



FACULTAD DE QUÍMICA

***PRODUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN
ESTRUCTURAL Y MECÁNICA DE ESPUMAS
METÁLICAS BASE ALUMINIO***

TESIS DE LICENCIATURA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

Mejia Contreras Luis Tomas

MÉXICO, D.F. 2016



Facultad de Química
UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROFESOR: GUILLERMO FAUSTO SALAS BANUET

VOCAL: PROFESOR: GERARDO ARAMBURO PÉREZ

SECRETARIO: PROFESOR: IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS

1ER. SUPLENTE: PROFESORA: BALBINA OJEDA RAMÍREZ VARGAS

2° SUPLENTE: PROFESOR: JOSÉ GUADALUPE RAMÍREZ VIEYRA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Instituto de Investigación en Materiales, UNAM

ASESOR:

DR. IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS

SUSTENTANTE:

LUIS TOMAS MEJIA CONTRERAS

RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó, fabricó y puso en funcionamiento un dispositivo capaz de producir espumas metálicas con metales con punto de fusión menores a 700°C mediante la infiltración de metal líquido provocada por la presión de un gas inerte, a través de una preforma que se encuentra previamente al vacío. Para esto, se hizo un esquema del dispositivo con base a las necesidades que el mismo proceso planteaba. Después se llevó a cabo una selección de materiales para la fabricación del reactor principal, por medio del denominado *método sistemático para la selección de materiales*, generado como resultado los diagramas de Ashby, referentes a dicha selección. Se elaboraron los dibujos de construcción para el reactor principal del dispositivo y posteriormente se prosiguió a la manufactura y ensamble del mismo. Se compraron y ensamblaron todos los componentes necesarios para obtener un sistema de entrada/salida de gas del reactor, así como el horno necesario para el proceso.

Se diseñó y fabricó una preforma, con la premisa de que fuera de un material capaz de producir partículas de tamaño y morfología controlada a bajo costo, para lo cual se seleccionó como material pasta comestible elaborada con una mezcla de agua, harina y NaCl, elaborándose un diagrama de mezclas ternario, con el objetivo de encontrar la composición más adecuada para la preforma de manera que esta fuera moldeable, resistente y fácil de disolver después de ser tratada térmicamente. En la fabricación de la misma, se hizo la extrusión y corte del material, obteniendo con esto partículas semicilíndricas de aproximadamente 5mm de diámetro por 4 de largo, posteriormente se efectuó un tratamiento térmico a las partículas con la finalidad de deshidratarlas, calcinarlas y sinterizarlas obteniendo así la preforma, con las dimensiones deseadas.

Una vez armado el dispositivo y obtenida la preforma, se generó el vacío dentro del dispositivo, y posteriormente se procedió a la fusión e infiltración a presión del metal líquido, fabricando así una espuma de aluminio (Al), grado 5005 (UNS No.A95005). La espuma resultante se maquinó para quitar la cascara o piel

externa que presenta una morfología de sólido continuo. De la espuma producida se obtuvieron 4 probetas, las cuales se sumergieron en agua para disolver la preforma remanente (material de sacrificio).

Posteriormente se realizó la caracterización estructural de las probetas de espuma de Al mediante observación microscópica, medición del tamaño de celda y el cálculo de la densidad relativa. Con los resultados obtenidos, se comprobó que el dispositivo era capaz de producir espumas de Al con una porosidad altamente interconectada.

Finalmente se realizó una caracterización mecánica de la espuma producida por medio de pruebas de compresión, observándose que la espuma fabricada presentó el clásico comportamiento de un material celular.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo y doy el más grande y profundo agradecimiento, porque sin su amor y ayuda mi vida no sería la misma, gracias por todo y para siempre a:
BLANCA CONTRERAS ROSALES y BLANCA KEREN MEJIA CONTRERAS.

Por todo su amor, ayuda, motivación y comprensión.

Mis estudios tal vez no hubiesen podido ser concluidos sin la inigualable ayuda de: HILDA GIOVANNA RAMÍREZ GUERRERO

Por inspirar mi vida, apoyarme en mis estudios y darme sabios consejos a:
SALVADOR ESQUIVEL CANO y FERNANDO LÓPEZ CANO

En memoria de:

Amalia Caritina Lilia Cano Jáuregui Pedraza
y Carlos Alberto López López

AGRADECIMIENTOS

Por ayudarme a adquirir conocimientos y habilidades durante mis estudios, y demostrarme que existen personas interesadas en querer transformar los paradigmas para crear un verdadero sistema de enseñanza-aprendizaje. A los mejores maestros durante mi estancia en la facultad:

GUILLERMO FAUSTO SALAS BANUET

MARÍA EUGENIA SOFÍA EMMA NOGUEZ AMAYA

JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

MARCO ANTONIO TALAVERA ROSALES

Por ayudarme a realizar este trabajo y por toda la paciencia que tuvieron conmigo un gran agradecimiento a:

IGNÁCIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS

OSCAR DAVID MOLINA RAMÍREZ

Agradezco enormemente a los proyectos SENER-CONACYT 151496 y SEP-CONACYT 178289 por el financiamiento para la realización de este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	3
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
ÍNDICE	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	14
1.1 ESTRUCTURA DE LAS ESPUMAS METÁLICAS.....	14
1.2 OBTENCIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS.....	17
1.3 PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS METÁLICAS	21
1.3.1 Densidad.....	22
1.3.2 Propiedades mecánicas	23
1.3.3 Propiedades térmicas.....	33
1.3.4 Propiedades eléctricas	34
1.3.5 Propiedades acústicas	35
1.3.6 Propiedades químicas.....	36
1.4 APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LAS ESPUMAS METÁLICAS	38
1.4.1 Estructuras tipo sándwich	38
CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL	44
2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO.....	44
2.1.1 Planteamiento del sistema para el proceso.....	44
2.1.2 Selección de materiales	44
2.1.3 Diseño del reactor (CAD)	45
2.1.4 Construcción del dispositivo	46
2.2 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS	47
2.2.1 Diseño y obtención de la preforma.....	47
2.2.2 Fabricación de espuma metálica.....	50
2.2.3 Caracterización estructural y mecánica de la espuma metálica....	54

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVO.....	58
3.1.1 Planteamiento del sistema para proceso	58
3.1.2 Selección de materiales	61
3.1.3 Dibujos de construcción del reactor (CAD)	70
3.1.4 Construcción del dispositivo	74
3.2 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMA METÁLICA....	81
3.2.1 Diseño y obtención de preforma.....	81
3.2.2 Fabricación de espuma metálica.....	85
3.2.3 Caracterización estructural.....	89
3.2.4 Caracterización mecánica	94
CAPÍTULO IV. CONCLUSION Y OBSERVACIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXO I (Parámetros utilizados en las pruebas de compresión)	106
ANEXO II (Propiedades de material utilizado para la fabricación del reactor)	107
ANEXO III (Dibujos de fabricación del reactor)	110
ANEXO IV (Propiedades de material utilizado para la fabricación de la espuma)	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- (A) Metal celular, (B) Espuma metálica, (C, D) Esponja metálica, y (E) Metal Poroso. ^[3]	14
Figura 2.- Procesos de producción de metales celulares agrupados de acuerdo al estado de la materia del metal de partida. ^[7]	18
Figura 3.- Relación del tamaño de la celda y la densidad relativa (ρ/ρ_s) para algunos de los principales procesos de fabricación (ρ es la densidad del metal celular y ρ_s densidad del material sólido del cual está hecho). ^[8]	18
Figura 4.- Esquemas de la variedad de procesos por infiltración de preforma soluble (IPS). ^[9]	19
Figura 5.- Comparación del intervalo de valores aproximados de las propiedades de diferentes tipos de materiales. ^[10]	21
Figura 6.- Variación de la densidad relativa en función del número de poros por unidad de superficie (NA), el área de los poros por unidad de volumen (SV) y el volumen de los poros por unidad de volumen (VV). ^[12]	23
Figura 7.- Curva esfuerzo-deformación a compresión típica de una espuma metálica. ^[11]	25
Figura 8.- Curva esfuerzo-deformación nominal de varias espumas comerciales. ^[15]	26
Figura 9.- Efecto del tamaño relativo de probeta (L/d) sobre el módulo de Young y sobre la meseta de esfuerzo (σ_{pl}) de un par de espumas metálicas comerciales. ^[15]	27
Figura 10.- Obtención de la energía absorbida y la eficiencia de absorción mediante la curva esfuerzo-deformación a compresión. ^[5]	30
Figura 11.- Comportamiento a la fatiga de espuma de celda cerrada Alporas. ^[11]	31
Figura 12.- Modulo de Young vs densidad de espumas metálicas comerciales. ^[11]	32
Figura 13.- Resistencia a compresión vs densidad de espumas metálicas comerciales. ^[11]	32
Figura 14.- Rigidez específica vs resistencia a compresión específica de espumas metálicas comerciales. ^[11]	33
Figura 15.- Conductividad térmica vs calor específico volumétrico de espumas comerciales. ^[11]	34
Figura 16.- Coeficiente de absorción de sonido de diferentes espumas de Al de densidad 0,5 g/cm ³ con estructura de poro abierto con diferente diámetro de poro "a" en mm, comparado con aluminio sólido, espuma de UP y matriz de fibra de vidrio. ^[26]	36
Figura 17.- Mapa de los diferentes tipos de materiales metálicos celulares con relación a su aplicación. ^[7]	39
Figura 18.- Paneles comerciales con estructura tipo sándwich. ^[30,31]	39
Figura 19.- a) Intercambiadores de calor construidos con espuma metálica, b) Tanques para almacenamiento de nitrógeno líquido cubiertos con espuma metálica, c) Emblema corporativo en espuma metálica, d) Depuradores de CO ₂ fabricados con espuma metálica, e) Micrófono con apantallamiento acústico de espuma metálica, f) Biombo en espuma metálica. ^[32, 33]	41
Figura 20.- Aplicaciones de las espumas metálicas en el sector del transporte a) Uso de una estructura AFS en el brazo de una grúa b) Absorbente de energía en un parachoques de tranvía COMBINO c) Reducción de peso en automóvil de la clase Ferrari. ^[31]	42
Figura 21.- Cono espacial para el Ariane 5 fabricado por la E.S.A. ^[32]	42
Figura 22.- a) Intercambiador de calor basado en espuma metálica, b) Espumas metálicas colocadas en un viaducto elevado en Japón, con el propósito de mitigar el ruido hacia los residentes cercanos. ^[31]	43
Figura 23.- a) y b) Techos de espuma metálica c) Piso de espuma metálica, d) Pared interior de espuma metálica, e) Pared exterior de espuma metálica, f) Anuncio comercial de espumas metálicas para construcción. ^[34]	43
Figura 24.- Ingredientes de la masa para fabricar la preforma.	47
Figura 25.- a) Proceso de mezclado b) Extrusor utilizado c) Partículas después de tratamiento de secado.	49
Figura 26.- Esquema representativo de la etapa de generación de vacío.	50
Figura 27.- Esquema representativo de la etapa de fusión.	52

