antecedentes	9
2.2 Aleaciones Zn-Al	13
2.3 Solidos celulares: Espumas metálicas	14
2.4 Aplicaciones de las espumas metálicas	17
2.5 Métodos de fabricación de espumas metálicas	20
2.6 Proceso de replicación	26
2.6.1 Preparación del patrón	28
2.6.2 Sinterización	30
2.6.3 Atomización	31
2.6.4 Infiltración	33
2.6.5 Infiltración centrífuga	34
2.6.6 Remoción del patrón	34
2.7 Caracterización	36
2.8 Propiedades mecánicas	38
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	40
4. JUSTIFICACIÓN	40
5. HIPÓTESIS	41
6. OBJETIVOS	41
6.1 Objetivos generales	41
6.2 Objetivos específicos	41
7. METODOLOGÍA	42
7.1 Preparación de la aleación 58Zn-2Cu-40Al	43
7.1.1 Cálculo de carga	43
7.1.2 Fundición	44
7.2 Atomización	45

7.3	Sinterización e infiltración	46
7.4	Fabricación de las probetas	48
7.5	Remoción de la preforma de NaCl	49
7.6	Caracterización de las espumas metálicas de poro abierto	49
7.7	Propiedades mecánicas	49
8.	<i>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</i>	<i>49</i>
8.1	Análisis químico de la aleación	49
8.2	Infiltración en las preformas de NaCl	50
8.3	Estructura del poro	61
8.4	Propiedades mecánicas	68
9.	<i>CONCLUSIONES.....</i>	<i>70</i>
10.	<i>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</i>	<i>72</i>
11.	<i>ANEXOS</i>	<i>77</i>

Número	ÍNDICE DE FIGURAS Nombre	Página
1	Distintos casos de infiltración centrífuga	12
2	Espumas metálicas Zn-22Al-2Cu de celda abierta con tamaños de poros: (a) 0.85 mm; (b) 0.65 mm; (c) 0.42 mm	13
3	Ejemplos de sólidos celulares: (a) Paneles bidimensionales; (b) Espuma tridimensional de celda abierta; (c) Espuma tridimensional de celda cerrada	15
4	Dispersiones de una fase en una segunda. Cada fase puede estar en uno de los tres estados de la materia	15
5	(a) Espuma metálica; (b) Metal poroso; (c) Esponja metálica	17
6	Desglose de los requisitos proyectados del sector industrial para aplicaciones de espumas metálicas	18
7	Esquema de aplicaciones de espumas metálicas	19
8	Aplicaciones de espumas metálicas en base al grado de apertura	19
9	Esquema de métodos de fabricación de espumas metálicas según el estado físico del metal	20
10	Esquema de la fabricación de espumas mediante inyección de gas	22
11	Esquema de fabricación de espumas mediante el proceso Alporas	23
12	Espuma fabricada por el proceso Gasar, mostrando sus característicos poros alargados	23
13	Esquema de la técnica de espumado de compactados de polvo	24
14	Ejemplos de espumas de Al-Si-C fabricadas por el proceso Formgrip	25
15	Tamaño de celdas y densidad relativa de espumas mediante diferentes procesos de fabricación	26
16	Esquema del método de fabricación de replicación	27
17	Morfología de granos de NaCl (a) angular; (b) esférica	30
18	Proceso de sinterización y unión de polvos compactos	31
19	(a) Partícula obtenida a partir de atomización por agua; (b) Partícula obtenida a partir de gas	32
20	Métodos de atomización por gas	32
21	Infiltración de metal fundido en molde soluble	33
22	3 casos de infiltración de metal fundido por fuerza centrífuga	34
23	Máquina de limpieza por ultrasonido de 3.2 L - US003	35
24	Micrografía óptica de muestra pulida de espuma de aluminio	37
25	Imagen de una espuma de plomo obtenida por radiografía de transmisión de rayos X	38

26	Etapas de curva esfuerzo-deformación obtenida a partir de ensayo de compresión	39
27	Diagrama de proceso de la fabricación de espumas de aleación por el método de replicación	43
28	Esquema de proceso de atomización	45
29	Estructura para la atomización del NaCl	46
30	Introducción del molde de la espuma en la mufla	48
31	Máquina de aceleración centrifuga	48
32	Fabricación de probetas	48
33	Prueba No.1 de infiltración en esponja de Zinalco	51
34	Prueba No.2 de infiltración en esponja de Zinalco	52
35	Prueba No.3 de infiltración en esponja de Zinalco	53
36	Prueba No.4 de infiltración en esponja de Zinalco	54
37	Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 1.0 mm	56
38	Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.5 mm	57
39	Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.5 mm cortada a la mitad	58
40	Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.710 mm	59
41	a) Espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.5 mm; b)Parte superior de espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.5 mm; c) Estructura de espuma metálica de poro abierto	62
42	a) Espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.710 mm; b)Parte superior de espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.710 mm; c) Estructura de espuma metálica de poro abierto	64
43	a) Espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 1.0 mm; b)Parte superior de espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 1.0 mm; c) Estructura de espuma metálica de poro abierto	66
44	Curva esfuerzo-deformación de espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al	69
45	Cálculo de carga para aleación 58Zn-2Cu-40Al (Excel)	77
46	Diagrama de fases Al-Zn	77
47	Diagrama de fases Cu-Zn	78

ÍNDICE DE CUADROS		
Número	Nombre	Página
1	Resumen de producción de esponjas metálicas usando la técnica de replicación	10
2	Datos de moldes para cálculo de carga	44
3	Necesidad de cada elemento para elaborar la aleación	44
4	Composición química de la aleación	49
5	Parámetros de proceso en pruebas preliminares de infiltración usando aleación de Zinalco	55
6	Parámetros de proceso en pruebas de infiltración usando aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al.	60
7	Medición de tamaño de poro en espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.5 mm	62
8	Medición de tamaño de poro en espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.710 mm	64
9	Medición de tamaño de poro en espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 1.0 mm	66
10	Datos de densidad de la espuma, densidad relativa y porosidad, de las 3 espumas metálicas obtenidas	67
11	Propiedades mecánicas de espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al.	70

RESUMEN

En el presente trabajo se llevó a cabo la fabricación de espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al mediante la técnica de replicación usando preformas lixiviables de NaCl y aplicando la infiltración por centrifugado, siendo esta técnica relativamente nueva y poco profundizada, lo que se busca es lograr la fabricación de espumas metálicas de poro abierto variando los parámetros en el proceso de replicación para de esta manera lograr determinar los parámetros óptimos de proceso, la caracterización de las espumas obtenidas se llevó a cabo mediante técnicas de microscopia óptica para analizar sus morfologías, así como también determinaron sus propiedades mecánicas a partir de un ensayo de compresión. Los resultados indicaron que, aplicando temperaturas de vaciado de 700°C, temperaturas de sinterización de la preforma de 650°C y velocidades rotacionales de 191 rpm son parámetros adecuados para lograr la fabricación de estas espumas incluso variando su tamaño de poro (0.5 mm, 0.710 mm y 1.0 mm). Además, las espumas fabricadas poseen porosidad homogénea y con tamaño de poro uniforme, al disminuir el tamaño de poro se incrementan propiedades como la densidad, la porosidad y las propiedades mecánicas, siendo estas últimas mejoradas con respecto a espumas fabricadas a partir de Zinalco.

Palabras clave: espuma, poro abierto, aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al, densidad, porosidad, Zinalco.

ABSTRACT

In the present work, the manufacture of 58% Zn-2% Cu-40% Al alloy open pore metallic foams was carried out by means of the replication technique using leachable NaCl preforms and applying infiltration by centrifugation, this technique being relatively new and not in depth, what is sought is to achieve the manufacture of open-pore metal foams by varying the parameters in the replication process in order to determine the optimal process parameters, the characterization of the foams obtained was carried out by means of optical microscopy techniques to analyze their morphologies, as well as their mechanical properties from a compression test. The results indicated that, applying casting temperatures of 700 ° C, sintering temperatures of the preform of 650 ° C and rotational speeds of 191 rpm are adequate parameters to achieve the manufacture of these foams even varying their pore size (0.5 mm, 0.710mm and 1.0mm). In addition, the foams manufactured have homogeneous porosity and uniform pore size, by decreasing the pore size, properties such as density, porosity and mechanical properties are increased, the latter being improved with respect to foams manufactured from Zinalco.

Keywords: foam, open pore, 58% Zn-2% Cu-40% Al alloy, density, porosity, Zinalco.

1. INTRODUCCIÓN

Las espumas y otros materiales altamente porosos con una estructura celular tienen muchas combinaciones interesantes de propiedades físicas y mecánicas, por esta razón, la naturaleza utiliza con frecuencia materiales de estructura celular con fines constructivos o funcionales (ej. Madera o huesos) [1]. Comprenden una nueva clase de material que puede llegar a ser desconocido para muchos ingenieros, generando confusión debido a los distintos términos sobre materiales similares, Banhart [2] define a estos materiales porosos, clasificándolos en espumas metálicas (sólidas) y esponjas metálicas, esto debido al tipo de estructura que poseen, existiendo espumas de poro abierto interconectado (mejor conocidas como esponjas) o de poro cerrado no conectado entre sí (mejor conocidas como espumas) [3]. Las espumas de celda (poro) cerrada exhiben excelentes propiedades mecánicas, debido a su estructura no permiten el acceso a su superficie interna, por lo tanto, su resistencia y capacidad de absorber energía es mayor en comparación con espumas de celda abierta [4], se recomiendan en aplicaciones de tipo estructural, de carga, estructuras sándwich para absorción de energía en impactos, piezas estructurales en turbinas, partes en carrocerías y motores y en menor medida para resistencia al fuego [5], barreras térmicas [6], etc., las espumas de celda abierta (o esponjas metálicas) están muy relacionadas con técnicas pulvimetalúrgicas, tienen una mayor superficie por unidad de peso y entre sus principales aplicaciones se encuentran en intercambiadores de calor y refrigeración [7], filtros, soportes de catalizador, prótesis biomédicas, control acústico y apartados de decoración y diseño [1,8]. Estas aplicaciones funcionales dan un valor agregado más alto en comparación con espumas en aplicaciones puramente estructurales, lo que es apropiado, debido al costo generalmente mayor en espumas de celda abierta [6].

De manera general, estos materiales ofrecen excelentes propiedades de alta rigidez, bajo peso específico, absorción de energía, control acústico, etc., [1,9] además de tener presencia en gran parte de las industrias como son la naval, aeroespacial, automotriz, militar, construcción, médica, etc.

Actualmente las espumas metálicas no están caracterizadas en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas por completo, los procesos para fabricarlas aún son imperfectos y aunque muchas de las técnicas continúan en constante desarrollo, el control de procesos mejora rápidamente [9]. Los métodos para fabricar las distintas espumas metálicas pueden agruparse de 3 formas, por el procesamiento de la espuma en fase líquida por medio de fusión, en fase sólida por técnicas pulvimetalúrgicas y en fase gaseosa por deposición electroquímica [1,10,11].

Los materiales metálicos porosos se desarrollan a un paso más lento y es hasta hace pocos años que el desarrollo de nuevos procesos de fabricación de estos productos con propiedades más homogéneas y razonablemente costeables ha hecho que se disponga industrialmente de estos nuevos materiales. En la actualidad gran parte del estudio de espumas metálicas se centra en el Aluminio debido a propiedades como baja densidad, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión, propiedades que hacen que sea un material fácil de manipular [12].

En el presente trabajo se muestran los parámetros del proceso de fabricación de espumas metálicas de aleación "58Zn-2Cu-40Al" obtenidas a partir del método de replicación (RP), para esto se emplearon preformas lixiviables de cloruro de sodio (NaCl) con tamaños de partícula de 1000, 710 y 500 micras, las cuales fueron sinterizadas para garantizar una buena compactación y formación sólida de la preforma. El método de infiltración de la masa fundida sobre la preforma fue mediante acción de la aceleración centrífuga. Las espumas elaboradas fueron caracterizadas estructuralmente logrando determinar propiedades de tipo morfológico como tamaño y cantidad de celdas, además de su distribución. De igual manera, se determinaron sus principales propiedades mecánicas obtenidas a partir de curvas esfuerzo-deformación derivadas de un ensayo de compresión. Las propiedades morfológicas y mecánicas de las espumas hacen funcional el empleo de estas en múltiples aplicaciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Las espumas metálicas son materiales celulares que comprenden en su mayoría un volumen ocupado por poros, y es a partir de materiales celulares de origen natural (piedra pómez, madera, hueso), que con sus peculiares propiedades incitan a investigadores a fabricar materiales celulares artificiales [13]. Artefactos de madera son un claro ejemplo de este tipo de material usado en Egipto desde hace 5000 años [7].

En 1925 [14] se tuvo la primera mención sobre la fabricación de espumas metálicas, De Meller propone en su patente la inyección de un gas inerte sobre el metal fundido o el uso de un agente de soplado (carbonato) sobre el metal fundido y una posterior agitación. Sugiriendo en unos primeros pasos lo que hoy en día se conoce como el proceso Alporas [13]; a partir de esta primer patente se siguieron realizando más estudios sobre espumas metálicas en todo el mundo, se descubrieron nuevos y mejores procesos, además de ir perfeccionando los ya existentes, hasta obtener los que hoy en día se conocen como los principales métodos comerciales de fabricación de espumas metálicas.

En la actualidad hay una variedad de técnicas novedosas, muchas de ellas en continuo desarrollo, por lo que algunos procesos no están controlados al cien por ciento y puede existir variabilidad en las propiedades [9], las cuales dependen fundamentalmente de la densidad relativa y la tipología celular (tamaño, cantidad y tipo de celda). Además, gran parte de las investigaciones en la actualidad se centran sobre las espumas de Aluminio debido a sus interesantes propiedades de densidad, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión, lo que lo convierten en un material de gran interés en el mercado de las espumas metálicas, sin embargo, aún existe la limitante de los altos costos en los procesos para fabricar espumas metálicas [12].

Una de estas técnicas relativamente novedosas, corresponde al proceso de replicación, que implica el uso de la infiltración para llevar a cabo la penetración del metal fundido sobre las preformas o patrones, aplicando altas presiones para superar la barrera de presión que existe entre el metal fundido y las preformas [15].

Conforme a este proceso de replicación se han documentado experimentos donde se han obtenido datos importantes como tamaño de poro y porcentaje de porosidad (%P) en la producción de espumas, cada uno diferenciándose en el material para fabricar las preformas, en el metal de la espuma, la técnica de infiltración y la técnica para remover la preforma, como se puede observar en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Resumen de producción de esponjas metálicas usando la técnica de replicación [6].

Material de patrón	Metal	Técnica de infiltración	Remoción del patrón	Características de las esponjas	
				Tamaño de poro (mm)	Porosidad (%)
Esponja de poliuretano	Mg, AZ91	Asistido por vacío	Rociado de agua	4.5	97
Esponja de poliuretano	Al, SG91A	Asistido por vacío	Rociado de agua	4.5	93-96
Esponja de poliuretano	Al, Cu, Zn, Fe, Ni, Co	Asistido por presión o vacío	No reportado	0.85-2.5	92-98
Arena de fundición granulada	Arrabio	Asistido por vacío	Agua a presión	1-5	60-63
Poliestireno y resina	Al	Fundición a presión modificada	Altas temperaturas (quemado)	1.2-3.7	73-86
NaCl	Al	Gravedad, asistido por vibración, presión y vacío	Lixiviación	0.15-5	60-63
No reportado	Al	No reportado	No reportado	0.45-1.45	55-67
NaCl (presinterizada)	Aleaciones de aluminio	Infiltración a presión de gas	Lixiviación	0.01-3	65-81

Una técnica poco explorada para generar esta presión de infiltración es mediante fuerza centrífuga y aunque hay varios investigadores que han probado la viabilidad de este método, se han publicado pocos artículos sobre la infiltración centrífuga de

metales fundidos para fabricar compuestos de matriz metálica (MMC), por lo tanto, es complicado obtener condiciones de infiltración óptimas [15].

Los trabajos relacionados con infiltración centrífuga se basan en la fabricación de MMC y en menor medida en la segregación de partículas en el metal fundido [16].

De acuerdo con la literatura disponible, hay 2 rutas para llevar a cabo la fabricación de espumas sintácticas de matriz metálica (MMSF) empleando el método de infiltración centrífuga, los métodos convencionales y los métodos modificados. Varios investigadores han empleado los métodos convencionales, por ejemplo, Sughisita y col., en 1982 modificaron un dispositivo de fundición a presión con la integración de un sistema de rotación, la estructura es sometida a temperaturas que oscilan los 50°C y los 100°C por encima de la temperatura de fusión, para alcanzar un equilibrio térmico. El proceso de infiltración comienza cuando las fuerzas centrífugas del frente del metal líquido son mayores que la presión del umbral de llenado y termina cuando la preforma se rellena con la fundición, en esta máquina se han empleado fuerzas de 1500 G a 100°C por encima del punto de fusión para la infiltración de aleaciones de aluminio y hojuelas de carbono, también para espumas de Sn-C se han empleado fuerzas de 380 G y temperaturas de 50°C encima del punto de fusión, obteniendo resultados similares [17].

Trabajos como el de Noordegraaf y col., en 1991 [18] patentaron una máquina para la fundición de objetos moldeables, sometiendo el molde a aceleración centrífuga, manteniendo la carga inmóvil durante la colación de la masa fundida, además emplearon distintos materiales de relleno como por ejemplo gránulos, polvos, fibras discontinuas, etc., el proceso puede aplicarse para fundir todo tipo de aleaciones y metales puros, en particular para fundir aluminio y zinc. Las aceleraciones centrífugas recomendadas en esta máquina fueron de 400 a 1500 G, para obtener una penetración completa y al mismo tiempo eliminar el aire contenido. Para cargas con un tamaño de partícula menor a 1 μm se recomendó emplear una aceleración centrífuga mínima de 1500 G para una buena infiltración.

Por otro lado, Taha y col., en 1998 realizaron pruebas de infiltración centrífuga con aleaciones de aluminio en polvos de alúmina gruesa (47 micras y 57% de fracción

en volumen) a una velocidad centrifuga de 2,000 rpm y una presión de infiltración de 5.0 atm, donde a partir de sus resultados encontraron 4 casos de infiltración centrifuga, como se puede observar en la Figura 1 [16].

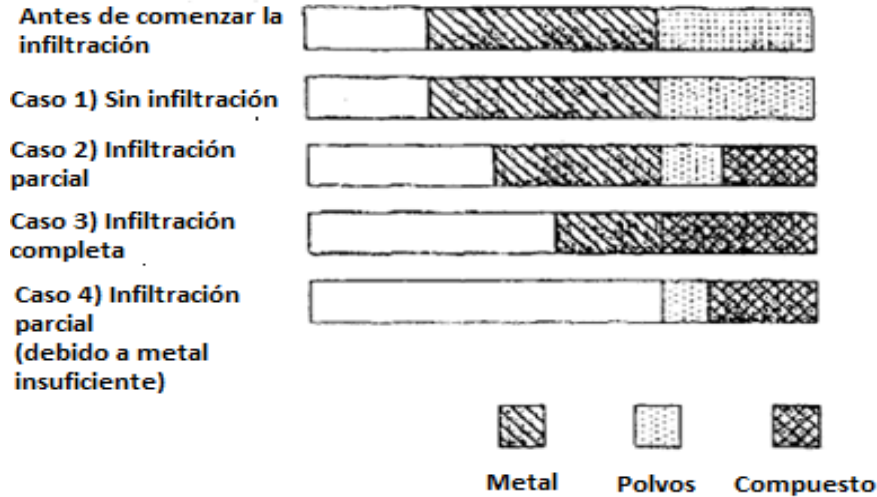


Figura 1. Distintos casos de infiltración centrifuga [16].

La técnica de infiltración centrifuga corresponde a un método indirecto para llevar a cabo la fabricación de este tipo de materiales de matriz metálica, siendo empleados principalmente métodos directos que emplean la infiltración por presión hacia abajo asistida por gas o mecánicamente [17].

Es hasta tiempos recientes que la técnica de infiltración por centrifugación ha sido más estudiada para la fabricación de espumas metálicas de poro abierto, siendo que esta técnica de infiltración ha tenido éxito para fabricar materiales de tipo MMC, es en 2016 cuando Sánchez y col., [19] determinaron experimentalmente parámetros de proceso para la fabricación de espumas de celda abierta de Zn-22Al-2Cu utilizando la infiltración centrifuga, como se puede observar en la Figura 2 emplearon diferentes tamaños de poro de 0.85 mm, 0.65 mm y 0.42 mm. Su trabajo mostro que las propiedades obtenidas para cada una de las espumas , además de los parámetros de proceso adecuado para llevar a cabo la fabricación de espumas de poro abierto, concluyendo en temperaturas adecuadas de sinterización y vertido de 600°C y aplicando fuerzas centrifugas de 11, 16 y 25 N para lograr la fabricación de estas espumas de poro abierto.

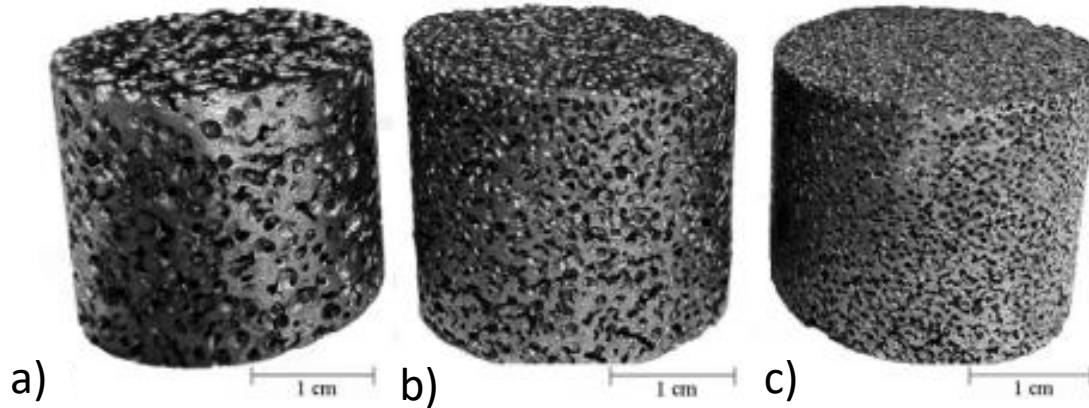


Figura 2. Espumas metálicas Zn-22Al-2Cu de celda abierta con tamaños de poros: (a) 0.85 mm; (b) 0.65 mm; (c) 0.42 mm [19].

2.2 Aleaciones Zn-Al

En años recientes las aleaciones binarias de Zn-Al han tomado un lugar importante en áreas de la investigación, estas aleaciones modificadas con cantidades pequeñas de elementos de aleación como lo son el Cu, el Si o el Mg presentan propiedades interesantes de resistencia al desgaste o corrosión, pero su principal atractivo es su característica propiedad superplástica [45].

Estudios sobre estas aleaciones comenzaron en 1973, con el objetivo de contribuir al conocimiento de este tipo de materiales, tomando mayor relevancia en México, debido al creciente uso del Aluminio y la carencia de este en el país, obligándolo a importar. Es hasta 1983 cuando se logra obtener un material con propiedades idóneas para competir con el aluminio y así combatir el problema de producción de aluminio en el país [46].

Por lo general, las aleaciones Zn-Al presentan buena fluidez, moldeabilidad, alta capacidad de amortiguamiento, buena calidad superficial, bajo coeficiente de fricción y bajo costo de producción, etc [47].

Con respecto a la adición del elemento de aleación Cu, las aleaciones Zn-Al presentan un endurecimiento, mejorando en sus propiedades mecánicas. La adición de 1% o 2% de Cu ayuda a incrementar la resistencia a la tensión, la termofluencia,

la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión, aunque también se ha comprobado que al adicionar más Cu también se reducen propiedades de las aleaciones Zn-Al como la resistencia al desgaste y la ductilidad [47].

Como el Cu afecta directamente en propiedades como lo son la ductilidad y la resistencia, el contenido de Cu dependerá directamente de los valores deseados de ductilidad y resistencia. Investigaciones sobre este tipo de aleaciones Zn-Al-Cu han demostrado que con combinaciones de 1%-2.5% de Cu se obtienen las mejores combinaciones de resistencia a la tensión y ductilidad en aleaciones con 22% en Al, sin embargo, el Cu tiene un efecto nulo sobre la ductilidad [48].

La superplasticidad que otorgan este tipo de aleaciones los convierte en materiales atractivos para la rama ingenieril, proporcionando elongaciones mayores al 200% antes de la aparición de fractura, esto en la mayoría de las aleaciones superplásticas, además de lograr elongaciones de hasta 4850% en aleaciones de Pb-Sn [47].

Las aleaciones superplásticas tienen la peculiaridad de ser aleaciones bifásicas eutécticas o eutectoides, por lo tanto, el crecimiento de grano es inhibido o perturbado por la presencia de ambas fases, de esta forma se obtienen granos con tamaños menores a 10 μm [49].

2.3 Sólidos celulares: Espumas metálicas

Los sólidos celulares son redes interconectadas de puntos sólidos que forman los bordes y caras de las células. En la figura 3 se pueden observar distintos tipos de sólidos con estructura celular, se tiene una matriz bidimensional de polígonos, a estas estructuras se les conoce como *Honeycombs* (Figura 3a), las siguientes corresponden a imágenes de espumas donde es más común las celdas tridimensionales de tipo poliédrico, las cuales se categorizan si el sólido está contenido solo en los bordes de la celda (celda abierta Figura 3b), o si las caras también son sólidas (celda cerrada Figura 3c), además puede haber espumas en las que existan los 2 tipos de celdas [20].

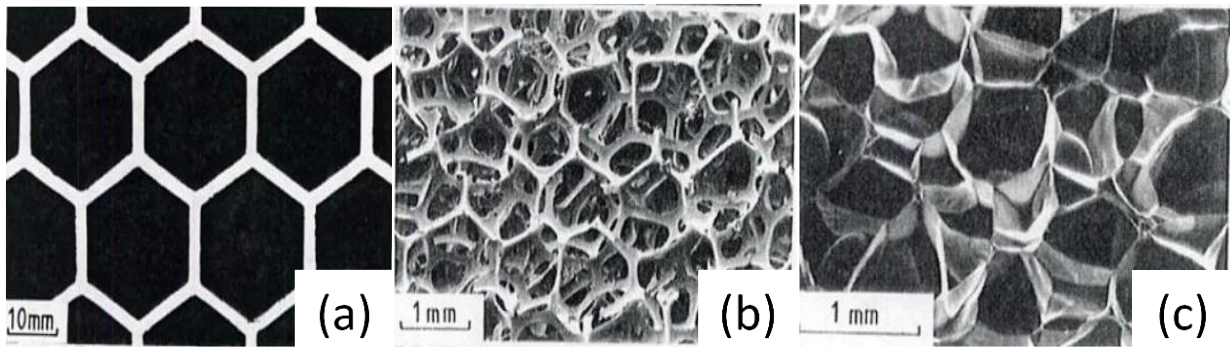


Figura 3. Ejemplos de solidos celulares: (a) Paneles bidimensionales; (b) Espuma tridimensional de celda abierta; (c) Espuma tridimensional de celda cerrada [20].

Cuando hablamos de espumas metálicas estamos tratando directamente con solidos celulares, mientras que la espuma metálica líquida solo se trata de una etapa durante la fabricación del material, sin embargo, se puede conservar la morfología de estas espumas dejando solidificar el líquido, obteniendo así una espuma solida [1]. En la Figura 4 se pueden observar las distintas designaciones que tienen las posibles combinaciones de una fase en un estado líquido, solido o gaseoso con una segunda fase dispersa. Como se observa, el termino espuma se reserva solamente en el caso en que tenemos un gas que es dispersado en una fase liquida, formando las burbujas que darán estructura al material [21].



Figura 4. Dispersiones de una fase en una segunda. Cada fase puede estar en uno de los tres estados de la materia [21].

Como se vio anteriormente, las espumas son el resultado de combinar gases y metal, los gases ocupan entre el 50 % y 90% de la estructura total, siendo materiales de baja densidad (entre 0.03-0.2 gr/cm³) con propiedades que por un lado son características del metal y por otro, son derivadas de su estructura. Además, para lograr esta estructura es necesario alcanzar el estado líquido del material o llegar a temperaturas próximas que den fluidez a la espumación [12].

A pesar del incremento en el interés de estos materiales, aún existe confusión, por lo que Banhart [2] identifica el termino de espuma metálica y lo distingue de otros términos que no describen al material:

- ✓ Metales celulares: El termino más general, se refiere a un cuerpo metálico donde se dispersan vacíos gaseosos, la fase metálica divide a los espacios que contienen la fase gaseosa.
- ✓ Espumas metálicas (solidas): Una clase de metal celular que se origina a partir de espumas metálicas liquidas. Las células son cerradas, redondas o poliédricas y están separadas por películas delgadas. (Figura 5a)
- ✓ Metales porosos: Un tipo de metal celular con huecos o poros aislados y redondos. (Figura 5b)
- ✓ Esponja de metal: Una morfología de un metal celular, generalmente con un vacío interconectado. (Figura 5c)

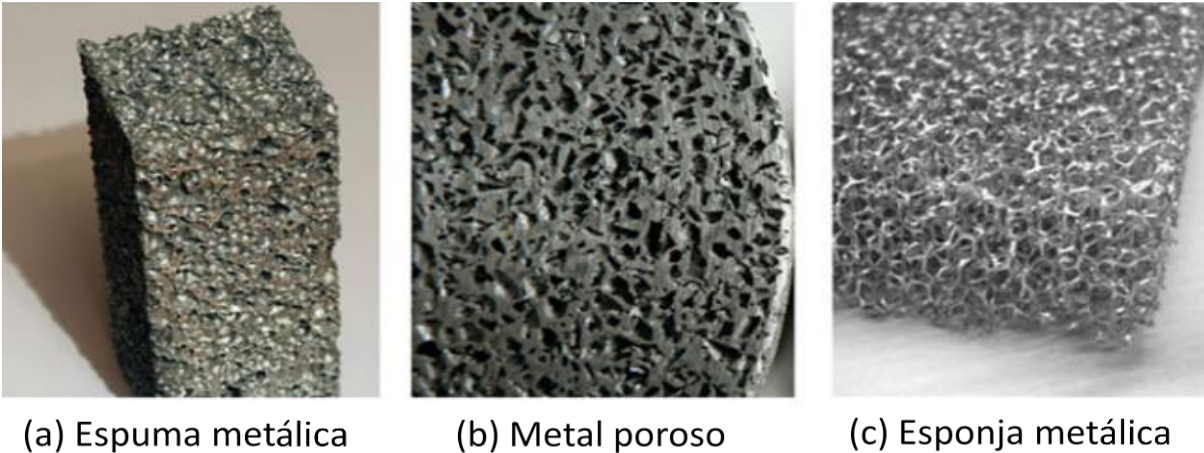


Figura 5. (a) Espuma metálica [22]; (b) Metal poroso [23]; (c) Esponja metálica [24].

2.4 Aplicaciones de las espumas metálicas

Los metales celulares presentan una serie de características especiales que los vuelven atractivos comparados con materiales estructurales en general, propiedades mecánicas como baja densidad, rigidez y fuerza que, en combinación con su gran absorción de energía en impactos, su eficiente absorción de sonido, amortiguamiento a vibraciones, etc., lo convierten en un material con propiedades, que no se pueden obtener de un material convencional, considerándolo muy prometedor en aplicaciones donde se puedan combinar varias de estas funciones [6].

Proyecciones sobre crisis futuras en combustibles, además de la inevitable necesidad de mejorar la eficiencia de los combustibles y las tecnologías de los materiales para hacerlos cada vez más ligeros y resistentes, han hecho que cada vez se considere más a la industria de las espumas metálicas. El laboratorio Nacional de Física de Reino Unido realizó una encuesta a industrias e instituciones para conocer el potencial y posible futuro de las espumas metálicas, siendo que en un 32% se cree que las industrias que más explotaran a las espumas metálicas son la industria automotriz y aeroespacial, como se muestra en la Figura 6 [25].

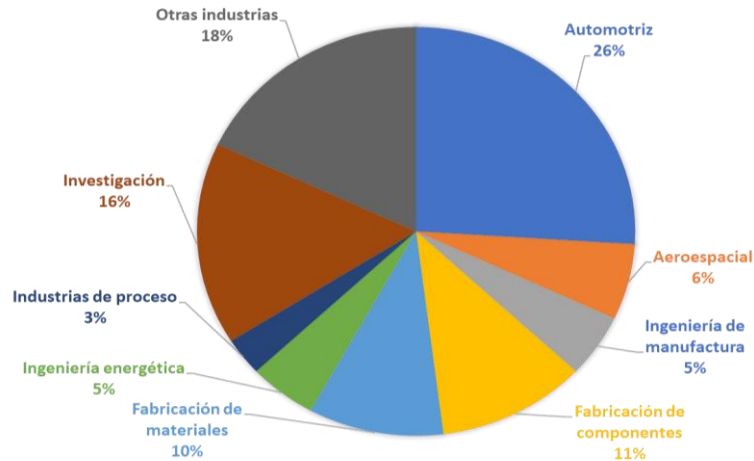


Figura 6. Desglose de los requisitos proyectados del sector industrial para aplicaciones de espumas metálicas [25].

Las espumas metálicas tienen una gran presencia en distintas industrias como la aeronáutica, aeroespacial, automotriz, construcción, ferroviaria, maquinaria, equipo deportivo o hasta industria biomédica [1,26, 8,27].

Entre sus principales aplicaciones se encuentran [12]:

- Estructuras tipo sándwich
- Partes en la industria de la automoción
- Estructuras en industria aeroespacial
- Industria naval
- Intercambiadores de calor
- Almacenamiento temporal de líquidos
- Control acústico
- Arte y decoración

La Figura 7 ejemplifica las diversas aplicaciones de las espumas metálicas, tanto en requisitos estructurales, funcionales, biomédicos y químicos. Así como en la Figura 8 podemos ver algunas aplicaciones específicas de las espumas según el tipo de estructura que tienen (poro abierto/cerrado).

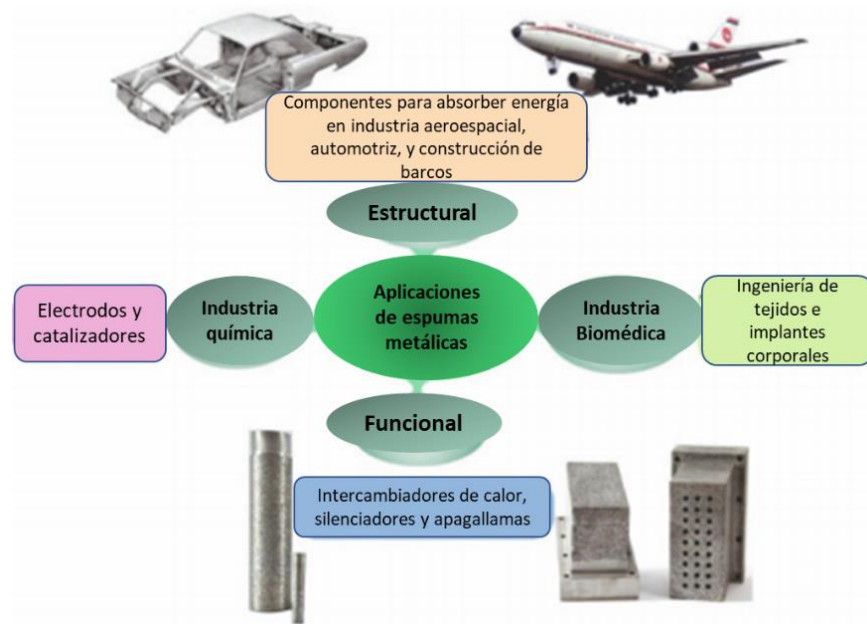


Figura 7. Esquema de aplicaciones de espumas metálicas [7].

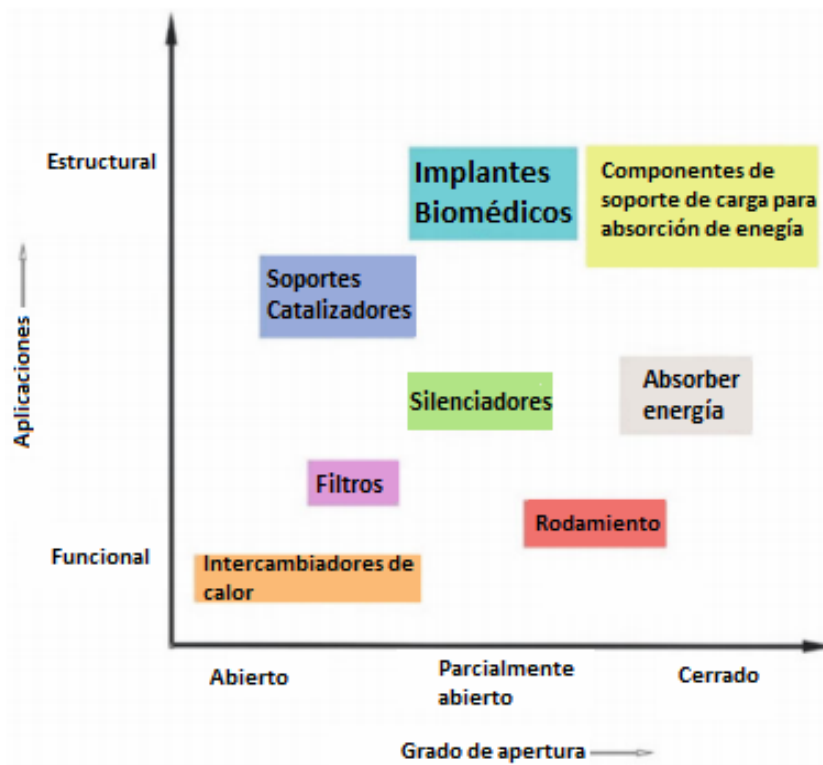


Figura 8. Aplicaciones de espumas metálicas en base al grado de apertura [7].

2.5 Métodos de fabricación de espumas metálicas

Existen distintos métodos para llevar a cabo la fabricación de las espumas metálicas, estas técnicas se pueden clasificar según el estado del precursor para llevar a cabo la formación de la espuma (sólido, líquido y gaseoso). En la Figura 9 se puede observar los distintos procesos de fabricación de espumas metálicas clasificados según el estado físico del metal durante el proceso [7].

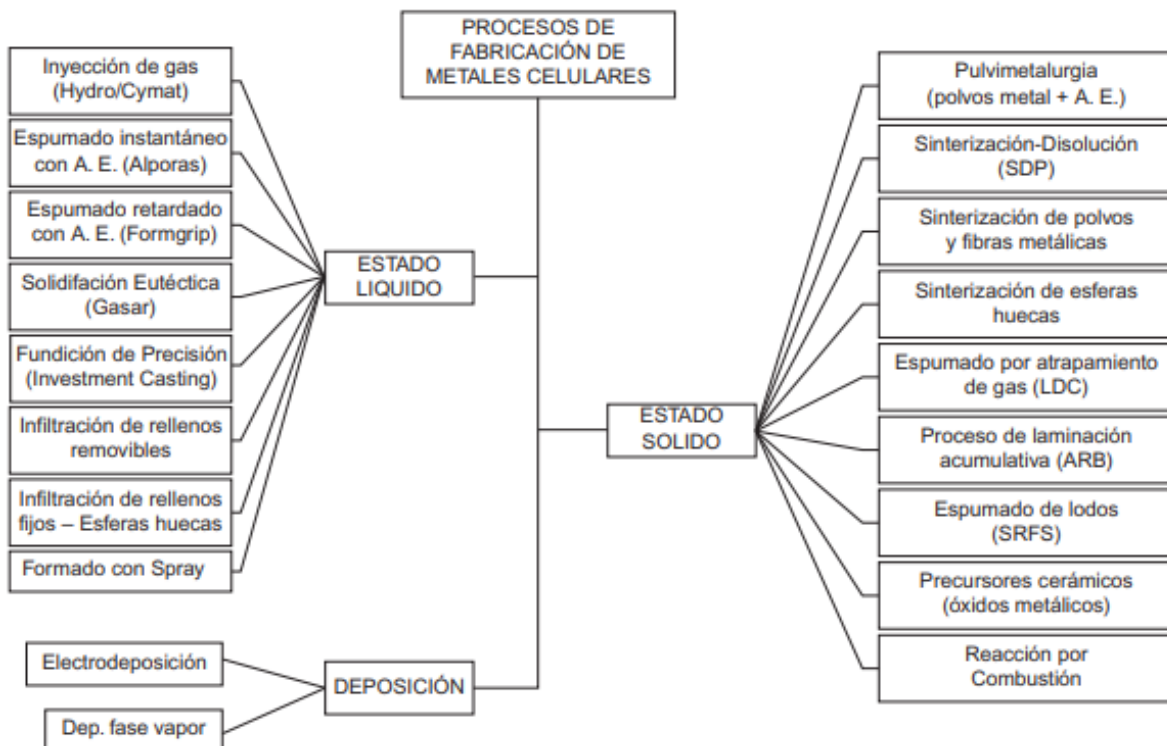


Figura 9. Esquema de métodos de fabricación de espumas metálicas según el estado físico del metal [26].