Figura 28.- Esquema representativo de la etapa de infiltración.-----	53
Figura 29.- Reactor en diferentes etapas de enfriamiento, con la implementación de la placa de cobre para enfriamiento acelerado desde la parte inferior del reactor. -----	53
Figura 30.- Una de las probetas de la espuma obtenida después de ser cortada al tamaño ideal para ensayos cuasiestáticos de compresión. -----	54
Figura 31.- Una de las probetas después de ser removidos completamente los residuos de la preforma. 55	
Figura 32.- Balanza analítica marca Ohaus, modelo Pioneer utilizada para la obtención de los pesos de las probetas de espuma de Al, así como los compuestos de la preforma para fabricarlas. -----	56
Figura 33.- Probeta ensayada a compresión a) 20% deformación b) 45% de deformación.-----	57
Figura 34.- Secuencia del proceso a realizar por el dispositivo diseñado para la fabricación de espumas metálicas.-----	60
Figura 35.- Código de colores del software CES EduPack2011 para identificar cada grupo de materiales. -----	65
Figura 36.- Diagrama obtenido con la base de datos de 98 grupos y clases de materiales. -----	65
Figura 37.- Diagrama obtenido al trazar la línea de discriminación requerida para la selección. -----	66
Figura 38.- Diagrama obtenido con la base de datos de 98 clases de materiales, poniendo como restricción la línea de discriminación y los límites de los requerimientos. -----	67
Figura 39.- Resultados de la selección de materiales con una base de datos de 98 clases de materiales. 67	
Figura 40.- Selección de materiales de una base de datos de 3881 materiales. -----	68
Figura 41.- Resultado final de la selección de materiales. -----	69
Figura 42.- Modelo de los componentes del sistema de válvulas. -----	72
Figura 43.- vista de ensamble de los componentes del reactor.-----	73
Figura 44.- a) Cuerpo o envoltorio del reactor, b) Tapa inferior y c) Tapa inferior. -----	75
Figura 45.- a) Soldadura de la tapa superior con el tubo de entrada y salida de gases, b) Soldadura de la boquilla al final del tubo de entrada y salida de gases. -----	76
Figura 46.- Empaques de grafito utilizados para la hermeticidad (sello) del recipiente y pernos de sujeción para cerrar el reactor. -----	77
Figura 47.- Reactor ensamblado y comparación con su modelo CAD. -----	77
Figura 48.- Sistema de válvulas. -----	78
Figura 49.- Sensor "Pirani" y display indicador de vacío.-----	79
Figura 50.- Herramienta (gancho) para remover e introducir el reactor al horno.-----	79
Figura 51.- a) Horno, b) Horno abierto, c) Lanceta-tapón y tapa con orificio.-----	80
Figura 52.- diagrama de mezclas para la masa con la que se fabricará la preforma.-----	81
Figura 53.- Tratamiento térmico de secado inicial de las partículas de la preforma. -----	83
Figura 54.- Partículas obtenidas para la fabricación de la preforma y reactor con las partículas ya colocadas. -----	83
Figura 55.- Tratamiento térmico de preforma. -----	84
Figura 56.- Preforma después de someterla al tratamiento térmico. -----	84
Figura 57.- Al puesto encima de la preforma para ser fundido e infiltrado. -----	85
Figura 58.- Parámetros durante la fusión e infiltración de Al. -----	86
Figura 59.- Espuma metálica resultado del proceso antes y después de ser removida la capa superficial de Al. -----	87
Figura 60.-espuma de Al obtenida "Probeta número 2". -----	89
Figura 61.- Ejemplo representativo de las fotografías de las espumas tomadas con el microscopio estereográfico. -----	89
Figura 62.- Gráfica Esfuerzo –Deformación nominales para las espumas de Al ensayada a compresión. -95	
Figura 63.- Curva esfuerzo- deformación de la probeta 1 donde se describen las diferentes zonas típicas del comportamiento de materiales celulares.-----	96

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.- Instituciones productoras de metales celulares. ^[1]</i>	13
<i>Tabla 2.- Algunas de las posibles dispersiones binarias de una fase en otra, donde cada fase puede estar en cualquiera de los tres estados de la materia. ^[2]</i>	14
<i>Tabla 3.- Relación entre estado de la materia del metal inicial, el material y tipo de porosidad obtenida para los principales procesos. ^[6]</i>	17
<i>Tabla 4.- Cálculo de las propiedades mecánicas de las espumas metálicas a partir de propiedades básicas de las espumas metálicas y del material de origen. ^[11]</i>	25
<i>Tabla 5.- Resumen de propiedades térmicas y mecánicas para diferentes espumas de base aluminio. ^[29]</i>	37
<i>Tabla 6.- Pruebas realizadas para obtener la composición ideal para la fabricación de las partículas de la preforma.</i>	48
<i>Tabla 7.- Resultado del análisis de composición con EDS.</i>	74
<i>Tabla 8.- Características estructurales observadas con el microscopio estereográfico.</i>	90
<i>Tabla 9.- Resultado de las mediciones del tamaño de celda promedio</i>	91
<i>Tabla 10.- Resultado de las mediciones del tamaño de celda promedio.</i>	92
<i>Tabla 11.- Valores de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las curvas esfuerzo-deformación.</i>	96

INTRODUCCIÓN

Los materiales celulares se caracterizan por tener una estructura altamente porosa, los cuales pueden ser de porosidad abierta o cerrada, las espumas metálicas pertenecen a este grupo de materiales. Por sus novedosas propiedades físicas, mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas las espumas metálicas constituyen una nueva y atractiva clase de materiales a los cuales cada día se les encuentra mayor utilidad en diversas industrias como la aeroespacial, automotriz, química, de la construcción, el diseño industrial, etc. Las primeras patentes de estos materiales se publicaron en los años 40 y hasta 1970 se propusieron muchas variantes de los procesos de espumado. A partir de 1980 gracias a una mayor publicación de resultados resurgió la fabricación y en nuestros días ha empezado su proceso de comercialización. En la actualidad, existen más de 18 empresas distribuidas por el mundo que comercializan espumas metálicas. Además de estas compañías, también existe un gran número de centros de investigación, universidades y empresas trabajando en el desarrollo de nuevos procesos, la búsqueda de nuevas aplicaciones, caracterización, la modelación y simulación tanto de procesos como del comportamiento de las espumas metálicas obtenidas (tabla 1).^[1]

Hoy en día, el gran reto para los investigadores en materiales se fundamenta, aún, en el perfeccionamiento de las técnicas de fabricación que permitan obtener metales celulares reproducibles, confiables, de calidad, a bajo costo y en poco tiempo. Por tal motivo, en el presente trabajo, se tiene como objetivo diseñar y construir un dispositivo para el proceso de fabricación de espumas metálicas de metales con punto de fusión menor a 700 °C, partiendo de la idea de que se pueden producir espumas metálicas, mediante la infiltración de metal líquido provocada por la presión de un gas inerte, a través de una preforma que se encuentra previamente al vacío. También se pretende, observar los efectos de

utilizar una preforma de un material con el cual se puedan producir partículas de tamaño y morfología controlada a bajo costo. De igual forma, también se reporta la caracterización estructural y mecánica de la espuma producida mediante dicho proceso.

Tabla 1.- Instituciones productoras de metales celulares. [1]

Proceso de producción	Institución	Denominación comercial/proceso
Espumado directa del metal fundido por inyección de gas	Cymat Aluminium Corporation (Canadá)	Cymat
	HKB-LKR (Australia)	Metcom
	Foamtech (Corea)	Lasom
	Sperre (Noruega)	
Espumado directa del metal fundido por adición de agente espumante	Shinko Wire Co. (Japón)	Alporas
	Cambridge University (Inglaterra)	Formgrip
Fundición de precisión (investment casting)	IPP (Alemania)	Doucel
	M-Pore (Alemania)	
	ERG (Estados Unidos)	
Infiltración en moldes solubles	Instituto de Tecnología Federal de Suiza (Suiza)	
	Northwestern University (Estados Unidos)	
	Universidad Pontificia Bolivariana (Bolivia)	
Reacción eutéctica sólido-gas	DMI (Ucrania)	Gasar
Infiltración del metal líquido en molde de esferas huecas	Instituto Tecnológico de Georgia (Estados Unidos)	Syntatic
Adición de agente espumante a precursores producidos por PM	Mepura (Australia)	Alulight
	Gleich-IWE (Alemania)	Foaminal
	Fraunhofer Institute (Alemania)	
	Neuman (Austria) Schunk-Honsel (Alemania)	
	Schunk-Honsel (Alemania)	Alufoam
Sinterización de polvos/fibras	GKN Sinter Metal Filter GMBH	
Sinterización de polvos	Porvair Advanced Materials (Estados Unidos)	Metpor
Sinterización disolución de moldes solubles	Liverpool University (Inglaterra)	DSP
Sinterización de esferas huecas metálicas	IFAM (Alemania)	
Técnicas de depositación	Inco Special Products (Canadá)	Incofoam
	Recemat internacional	Recemat
	Sumilomo (Japón)	Celmet
	Fibernide (Canadá)	
	Dunlop (Inglaterra)	Retimet

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 ESTRUCTURA DE LAS ESPUMAS METÁLICAS

Los materiales celulares están definidos como cuerpos metálicos sólidos con gases dispersos en su interior; a su vez; las espumas metálicas son un subgrupo dentro de los metales celulares, esto es importante aclarar ya que el término espuma está, generalmente, referido a la dispersión de burbujas de gas en un líquido (tabla 2). Sin embargo, si la morfología de una espuma metálica puede mantenerse, mediante algún proceso hasta obtener un sólido celular entonces, se obtiene un metal celular. [2]

Tabla 2.- Algunas de las posibles dispersiones binarias de una fase en otra, donde cada fase puede estar en cualquiera de los tres estados de la materia. [2]

	Es dispersado en un:		
Cuando un:	GAS	LIQUIDO	SOLIDO
GAS	Mezcla de gases	Espuma	Espuma solida o Sólido celular
LIQUIDO	Niebla (fog)	Emulsión	Gel
SOLIDO	Humo	Suspensión de partículas (slurry)	Partículas incrustadas (embedded particles)

Los metales celulares se dividen en varios tipos, de acuerdo a su estructura, por lo que es necesario identificar cuáles son y que los caracteriza. La morfología de los diferentes tipos de metales celulares se muestra en la figura 1 [3].

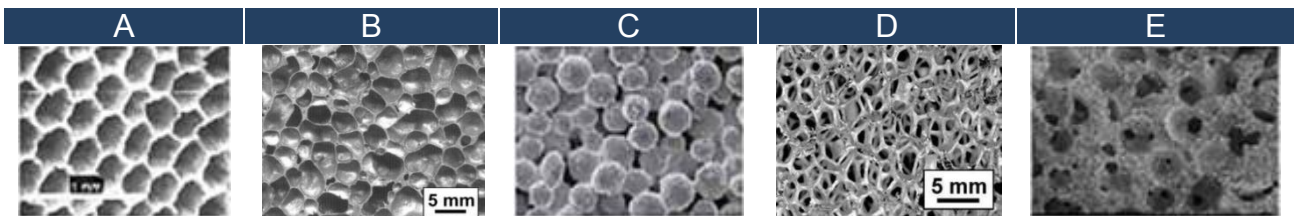


Figura 1.- (A) Metal celular, (B) Espuma metálica, (C, D) Esponja metálica, y (E) Metal Poroso. [3]

De esta figura se puede mencionar lo siguiente:

(A) Metal celular: es un metal en el cual los espacios están divididos por células bien determinadas. Los límites de estas células son de metal sólido y en el interior son espacios vacíos.

(B, C) Espuma metálica: son casos especiales de los metales celulares. Una espuma metálica se origina después de la solidificación del metal líquido, la sinterización o depositación de partículas, produciendo celdas cerradas, redondas o poliédricas, separadas una de otra por una capa delgada.

(D) Esponja metálica o Espuma de celda abierta: está formada por una red continua de metal, coexistiendo con una red de espacios vacíos los cuales también están interconectados.