Normalmente las espumas metálicas de poro abierto son generadas a partir de procesos de polvos metálicos, mientras que para espumas de poro cerrado son a partir de metal fundido [28].

De los distintos procesos de fabricación mencionados anteriormente, solo 5 están establecidos comercialmente, los cuales son: Alporas, Hydro/Alcan, Formgrip, Gasars y Alulight [2]. Las calidades de las espumas difieren según el proceso y el material del cual estén conformadas, hoy en día los rangos de precio pueden variar de los \$7 a los \$12,000 USD por kg de espuma fabricada. A continuación, se presentan cada uno de los 5 procesos más reconocidos comercialmente, para la fabricación de espumas metálicas [9].

Espuma por inyección de gas (Hydro/Alcan)

Actualmente hay dos líneas de proceso de fabricación de espumas que operan con masas fundidas, una siendo explotada por Cymat (originalmente Alcan) en Canadá e Hydro Aluminium en Noruega para aleaciones de aluminio [2,29]. El proceso comienza por el uso de partículas de carburo de silicio (SiC), óxido de aluminio (Al_2O_3) o magnesio, para modificar la viscosidad de la masa fundida, en términos generales es fundamental mezclar y crear una masa fundida que contenga cualquiera de los componentes anteriormente comentados. El principal problema que enfrenta este tipo de proceso es lograr la humedad y distribución homogénea de las partículas en la masa fundida. Al haberse mezclado los componentes y generado la distribución homogénea deseada, se procede con el soplado de gases, comúnmente aire, nitrógeno o argón. Las espumas que se generan y flotan pueden ser extruidas. Debido al alto contenido de partículas cerámicas, el mecanizado puede ser un problema en el proceso [29]. Además, este proceso se limita a la fabricación de espumas de aluminio con una estructura comúnmente de poro cerrado [30]. Una gran ventaja que tiene este proceso es la capacidad para producir grandes volúmenes a un costo relativamente bajo y baja densidad. Además, las espumas MMC (Matriz metálica) son quizás las menos costosas en comparación con otro tipo de espumas [29]. El esquema del proceso Hydro/Alcan se puede ver en la Figura 10.

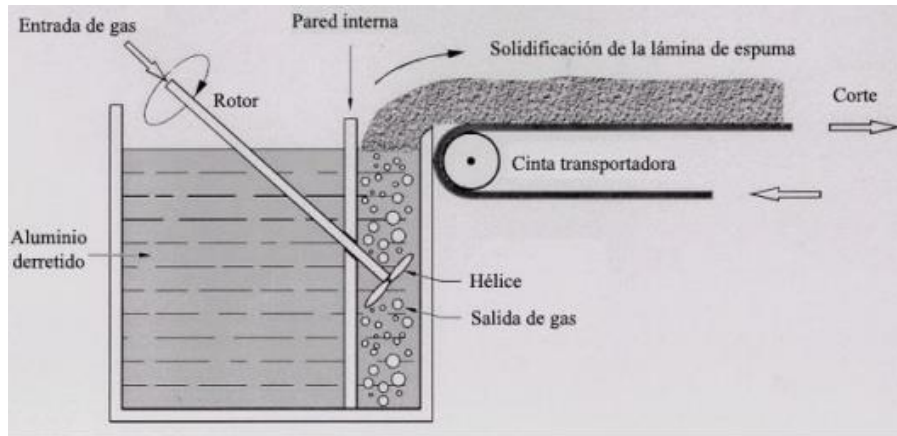


Figura 10. Esquema de la fabricación de espumas mediante inyección de gas [2].

Espuma con agentes liberadores de gas (Alporas)

Una segunda forma de hacer espumas directamente es mediante la adición de un agente espumante en lugar del soplado de un gas. El agente espumante se descompone y libera el gas debido al calor y esto impulsa a la formación de la espuma. La compañía Shinko Wire en Amagasaki Japón ha producido espumas desde 1986 con reportes de volúmenes de producción de hasta 1000 kg por día. En una primera instancia se añade el 1.5% en peso de Calcio a la masa fundida, después la masa fundida es agitada durante varios minutos en donde ocurre un crecimiento de la viscosidad, debido a la formación de compuestos como óxido de calcio (CaO), y aluminio (CaAl_2O_4), o intermetálicos (Al_4Ca) que espesan el metal líquido caliente [2]. Al metal caliente se le adiciona de 1 a 2% de TiH_2 , una vez disperso el TiH_2 se forma una espuma sobre el metal líquido, ya concluido el espumado se enfría el metal para solidificarlo antes de que las burbujas colapsen [30]. Espumas producidas por el método comercial llamado Alporas, son quizás las espumas de aluminio más homogéneas del mercado actualmente [2]. Además, se ha reportado que este material es más caro que las espumas de tipo MMC [29].

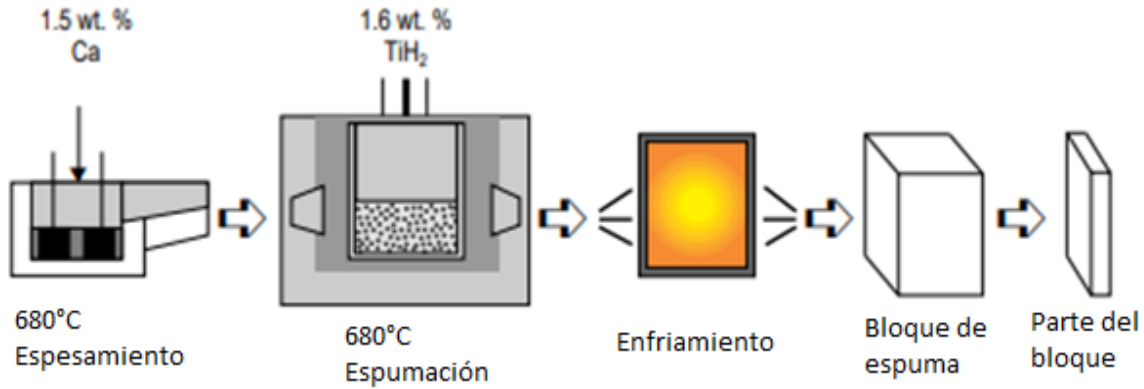


Figura 11. Esquema de fabricación de espumas mediante el proceso Alporas [2].

Solidificación eutéctica de gas sólido (Gasars)

Proceso desarrollado hace algunos años y que aprovecha que algunos metales líquidos forman un sistema eutéctico con el gas hidrogeno. El proceso hace uso del manejo de presiones, y temperaturas para desarrollar y favorecer un sistema heterogéneo de 2 fases [2]. Si estos parámetros de velocidad de enfriamiento y presión son manejados de forma adecuada, el gas se acumulará en finas burbujas en el sólido, formando así la espuma [29]. La distribución y tamaño de los poros no es uniforme debido al crecimiento de poros grandes, pequeños y su coalescencia. [2]

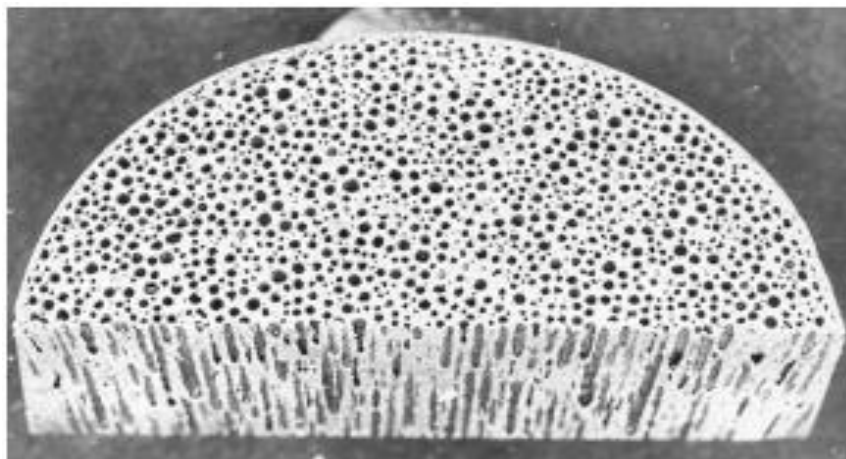


Figura 12. Espuma fabricada por el proceso Gasar, mostrando sus característicos poros alargados [2].

Espuma de polvo compactado (Foaminal/Alulight)

Otro proceso de fabricación de espumas es mediante la utilización de polvos metálicos, el proceso comienza con la mezcla de polvos metálicos que pueden ser de varios tipos, de elementos metálicos, polvos de aleaciones o una mezcla de polvos metálicos, esto siempre con la adición de un agente espumante. Una vez realizada la mezcla es preciso llevar a cabo la compactación, la cual nos dará un producto semiacabado. Es necesario tomar en cuenta que el precursor debe ser tratado de forma especial debido a porosidad residual u algún otro defecto que pueda afectar su posterior procesamiento. El siguiente paso del proceso consiste en la aplicación de un tratamiento térmico a una temperatura cercana al punto de fusión de la matriz del material, el agente espumante adicionado el cual es distribuido homogéneamente se descompone y el gas obliga al material precursor a expandirse, dando paso a la formación de la estructura porosa [2].

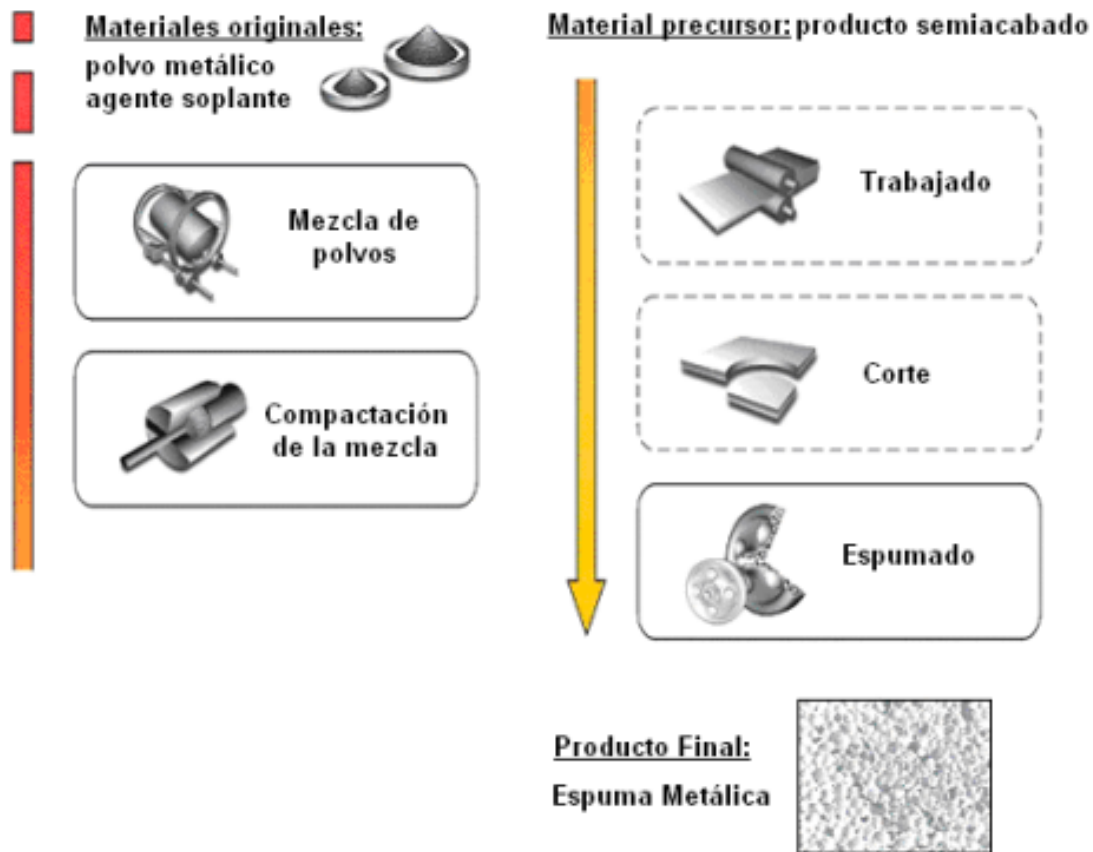


Figura 13. Esquema de la técnica de espumado de compactados de polvo [27].

Proceso Formgrip/Foamcast

El proceso de polvos metálicos compactados ha sido recientemente modificado, añadiendo la aplicación de partículas de TiH_2 directamente sobre la fundición de aluminio. Para evitar la prematura liberación del gas hidrogeno se lleva a cabo un enfriamiento rápido por debajo de la temperatura de fusión o en su lugar llevar a cabo la pasivación del agente espumante antes de que ocurra la solidificación. El proceso permite controlar parámetros de velocidad de calentamiento y temperatura final, lo que se traduce en variedad de estructuras de poros diferentes [2].

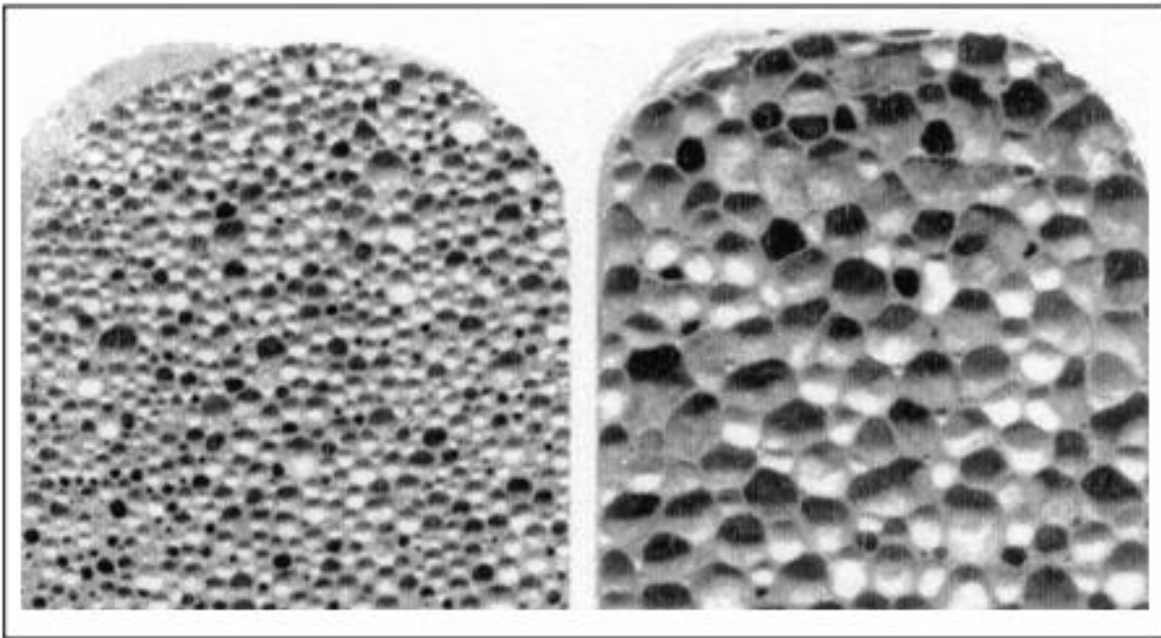


Figura 14. Ejemplos de espumas de Al-Si-C fabricadas por el proceso Formgrip [2].

En la Figura 15 se pueden observar los diferentes tipos de espumas variando su tamaño de celda y su densidad relativa, empleando las técnicas anteriormente mencionadas, como se observa, la técnica de inyección de gas (Hydro/Alcan) conlleva la fabricación de espumas con celdas de mayor escala y estructura de poro cerrada, adicionando agentes espumantes (Alporas) se tienen tamaños de celda de entre 0.1 y 1.0 mm, además también podemos ver que las espumas de poro abierto conllevan valores de densidad más bajos, estas propiedades varían según el

método empleado para llevar a cabo la espumación.

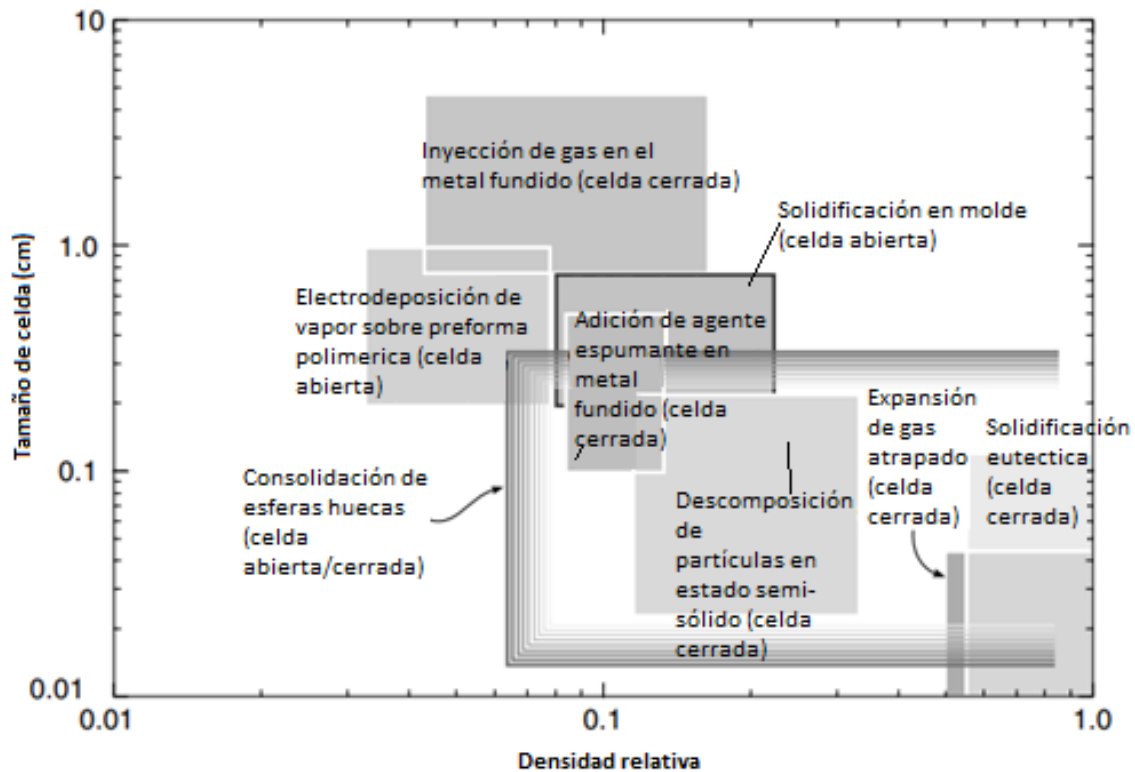


Figura 15. Tamaño de celdas y densidad relativa de espumas mediante diferentes procesos de fabricación [9].

Como se ha visto, las espumas se pueden fabricar sin necesidad de espumar directamente el metal, para este tipo de procesos se emplea el uso de preformas poliméricas o de materiales lixiviables que sean de fácil remoción. Las dificultades que se presentan en este tipo de procesos son sobre el control del llenado de las preformas, el control de la solidificación o la extracción de la esponja del molde sin dañar la estructura [1].

2.6 Proceso de replicación

El proceso de fabricación de espumas por infiltración ha sido desarrollado en gran medida por el Instituto Tecnológico Federal de Suiza (ITFS), este también es conocido como el proceso de replicación (RP), el método consiste en llenar un molde con material orgánico o no, este se sinteriza, dando lugar a una preforma de la espuma, esta es infiltrada por el metal fundido (comúnmente el aluminio), el

material se deja solidificar para finalizar eliminando la preforma mediante disolución o tratamiento térmico. Se han fabricado espumas con porosidades de 60 a 70% y un tamaño de poro de 1 mm, esto usando como material de preforma partículas de sal y sin necesidad de sinterización [31].

Como se puede observar en la Figura 16, el proceso de replicación se puede definir en 3 pasos para la obtención de un material poroso:

- a) Preparación del patrón removible
- b) Infiltración del patrón (seguido de la solidificación)
- c) Remoción del patrón

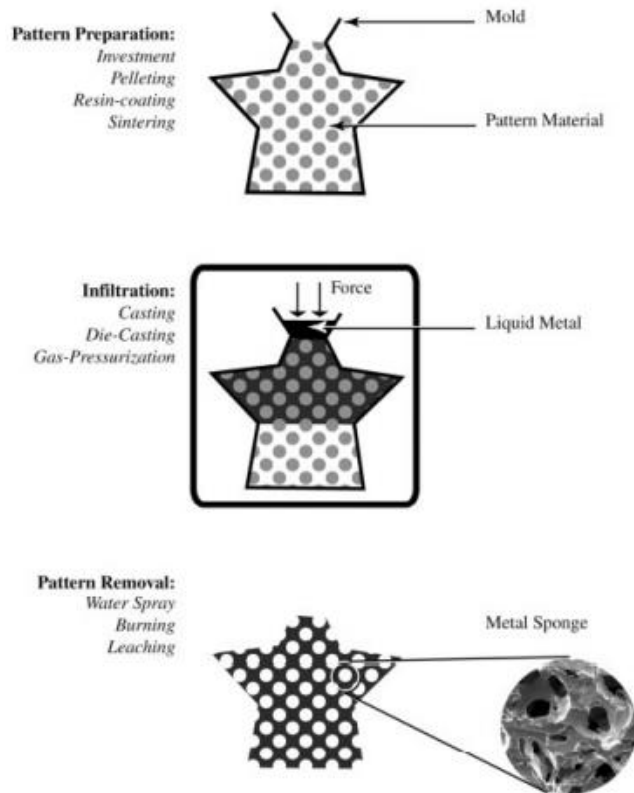


Figura 16. Esquema del método de fabricación de replicación [6].

La técnica de replicación es empleada en situaciones donde la fabricación de las esponjas se puede dificultar por algunos otros procesos. Para llevar a cabo esta metodología es necesario tener un patrón o estructura de poro abierto, siendo esto una diferencia fundamental si comparamos este proceso con los más establecidos

comercialmente. El patrón determina la estructura de la esponja, se ha documentado la obtención de esponjas con porosidades del 55% hasta el 98%, lográndose tamaños de poro de hasta 10 micras [6].

Esta técnica ha sido empleada para fabricar esponjas de aleación Ti-6Al-4V, utilizando poliuretano como material de la preforma y sumergiendo la espuma sobre la suspensión de la aleación con agua y amoníaco. Se descubrió que la aleación porosa fabricada poseía una porosidad del 88% y una resistencia a la compresión de 10 MPa [32].

2.6.1 Preparación del patrón

Hay diversos factores que influyen positivamente sobre la preparación del patrón, la elección del tipo de material determina el tipo de arquitectura que se puede producir. En la actualidad hay 4 tipos de material patrón:

- Refractarios (continuos)
- Refractarios discontinuos (arenas de fundición granuladas)
- Quemables (resinas, poliestireno)
- Lixiviable (cloruro de sodio-NaCl)

El material de tipo refractario es el que más se emplea para la obtención de esponjas metálicas de baja densidad por el método de replicación, debido a la capacidad que tiene para soportar las altas temperaturas del metal fundido, el poliuretano es otro material que posee propiedades variadas en términos de porosidad y que además puede quemarse en el aire. En general, el material que se aplique debe ser de fácil remoción, sin dañar la arquitectura de la esponja.

Otro tipo de material utilizado son los refractarios discontinuos (arenas de fundición granuladas), al emplear este método se mezclan las arenas de fundición con un aglutinante orgánico para formar aglomerados que servirán como relleno del molde del patrón. En principio las arenas de fundición granuladas pueden emplearse con cualquier aleación moldeable en arena. Algunos de los materiales más inusuales son el poliestireno y las resinas, aunque tengan un patrón de fácil remoción (patrón quemable), las esferas de poliestireno se recubren con resina y se rellena el molde

de la esponja antes de que esta endurezca, la resina forma la red conectada de esferas, al ser un material quemable, este material cuenta con la ventaja de que la eliminación del patrón viene implícita en el proceso, la desventaja es que se emplea fundamentalmente en metales o aleaciones con bajo punto de fusión como Al, Mg y Zn, esto debido a que al darse la infiltración se puede quemar el patrón, por tanto, la infiltración deberá llevarse a cabo en frío.

Con respecto al material lixiviable, el patrón se remueve por efecto de la disolución aplicando un disolvente adecuado. Los patrones de material lixiviable se crean a partir de los polvos o gránulos, por lo que la densidad depende del tamaño y distribución de estos gránulos o polvos.

Los patrones de cloruro de sodio (NaCl), patentados desde 1960 [33] son uno de los materiales lixiviables más usados para la fabricación de patrones en esponjas metálicas, siendo un material barato y de fácil manejo. Dentro de las ventajas importantes del empleo del cloruro de sodio (NaCl) en la fabricación de los patrones es la posibilidad de aplicar el método de sinterización, lo que mejora la conectividad de la sal, cambia la estructura del patrón y crea una preforma que puede manipularse y posteriormente infiltrarse. Aunque la sinterización no siempre es necesaria, debido a que los granos tienen una unión transitoria, ya sea durante el precalentamiento, antes o durante la infiltración, esto debido a la humedad del cloruro de sodio. Una desventaja que presenta el uso de la sal en patrones es que, durante la disolución se pueden formar soluciones salinas concentradas que afectan a la corrosividad de algunas aleaciones [6].

Elizondo Luna y colaboradores [34] presentaron un protocolo para la fabricación de espumas de aluminio de celda abierta empleando el método de replicación, en su trabajo muestran las distintas espumas fabricadas empleando ambas morfologías de los granos de cloruro de sodio angulares a) y esféricas b)), como se puede ver en la Figura 17, ellos encontraron que el uso de las diferentes morfologías no genera un gran cambio en la porosidad de las espumas.

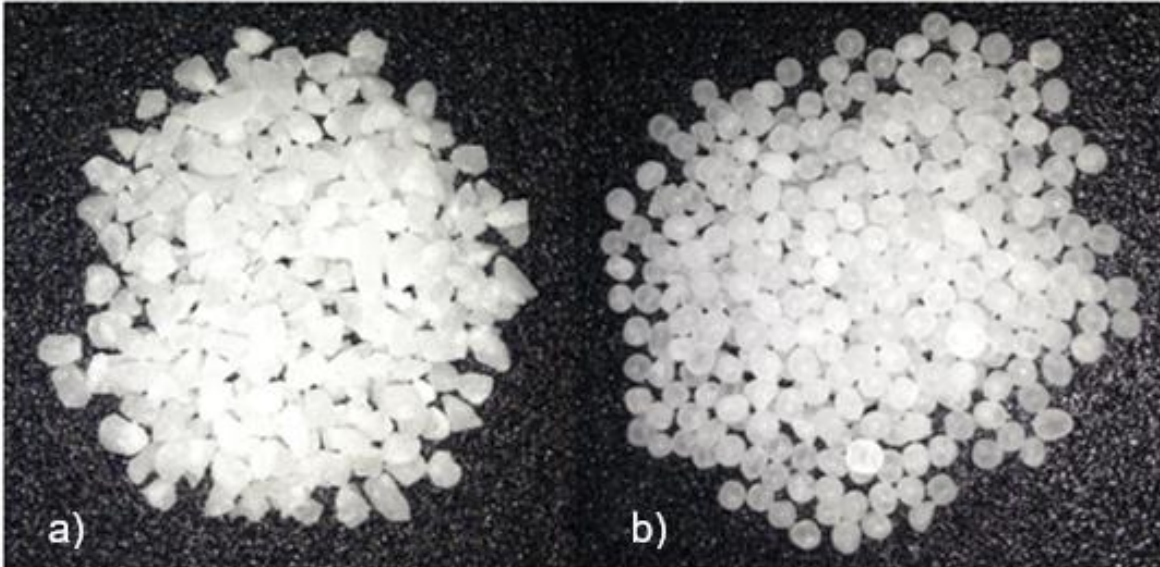


Figura 17. Morfología de granos de NaCl (a) angular; (b) esférica [34].

2.6.2 Sinterización

Este proceso confiere a una masa de polvos aglomerados propiedades físicas y mecánicas deseadas. Se trata de un proceso de fabricación de piezas con formas particulares y características, tanto estructurales como físicas, imposibles de otorgar a través de otro proceso metalúrgico. El proceso consiste en compactar una mezcla de polvos y calentarla, esto con el fin de formar una unión estructural interna, el proceso se caracteriza porque la temperatura permanece por debajo de la temperatura de fusión del elemento principal llamado sinterización. Además, se trata de un proceso económico con mínimas pérdidas de material en comparación con otros métodos donde pueden llegar a haber pérdidas del 50% del material [35].

Este proceso permite que los polvos compactados se conviertan en el producto final con textura y propiedades determinadas, por lo que la sinterización influye mucho en las características del producto final [36]. La Figura 18 ejemplifica el proceso de sinterización y la unión de los polvos compactos, donde inicialmente los polvos no están unidos, una vez expuestos los polvos a un tratamiento térmico o altas temperaturas, estos proceden a unirse generando puentes de unión.



Figura 18. Proceso de sinterización y unión de polvos compactos [36].

Se recomienda el empleo de la sal (NaCl) en la fabricación de preformas de espumas metálicas de poro abierto, debido a la flexibilidad en el control de parámetros durante la sinterización, como lo son el tamaño de partícula, temperatura, atmosfera, tensiones residuales y tiempo [6].

2.6.3 Atomización

La atomización es un método dominante en la producción de metales y polvos prealeados, esta tecnología de atomización es resultado de constantes avances a partir de la primera producción a escala de polvos de hierro atomizados en la segunda guerra mundial. Actualmente la capacidad de atomización de polvos metálicos a nivel mundial supera las 106 toneladas métricas por año [37]. Es un método muy versátil y popular para producir polvos metálicos, siendo aplicable para la mayoría de las aleaciones o metales puros. La atomización se puede definir como la conversión de una fundición metálica en gotas que solidifican formando polvos, esto mediante la aplicación de un flujo a cierta velocidad (agua o aire) [38-39]. Es común que se obtengan partículas de forma esférica empleando la atomización por gas o aire (Figura 19a), mientras que con la atomización por agua se obtienen partículas irregulares (Figura 19b).

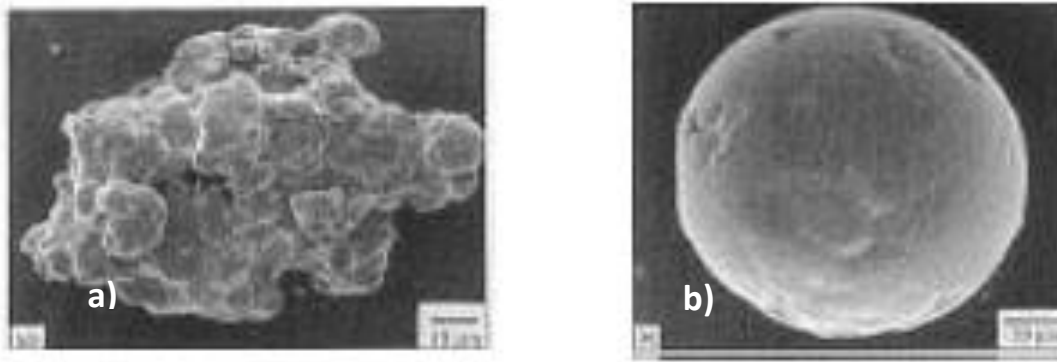


Figura 19. (a) Partícula obtenida a partir de atomización por agua; (b) Partícula obtenida a partir de gas [36].

El principio se basa en que, a mayor velocidad, menor tamaño de partícula, además algunas de sus aplicaciones son en la producción de hierro atomizado para la fabricación de aceros, cobre atomizado como aleante de aceros, etc., [40]. En la Figura 20 se pueden observar esquemas de proceso de atomización por gas.

Los polvos metálicos producidos por atomización son normalmente de un tamaño menor a las 150 μm , aunque también se pueden producir partículas de mayor tamaño, en esos casos la atomización se conoce como "granulación". Las principales características que poseen estos polvos en comparación con polvos producidos por otros métodos como electrolisis o precipitación son su forma y densidad, además de tener un buen flujo y una buena compresibilidad [37].

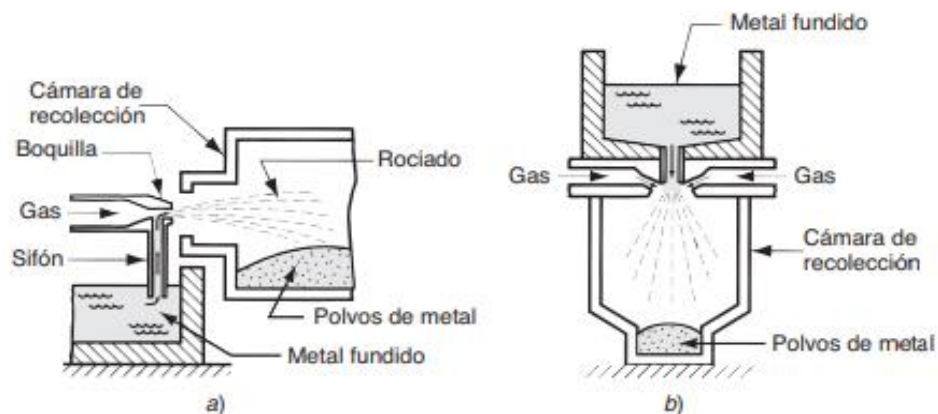


Figura 20. Métodos de atomización por gas [38].

2.6.4 Infiltración

La presión necesaria para iniciar la infiltración (presión umbral) no ha sido un rubro muy explorado por investigadores en el proceso de replicación, esta presión umbral ha sido abordada en infiltraciones de lechos cerámicos con aluminio. La presión específica necesaria para dar la infiltración depende del tamaño de los poros y su fracción de volumen. Idealmente, es preferible la infiltración por el efecto de la gravedad, ya que esta no requiere de equipos o procedimientos especiales, pero en la mayoría de las veces no se da una buena infiltración de la fundición sobre el patrón de la esponja, por lo tanto, se debe aplicar alguna fuerza externa para promover la infiltración y llevar a cabo una distribución uniforme del metal fundido sobre el patrón. Cuando el material empleado para las preformas es poroso y se aplica una presión alta, se provocará que el espacio entre los granos sea infiltrado, de modo que no pueda ser removido. De igual forma con patrones fabricados a partir de materiales granulados, en la regiones cercanas a los contactos de los granos no se infiltrarán si la presión de infiltración es baja, por tanto, es importante tener un control de la infiltración para asegurar una distribución uniforme del metal sobre la preforma [6]. En la Figura 21 se puede observar un ejemplo del proceso de infiltración, empleando una preforma de sal y aplicando una infiltración a presión con gas argón (Ar).

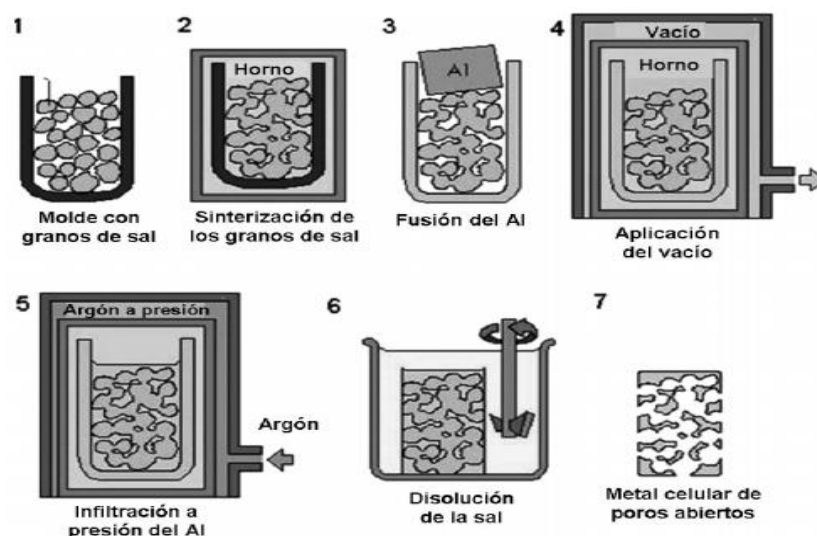


Figura 21. Infiltración de metal fundido en molde soluble [31].

2.6.5 Infiltración centrífuga

En procesos de infiltración es común aplicar alta presión directamente al metal fundido, sin embargo, también se tiene la posibilidad de generar una buena presión en el metal fundido mediante fuerza centrífuga [15].

La fundición centrífuga consiste en el llenado de moldes con fundición, los cuales son girados sobre un eje horizontal o vertical antes de que se solidifique el metal. La gran mayoría de los artículos relacionados con la fuerza centrífuga hacen referencia a la segregación de partículas en el metal fundido durante la solidificación [16].

En 1998, Nishida y Ohira [15] plantearon de forma teórica la cinética de infiltración de aluminio fundido en preformas fibrosas de alúmina por acción de la fuerza centrífuga, en su investigación ellos plantean 3 casos de infiltración centrífuga, como se puede observar en la Figura 22, donde obtienen la relación entre la localización del frente de infiltración y el tiempo, además de curva de la distribución de la presión en las preformas. Ellos compararon sus resultados teóricos con pruebas experimentales, demostrando que su análisis es útil para comprender la infiltración en la fundición centrífuga.

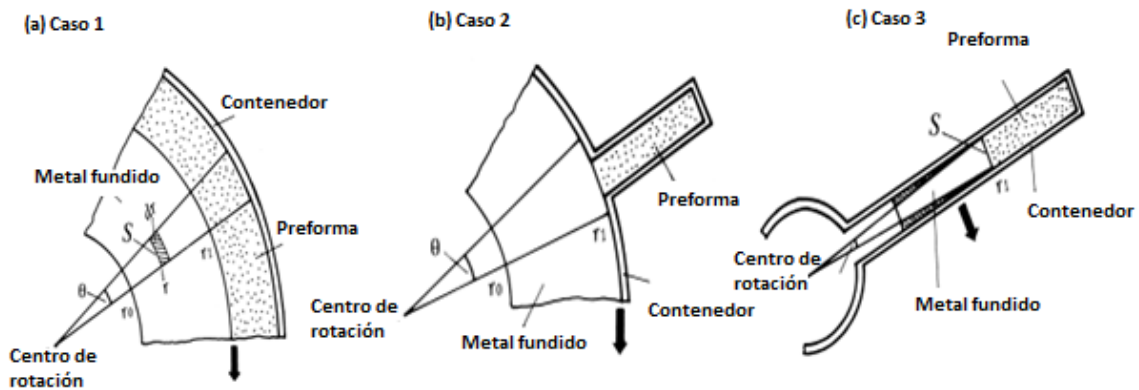


Figura 22. 3 casos de infiltración de metal fundido por fuerza centrífuga [15].

2.6.6 Remoción del patrón

Para la remoción del patrón de las esponjas metálicas es necesario conocer las características del patrón, algunos casos de patrones fabricados a partir de polvos cerámicos son removidos mediante agua, siendo posible utilizar el agua para algunas esponjas, sin embargo, para esponjas relativamente finas (<1mm) y densas (>10%) no es tan recomendable el uso del agua. Una alternativa puede ser el uso de vibraciones ultrasónicas. Respecto a patrones de polímero se eliminan mediante quema, estos patrones tienen la ventaja de poder emplear el mecanizado en las esponjas antes de remover el patrón sin dañar la estructura de la esponja. En los patrones lixiviables también se puede realizar mecanizado antes de la lixiviación y sin dañar la estructura. En el caso del cloruro de sodio (NaCl) se suele realizar inmersiones en agua [6].