(E) Metal Poroso: Es un tipo especial de metal celular en que los poros están normalmente aislados uno de otros, producto de gases atrapados y se caracterizan por tener una superficie externa lisa. [3]

Actualmente, gran parte de la investigación de espumas se centra en las espumas de aleaciones de Al, como es el caso de este trabajo, ya que además de tener buenas propiedades son relativamente fáciles de manipular y procesar. La espuma de Al es un material metálico relativamente isotrópico muy poroso con una distribución aleatoria de los poros dentro de su estructura, dichos poros son esencialmente esféricos y parcialmente cerrados, generalmente, interconectados, aunque también puede lograrse una porosidad completamente cerrada, ocupando del 50 al 95% del volumen total. La forma del poro se puede también describir por su geometría. No hay ningún diámetro típico de poro, no obstante, algunas muestras pueden prepararse con tamaños de poro controlado

(entre 0.5 - 8 mm) dependiendo de la composición de la matriz o los parámetros del proceso de espumado. [4]

La caracterización estructural de las espumas metálicas generalmente se realiza mediante la definición de su topología de celdas (celda abierta, celda cerrada), el material que forma la espuma, la densidad relativa, el tamaño y forma de celda y anisotropía. La densidad se puede medir pesando una muestra de volumen conocido, mientras que para el resto de parámetros es necesario emplear microscopía óptica o electrónica. La microscopía óptica es de utilidad para la caracterización de las espumas metálicas, siempre que la espuma sea sometida a una preparación metalográfica, de acuerdo al procedimiento convencionalmente empleado para los metales. Igualmente útil es la microscopía electrónica de barrido (SEM: Scanning electron microscopy), aunque puede presentar información un tanto confusa en el caso de las espumas de celda cerrada, que complica la medición de su forma y tamaño de celda. Adicionalmente, existen otras técnicas de manejo y análisis de imagen que pueden ser utilizadas, tales como la tomografía computarizada. [5]

1.2 OBTENCIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS

Existen diferentes metodologías para su fabricación dependiendo del estado de la materia del metal de partida y el tipo de metal con el que se realice el proceso. En general se distinguen cuatro categorías: formadas a partir de una fase vapor (componentes metálicos gaseosos), de un estado de metal líquido, de un metal sólido en polvo y por electrodeposición desde una solución acuosa (tabla 3 y figura 2). Cada una de las categorías sólo ha sido utilizada con un pequeño subgrupo de metales para crear un material con poros con un intervalo limitado de sus densidades relativas y el tamaño de sus celdas (figura 3). [6]

Tabla 3.- Relación entre estado de la materia del metal inicial, el material y tipo de porosidad obtenida para los principales procesos. [6]

METAL DE PARTIDA	PROCESO	METALES UTILIZADOS	POROSIDAD (%)	TIPO DE CELDA
SÓLIDO	Sinterizado de esferas huecas, GLATT®	Fe	80	Cerrada
	Captura de gas	Ti	45	Cerrada
	Space-holding filler	Ti	70	Cerrada
	Sinterizado de polvos o fibras	Cu, Ni, Fe	20-80	Cerrada
IÓNICO	Electrodeposición	Ni, Cu	93-97.5	Abierta
VAPOR	Deposición en forma de vapor, INCOFOAM®	Ni, Cu	92-95	Abierta
LÍQUIDO	Inyección de gas, CYMAT® , METCOMB®	Al, Zn	80-97	Cerrada
	Agentes espumantes, ALPORAS®	Al, Zn	91-93	Cerrada
	Difusión de gas, GASAR	Ni, Cu, Al, Mg	5-75	Cerrada
	Infiltración, DOUCEL®, RECEMAT®	Al, Zn, Pb, Cu	80-97	Abierta
	Ruta PM, ALULIGHT®	Al, Zn, Pb	60-90	Cerrada

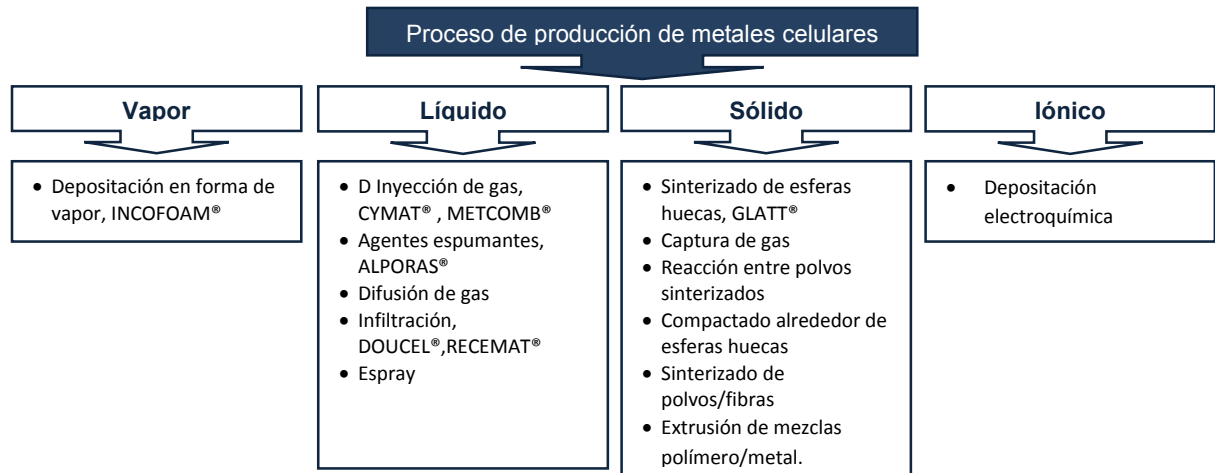


Figura 2.- Procesos de producción de metales celulares agrupados de acuerdo al estado de la materia del metal de partida. [7]

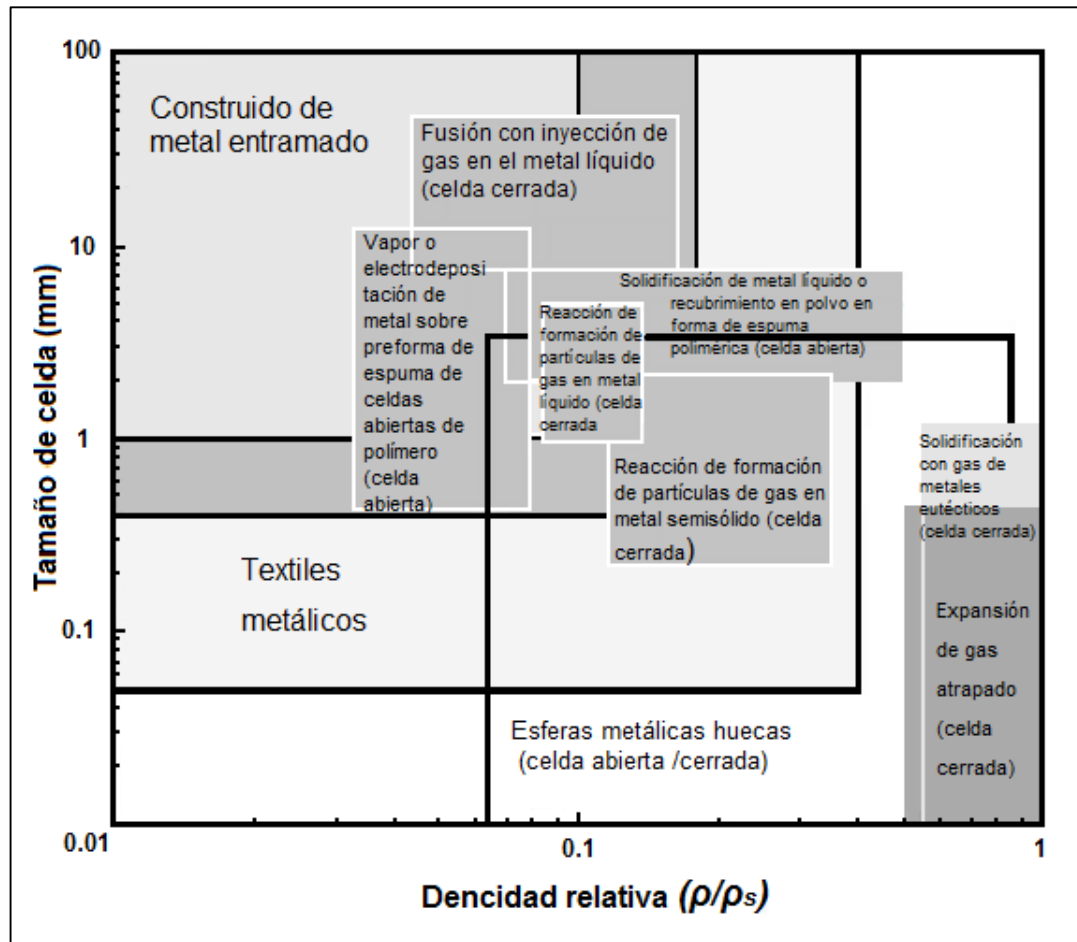


Figura 3.- Relación del tamaño de la celda y la densidad relativa (ρ/ρ_s) para algunos de los principales procesos de fabricación (ρ es la densidad del metal celular y ρ_s densidad del material sólido del cual está hecho). [8]

El proceso a desarrollar en este trabajo, pertenece al grupo de procesos denominados por “infiltración” o “SPI” (Soluble Preform Infiltration), en los cuales se parte del metal líquido; es decir metal fundido; buscando que este fluya a través de una preforma llenando los espacios vacíos dentro de ésta, para posteriormente solidificar. Después, se extrae del molde y se maquina si es necesario para remover la denominada piel de la espuma y finalmente se elimina la preforma por métodos térmicos o químicos dejando los espacios que ocupaba ésta, en el interior del material como huecos, y con ello obtener una espuma metálica.

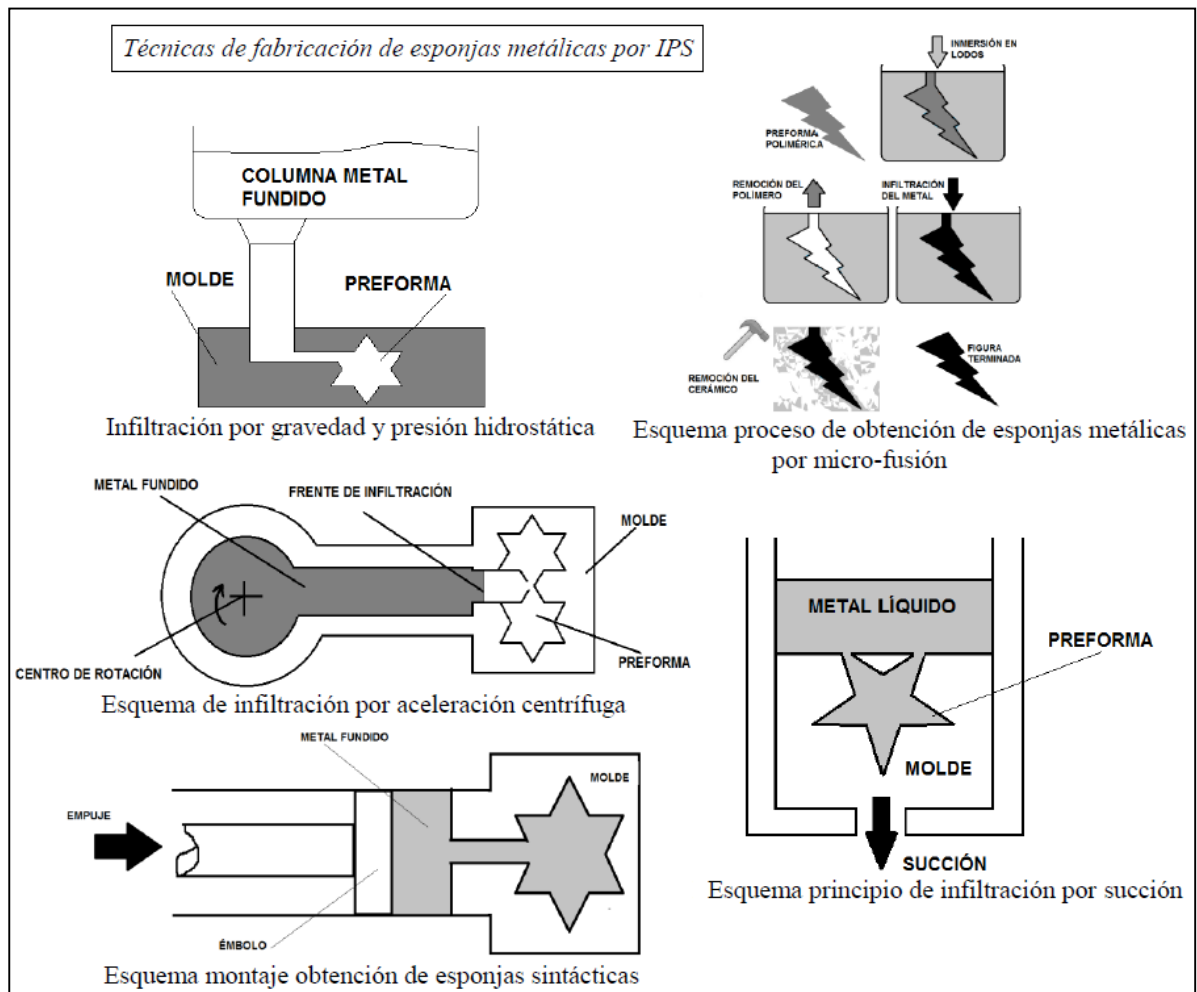


Figura 4.-Esquemas de la variedad de procesos por infiltración de preforma soluble (IPS). [9]

Algunas variantes ya estudiadas de este tipo de proceso (Figura 4) son: ^[9]

- Infiltración por gravedad.
- Infiltración por Micro-fusión.
- Infiltración por aceleración centrífuga.
- Infiltración por succión o presión negativa.
- Infiltración con empuje o presión positiva.