Métodos de limpieza en piezas como el ultrasonido son tecnologías nuevas más eficaces y que otorgan una mayor productividad, el método funciona a partir de ondas longitudinales de alta frecuencia producidas en el líquido donde es sumergida la pieza, generando fuerzas de tensión que rompen con los enlaces alojados en la superficie de las piezas. El proceso garantiza la eliminación de rastros de suciedad incluso en zonas de difícil acceso, quedando disueltas en el fluido. La limpieza con ultrasonido tiene un gran abanico de aplicaciones en distintos sectores como el automotriz, aeronáutica, farmacéutica, quirúrgica, herramientas, etc., [41].

En la actualidad hay una gran variedad de marcas que ofrecen estos aparatos para llevar a cabo el lavado ultrasónico de diversas piezas complejas, en la Figura 23 se muestra un aparato de lavado ultrasónico de la marca RFS equipment.



Figura 23. Máquina de limpieza por ultrasonido de 3.2 L - US003 [42].

2.7 Caracterización

La caracterización estructural de las espumas depende de la tipología celular, si son espumas de celda abierta o cerrada, el tamaño y la forma de las celdas, su densidad y anisotropía. Para caracterizar espumas metálicas es necesario tomar consideraciones especiales, como pueden ser los módulos en pruebas mecánicas donde se depende de la relación entre el tamaño de la muestra y el tamaño de las celdas, además de otros factores como la superficie, lo que demuestra la necesidad de obtener muestras de al menos 7 celdas por diámetro en cada dimensión y una preparación de superficie adecuada. La densidad en las espumas se mide de mejor forma pesando una muestra de volumen conocido. Sin embargo, en espumas con estructura irregular resulta difícil la medición del volumen, en estos casos la densidad de espumas puede determinarse empleando el principio de Arquímedes, es decir, midiendo su flotabilidad en una superficie líquida de densidad conocida, si las muestras a caracterizar no tienen una estructura de poro cerrado, se deberá aplicar una capa de polímero para evitar la penetración del líquido en los poros. Otras propiedades requieren de la microscopía óptica o electrónica [1,43].

Otra propiedad fundamental que define a las espumas metálicas al momento de fabricarlas es la densidad relativa (ρ/ρ_0), que se puede definir como la relación entre la densidad de la espuma (ρ), y la densidad del metal precursor (ρ_0), de esta manera se puede definir la proporción del metal sólido frente al volumen total. Además de esta propiedad, la porosidad (%P) es otra propiedad que tiene gran influencia sobre las propiedades mecánicas de las espumas, esta define la proporción de los poros con respecto al volumen total de la espuma [28].

$$p = \left[1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right] * 100 \quad (Ec. 1)$$

La estructura de las espumas metálicas se puede examinar mediante 3 métodos:

- Microscopía óptica

- Microscopia electrónica de barrido
- Tomografía por rayos-X

La microscopia óptica es útil para caracterizar espumas siempre que las espumas se encuentren impregnadas de un epoxi opaco antes del pulido. Para esto se sumerge la espuma en un termoestable de baja viscosidad y con un colorante (recomendable negro o azul), se coloca en una cámara de vacío para desgasificar y proceder con la presurización para garantizar la penetración de polímero en las celdas. Además de este proceso, el pulido convencional proporciona secciones confiables para llevar a cabo la microscopia óptica [9]. En la Figura 24 se muestra una micrografía óptica de una sección pulida de una espuma de aluminio fabricada por el proceso Alcan.

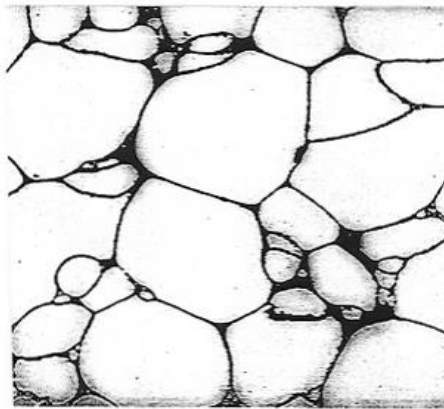


Figura 24. Micrografía óptica de muestra pulida de espuma de aluminio [9].

La microscopia electrónica de barrido (SEM) es sencilla, la única precaución a tomar en cuenta es sobre la preparación de la superficie, además es recomendable aplicar este método de caracterización a espumas de celda abierta, mientras que para espumas de celda cerrada se recomienda mejor la microscopia óptica. Mediante este método se pueden obtener imágenes de alta resolución sobre la estructura de la espuma, además de realizar análisis espectrográficos de la composición de la muestra [9,43].

La tomografía por rayos-X (radiografía de transmisión) es otra técnica empleada para mapear espumas y materiales celulares, en este un haz de rayos-X es dirigido

a través de una probeta de muestra, midiendo la atenuación, que está relacionada con la masa total de la muestra, de esta manera si se obtienen muestra de espumas con espesor delgado es más factible realizar el mapeo de la morfología de los poros. Esta forma de escaneo permite obtener un mapeo de la muestra en 2D, como se puede observar en la Figura 25, donde se ha realizado una radiografía por rayos-X a una muestra de espuma de plomo [1].

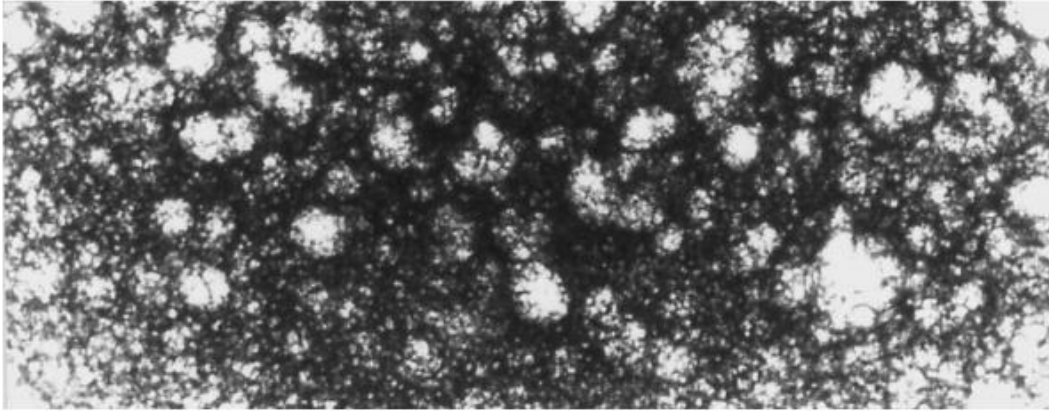


Figura 25. Imagen de una espuma de plomo obtenida por radiografía de transmisión de rayos X [1].

2.8 Propiedades mecánicas

La propiedad más importante de las espumas metálicas es su absorción de energía, esta mantiene una gran relación con la variación de la densidad o la estructura del poro. Los ensayos de compresión son muy habituales en este tipo de materiales, y estos presentan un curva esfuerzo-deformación como se observa en la Figura 26, a partir de la cual se pueden obtener parámetros importantes sobre las espumas como lo son la fuerza de fluencia o cedencia, el módulo elástico, la carga de rotura, la absorción de energía y la meseta de rendimiento o curva de Plateau, estos parámetros evalúan mecánicamente a las espumas, de esta forma se puede determinar la deformación de las espumas, el nivel de estiramiento y la ductilidad del material [26].

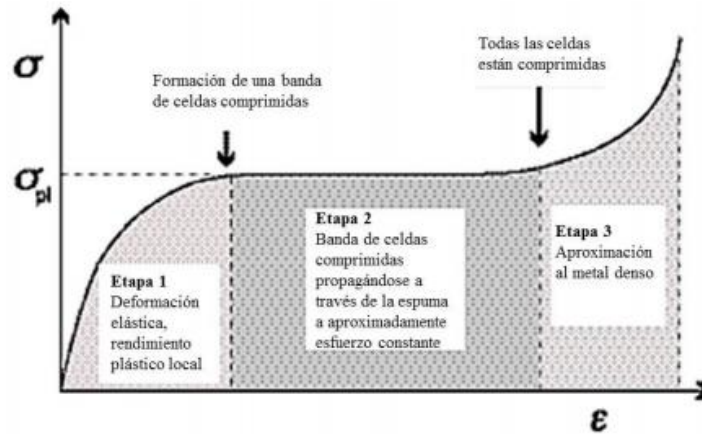


Figura 26. Etapas de curva esfuerzo-deformación obtenida a partir de ensayo de compresión [26].

Hay 3 regiones características de estas curvas esfuerzo-deformación:

Etapa 1: Aplicando una carga de compresión a pequeñas deformaciones provoca la flexión de las paredes de las celdas (deformación elástica). Después se alcanza la deformación plástica cuando la carga en las paredes supera el límite elástico ($\sigma_{y,s}$) del sólido, dando una deformación irreversible.

Etapa 2: En esta región se da el inicio de la meseta de deformación, donde al incrementar la carga se origina un efecto de pandeo en las paredes o zonas más débiles de las espumas, se da la formación de una banda de deformación perpendicular a la dirección de la carga, provocando un colapso en las celdas de la espuma. Pueden darse varios tipos de meseta, siendo como una pendiente, o con pequeñas ondulaciones, según la estructura y las propiedades del sólido.

Etapa 3: Una vez dado el colapso de las celdas, hay un incremento en el esfuerzo o carga a partir de una determinada deformación, a esta región se le conoce como densificación [47]. El área por debajo de la curva esfuerzo-deflexión nos brinda información sobre la absorción de energía para llevar a cabo una deformación plástica en la espuma, este factor es de importancia si interesa conocer la absorción de energía del material en impactos. Esta energía también depende de la densidad, ya que para absorber energías de impactos se requieren densidades intermedias, ni altas ni bajas [26].

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las espumas metálicas comprenden una nueva clase de material que posee características particulares como su relación resistencia-peso, su absorción de energía a impactos, su control acústico, inflamabilidad y demás propiedades que las han dotado de una gran importancia para la mayoría de las industrias, destacando principalmente en la industria automotriz, industrial y de construcción. Además de ser un material reciclable debido a su característica porosidad que permite realizar refundiciones en comparación con otro tipo de materiales metálicos, funcionales y estructurales. Algunos estudios mercadológicos analizan el crecimiento del mercado de las espumas metálicas con una tasa de crecimiento anual del 4.7%, esperando para 2027 un valor global de mercado de 96.5 millones de USD [44]. Aunque existen diferentes procesos de fabricación de espumas y algunos ya están establecidos comercialmente, aún hay campo para desarrollar distintas técnicas controlando los parámetros de proceso, de esta forma se pueden obtener espumas metálicas con propiedades particulares que ayuden a incrementar el campo de aplicaciones.

4. JUSTIFICACIÓN

Las aplicaciones y propiedades de las espumas metálicas lo convierten en un material de interés para las diferentes industrias, su creciente demanda lo expone como un material valioso en la actualidad y a futuro, los procesos de obtención ya establecidos hacen posible el manejo de diferentes metodologías para obtener distintas espumas metálicas, diferenciándose en sus propiedades morfológicas, mecánicas y de aleación. Es hasta tiempo recientes que investigadores han centrado la fabricación de espumas metálicas empleando aleaciones Zn-Al debido a una importante característica de superplasticidad, que permite obtener mayores deformaciones más allá de su punto de ruptura normal.

El control en los parámetros de estos procesos permite obtener espumas con propiedades específicas y morfología controlada, de esta manera se establecen parámetros de proceso para reproducir un producto que tenga buenas propiedades y sea funcional en las distintas aplicaciones.

5. HIPÓTESIS

El método de replicación, empleando infiltración centrífuga puede ser empleado para la fabricación de espumas metálicas de aleación "58%Zn-2%Cu-40%Al", utilizando preformas lixiviables de NaCl y controlando parámetros del proceso como tiempo de infiltración y rpm en la maquina centrifugadora.

Las espumas metálicas fabricadas tendrán propiedades morfológicas y mecánicas para ser empleadas en distintas aplicaciones funcionales.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivos generales

Fabricar espumas metálicas de poro abierto de aleación "58%Zn-2%Cu-40%Al" empleando el método de replicación e infiltración centrífuga, variando los parámetros del proceso.

6.2 Objetivos específicos

- ✓ Establecer parámetros de proceso para lograr la fabricación de espumas metálicas de poro abierto de aleación "58%Zn-2%Cu-40%Al".
- ✓ Analizar la morfología a partir de microscopia óptica.
- ✓ Determinar propiedades mecánicas de las espumas a partir de un ensayo de compresión.

7. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se muestra el proceso de fabricación de espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al, las cuales fueron caracterizadas y ensayadas para analizar su morfología y sus propiedades mecánicas.

Para llevar a cabo la fabricación de las esponjas primero se realizó la elaboración de la aleación de 58%Zn-2%Cu-40%Al, para ello fue necesario realizar cálculos de carga que nos dictaran la necesidad de cada elemento para cumplir con los porcentajes de la aleación, una vez obtenidos estos datos de carga se procedió a fundir, logrando de esta manera la aleación con composición deseada de la cual serán fabricadas las esponjas. Se empleó el método de replicación que consta de 3 etapas: (1) la preparación de la preforma, la cual en este trabajo es fabricada a partir de material lixiviable "Cloruro de Sodio" (NaCl) con diferente tamaño de esferas: 1000 μm , 710 μm y 500 μm , (2) proceso de infiltración, que consiste en la penetración de la fundición sobre la preforma de la espuma, la técnica de infiltración empleada en este trabajo es mediante acción de la aceleración centrífuga y (3) la disolución de la preforma, mediante un lavado con ultrasonido. Las espumas obtenidas fueron posteriormente maquinadas y caracterizadas mediante microscopia óptica para analizar su morfología (estructura, escala y cantidad de poros, etc.).

Desarrollo experimental

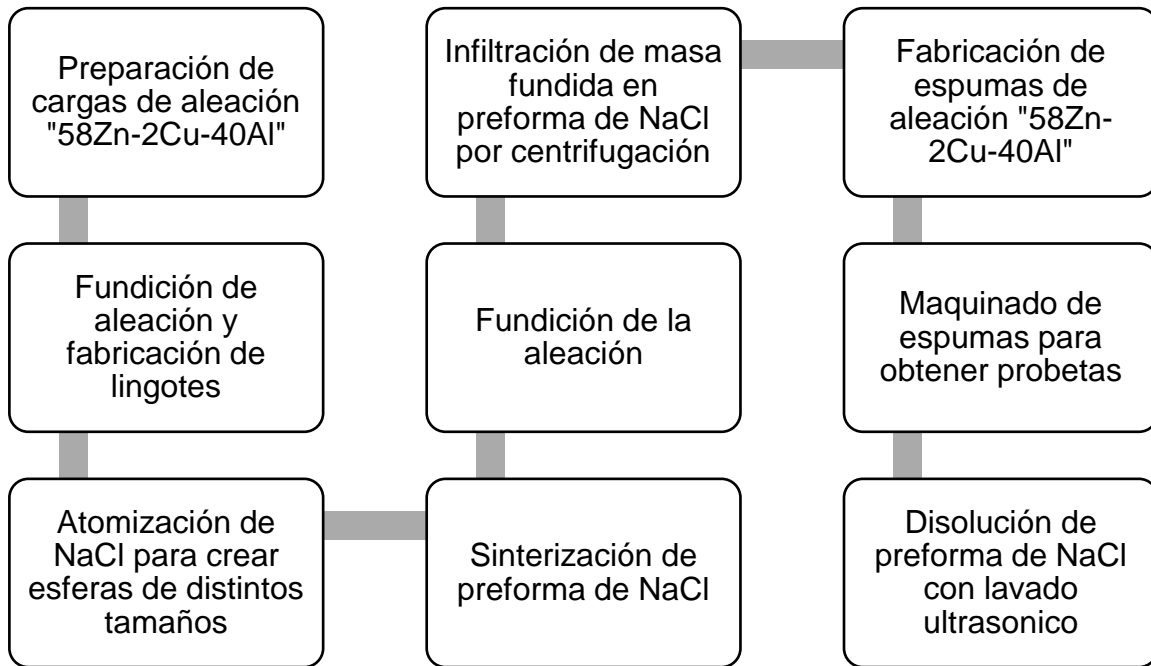


Figura 27. Diagrama de proceso de la fabricación de espumas de aleación por el método de replicación.

7.1 Preparación de la aleación 58Zn-2Cu-40Al

7.1.1 Cálculo de carga

Se realizaron cálculos de carga para preparar la aleación con composición 58%Zn-2%Cu-40%Al de la cual serán compuestas las espumas a realizar, para esto se midieron las longitudes de diámetro y altura de los moldes de acero cilíndricos, además como se puede ver en el Cuadro 2 se utilizaron datos correspondientes a la densidad de cada uno de los elementos implicados en la aleación (Zn-Cu-Al). Las mediciones de altura y diámetro del molde son fundamentales para determinar los valores de área y volumen del molde, que a su vez corresponderán a los valores de las espumas. Los cálculos de carga se realizaron en el programa Excel, se pueden ver las plantillas del Excel en los anexos (Figura 32).

Cuadro 2. Datos de moldes para cálculo de carga.

DATOS DEL MOLDE	
Diámetro (cm)	6.7
Atura (cm)	5
Área (cm²)	35.26
Volumen (cm³)	176.28
DENSIDADES	
Zn (g/cm³)	7.14
Cu (g/cm³)	8.96
Al (g/cm³)	2.6989

Una vez obtenido el volumen total que comprenderá a la espuma, se determinan los valores de volumen que corresponderán a cada porcentaje de elemento en la aleación, así como la cantidad en masa que corresponde a ese porcentaje volumétrico. Ya que se tienen estos valores de masa de cada elemento, lo siguiente es realizar el balance para ajustar ese peso a la composición inicial deseada, las ecuaciones 2, 3 y 4 en los anexos ejemplifican estos pasos realizados en el cálculo, el Cuadro 3 muestra los resultados del cálculo de carga de la necesidad de cada elemento para llevar a cabo la aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al.

Cuadro 3. Necesidad de cada elemento para elaborar la aleación.

Aleación 58Zn-2Cu-40Al	Para 1 esponja	Para 2 esponjas
Zn (kg)	552.11	1104.23
Cu (kg)	19.04	38.08
Al (kg)	380.77	761.54

7.1.2 Fundición

La fundición de la aleación se llevó a cabo en un horno de resistencia eléctrica, el cual tiene adaptado un termopar tipo K que mide la temperatura de la resistencia en el horno, además se empleó el uso de otro termopar tipo K marca EMKO, el cual ayuda a medir la temperatura en la carga metálica, de esta forma se asegura un mayor control en las temperaturas de fusión. Se Introdujeron en el crisol las cargas correspondientes para 2 esponjas, primero el aluminio (Al) junto con el cinc (Zn) ya que estas corresponden la mayoría de la aleación y, por tanto, necesitan un mayor

tiempo de fusión que el cobre (Cu), el cual es puesto cerca del horno para generar un precalentamiento en el metal y sea más fácil su fusión, teniendo especial cuidado en las temperaturas de solubilización de cada elemento, ya que si dejamos elevar las temperaturas podemos generar perdidas por oxidación, estas temperaturas de solubilización fueron previstas con ayuda de diagramas de fases de aleación de Al-Cu-Zn (Anexos, Figura 33 y 34), la fundición se llevó a cabo durante un tiempo aproximado de 45 minutos, con una temperatura en la resistencia de 650°C y una temperatura en la carga de 654°C.

7.2 Atomización

La atomización del cloruro de sodio (NaCl) se llevó a cabo utilizando el principio de inyección de aire a presión, la Figura 28 ejemplifica el principio de atomización empleado durante este trabajo, sin embargo, para el proceso se adaptó a una estructura que ayuda a recuperar las esferas de sal atomizadas (Figura 29). Primero se procedió a fundir una carga de sal grado técnico en un crisol de carburo de silicio (SiC) dentro de un horno de resistencia eléctrica, la sal está en continua observación ya que antes de fundirse, esta se pasa a un estado pastoso, la temperatura de fundición fue de 800°C durante un tiempo de 40 minutos aproximadamente. Ya que observamos que la sal estaba completamente fundida el siguiente paso consta en vaciar la sal fundida por efecto de la gravedad en dirección perpendicular a la estructura montada para recuperar las esferas de sal, y dispararle el aire a presión con ayuda del compresor, el cual fue regulado para generar una presión de salida de 100 psi.