1.3 PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS METÁLICAS

Las propiedades de las espumas metálicas están directamente ligadas a su composición química, su morfología y proporción entre las zonas sólidas y las gaseosas que componen su estructura. La principal ventaja de emplear las espumas metálicas, es el disponer de unas propiedades notablemente diferentes frente a las aleaciones solidas originales, lo que las hacen atractivas para la fabricación de nuevos productos y el desarrollo de nuevas aplicaciones (figura 5).

El progreso de las espumas metálicas para satisfacer nuevos requerimientos y aplicaciones está basado en la obtención de propiedades cada vez más específicas. [14]

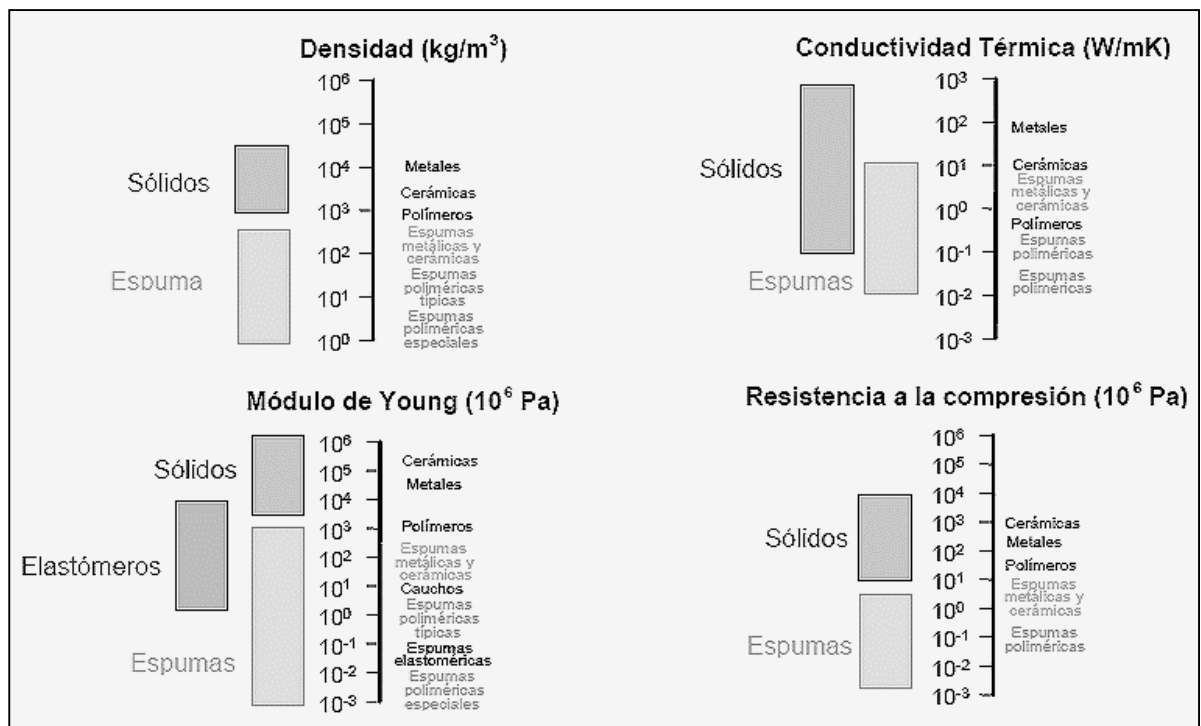


Figura 5.- Comparación del intervalo de valores aproximados de las propiedades de diferentes tipos de materiales. [10]

En este trabajo el dispositivo diseñado es para producir espumas de aleaciones con punto de fusión bajo (máximo 750°C), y probado con Al, por su buena relación resistencia-peso. Por ello a continuación se desarrolla un breve análisis de las propiedades más importantes de las espumas de aleaciones base Al.

1.3.1 Densidad

Las propiedades mecánicas de las espumas de Al dependen, fundamentalmente, de su densidad y la estructura del poro que las forma. La densidad de la espuma, se puede determinar por métodos volumétricos (peso y geometría) o mediante análisis de imagen de la estructura del poro interno, típicamente la densidad de la espuma de Al se reporta en un intervalo de 0,12 a 1,2 gr/cm³. [11]

La densidad relativa de una espuma metálica se obtiene a partir de la densidad de la espuma y de la densidad del sólido que la conforma mediante la expresión:

$$\rho_r = \frac{\rho^*}{\rho_s} \dots\dots\dots (1)$$

Donde ρ_r es la densidad relativa, ρ^* es la densidad de la espuma y ρ_s es la densidad del material sólido que conforma la espuma, dicho parámetro al multiplicarlo por cien representa el porcentaje total de sólido en el material; por lo que; al considerar que el porcentaje de sólido y el porcentaje de espacios sin material es igual a 100% (dentro de un volumen definido) es posible definir a la cantidad de porosidad como:

$$p = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \dots\dots\dots (2)$$

Donde al multiplicarse por 100 el valor resultante, es el porcentaje de porosidad de la espuma.

De igual forma se ha observado que al determinar parámetros geométricos como: número de poros por unidad de superficie (NA), el área de los poros por unidad de volumen (SV) y el volumen de los poros por unidad de volumen (VV), estos se comportan de tal forma que al disminuir la densidad, VV crece y NA y SV disminuyen (figura 6).^[12]

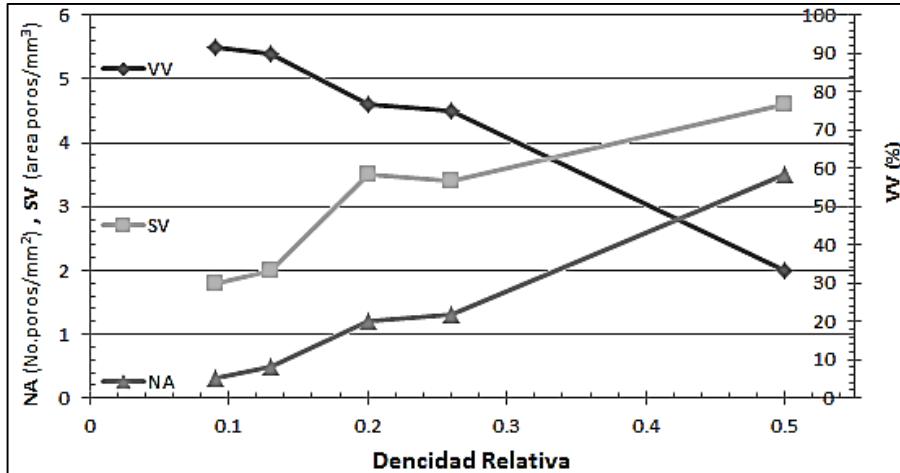


Figura 6.- Variación de la densidad relativa en función del número de poros por unidad de superficie (NA), el área de los poros por unidad de volumen (SV) y el volumen de los poros por unidad de volumen (VV).^[12]

1.3.2 Propiedades mecánicas

El valor de la mayoría de las propiedades de las espumas de Al pueden ser escalables al relacionarlas con su densidad relativa, de manera que dichos valores pueden ser aproximados teóricamente al obtener expresiones con la siguiente forma:^[11]

$$\frac{P^*}{P_s} = \omega \left\{ \frac{\rho^*}{\rho_s} \right\}^n \dots\dots\dots (3)$$

Dónde: el subíndice “s” indica que la propiedad corresponde al metal sólido del cual está hecha la espuma, el superíndice “*” indica una propiedad de la espuma, P es una propiedad cualquiera (por ejemplo módulo de Young, conductividad

eléctrica, etc.), ω es una constante y n un exponente fijo para dicha propiedad los cuales se obtienen de manera experimental. A continuación se presentan las ecuaciones con las que se puede aproximar algunas de las propiedades, todas ellas son útiles como primera aproximación, en las etapas iniciales de diseño (tabla 4).

Los ensayos a compresión uniaxial cuasiestática, son muy habituales para la caracterización mecánica de las espumas metálicas ya que muchas estructuras se diseñan para trabajar a compresión. Los resultados de los ensayos a compresión comúnmente exhiben una visible y bien definida *meseta de esfuerzo*, σ_{pl} (Figura 7). El mecanismo involucrado en este comportamiento describe que la respuesta mecánica inicial está relacionada a la flexión de los bordes y alargamiento de las caras, en espumas de celda cerrada, y en espuma de celda abierta únicamente a la flexión de los bordes de celda.^[13] El mecanismo involucrado en este comportamiento describe que la respuesta mecánica inicial está relacionada a la flexión de los bordes y alargamiento de las caras, en espumas de celda cerrada, y en espuma de celda abierta únicamente a la flexión de los bordes de celda. ^[14]

Cuando se incrementa la carga aplicada sobre las espumas, las celdas empiezan a deformarse o fracturarse (dependiendo del material) a una presión casi constante. Posteriormente cuando todas las celdas han colapsado, inicia una etapa denominada compactación o densificación en donde el aumento en la deformación causa presión entre las paredes de celda aumentando el esfuerzo de forma rápida a partir de una determinada deformación, llamada *deformación de densificación* (ϵD).

Tabla 4.- Cálculo de las propiedades mecánicas de las espumas metálicas a partir de propiedades básicas de las espumas metálicas y del material de origen. [11]

Estructura de celda	Abierta	Cerrada
Módulo de Young, E	$(0.1-4)E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2$	$(0.1-1)E_s \left(0.5\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 + 0.3\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right)$
Módulo de cortadura, G	$\approx \frac{3}{8}E$	$\approx \frac{3}{8}E$
Módulo de Poisson, ν	0.32-0.34	0.32-0.34
Módulo de comp. vol., K	$\approx 1.1E$	$\approx 1.1E$
Resistencia a tracción, σ_t	$\approx (1.1-1.4)\sigma_c$	$\approx (1.1-1.4)\sigma_c$
Resistencia a compresión, σ_c	$(0.1-1)\sigma_{c,s} \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{3/2}$	$(0.9-1)\sigma_{c,s} \left(0.5\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{2/3} + 0.3\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right)$
Deformación de compactación, ε_D	$(0.9-1) \left(1 - 1.4\frac{\rho}{\rho_s} + 0.4\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^3\right)$	$(0.9-1) \left(1 - 1.4\frac{\rho}{\rho_s} + 0.4\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^3\right)$
Dureza, H	$\sigma_c \left(1 + 2\frac{\rho}{\rho_s}\right)$	$\sigma_c \left(1 + 2\frac{\rho}{\rho_s}\right)$

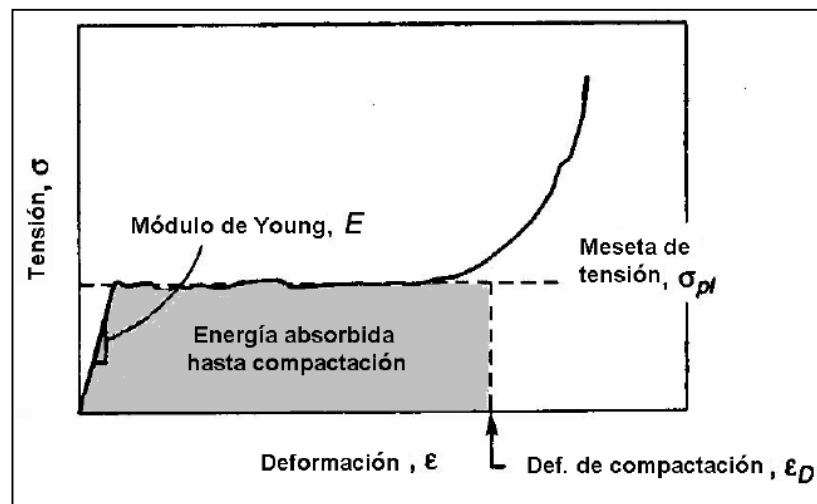


Figura 7.- Curva esfuerzo-deformación a compresión típica de una espuma metálica. [11]

En las espumas de celda cerrada existe un comportamiento más parecido al de un material sólido, existiendo un ligero incremento del esfuerzo con la deformación plástica, esto debido a los esfuerzos de membrana en las caras de las celdas (Figura 8). [5]

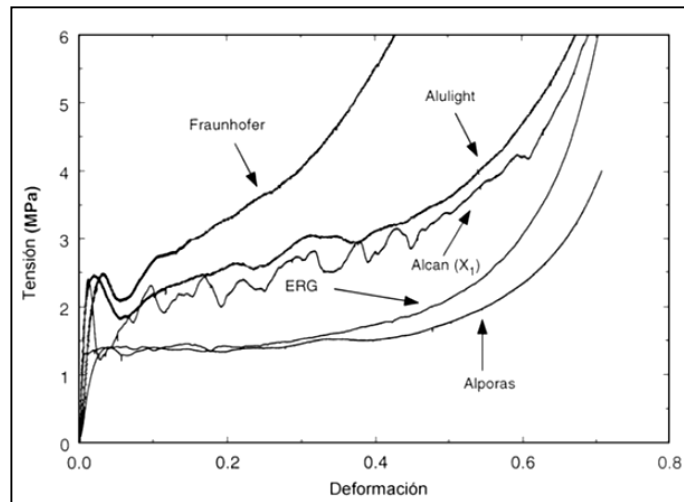


Figura 8.- Curva esfuerzo-deformación nominal de varias espumas comerciales. [15]

En el análisis de la resistencia a la compresión de estructuras tipo sándwich se ha obtenido que, generalmente, la carga del colapso obtenida excede el valor estimado (por cualquier método teórico) en un 50%. Se piensa que la diferencia es debida a la presencia de una capa límite en la interface entre el núcleo de espuma y las caras de láminas. [16]

Debido a la estructura de las espumas, los ensayos mecánicos a compresión requieren de cuidados especiales, ya que los resultados obtenidos dependen de la relación del tamaño de celda de la espuma con el tamaño y forma de la probeta ensayada, el acabado superficial de la probeta y la forma en que es sujeta la probeta.