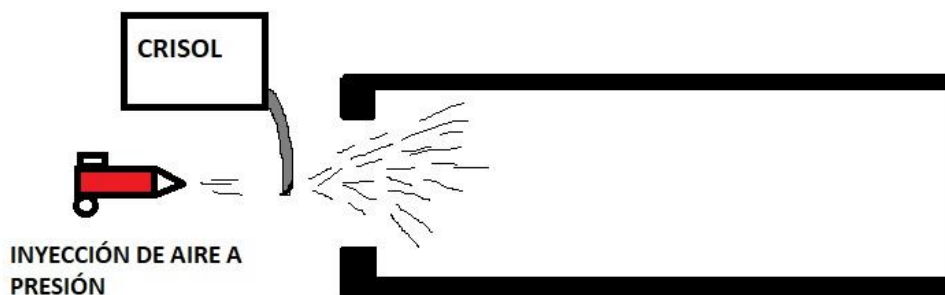


Figura 28. Esquema de proceso de atomización.



Figura 29. Estructura para la atomización del NaCl.

Una vez recuperadas las partículas de cloruros de sodio de la estructura, estas fueron tamizadas en un Ro-tap durante un tiempo de 5 minutos y fueron clasificadas en 5 grupos de tamaño distinto: 1mm, 710 μm , 500 μm , 355 μm , 250 μm y -250 μm , para la fabricación de las esponjas se pretendió utilizar un tamaño de poro correspondiente a 3 tamaños, 1 mm, 710 μm y 500 μm , por lo tanto, los tamaños de poro para las esponjas fabricadas fueron de 1 mm, 0.71 mm y 0.50 mm.

7.3 Sinterización e infiltración

Se prepararon los moldes de acero cilíndrico los cuales servirán para fabricar las espumas, a estos moldes se les dio un acabado en el interior con ayuda de un esmeril DREMEL, este acabado ayudó a eliminar cordones de soldadura o imperfecciones en el molde que compliquen la extracción de la esponja del molde o la penetración de la fundición sobre la preforma de cloruro de sodio, alterando su estructura original o dañándola, además también se le aplicó una cubierta de pasta de grafito en el interior de los moldes para facilitar la extracción y desmolde de las espumas. Una vez preparada la superficie de los moldes de acero, estos se proceden a pesar en una báscula digital, con la cantidad de partículas de sal y la

cantidad de la aleación a emplear para fabricar las espumas, durante las pruebas realizadas se usó un promedio de 90 gramos por espuma, mientras que el peso de la carga metálica optimo oscilo entre los 400 y 500 gramos. Estos pesos son importantes ya que, para llevar a cabo la infiltración centrifuga es necesario balancear el peso del molde y la carga en la máquina, cuando el peso no está distribuido de manera igual habrá desbalance y, por tanto, no habrá una buena distribución de la masa fundida sobre la preforma. La sinterización de la preforma de NaCl se llevó a cabo en un horno mufla de alta temperatura, el cual fue programado para llevar a cabo un control de temperatura en rampa consistente en 3 niveles, 100°C, 500°C, hasta llegar a la temperatura de sinterización deseada de 650°C, durante 1 hora. De manera simultánea mientras se llevaba a cabo la sinterización también se procedían a fundir los lingotes de nuestra aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al en el horno de resistencia eléctrica, a una temperatura del horno de 650°C, y una temperatura de vaciado entre los 700 y 720°C, tratando de empatar los tiempos de fundición con los de sinterización. Una vez alcanzado el tiempo de sinterización se procedía a vaciar la carga metálica sobre la preforma sinterizada, es importante tener en cuenta la presencia de escoria o impurezas que puedan afectar a la infiltración, por lo tanto, antes de vaciar se procede a limpiar el molde de sinterización, así como la fundición de la aleación. Ya vaciado el metal fundido sobre la preforma, el molde se montó sobre el rotor angular de aceleración centrifuga y se procedió a encender la máquina, regulando las rpm, los giros del molde y el tiempo. Para la fabricación de las espumas metálicas se empleó una velocidad rotacional máxima de 191 rpm y el molde se giró entre 2 y 4 veces 180° para asegura una mayor penetración de la masa fundida en la preforma, los tiempos de centrifugado no sobrepasaron de 5 minutos.



Figura 30. Introducción del molde de la espuma en la mufla.



Figura 31. Máquina de aceleración centrífuga.

7.4 Fabricación de las probetas

Una vez obtenidas las esponjas originales del molde cilíndrico, estas fueron cortadas con ayuda de una fresadora de banco a la cual se le acopló una broca especial de $\frac{3}{4}$ de pulgada para obtener probetas con un tamaño de 20 mm de alto y 20 mm de ancho.



Figura 32. Fabricación de probetas.

7.5 Remoción de la preforma de NaCl

Una vez que se tenían las probetas de las espumas metálicas, estas fueron dispuestas a un proceso de lavado ultrasónico para remover la preforma de NaCl del interior de las espumas, durante un tiempo total de 25 minutos.

7.6 Caracterización de las espumas metálicas de poro abierto

Para caracterizar las espumas metálicas en cuanto a la evidencia de su tipo de estructura, el tamaño y tipo de los poros se empleó el uso de un microscopio digital para tomar fotografías con aumentos de hasta 500x. La densidad de las espumas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al fue determinada mediante el cálculo de su volumen por sus dimensiones conocidas y su peso. El porcentaje de porosidad fue calculado mediante la ecuación 1.

7.7 Propiedades mecánicas

Para llevar a cabo la determinación de las propiedades mecánicas de las espumas, se llevó a cabo un ensayo de compresión a las espumas con tamaño de poro de 0.710 mm y 1.0 mm, empleando una maquina universal de ensayos. Los datos obtenidos de la curva esfuerzo-deformación son en términos esfuerzo ingenieril y deformación.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 Análisis químico de la aleación

Se determinó la composición química de la aleación usada (58%Zn-2%Cu-40%Al) para fabricar las espumas metálicas, el método empleado fue mediante espectrometría de emisión por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y la finalidad de este análisis es determinar la composición de la aleación que se fabricó.

Cuadro 4. Composición química de la aleación.

%Zn	%Al	%Cu
60.02	37.92	1.93

8.2 Infiltración en las preformas de NaCl

Para llegar a determinar los mejores parámetros de fabricación de espumas metálicas empleando este proceso de infiltración centrífuga fue necesario realizar pruebas preliminares usando una aleación de Zinalco, para de esta forma conocer el equipo de centrifugado y de sinterización, y de esta forma llevar a cabo correcciones o adecuaciones al proceso conforme se fueran obteniendo las espumas y sus respectivas infiltraciones.

Para llevar a cabo la fabricación de las espumas metálicas se realizaron 5 pruebas preliminares empleando la aleación de Zinalco, la cual tiene la presencia de los mismos elementos de aleación que nuestra aleación principal, sin embargo, esta tiene una composición diferente con respecto al Zn y el Al, lo cual en un principio cambia la temperatura de fusión y la solubilidad de los elementos presentes en la aleación. De acuerdo con los diagramas de fases binarios de Zn-Al y Zn-Cu la temperatura en el horno para fundir la aleación debe superar los 550 °C para llevar a cabo una buena solubilidad de los metales presentes en la aleación.

Inicialmente las primeras pruebas de espumas de poro abierto fueron empleando la aleación Zn-22%Al-2%Cu, para la prueba No.1 se utilizaron 132 g de esferas de NaCl, esto debido a que se pretendía que el espacio ocupado por las esferas fuera a una altura aproximada a los 2 cm, se empleó un tamaño de esfera de 710 μm y un peso de carga de aproximadamente 750 g, la carga de aleación se fundió a una temperatura de 600°C, controlando el tiempo de fusión para no provocar oxidación. El tiempo de sinterización fue de 30 minutos a una temperatura de 600°C. Con respecto a la infiltración se inició probando una velocidad rotacional de 323 rpm, la cual fue una velocidad alta con respecto a las cantidades de carga y de sal empleadas. La cantidad de carga fundida dispuesta en el molde superaba el 80% de la altura del molde, por tanto, combinado con una alta velocidad rotacional provoco la derrama de material fundido, se piensa que esto es debido también a evidentes fugas en las paredes del molde cilíndrico. En la Figura 33 se puede observar la primera prueba de infiltración realizada con la aleación de Zinalco, se

puede observar que hay una evidente infiltración incompleta, dándose la infiltración solo en un lado del molde.



Figura 33. Prueba No.1 de infiltración en esponja de Zinalco.

A partir de esta prueba inicial, se llevaron a cabo cambios como controlar el peso de la cantidad de esferas de NaCl, estandarizando la cantidad para todas las pruebas. También controlar la cantidad de carga a fundir y que será vertida en el molde, se consideró que era óptimo utilizar menos carga sobre el molde para evitar pérdida del material. Otro factor para tomar en cuenta fue la oxidación que se generó en el molde durante la sinterización, al sacar el molde de la mufla se observó que tanto en las paredes del molde como en la superficie de la preforma de NaCl había películas o costras de oxidación, las cuales posiblemente son generadas a partir de la exposición del molde de metal a las altas temperaturas de la mufla.

Una vez que se tomaron en cuenta estos imponderables se procedió a realizar una segunda prueba con la misma aleación de Zinalco, debido a la poca infiltración en la prueba pasada, se recuperó la mayoría de las esferas de NaCl empleadas, considerándolas óptimas para llevar a cabo una segunda prueba. Además, se cambió el molde cilíndrico, por uno que garantizara menores fugas del material en las uniones del molde. En la prueba No.2 se empleó una cantidad de esferas de sal

de 90 g, empleando las esferas de la prueba pasada de 710 μm , además se consideró un peso de carga a fundir de 552 g, la temperatura de vaciado fue de 600°C, el tiempo de sinterización fue de 28 minutos a 650°C y se reguló la velocidad rotacional a 244 rpm. En la Figura 34 se observa que ocurrió el mismo patrón de infiltración de la prueba pasada, se dio una infiltración incompleta y solo de un lado del molde. Además, se observó una de las problemáticas del proceso, que consistía en la extracción de la espuma del molde cilíndrico, ya que el metal de la espuma se pega fácilmente en las paredes del molde, para evitar esto se procedió a aplicar pasta de grafito en las paredes interiores del molde y de esta manera que no se pegara la espuma en el molde y fuera fácil su extracción.



Figura 34. Prueba No.2 de infiltración en esponja de Zinalco.

Para la prueba No.3 de infiltración también se empleó el uso del Zinalco y se cambió el mecanismo de centrifugación, ahora se procederán a realizar pausas en el centrifugado para girar el molde cilíndrico y de esta forma observar si se da una infiltración más homogénea y en ambos lados del molde. Se empleó la misma cantidad en peso (90 g) de las esferas de NaCl, a un tamaño de 710 μm . La temperatura de vaciado se incrementó a 650°C, así como también la temperatura de sinterización a 680°C, el tiempo de sinterizado fue de 33 minutos y en esta prueba se llevó a cabo la modificación de la inclusión de giros en el molde,

aplicándole 4 giros al molde cilíndrico y empleando una velocidad rotacional de 112 rpm. En la figura 35 se puede observar que el metal fundido no logró infiltrar la preforma de esferas de NaCl, esto se puede deber a la baja velocidad rotacional aplicada, por lo tanto, hay que encontrar una velocidad rotacional óptima.



Figura 35. Prueba No.3 de infiltración en esponja de Zinalco.

Para la prueba No.4 se cambió el tamaño de las esferas de NaCl, empleando ahora un tamaño de esfera de 1.0 mm, se emplearon 90 g de peso en esferas de NaCl, el peso de la carga metálica fundida fue de 394 g, la temperatura de vaciado fue de 650°C, se sinterizó a 640°C aumentando el tiempo a 40 minutos. Durante el centrifugado el molde se giró 2 veces y la velocidades rotacionales aplicadas fueron de 138 rpm y se aumentaron a 191 rpm. En la Figura 36 se puede observar el resultado exitoso de infiltración logrado, siendo esta la espuma con infiltración más homogénea y profunda. Este resultado talvez se deba al aumento de las rpm, que al incrementarlas se traduce en un aumento en la presión de infiltración. Otro factor para tomar en cuenta es el tamaño empleado de las esferas de NaCl para la fabricación de la preforma, siendo que a un mayor tamaño hay más espacio entre sus bordes, por lo tanto, es más fácil que el metal fundido pueda traspasar estos canales. También se puede observar la cantidad de metal en exceso restante el cual ya no alcanza a infiltrar y queda como sobrante, esto nos indica de las cantidades optimas de carga para fundir, siendo que estas no deben de ser mayores a los 500 g para no ocasionar problemas de derrame o perdida de metal fundido.



Figura 36. Prueba No.4 de infiltración en esponja de Zinalco.

En la Cuadro 5 se resumen los parámetros de proceso aplicados durante estas pruebas preliminares de infiltración usando la aleación de Zinalco. A partir de estos datos podemos concluir algunas consideraciones sobre el proceso o los mejores parámetros para lograr la fabricación de las espumas metálicas de poro abierto empleando este método de infiltración centrifuga, primero que nada es necesario estandarizar la cantidad de esferas de NaCl así como también de la cantidad de metal a fundir, debido al equilibrio que tiene que haber en la maquina centrifugadora, un mal balance o compensación de las masas en la maquina puede provocar el desbalance en la máquina, generando infiltraciones no homogéneas. Por otro lado, el tiempo de sinterización debe de aumentarse para provocar que la pieza de la preforma obtenga un buen precalentamiento y de esta forma se eviten choques térmicos o la solidificación temprana del metal, además aumentar el tiempo de sinterización nos otorga una mayor fluidez durante la infiltración. Aumentar las temperaturas de sinterización como de vaciado ayuda a tener una mayor fluidez durante el proceso, es importante controlar estas temperaturas debido a que sinterización debe llevarse a una temperatura menor a la temperatura de fusión del material de la preforma, en este caso la temperatura del NaCl es de 800°C, por lo

tanto, no debemos exceder esa temperatura. Conforme a la temperatura de fusión de la aleación se estableció un rango de temperaturas (600-700°C) para poder trabajar en la fusión de la aleación, siempre controlando el tiempo y la temperatura para no causar la formación de oxidación o escorias que inhiban la infiltración del metal líquido en la preforma. Conforme a la adecuación de los giros del molde, esta fue fundamental para lograr una buena infiltración, como se observó en las pruebas preliminares, donde la única espuma con infiltración completa se dio aplicando esta adaptación, para garantizar infiltraciones más uniformes es necesario considerar tanto el número de giros, así como el tiempo de centrifugación para cada lado o giro del molde. Debido al tipo de moldes que se usan, es difícil aumentar las rpm ya que los moldes no cuentan con tapadera y al alcanzar velocidades altas de rotación el metal líquido comienza a derramarse, provocando pérdida de material. Por esta razón es que empleando una velocidad rotacional máxima de 191 rpm se logró una buena infiltración.

Cuadro 5. Parámetros de proceso en pruebas preliminares de infiltración usando aleación de Zinalco.

No. Prueba	NaCl (g)	Tamaño de esferas (micras)	Tiempo de sinterización (minutos)	Temperatura de sinterización (°C)	Temperatura de vaciado (°C)	Vel. Rotacional (Rpm)	Giros del molde	Tiempo de centrifugado (minutos)
Prueba 1	132	710	30	600	600	323	Sin giros	1
Prueba 2	90	710	28	650	600	244	Sin giros	1
Prueba 3	90	710	33:40	680	650	112	4	4
Prueba 4	90	1000	40	640	650	138 191 191	2	3

Una vez que se realizaron las pruebas preliminares con Zinalco y se lograron determinar condiciones óptimas de proceso para fabricar espumas metálicas de poro abierto, se procedió a realizar espumas metálicas con la aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al. En la espuma 1 se empleó una cantidad de esferas de NaCl de 90 g, a un tamaño de 1000 μm , la cantidad de carga de aleación a fundir fue de 398 g, se aumentó la temperatura de vaciado a 700°C para garantizar una mayor fluidez y una solidificación menos rápida, de la misma forma se aumentó el tiempo de sinterización a 45 minutos a una temperatura de 650°C, conforme a los giros del molde, este fue girado 3 veces, empleando una velocidad rotacional inicial de 138 rpm y aumentando a 191 rpm, el tiempo de centrifugación fue entre 3:00 y 3:30 minutos, ya que la duración aproximada de centrifugación para cada giro o lado del molde es de 45 segundos, esto para evitar los problemas de las pruebas preliminares en donde el metal solidificaba de un solo lado del molde. En la Figura 37 se puede observar la espuma formada, con un tamaño de poro de 1000 μm o 1.0 mm, en ella se puede observar que la infiltración se dio de forma homogénea. A pesar de utilizar una carga metálica menor es evidente el exceso de metal que no logra infiltrar en la preforma, esto es indiferente ya que este exceso es cortado posteriormente.



Figura 37. Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 1.0 mm.

Para las siguientes espumas metálicas se emplearon valores parecidos de temperaturas de vaciado y sinterización, así como la velocidad rotacional y el tiempo de centrifugado, para la segunda espuma se utilizaron 90 g de esferas de NaCl, a un tamaño de 500 μm , y un peso de carga metálica de aleación de 404 g, se sinterizó 50 minutos a una temperatura de 650°C, la temperatura de vaciado se mantuvo de igual forma a 700°C, se le realizaron 3 giros al molde, y de igual forma se aplicó una velocidad rotacional inicial de 138 rpm seguida de una de 191 rpm. En la Figura 38 se puede observar que se dio una infiltración homogénea para ambos lados del molde, de igual forma existe un exceso de metal que no infiltró, siendo este un patrón en la mayoría de las espumas fabricadas. Sin embargo, al cortar la espuma a la mitad, nos pudimos percatar de que la espuma no se encontraba infiltrada en su totalidad, en la Figura 39 se puede observar que en la parte central de la espuma no se logró una buena infiltración, esto se puede deber a distintos factores como el tamaño de las esferas de NaCl, al ser un menor tamaño (0.5 mm) los espacios entre las esferas que funcionan como canales para guiar al metal fundido son más pequeños, para esto es necesario aumentar las rpm en la máquina centrifugadora, el aumento de esta velocidad rotacional es la principal solución a este problema, debido al aumento de presión de infiltración, sin embargo, como se comentaba anteriormente, los moldes empleados dificultan la posibilidad de aumentar este parámetro, debido al derrame o pérdida de metal en el centrifugado.

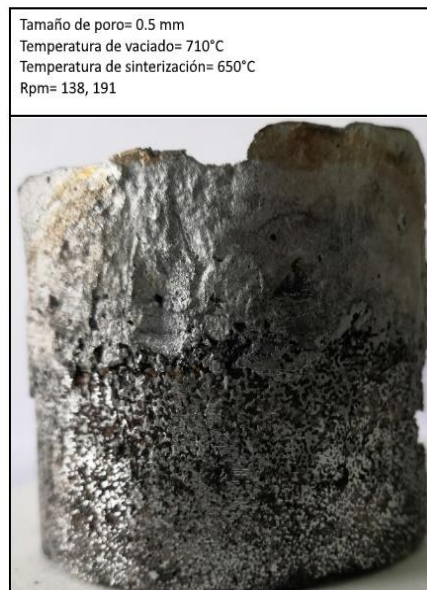


Figura 38. Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.5 mm.

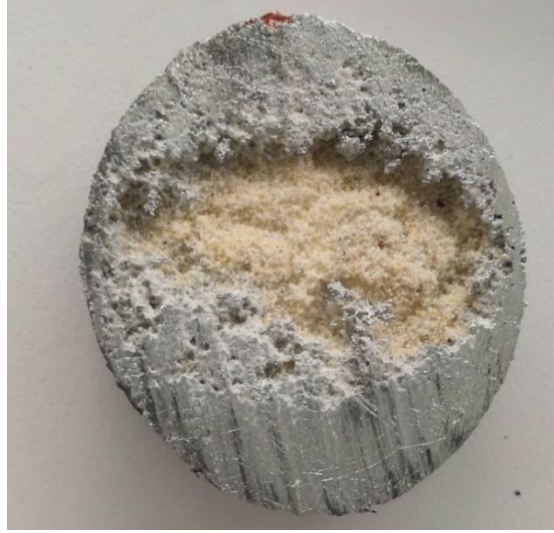


Figura 39. Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.5 mm cortada a la mitad.