De tal forma que, para minimizar el daño de las celdas y obtener valores más ciertos en la caracterización mecánica, es recomendable hacer el corte con disco de diamante, electroerosión por hilo u otro equipo de EDM (*electric discharge machining*: mecanizado por descarga eléctrica), fresado químico, o

chorro de agua a alta presión, ya que se ha encontrado que en comparación con el corte convencional con sierra de cinta, este último disminuye significativamente un 15% el valor del módulo de Young y hasta 7% el de la resistencia a compresión.^[5,11]

Para el tamaño de las probetas, por lo general se toma una medida relativa la cual relaciona el tamaño de probeta (L) y el tamaño de celda (d) de tal forma que L/d sea mayor a siete, ya que a estos valores los efectos causados durante los ensayos el módulo de elasticidad y la resistencia tienden a incrementarse a medida que aumenta L/d ,^[11,17] lo cual implica que debe tomarse este valor como referencia al dimensionar las probetas para que tengan representatividad (Figura 9).

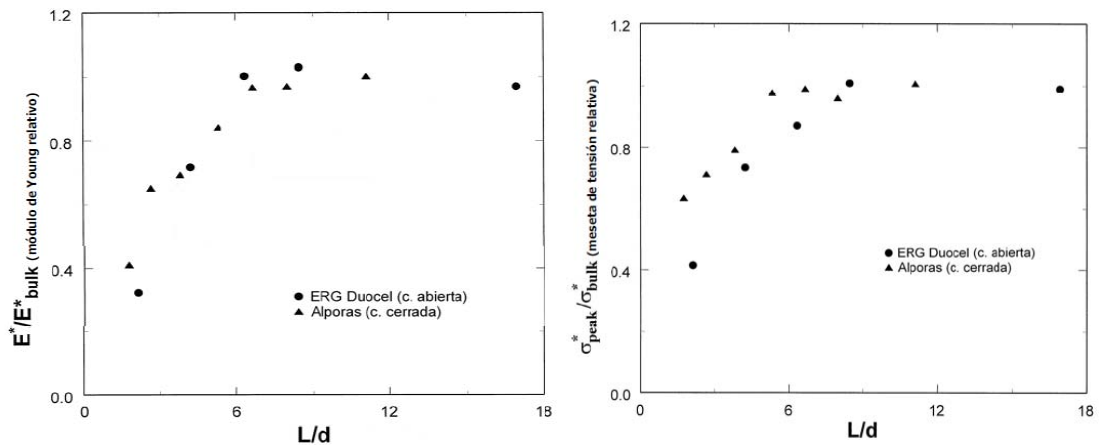


Figura 9.- Efecto del tamaño relativo de probeta (L/d) sobre el módulo de Young y sobre la meseta de esfuerzo (σ_{pl}) de un par de espumas metálicas comerciales.^[15]

En la práctica, suele ocurrir que los valores de módulo de Young (E) estimados mediante extensómetros sean 5-10% mayores que los medidos por desplazamiento de cabezal.^[11]

Como en cualquier otro ensayo de compresión uniaxial, es conveniente lubricar las caras de la probeta que estén en contacto con los platos de carga, para evitar que el rozamiento entre ambas superficies ocasione falta de homogeneidad en la deformación (abarrilamiento) y, por consiguiente, imprecisión en la estimación de las propiedades mecánicas.^[5]

Mediciones de deformación superficial han indicado la existencia de plasticidad localizada a esfuerzos por debajo del límite elástico de la espuma metálica, lo cual tiende a reducir la pendiente de su curva esfuerzo-deformación en la zona elástica. ^[18] Como consecuencia de esto, las mediciones del módulo de Young de la espuma deben hacerse a partir de la pendiente obtenida al hacer una descarga aproximadamente al 75% de su resistencia a compresión. La *resistencia a compresión* (σ_c) se toma como el pico de esfuerzo inicial de la curva esfuerzo-deformación (previo a la meseta de esfuerzo), siempre que el mismo exista, de lo contrario, se toma como el esfuerzo correspondiente a la intersección entre las pendientes de la zona elástica y de la meseta de esfuerzo.^[11]

El módulo de elasticidad es de importancia técnica debido a que un módulo de elasticidad relativamente alto, con densidad baja, permite obtener una rigidez específica muy alta y con esto poder minimizarse el peso de una estructura. Dicho módulo no puede obtenerse fácilmente a partir de la curva esfuerzo-deformación, debido al efecto de sujeción y también debido a la deformación plástica de paredes celulares muy delgadas en las fases iniciales de aplicación del esfuerzo. El método más adecuado para este propósito parece ser el cálculo de la respuesta de vibraciones libres de las muestras. ^[14]

El módulo de elasticidad también puede calcularse usando la respuesta frente a vibración por impacto según DIN 53 440, donde el módulo de elasticidad resulta, casi, independiente de la frecuencia de resonancia. ^[19]

Es importante señalar que en relación al comportamiento a tracción y compresión cuasiestática de las espumas metálicas, usualmente el módulo de Young, E , a tracción es alrededor de un 10% mayor al que se tiene en compresión. ^[5]

La capacidad de deformación plástica está directamente asociada a la absorción de energía estática y dinámica. El comportamiento plástico está relacionado con la variación del tamaño de poro, habiéndose observado que el micromecanismo de deformación en las espumas de poro cerrado, es el colapso colectivo

simultáneo de 5 o 6 poros. Al variar el volumen de las muestras estudiadas, no se han observado variaciones escalonadas de propiedades. [20]

El comportamiento a tracción de las espumas metálicas difiere del que se ha descrito para compresión. Éste no ha sido tan estudiado debido a que con muestras de estos materiales se tienen complicaciones con las mordazas de sujeción. Hasta ahora se realizan sobre muestras de forma de prisma rectangular o con geometría de hueso, mediante ensayos cuasiestáticos. Las espumas de Al muestran un comportamiento frágil bajo carga de tracción. Los esfuerzos en la rotura indican que la deformación elástica es seguida por una deformación plástica provocando un fallo inmediato de la espuma. Los poros individuales actúan como muescas que propician el inicio de la fractura. [21]

Las espumas de Al presentan alta eficiencia al absorber energía dinámica, ya que su velocidad de deformación es casi constante para un amplio intervalo de velocidades de aplicación de carga. La estructura altamente isotrópica de la espuma hace que la energía mecánica recibida se disperse por igual en todas las direcciones. Durante el impacto los poros se colapsan y actúan de amortiguador, disipando la energía de choque. Se han estudiado espumas de Al sujetas a impacto con cargas de choque en medios líquidos y gaseosos, en los cuales se describe que la energía disipada con un choque frontal excede significativamente la absorción de energía absorbida mediante ensayos cuasiestáticos (10^3 s^{-1}). [14] En los ensayos de choque, la deformación produce una onda plana de tamaño similar al tamaño celular donde la espuma se fragmenta en pequeñas partículas. Los ensayos a alta velocidad de deformación se pueden realizar mediante caída de pesos (hasta 100 s^{-1}), impacto con barra Hopkinson (hasta $5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$) o mediante ensayos balísticos (hasta 10^5 s^{-1}). [14] La estimación de la energía absorbida por unidad de volumen, (W) y de la eficiencia, (η) de una espuma metálica se puede obtener mediante su curva esfuerzo-deformación a compresión (Figura 10).

La energía que la espuma absorbe por unidad de volumen, (W) hasta el inicio de la compactación (ϵ_a) puede obtenerse del área bajo la curva esfuerzo-deformación, mientras que la eficiencia, (η) de la espuma para absorber energía hasta la deformación de compactación (ϵ_a) resulta mostrado en la figura 10.

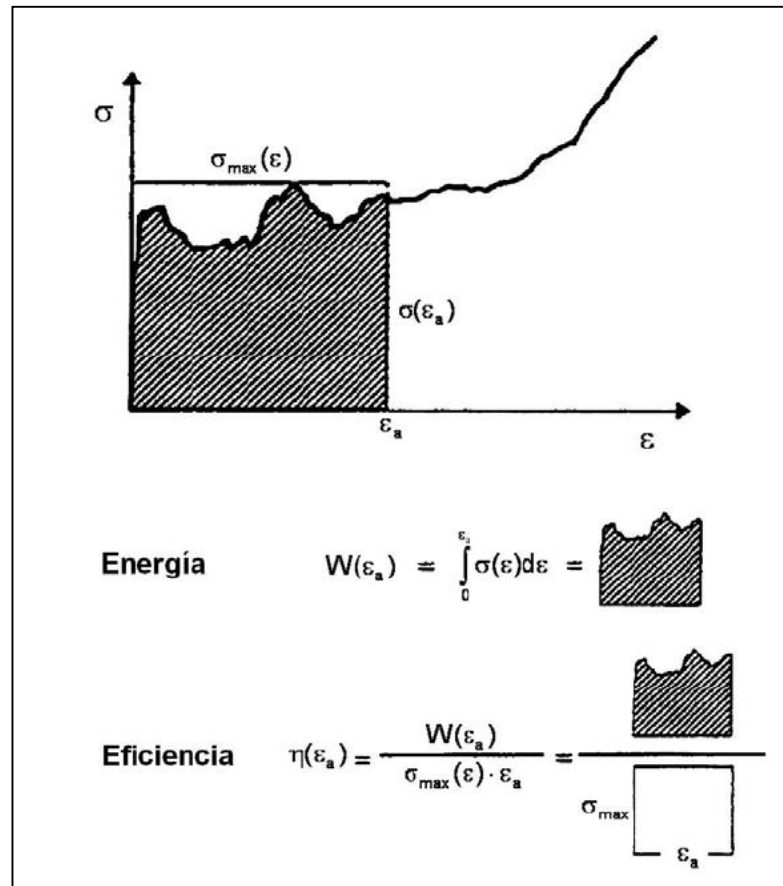


Figura 10.- Obtención de la energía absorbida y la eficiencia de absorción mediante la curva esfuerzo-deformación a compresión. [5]

Los ensayos de flexión se realizan en configuraciones de tres o cuatro puntos. Es importante una selección cuidadosa de los rodillos que transmiten el soporte y la fuerza, debido a que los colapsos locales pueden provocar que los resultados de la prueba no sean significativos. Los ensayos sobre espumas con piel externa rígida influyen en los resultados obtenidos en las pruebas. [14]

La fatiga mecánica también afecta a las espumas metálicas cuando estas están sometidas a cargas cíclicas. Los ensayos de fatiga a mayores ciclos, permiten estimar un límite de fatiga, definido como el esfuerzo a la cual la espuma puede soportar 10^7 ciclos^[11] (figura 11). Los ensayos de fatiga más utilizados son en condiciones de compresión-compresión, aunque también hay trabajos en condiciones de compresión-tensión, de tensión-tensión y de flexión rotatoria.^[22] Cuando el fallo se produce por compresión, puede ser un problema identificar el punto de inicio de rotura, pudiéndose definir como criterio de fallo un nivel de deformación crítico o el número de ciclos para el colapso plástico.^[23]