Para la tercera y última espuma se emplearon 90 g de esferas de NaCl a un tamaño de 710 μm , el peso de la carga de aleación a fundir fue de 501 g, la temperatura de vaciado fue de 710°C, se sinterizó 50 minutos a una temperatura de 650°C, el molde fue girado 4 veces a una velocidad rotacional constante de 191 rpm. Los parámetros de fabricación son muy parecidos con las demás espumas y como se puede ver en la Figura 40 también a partir de estos se obtuvo una buena espuma, homogénea en ambos lados del molde y con una buena infiltración. En este punto de las pruebas realizadas, se puede entender que los principales problemas que se tienen sobre el proceso son en cuanto a los moldes cilíndricos de las espumas, por lo cual es recomendable utilizar moldes preferentemente de acero inoxidable, para evitar la creación de oxidación dentro del molde que inhiba la buena infiltración del metal, además también se recomienda emplear pasta o pintura de grafito, ya que esta tiene una mayor permeabilidad en los moldes y evita de mejor forma que las espumas se peguen en las paredes del molde, también considerar agregar una tapadera a los moldes, para de esta manera lograr aumentar las velocidades rotacionales y no exista pérdida de material o metal fundido. Un punto importante para resaltar es

sobre el control de pesos de los materiales, tener estandarizado las cantidades de esferas de NaCl, así como del metal a fundir, puede ayudar a evitar pérdida de material. Esto es importante ya que el proceso para fabricar las esferas de NaCl es un proceso laborioso o tardado, de esta forma al llevar a cabo una mala ejecución en la práctica, se corre el riesgo de perder material, contaminándolo y resultando en material inservible o inutilizable.



Figura 40. Espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.710 mm.

En el Cuadro 6 se resumen los parámetros empleados para cada una de las espumas fabricadas, se puede observar que los parámetros se trataron de estandarizar en la posible, y logrando de esta manera espumas metálicas de poro abierto con diferente tamaño de poro (0.5 mm, 0.71 mm y 1.0 mm), cabe destacar que los tiempos de centrifugado, así como los tiempos de sinterización son muy diferentes con respecto a los publicados en 2016 [47], donde la sinterización de las preformas de NaCl eran de 3 horas a 680°C, podemos observar que hay una evidente reducción en el tiempo de sinterización, optimizando los tiempos del proceso. Con respecto al tiempo de infiltración, también son similares, siendo que

los tiempos empleados en aquel trabajo son de no máximo 5 minutos, mientras que aquí trabajamos a un rango de tiempos de entre 3 y 5 minutos, dependiendo de los giros del molde y como se vaya observando la infiltración. Otro punto para considerar es la velocidad rotacional (rpm) empleada, ya que en aquel trabajo se alcanzan velocidades de 150 rpm como máximo, mientras que nosotros empleamos velocidades de hasta 191 rpm para cada una de las espumas, como se pudo observar empleando estas velocidades, solo se tuvo complicaciones con la espuma de menor tamaño de poro (0.5 mm), presentándose una infiltración incompleta en el centro de la muestra de la espuma.

Cuadro 6. Parámetros de proceso en pruebas de infiltración usando aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al.

No. Prueba	NaCl (g)	Tamaño de esferas (micras)	Tiempo de sinterización (minutos)	Temperatura de sinterización (°C)	Temperatura de vaciado (°C)	Vel. Rotacional (Rpm)	Giros del molde	Tiempo de centrifugado (minutos)
Prueba 1	90	1000	45	650	700	138 191 191 191	3	Entre 3 y 3:30
Prueba 2	90	500	50	650	710	138 191 191 191	3	Entre 3 y 3:30
Prueba 3	90	710	50	650	710	191 191 191 191 191	4	4

Las temperaturas de sinterización así como de vaciado son temperaturas óptimas para lograr fabricar espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-

40%Al, ambas temperaturas a 650°C la de sinterización, así como 700°C la de vaciado fueron funcionales y con buenos resultados, conforme a las rpm se deben realizar más pruebas para considerar los mejores niveles de velocidad, sin embargo, empleando una velocidad mínima de 138 rpm y una máxima de 191 rpm se lograron infiltrar las preformas, teniendo problemas en la de 0.5 mm, este aspecto se debe tomar en cuenta para futuros experimentos empleando tamaños de poro iguales o más pequeños a 0.5 mm. De esta manera se puede definir que las esferas de NaCl sirvieron como un parámetro para lograr definir las velocidades rotacionales, a menor tamaño de poro o esferas de NaCl es necesario incrementar las rpm, para de esta manera lograr la infiltración en regiones cada vez más estrechas.

8.3 Estructura del poro

La estructura de las espumas es un parámetro muy importante para caracterizarlas, en ellas podemos observar distintos tipos de poros (abierto, cerrado y mixto), los grosores de las paredes y el tamaño de los poros. En la Figura 41 se pueden observar distintas perspectivas de una espuma metálica de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con un tamaño de poro 0.5 mm, en ella podemos observar 2 fotografías tomadas con celular y una tercera tomada con ayuda de un microscopio digital, podemos observar que la forma común de los poros es esférica, teniendo además una porosidad homogénea, aunque existen excepciones donde se puede percibir la formación de poros irregulares o la unión de varios poros provocando un tamaño de poro más grande. En el Cuadro 7 se pueden observar las mediciones realizadas con ayuda del software *Imagej* para determinar el tamaño de los poros en la espumas, determinando un total de 20 poros, de esta forma podemos darnos cuenta del tamaño de poro promedio para cada una de las espumas.

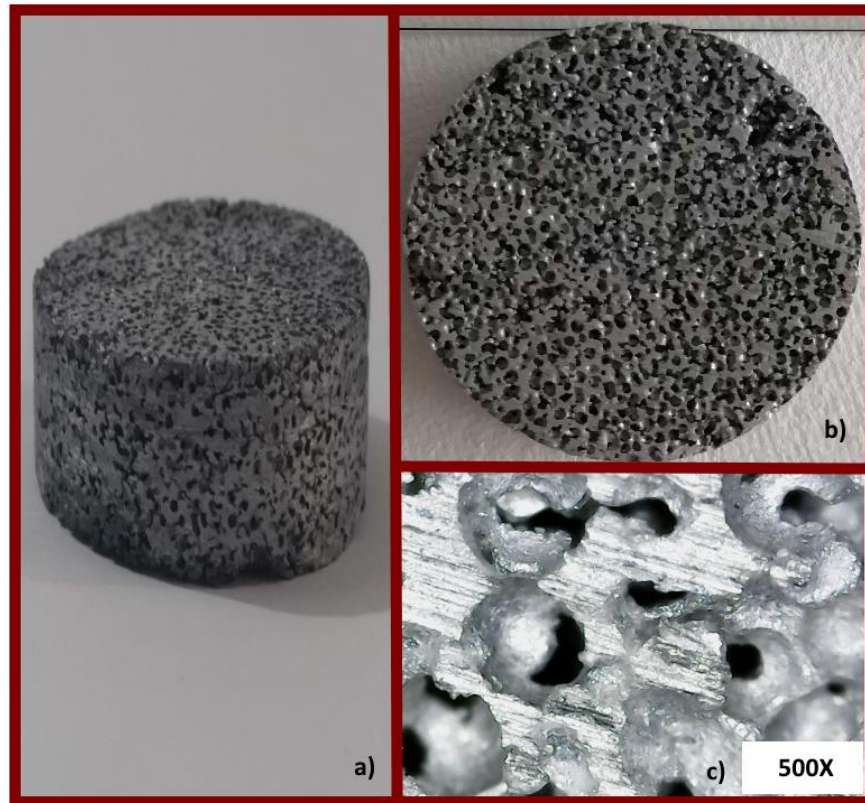


Figura 41. a) Espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.5 mm; b) Parte superior de espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.5 mm; c) Estructura de espuma metálica de poro abierto.

Cuadro 7. Medición de tamaño de poro en espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.5 mm.

No. Medición	Modo	Unidad	Longitud de la línea
1	Distancia	mm	0.703
2	Distancia	mm	0.527
3	Distancia	mm	0.461
4	Distancia	mm	0.527
5	Distancia	mm	0.608
6	Distancia	mm	0.662
7	Distancia	mm	0.514
8	Distancia	mm	0.514

9	Distancia	mm	0.595
10	Distancia	mm	0.622
11	Distancia	mm	0.474
12	Distancia	mm	0.555
13	Distancia	mm	0.460
14	Distancia	mm	0.569
15	Distancia	mm	0.622
16	Distancia	mm	0.595
17	Distancia	mm	0.622
18	Distancia	mm	0.459
19	Distancia	mm	0.486
20	Distancia	mm	0.514

En las primeras mediciones de poro llevadas a cabo con el software Imagej podemos ver que en la espuma metálica con tamaño de partícula de NaCl de 0.5 mm, su valor promedio de tamaño de poro fue de 0.554 mm, este resultando está dentro de lo esperado.

En la Figura 42 se puede observar de igual forma las fotografías tomadas para la espuma metálica con un tamaño de poro de 0.710 mm. De igual forma podemos percibir con ayuda del microscopio digital la formación de poros esféricos, además también es visible una porosidad homogénea a lo largo de la espuma. Al igual que la espuma de 0.5 mm a esta espuma se le determinó el tamaño promedio de poro, sacando un total de 20 mediciones con el Imagej, como se puede ver en el Cuadro 8.

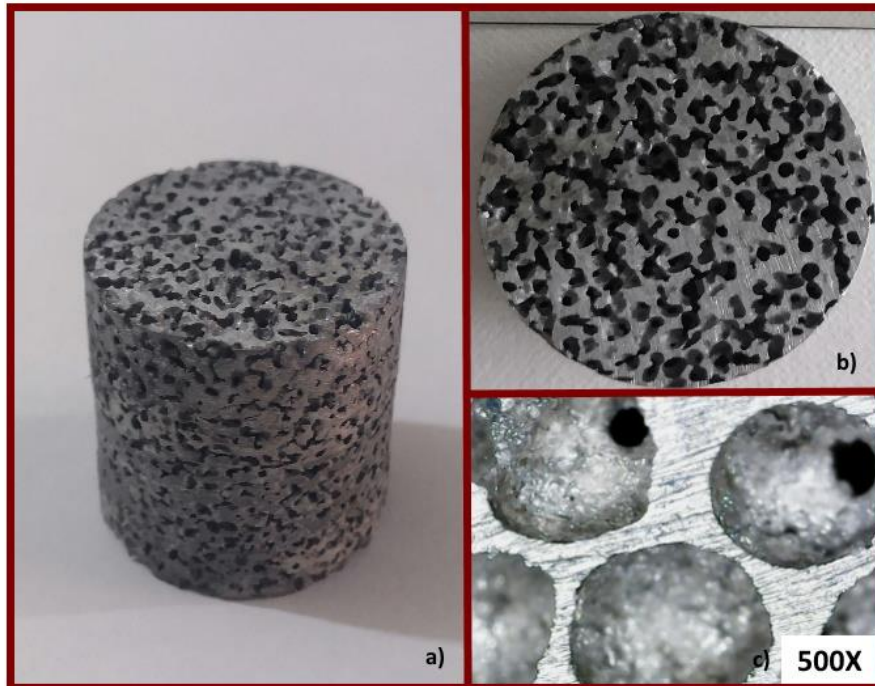


Figura 42. a) Espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.710 mm; b) Parte superior de espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 0.710 mm; c) Estructura de espuma metálica de poro abierto.

Cuadro 8. Medición de tamaño de poro en espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 0.710 mm.

No. Medición	Modo	Unidad	Longitud de la línea
1	Distancia	mm	0.757
2	Distancia	mm	0.568
3	Distancia	mm	0.595
4	Distancia	mm	0.744
5	Distancia	mm	0.764
6	Distancia	mm	0.800
7	Distancia	mm	0.946
8	Distancia	mm	0.880
9	Distancia	mm	0.770
10	Distancia	mm	0.690

11	Distancia	mm	0.676
12	Distancia	mm	0.635
13	Distancia	mm	0.743
14	Distancia	mm	0.812
15	Distancia	mm	0.789
16	Distancia	mm	0.744
17	Distancia	mm	0.676
18	Distancia	mm	0.797
19	Distancia	mm	0.892
20	Distancia	mm	0.920

Para esta espuma metálica se observa de igual forma en las fotografías de la Figura 42 que hay la formación de porosidades más grandes, lo cual puede deberse también al desgaste de las superficies de la estructura de la espuma, ya que las espumas fueron mecanizadas para poder formar las probetas. De acuerdo con los resultados obtenidos de las 20 mediciones del tamaño de poro, se obtuvo un tamaño de poro promedio de 0.759 mm.

Para la espuma metálica de 1.0 mm, en la Figura 43 se puede observar con ayuda de las fotografías tomadas que, de igual forma se aprecia la formación de porosidades de tipo esférico y algunas irregulares, aunque para esta se empleó un tamaño de partícula de NaCl mayor, se puede ver que hay una aparente mayor cantidad de poros comparada con la espuma con tamaño de poro de 0.710 mm. Para esta espuma también se usó el software Imagej para determinar el tamaño promedio de poro, de igual forma se tomaron 20 mediciones, las cuales se pueden ver en el Cuadro 9.

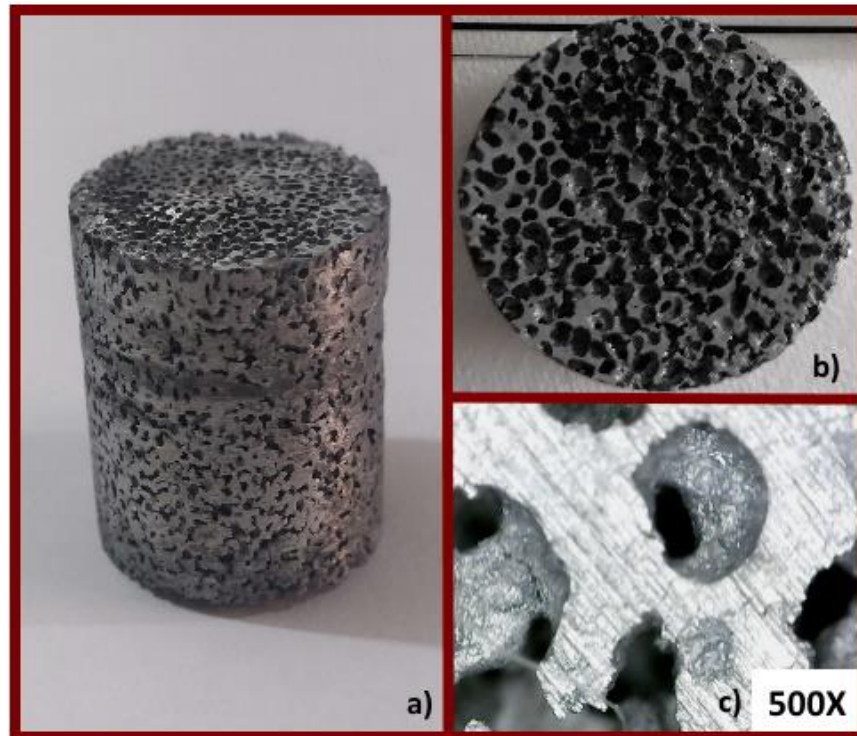


Figura 43. a) Espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 1.0 mm; b) Parte superior de espuma metálica de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al con tamaño de poro de 1.0 mm; c) Estructura de espuma metálica de poro abierto.

Cuadro 9. Medición de tamaño de poro en espuma metálica de aleación con tamaño de poro de 1.0 mm.

No. Medición	Modo	Unidad	Longitud de la línea
1	Distancia	mm	1.131
2	Distancia	mm	1.163
3	Distancia	mm	1.260
4	Distancia	mm	0.838
5	Distancia	mm	0.878
6	Distancia	mm	0.853
7	Distancia	mm	1.097
8	Distancia	mm	0.893
9	Distancia	mm	1.217

10	Distancia	mm	0.826
11	Distancia	mm	1.297
12	Distancia	mm	1.004
13	Distancia	mm	0.943
14	Distancia	mm	0.946
15	Distancia	mm	1.291
16	Distancia	mm	0.921
17	Distancia	mm	1.284
18	Distancia	mm	0.838
19	Distancia	mm	0.816
20	Distancia	mm	0.994

Para esta espuma metálica de 1.0 mm, el valor promedio del tamaño de poro fue de 1.024 mm. Conforme a los resultados obtenidos, se puede decir que las espumas fueron controladas morfológicamente, debido a que se cumplió con los valores de porosidad para cada una de las espumas metálicas.

En el Cuadro 10 se pueden observar los resultados obtenidos en cuanto a las densidades de las espumas, densidades relativas, así como el porcentaje de porosidad de las espumas metálicas de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al. La densidad de las espumas (ρ) se obtuvo con datos conocidos de volumen y peso de las muestras, mientras que la densidad del metal precursor (ρ_0) se determinó mediante la técnica de Arquímedes.

Cuadro 10. Datos de densidad de la espuma, densidad relativa y porosidad, de las 5 pruebas de espumas metálicas obtenidas.

No. Muestra	Tamaño de poro (mm)	Densidad de la espuma	Densidad relativa	Porosidad (%)
1	1.0	1.94	0.46	53.9
2	1.0	1.99	0.47	52.6
3	1.0	2.02	0.48	51.8
4	0.710	1.89	0.45	55.0
5	0.5	2.12	0.50	49.6

Los resultados obtenidos indican que las espumas metálicas obtenidas por el método de infiltración centrífuga empleando un tamaño de partícula de NaCl de 1.0 mm tienen un valor promedio de porosidad del 52.7%, para un tamaño de 0.710 mm se tuvo el mayor porcentaje de porosidad, de 55%, y para la espuma con un tamaño de partícula de NaCl menor (0.5 mm) se obtuvo la menor porosidad de 49.6%. También se puede ver que a menor tamaño de poro tanto la densidad de la espuma como también la densidad relativa aumentaron. Conforme a trabajos anteriormente publicados, para tamaños de poro similares, empleando preformas lixiviables de NaCl y aplicando la técnica de infiltración centrífuga, el rango de porcentaje de porosidad alcanzado fue del 59 al 68%.

8.4 Propiedades mecánicas

Conforme a las propiedades mecánicas de las espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al, se pueden observar en la figura 44 las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir del ensayo de compresión que se les realizó a 2 probetas de 1.0 y 0.710 mm, no se realizó prueba de compresión a la espuma con tamaño de poro de 0.5 mm debido a que la probeta de esta espuma tenía grietas o fracturas de un tamaño considerable que afectarían a los resultados obtenidos en el ensayo de compresión.

Como se mencionaba anteriormente, en este tipo de graficas se observan 3 regiones características, una región elástica lineal a una baja deformación, seguido de una zona amplia de meseta y al final una etapa de densificación donde a partir de una deformación se incrementa exponencialmente el esfuerzo. Conforme a las curvas obtenidas, estas tienen una forma atípica a las reportadas en espumas de Zinalco [47], también se puede observar un comportamiento similar para ambos tamaños de poro ya que no hay oscilaciones significativas en la región de la meseta, esto es debido a que las espumas se encuentran en un punto medio en donde hay una cierta uniformidad en la morfología de los poros, pero al mismo tiempo hay zonas con poros irregulares.