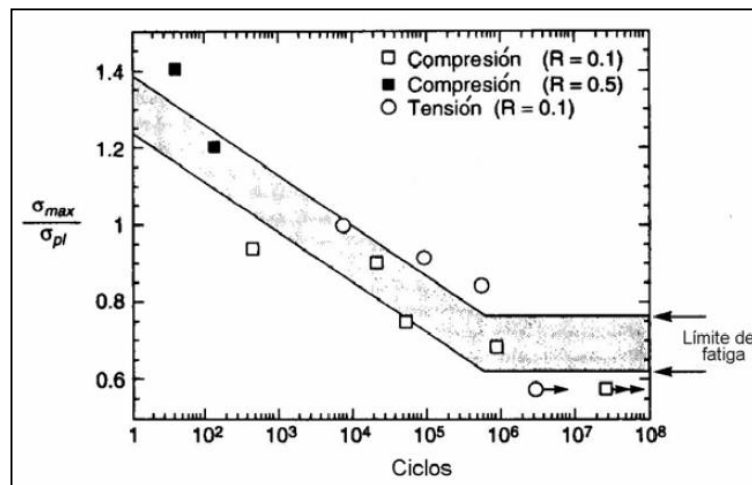


Figura 11.- Comportamiento a la fatiga de espuma de celda cerrada Alporas.^[11]

Otros ensayos mecánicos incluyen medidas de la dureza mediante indentación con penetradores de diversas geometrías, para los paneles tipo sándwich con una base celular, hay pruebas tecnológicas para describir la unión entre las hojas de la cara y la base, tal como la propuesta en la norma ASTM D1781.^[14]

En las Figuras 12, 13 y 14, se muestran diagramas de propiedades mecánicas de varias espumas metálicas comerciales, estos dan una idea general de las referidas propiedades y ayudan a establecer relaciones que permitan determinarlas.^[11]

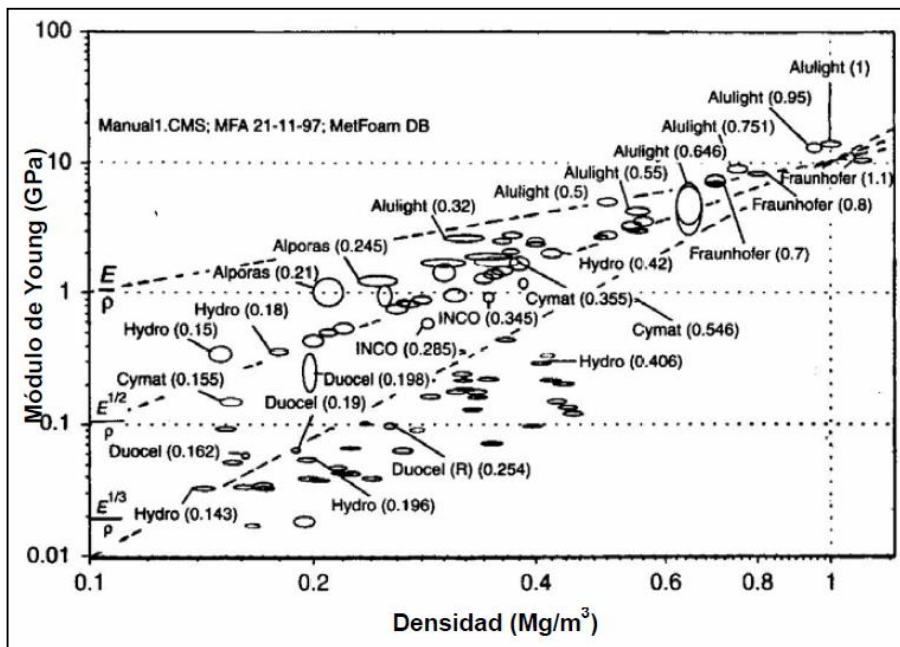


Figura 12.- Modulo de Young vs densidad de espumas metálicas comerciales. [11]

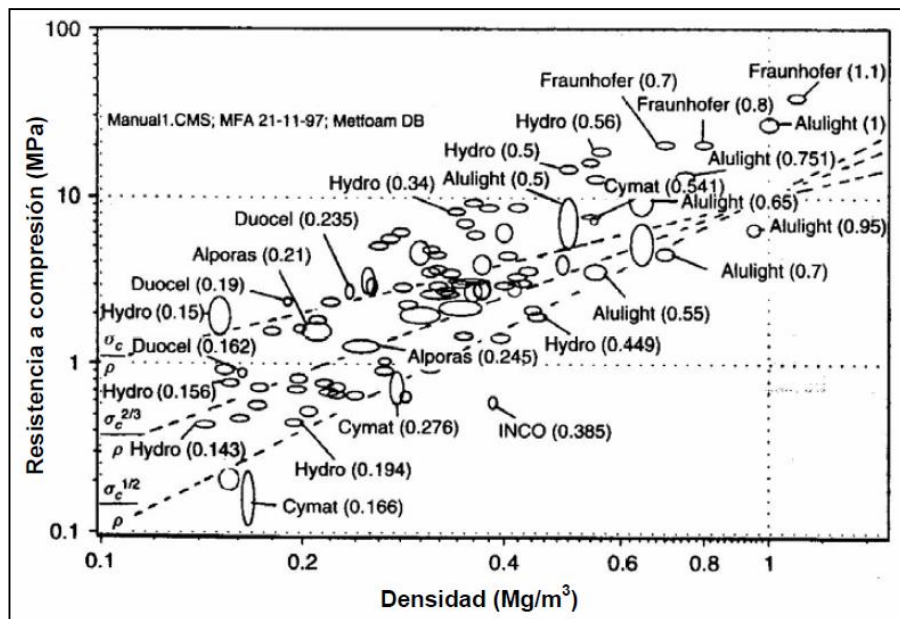


Figura 13.- Resistencia a compresión vs densidad de espumas metálicas comerciales. [11]

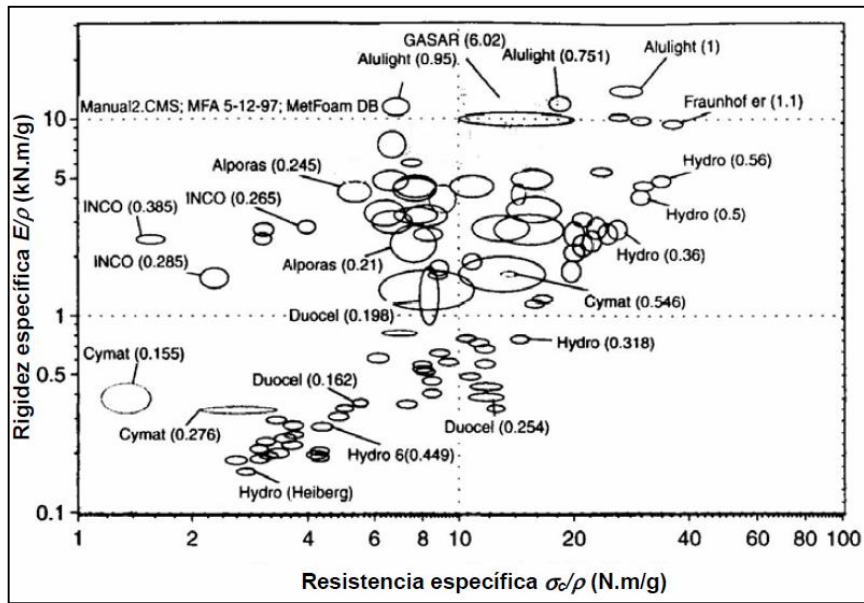


Figura 14.- Rigidez específica vs resistencia a compresión específica de espumas metálicas comerciales. [11]

1.3.3 Propiedades térmicas

El Aluminio tiene una alta conductividad térmica. Debido a la elevada superficie específica de las espumas de Al, tanto con poros abiertos como cerrados, pueden constituir un medio eficiente para la transferencia de calor. Las especificaciones para estos materiales se realizan a partir de la disipación de calor y los índices de caída de presión.[11] Debido a los muchos parámetros que están involucrados, para evaluar el comportamiento en diferentes espumas comerciales y asumir que los mismos coeficientes son aplicables para un gran intervalo de densidades relativas y tamaños de poro de la espuma, se utilizan gráficos experimentales, que deben estar contruidos para puntos específicos de velocidades del flujo líquido y del espesor de la espuma.[24]

El punto de fusión, calor específico y coeficiente de expansión de las espumas metálicas son los mismos que aquellos del metal del que están hechas. En cuanto a, la conductividad térmica (λ) esta puede obtenerse de manera aproximada a partir de la densidad mediante: [11]

$$\lambda \approx \lambda_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^q$$

Con $q = 1.65$ a 1.8 (4)

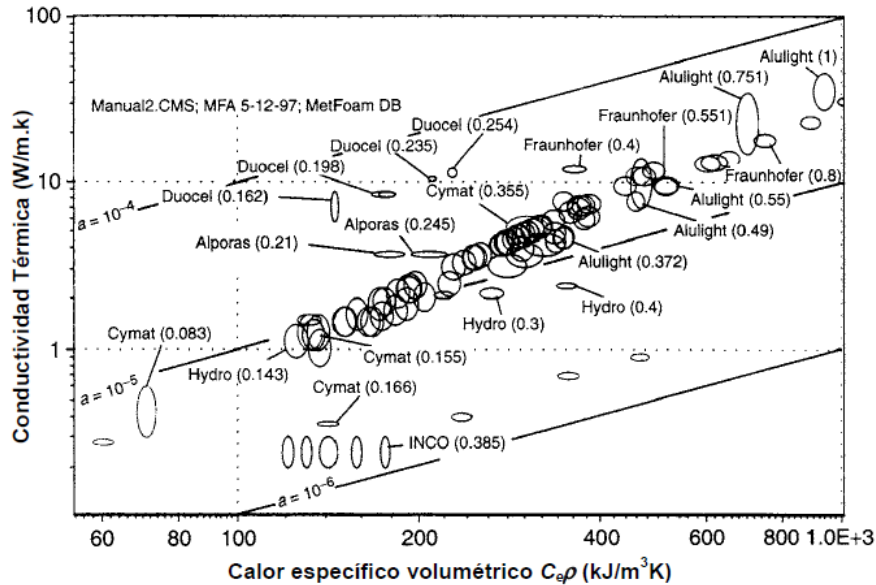


Figura 15.- Conductividad térmica vs calor específico volumétrico de espumas comerciales. [11]

1.3.4 Propiedades eléctricas

La conductibilidad eléctrica de las espumas de Al depende significativamente de la densidad. El exponente similar encontrado para la conductibilidad eléctrica y térmica confirma la validez de la ley de Wiedemann-Franz para las espumas de Al:

$$LT = K/\sigma \dots \dots \dots (5)$$

Donde, K es la conductividad térmica, σ es la conductividad eléctrica, T es la temperatura absoluta y L es una constante (número de Lorenz). La resistividad real de la espuma tiene una componente que aumenta con la temperatura, que no es sensible a la estructura y es el resultado directo de la agitación térmica. Cualquier otra imperfección da lugar a un segundo componente de la

resistividad, que es el componente principal a temperaturas bajas y se conoce como resistividad residual. [25]

La principal propiedad eléctrica de interés es la resistividad R , que se puede estimar a partir de la densidad específica de la espuma y el valor de la Resistividad eléctrica del material con que esta esa fabricada, mediante: [11]

$$R \approx R_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^r$$

Con $r = 1.6$ a 1.85 (6)

1.3.5 Propiedades acústicas

Las espumas de Al poseen la capacidad de absorber o rechazar parte de la energía sonora que les llega. La incidencia de una onda acústica en un una área recubierta con este material, permite definir el coeficiente de absorción sonora por unidad de superficie (α), el cual es la relación entre la energía sonora absorbida por un material y la energía sonora incidente sobre dicho material. Este coeficiente depende, además, de la naturaleza del material, de la frecuencia y del ángulo de incidencia de dicha onda acústica. Dicho coeficiente de absorción es una función del espesor del material, la densidad y el tamaño del poro de la espuma metálica. La máxima absorción de sonido para las frecuencias incidentes puede ajustarse por el tamaño del poro de la espuma. La mayor absorción de energía sonora se produce para espumas con densidades en poro a $0,65 \text{ g/cm}^3$ y los fabricantes de materiales suelen darlo en función de una banda de frecuencias comprendida entre 125Hz y 4000Hz. [19]