Tamaño de poro:	Densidad relativa:	Porosidad (%):
a) 0.710 mm	0.46	53.9
b) 1.0 mm	0.45	55

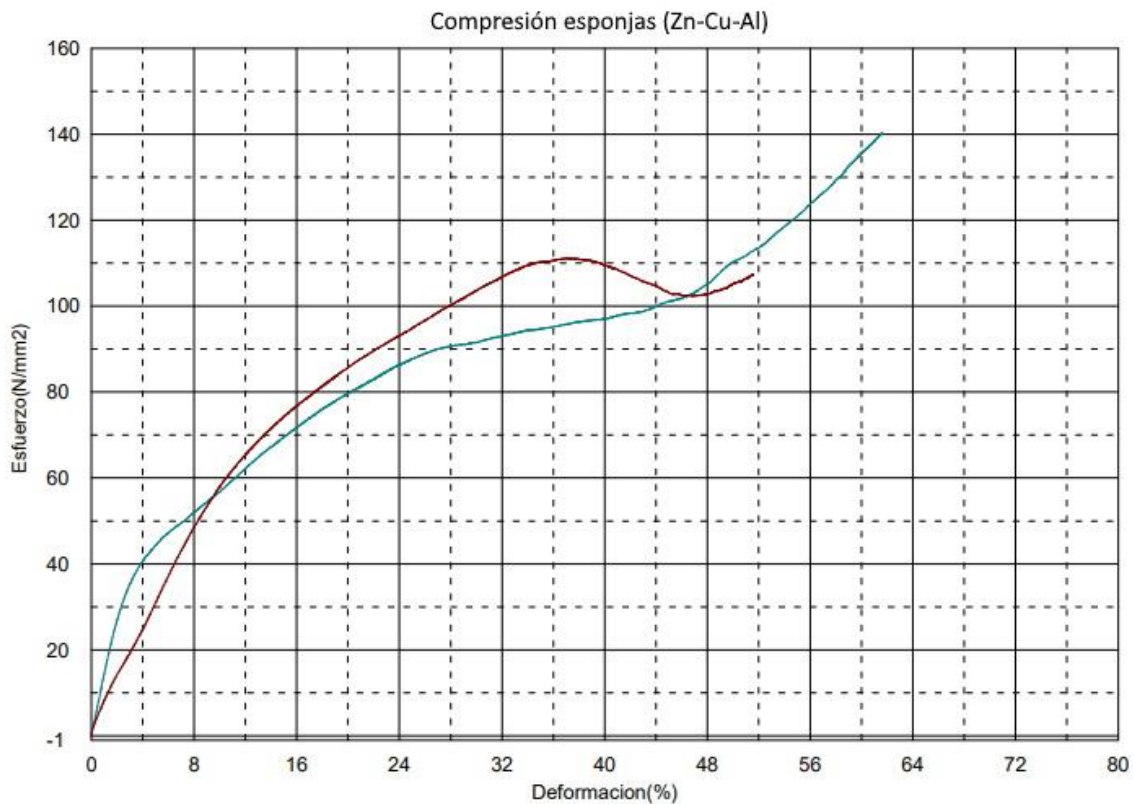


Figura 44. Curva esfuerzo-deformación de espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al.

Las propiedades que se pueden obtener a partir de la curva esfuerzo-deformación se resumen en el Cuadro 11, donde se incluyen valores de carga máxima, desplazamiento máximo, esfuerzo máximo, deformación máxima, los cuales fueron determinados en el ensayo de compresión, mientras que el límite elástico, el módulo de Young y el área bajo la curva fueron obtenidos a partir de la gráfica.

Cuadro 11. Propiedades mecánicas de espumas metálicas de poro abierto de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al.

Muestra	Carga Max. (kN)	Despl.Max. (mm)	Esfuerzo Max. (MPa)	Deformación Max. (%)	Límite elástico (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Promedio de la zona de la meseta (MPa)
0.710 mm	48.6328	12.9380	140.411	61.6095	37	1.304	75
1.0 mm	38.5234	7.78100	111.224	37.0524	64.5	0.612	92

A partir de estos resultados podemos observar un comportamiento similar, ya que al disminuir el tamaño de poro se está incrementando la densidad, como se discutía en el Cuadro 10, de esta manera, al aumentar la densidad de las espumas también incrementan las propiedades mecánicas, obteniendo los mejores resultados de carga máxima (48.6328 kN), esfuerzo máximo (140.411 MPa) y módulo de Young (1.304 GPa) en la espuma con tamaño de poro más pequeño (0.710 mm), tanto el límite elástico (37 MPa) como el promedio de la zona de la meseta (75 MPa) fueron menores para el tamaño de poro más pequeño.

Empleando esta aleación (58%Zn-2%Cu-40%Al), hay un gran aumento en las propiedades mecánicas comparándolo con la aleación convencional de Zinalco, obteniendo grandes diferencias principalmente en parámetros como el límite elástico o el promedio de la zona de la meseta, estas diferencias se pueden notar fácilmente a partir de las curvas obtenidas, la zona elástica, así como la zona de la meseta se extienden a niveles de esfuerzo más grandes.

Para obtener un mayor panorama de la influencia del cambio en composición de la aleación, se recomienda llevar a cabo un análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB), para de esta manera observar con mayor detalle las regiones, fases y microestructuras que se forman y su relación con las propiedades mecánicas de la aleación.

9. CONCLUSIONES

- 1) El método de infiltración centrífuga puede ser aplicado para fabricar espumas metálicas de poro abierto de aleación (58%Zn-2%Cu-40%Al), empleando

preformas lixiviables de NaCl con tamaños de poro de 0.5 mm, 0.710 mm y 1.0 mm. Conforme el tamaño de poro se reduce se incrementan las velocidades rotacionales para lograr infiltraciones más efectivas.

- 2) Se determinó que, empleando velocidades rotacionales de 193 rpm con tiempos de centrifugado de entre 3 y 5 minutos, temperatura de vaciado de 700°C y un tiempo de sinterización de 50 minutos a 650°C, son parámetros funcionales para llevar a cabo la fabricación de espumas metálicas con tamaños de poro de 1.0 mm, 0.710 mm y 0.5 mm.
- 3) Empleando la aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al se consiguieron espumas metálicas de poro abierto con mejores propiedades mecánicas que las conseguidas con el Zinalco en trabajos anteriores.
- 4) Al disminuir el tamaño de partícula de NaCl en las preformas de las espumas metálicas de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al se incrementan tanto la porosidad como la densidad de las espumas.
- 5) Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de espumas metálicas de aleación 58%Zn-2%Cu-40%Al tienen un comportamiento atípico, presentándose un incremento importante en la zona elástica y oscilaciones significativas en la meseta atribuidas a la presencia de poros irregulares.
- 6) Las mejores propiedades mecánicas se incrementan conforme se reduce el tamaño de poro.
- 7) La metodología empleada para fabricar espumas metálicas de poro abierto es una técnica fácil y económica, pero laboriosa, siendo este un factor a tomar en cuenta para la escalabilidad del proceso.
- 8) Se recomienda para posteriores trabajos llevar a cabo un análisis de las fases o microestructuras que se forman con esta aleación (58%Zn-2%Cu-40%Al) para obtener un mayor panorama sobre la influencia de los elementos en las propiedades mecánicas de las espumas.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J. Banhart. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science. Vol.46. Bremen, Germany: Pergamon, 2001, pp. 561-562.
- [2] J. Banhart, "Manufacturing Routes for Metallic Foams", *JOM*, pp. 22-27, december 2000.
- [3] O. Ochoa, "OBTENCION Y PROPIEDADES DE ESPUMAS METÁLICAS BASE ZINALCO", Tesis, Instituto Politécnico Nacional, D.F., México, 2008.
- [4] A. A. Mohammadi Nasrabadi, R. Hedayati and M. Sadighi, "NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANICAL RESPONSE OF ALUMINUM FOAMS UNDER COMPRESSIVE LOADING USING CT DATA", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 54, no. 4, pp. 1357-1368, 2016.
- [5] L. P. Lefebvre, J. Banhart and D. C. Dunand, "Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments", *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS*, vol. 10, no. 9, pp. 775-787, 2008.
- [6] H. P. Degischer and B. Kriszt. *Handbook of Cellular Metals*. Germany: Wiley-VCH, 2002.
- [7] D. P. Rajak and M. Gupta. *An Insight Into Metal Based Foams*. Singapore: Springer, 2020.
- [8] F. García-Moreno, "Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production", *Materials*, vol. 9, no. 2:85, enero 2016.
- [9] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*. United State of America: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [10] S. Sadighikia , S. Abdolhosseinzadeh and H. Asgharzadeh, "Production of high porosity Zn foams by powder metallurgy method", *Powder Metallurgy*, vol. 58, no. 1, pp. 61-66, 2015.

- [11] F. Diaz, "ESPUMAS METÁLICAS", Departamento de Ingeniería, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Cuautitlán, Edo. Méx., 2009.
- [12] J.A. Gutiérrez-Vázquez y J. Oñoro, "Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones", *REV. METAL.*, vol. 44, no. 5, pp. 457-476, mayo 2008.
- [13] J.Banhart. Light-Metal Foams-History of Innovation and Technological Challenges. *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS*. Vol. 15. Germany: Wiley-VCH, , pp. 82-111.
- [14] M. A. De Meller, "Produit métallique pour l'obtention d'objets laminés, moulés ou autres, et procédés pour sa fabrication", French Patent 615,147, 1926 (1925).
- [15] Y. Nishida and G. Ohira, "MODELLING OF INFILTRATION OF MOLTEN METAL IN FIBROUS PREFORM BY CENTRIFUGAL FORCE", *Acta Metallurgica*, vol. 47, no. 3, pp. 841-852, nov. 1998.
- [16] J. Wannasin, "Centrifugal Infiltration of Particulate Metal Matrix Composites: Process Development and Fundamental Studies", tesis doctoral, MIT, MA, USA, 2004.
- [17] A. M. S-de la Muela, L. E. G. Cambronero and J. M. Ruiz-Román, "Molten Metal Infiltration Methods to Process Metal Matrix Syntactic Foams", *Metals*, vol. 10, no. 1, pp. 149-167, January 2020.
- [18] Noordegraf J., Alsem W., Groenenberg C., and Rensen C. "Centrifugal Casting of Metal Matrix Composite", U.S. Patent No. 5,002,115, March 26, 1991.
- [19] A. Sánchez-Martínez, A. Cruz, M. González-Nava and M. A. Suárez, "Main process parameters for manufacturing open-cell Zn-22Al-2Cu foams by the centrifugal infiltration route and mechanical properties", *Materials and Design*, vol. 108, pp. 494-500, October 2016.
- [20] Lorna J. Gybson and Michael F. Ashby, *Cellular solids Structure and properties*. 2nd. Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [21] J. Banhart, "Metallic Foams", *Europhys. News* (30), pp. 17-20, 1999.

- [22] Wikipedia. Metal Foam [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam
- [23] Exxentis. Porous Aluminum vs sintered metal [Online]. Available: <http://www.porous-aluminum.com/sinteredmetal.html>
- [24] B. Coxworth (2018, oct 01). Hybrid Foam combines strengths of Wood and metal [Online]. Available: <https://newatlas.com/wood-metal-foam/56577/>
- [25] V. C. Srivastava and K. L. Sahoo, "Processing, stabilization and applications of metallic foams. Art of science", *J. Mater. Sci.*, vol. 25, no. 3, pp. 733-753, 2007.
- [26] M. González Nava, "FABRICACIÓN DE ESPUMAS DE LA ALEACIÓN A356 CON ADICIÓN DE BARITA Y WOLLASTONITA COMO AGENTES ESPESANTES Y CARBONATO DE CALCIO COMO AGENTE ESPUMANTE", tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, ESIQUE-IPN.
- [27] I. A. Irausquín Castro, "CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ESPUMAS METÁLICAS Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA", tesis doctoral, Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras, UC3M, Leganés, Esp., 2012.
- [28] F. J. De Diego Fernández, "Diseño y simulación de espumas a escala microscópica", trabajo fin de grado, UC3M, Leganes, Esp., 2018.
- [29] J. Banhart y J. Baumeister, "Production Methods for Metallic foams", *Mat. Res. Soc.*, vol. 521, pp. 121-132, enero 1998.
- [30] JOSEFINA ROMERO MARTINEZ, Obtención de espumas de aluminio A356 con adición de carbonato de calcio.
- [31] P. Fernández, L. J. Cruz y J. Coletto, "Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida", *REV. METAL.*, vol. 44, no. 6, pp. 540-555, mayo 2008.
- [32] G. Ryan, A. Pandit and D. P. Apatsidis, "Fabrication Methods of porous metals for use in orthopaedic applications", *Biomaterials*, vol. 27, pp. 2651-2670, 2006.

- [33] H. A. Kuchek, "Method of making porous Metallic article", U.S. Patent 3,236,706, nov. 17, 1963.
- [34] E. M. Elizondo Luna, F. Barari, R. Woolley and R. Goodall, "Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity", *J. Vis. Exp.* (94), December 2014.
- [35] A. S. Machado, E. K. Shimomoto, R. Silverio, G. Garcia del Pino, C. A. Chagoyén y J. L. Moya. "SINTERIZACIÓN, UN PROCESO DE CONFORMACIÓN DE METALES COMO ALTERNATIVA ECONÓMICA CON UN BAJO IMPACTO AMBIENTAL", *Revista Centro Azúcar*, vol. 44, no. 3, pp. 83-92, Julio-septiembre 2017.
- [36] L. Ortega Calderón. MÓDULO I: FUNDICIÓN y SINTERIZADO. TEMA 4: Sinterizado TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN. Grado en Ingeniería en Organización Industrial [Online]. Available: <https://docplayer.es/15696137-Modulo-i-fundicion-y-sinterizado-tema-4-sinterizado-tecnologias-de-fabricacion-grado-en-ingenieria-en-organizacion-industrial.html>
- [37] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook: Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications*. 2nd. Ed., 1998.
- [38] M. P. Groover. *Fundamentos de manufactura moderna*. 3a. Ed. McGraw-Hill, 2007.
- [39] J. Anguiano, "PRODUCCION DE ALUMINIO EN POLVO POR EL METODO DE ATOMIZACION.", tesis, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, IPN, México, D.F., 1984.
- [40] A. M. Quevedo, "Procesado y caracterización de aleaciones Fe-Al", trabajo final de carrera, UPC, Catalunya, Barcelona, 2005.
- [41] Edeltec. LIMPIEZA POR ULTRASONIDOS [Online]. Available: <https://edeltec.com/limpieza-por-ultrasonidos/>

[42] RSF Equipment. Máquina de limpieza por ultrasonido de 3.2 L - US003 [Online]. Available: <https://www.rsf-maquinaria.com/es/herramientas-de-taller/limpieza-por-ultrasonidos/maquina-us003>.

[43] E. P. Abarca Pérez, "SÍNTESIS DE ESPUMAS METÁLICAS DE ALUMINIO DE CELDA ABIERTA", Trabajo fin de master, Facultad de Ingeniería Mecánica, EPN, Quito, 2017.

[44] K. Pulidindi and H. Pandey. (2021, Feb). Metal Foam Market Size, 2027 [Online]. Available: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/metal-foam-market>

[45] J. A. Aragón, J. R. Miranda y A. García-Bórquez, "Obtención de una microestructura nueva en la aleación Zn-40%at. Al-1.5%at. Cu", *Rev. Mex. Fis.*, vol. 53, no. 3, pp. 149-158.

[46] O. E. Ochoa de Jesús, "OBTENCIÓN Y PROPIEDADES DE ESPUMAS METÁLICAS BASE ZINALCO", Tesis, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán, IPN, México D.F., 2008.

[47] A. Sánchez Martínez, "Fabricación de Espumas Metálicas de Poro Abierto por Infiltración Centrífuga de la Aleación Zn-22Al-2Cu", Tesis doctoral, ESQIE, IPN, México D.F., 2017.

[48] G. Gonzáles Arenas, "CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE ALEACIONES Zn-22%Al-2%Cu, Zn-22%Al-4%Cu y Zn-22%Al-2%Cu-2%Ag ENVEJECIDAS ISOTÉRMICAMENTE", Tesis, ESQIE, IPN, México D.F., 2013.

[49] L. D. Meléndez Morales, "ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DE PLATA SOBRE LAS TRANSFORMACIONES DE FASE DE LA ALEACIÓN Zn-22%Al-2%Cu", Tesis, ESQIE, IPN, México D.F., 2011.

11. ANEXOS

Preparación de la aleación 58Zn-2Cu-40Al

CALCULO DE CARGA "ALEACIÓN 3"												
Composición Zinalco aleación 3			Datos		Cálculos de volumen y peso				Necesidad de aleación			
%Zn	%Al	%Cu	Volumen esponja		Volumenes		Peso		%	Elementos	1 pza	2 pzas
58	40	2	diámetro (cm)	6.7	Vol Zn	102.24	Kg Zn	730.02	76.69		Peso g	Peso g
			Altura (cm)	5	Vol Al	70.51	Kg Al	190.31	19.99	Zn	552.11	1104.23
			Area (cm ²)	35.26	Vol Cu	3.53	Kg Cu	31.59	3.32	Al	380.77	761.54
			Vol (cm ³)	176.28	Total	176.28	Total	951.92	100.00	Cu	19.04	38.08
			Vol (2 pzas)	352.57								
			Densidades	g/cm ³								
			Zn	7.14								
			Al	2.6989								
			Cu	8.96								

Figura 45. Cálculo de carga para aleación 58Zn-2Cu-40Al (Excel).

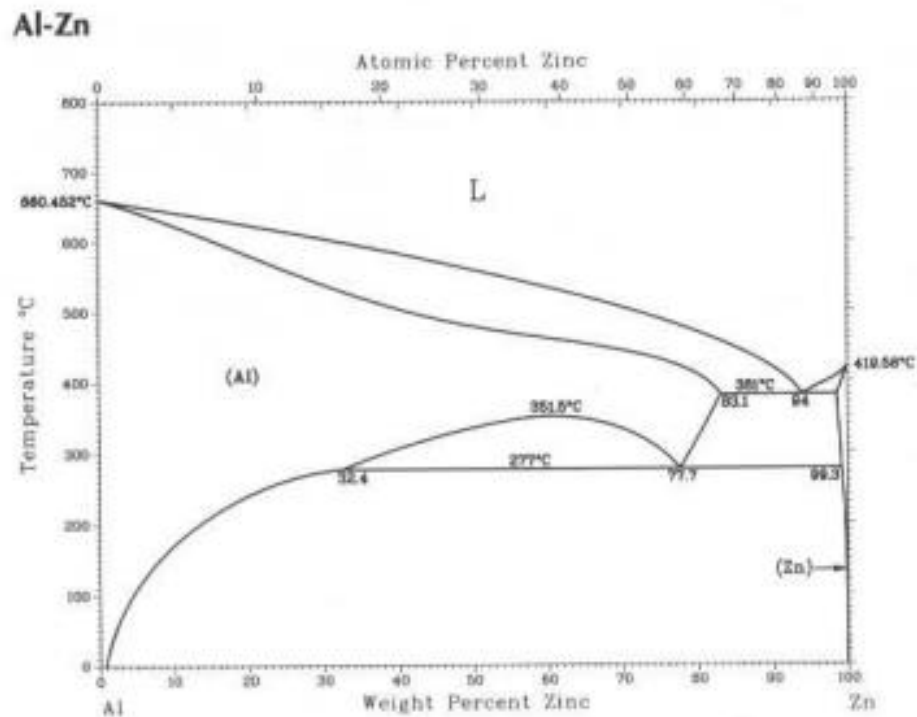


Figura 46. Diagrama de fases Al-Zn.

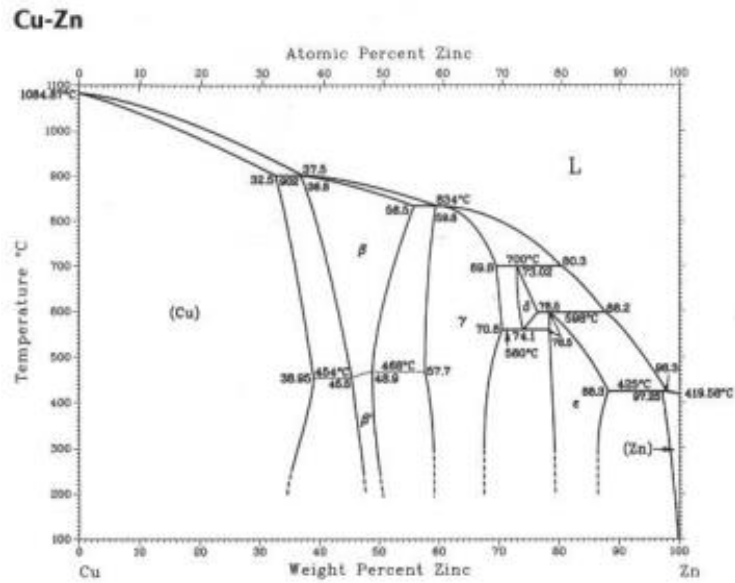


Figura 47. Diagrama de fases Cu-Zn.

Ecuaciones

$$Vol. Elem = (Volumen) * \left(\frac{\% \text{ del elemento en la aleación}}{100} \right) \quad (Ec. 2)$$

$$Masa = (\rho) * (Vol) \quad (Ec. 3)$$

$$Nece. elem = (\% \text{ en composición}) * \left(\frac{Masa elem.}{\% \text{ de la masa}} \right) \quad (Ec. 4)$$