Las espumas de Al, sobre todo aquellas con los poros interconectados son muy eficaces en la absorción del sonido, ya que el sonido entrante se refleja dentro de la espuma entre los poros y la superficie del poro vibra convirtiendo el sonido en calor, por esto, un nivel de sonido muy reducido se refleja dentro del espacio

encerrado. La comparación de coeficientes de absorción de sonido de espumas de Al de poros abiertos, el aluminio puro, la fibra de vidrio y la espuma de Poliuretano se muestra en la figura 16. [26]

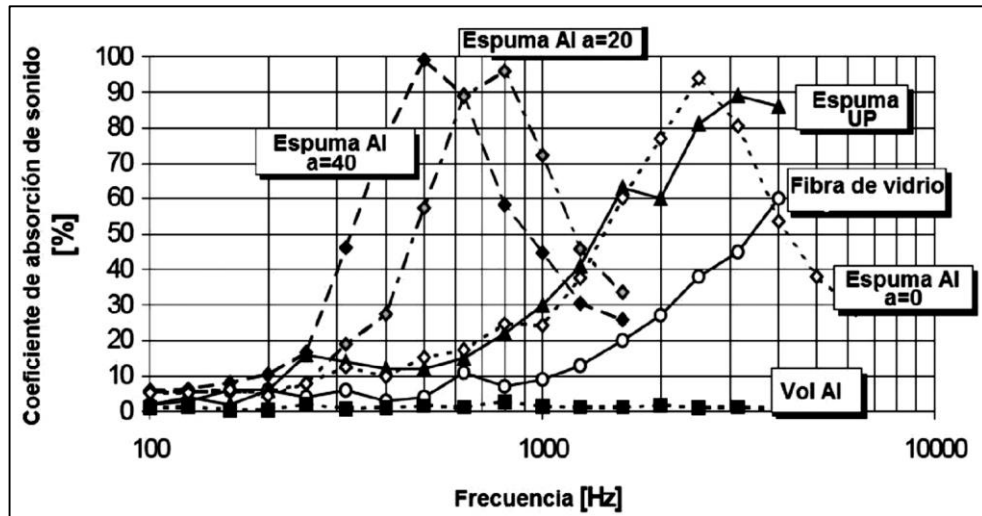


Figura 16.- Coeficiente de absorción de sonido de diferentes espumas de Al de densidad 0,5 g/cm³ con estructura de poro abierto con diferente diámetro de poro "a" en mm, comparado con aluminio sólido, espuma de UP y matriz de fibra de vidrio. [26]

1.3.6 Propiedades químicas

Las espumas de Al se fabrican tanto de aluminio puro como de aleaciones, lo cual hace que se comporten de diferente forma frente a la corrosión. El aluminio es considerado un material adecuado para resistir a los ácidos oxidantes pero, ocupa un lugar muy bajo en la serie de potenciales electroquímicos y el carácter esencialmente reactivo del material. El Al, a cualquier concentración, presenta trazas de cloruros que activa el ataque. Las espumas de Al son sensibles a la corrosión-fatiga donde el agente nocivo es el vapor de agua. No obstante, en muchos de los procesos de fabricación de espumas de Al, se agrega sílice, tanto por aumentar la densidad de la espuma como para mejorar su resistencia a la corrosión. [27]

La utilización de aleaciones de Al de alta resistencia, cuyas mejores propiedades se alcanzan mediante tratamiento térmico (temple seguido por un revenido), puede conducir a que estas aleaciones sean susceptibles al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo. El comportamiento es diferente según la aleación y en algunos casos se puede alcanzar una gran resistencia sin peligro de vulnerabilidad si los tratamientos térmicos se realizan adecuadamente. [28]

Finalmente se muestran algunos datos de propiedades mecánicas de diversas composiciones y densidades de espumas de Al (tabla 5).

Tabla 5.- Resumen de propiedades térmicas y mecánicas para diferentes espumas de base aluminio. [29]

PROPIEDAD	UNIDAD	Al-Si12	Al-Si12	Al-Mg1-Si (6061)	Al-Mg1-Si (6061)	Al-Mg1-Si (6061)	Al-Si7	Al-Si7	Al-Si7
Densidad	g/cm ³	0.6	0.8	0.5	0.6	0.8	0.5	0.6	0.8
Módulo de Young	GPa	4.9	8.4	--	3.9	--	--	--	--
Resistencia a la compresión	MPa (Sin piel)	18.8	30.2	14.3	22	43.6	7.8	11.9	22.8
	MPa (Con piel)	16.1	29	14.1	20.3	35.8	--	--	--
Absorción de energía a compresión	KJ/dm ³ (Por volumen)	3.1	--	--	7.1	--	4.4	5.3	--
	KJ/Kg (Por masa)	5.3	9.75	9.86	11.9	--	8	8.4	--
Conductividad térmica	W/mK	16.7 (20°C)	--	--	18.4 (20°C)	--	6.1 (50°C) 6.9 (100°C) 7.7 (200°C)	7.8 (50°C) 8.8 (100°C) 9.8 (200°C)	--
Capacidad calorífica	KJ/KgK	0.88	--	--	9.2	--	0.9	0.9	--
Coeficiente de dilatación lineal	10 ⁻⁶ /K	19.9-20.6	--	--	23.1	--	--	--	--

1.4 APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LAS ESPUMAS METÁLICAS

Las espumas metálicas son una clase de materiales que se caracterizan por tener una baja densidad en combinación con propiedades notables, por lo que su uso se ha incrementado como un nuevo material en ingeniería. Las principales aplicaciones de las espumas metálicas están en la industria automotriz, aeroespacial, naval, ferroviaria y construcción (Figura 17). [14]

1.4.1 Estructuras tipo sándwich

Las estructuras sándwich son de vital importancia ya que en esta configuración es donde recae la mayor cantidad de espumas fabricadas comercialmente. Dicha estructura consiste en construcciones laminares constituidas por dos revestimientos unidos a un cuerpo central (núcleo) relativamente ligero, dando como resultando un panel de elevada rigidez y poco peso (Figura 18). La principal función de los revestimientos es la de soportar y transmitir, uniformemente, las cargas superficiales recibidas. Estos revestimientos pueden estar formados por láminas de materiales metálicos como el aluminio y sus aleaciones, materiales compuestos, madera, etc. En aplicaciones de carácter estructural el objetivo de la espuma, es resistir la transmisión de esfuerzos de corte de una capa a otra, así como, resistir la compresión. Adicionalmente a las construcciones de elevada rigidez, las estructura sándwich tienen importante aplicación en estructuras resistentes al impacto, así como en estructuras ultraligeras, atenuación de ruidos en carreteras, puentes, edificios y máquinas, sistemas de protección contra incendios, etc. [14]

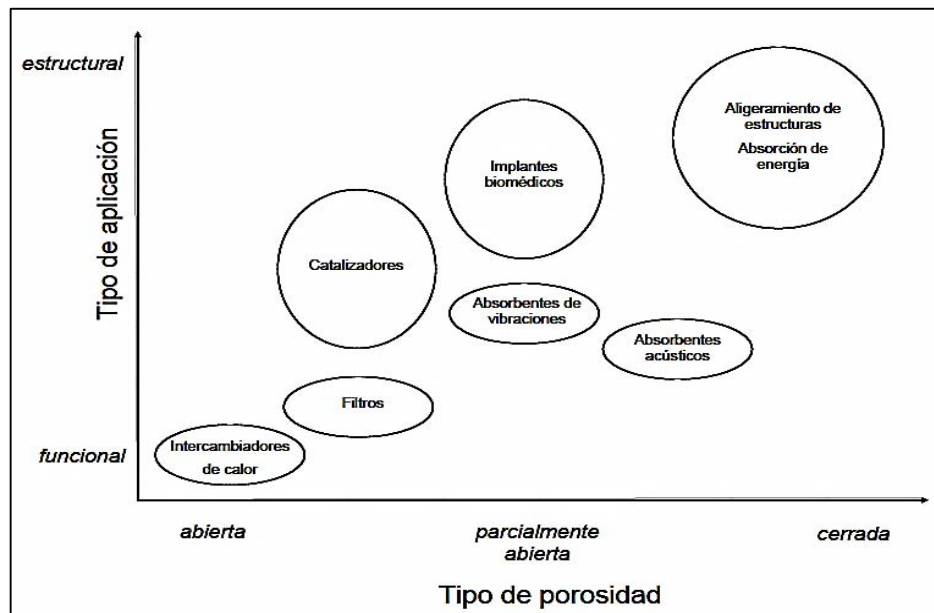


Figura 17.- Mapa de los diferentes tipos de materiales metálicos celulares con relación a su aplicación. [7]

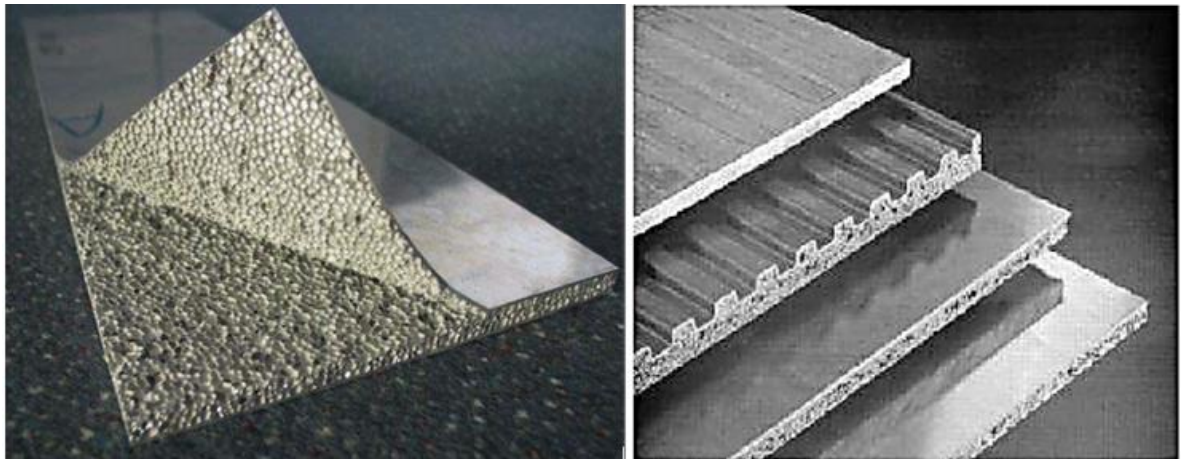


Figura 18.- Paneles comerciales con estructura tipo sándwich. [30,31]

En resumen algunas de las principales aplicaciones en las que se utilizan las espumas metálicas hoy en día son:

- 1) Electrodo porosos.
- 2) Elementos que absorben el sonido.
- 3) Disipadores de calor.
- 4) Flotadores o boyas.

- 5) Injertos biocompatibles.
- 6) Elementos que absorben la energía térmica.
- 7) Aplicaciones electroquímicas.
- 8) Reducción de peso en estructuras y vehículos.
- 9) Elementos que absorben la energía de impacto.
- 10) Reducción de emisiones acústicas.
- 11) Barreras acústicas.
- 12) Piezas estructurales en turbinas,
- 13) Los cierres entre diferentes partes del motor de aviones.
- 14) Refuerzo para las estructuras de carga en satélites.
- 15) Tapa de viento de micrófonos para reducir el ruido y actuar como un enderezador de flujo.
- 16) Estructura de conos espaciales
- 17) Decoración de fachadas de edificios.
- 18) Paredes de edificios resistentes al fuego.
- 19) Sistemas estructurales que mitigan el daño por explosión en edificios.
- 20) Para almacenar productos o equipajes sospechosos de explosión.
- 21) Piezas de maquinaria fabricadas de espuma o rellenas de espuma en taladradoras, fresadoras, etc.
- 22) Contenedores con protección electromagnética.
- 23) Filtración y separación.
- 24) Intercambiadores de calor.
- 25) Almacenamiento temporal de líquidos.
- 26) Tamiz para catalizadores.
- 27) Control de flujo.
- 28) Control acústico.
- 29) Arte y decoración.
- 30) Construir muebles, relojes, lámparas, altavoces, etc.

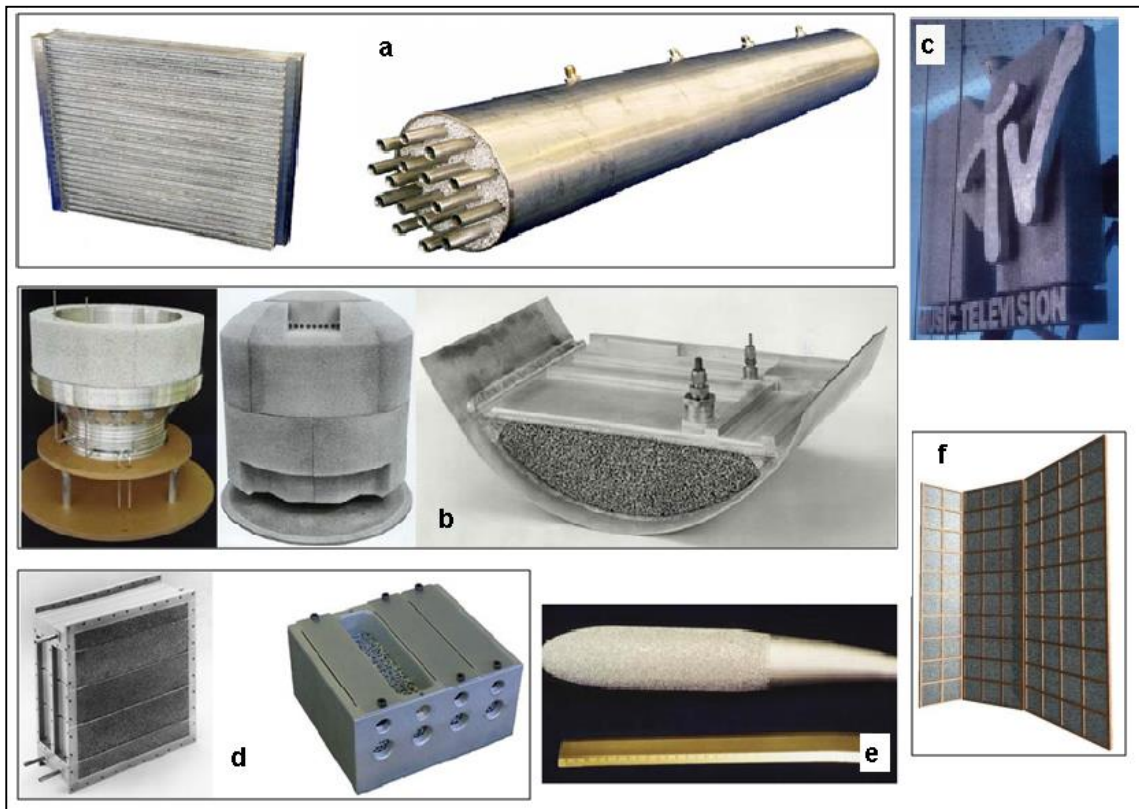


Figura 19.- a) Intercambiadores de calor contruidos con espuma metálica, b) Tanques para almacenamiento de nitrógeno líquido cubiertos con espuma metálica, c) Emblema corporativo en espuma metálica, d) Depuradores de CO2 fabricados con espuma metálica, e) Micrófono con apantallamiento acústico de espuma metálica, f) Biombo en espuma metálica.^[32, 33]

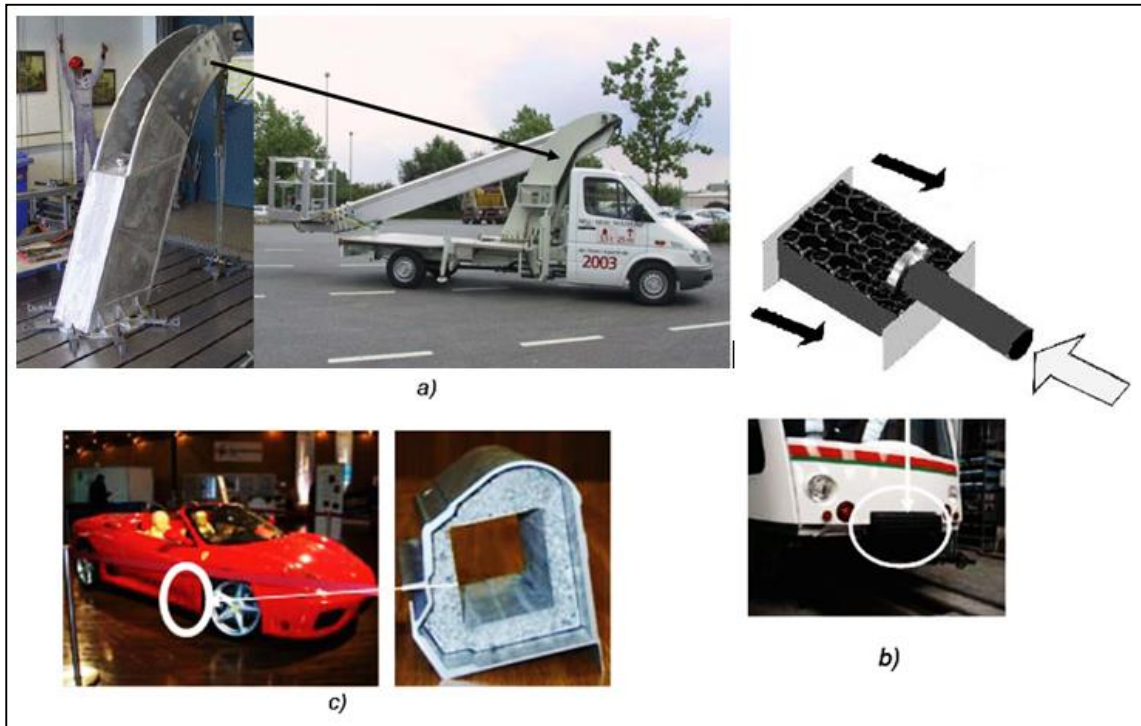


Figura 20.- Aplicaciones de las espumas metálicas en el sector del transporte a) Uso de una estructura AFS en el brazo de una grúa b) Absorbente de energía en un parachoques de tranvía COMBINO c) Reducción de peso en automóvil de la clase Ferrari. [31]

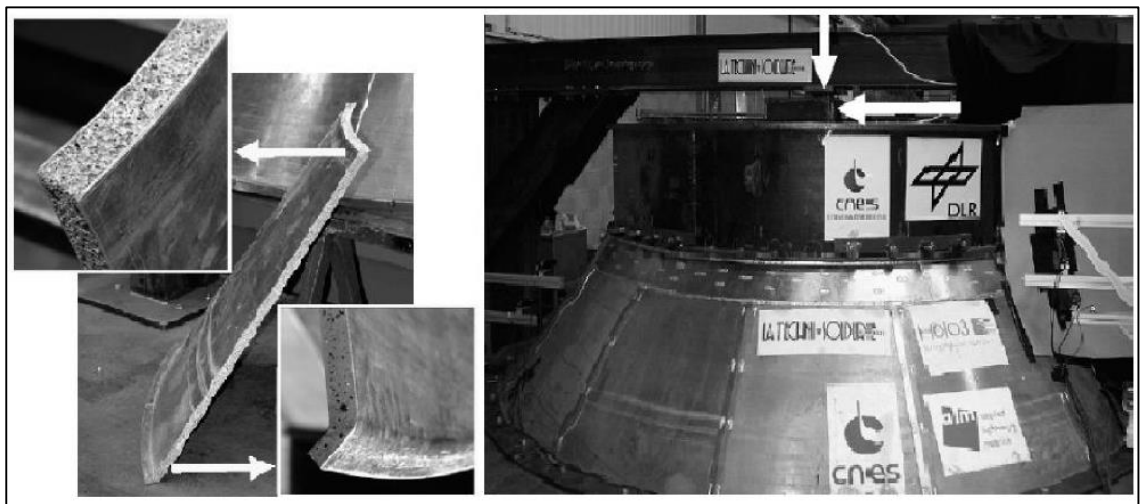


Figura 21.- Cono espacial para el Ariane 5 fabricado por la E.S.A. [32]

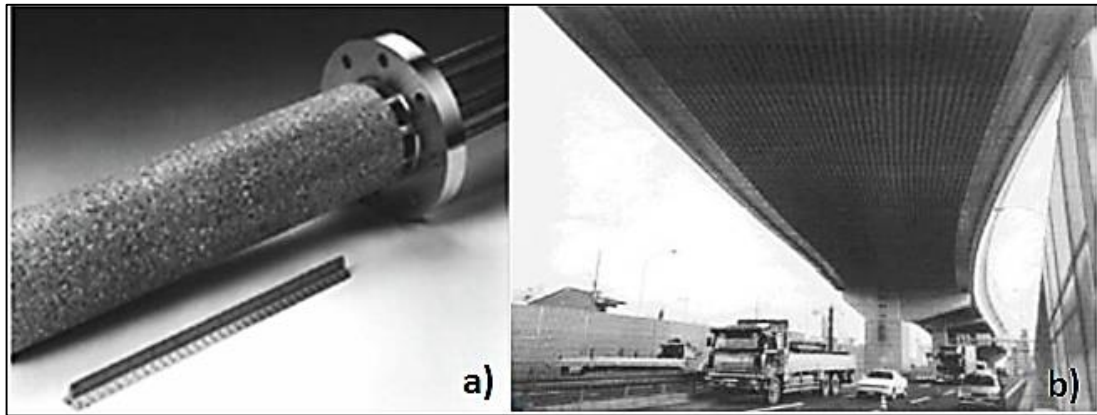


Figura 22.- a) Intercambiador de calor basado en espuma metálica, b) Espumas metálicas colocadas en un viaducto elevado en Japón, con el propósito de mitigar el ruido hacia los residentes cercanos. [31]

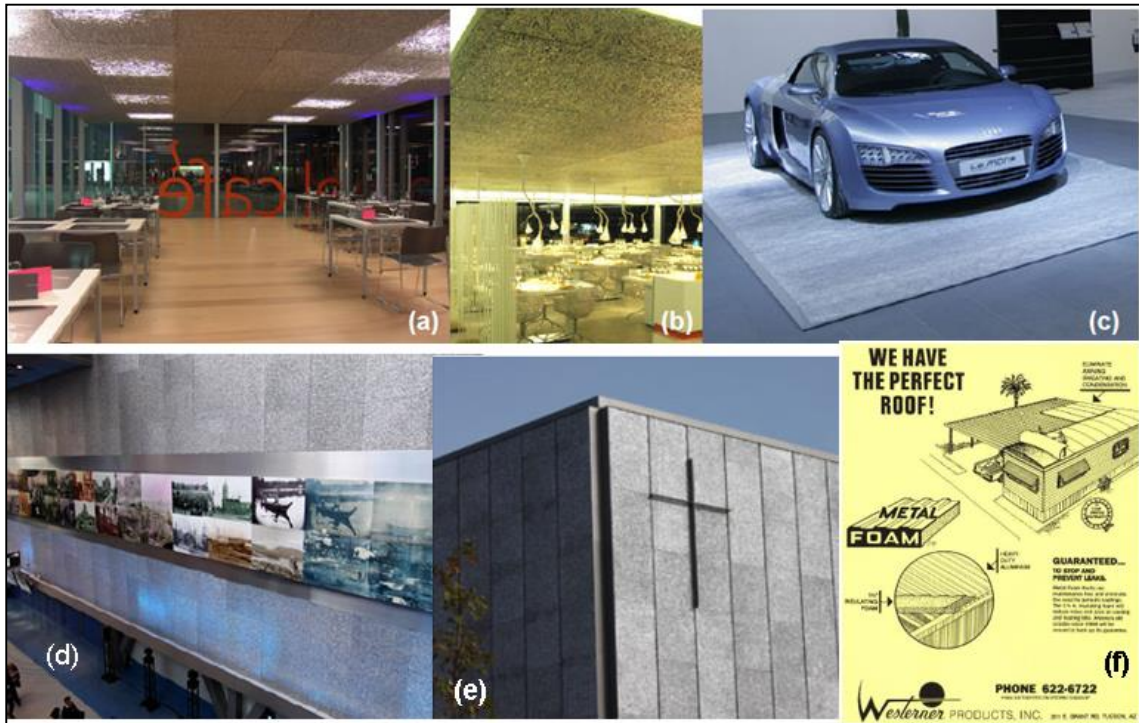


Figura 23.- a) y b) Techos de espuma metálica c) Piso de espuma metálica, d) Pared interior de espuma metálica, e) Pared exterior de espuma metálica, f) Anuncio comercial de espumas metálicas para construcción. [34]

CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

2.1.1 Planteamiento del sistema para el proceso

Como se mencionó anteriormente uno de los objetivos de este trabajo es el diseño de un dispositivo para obtener espumas metálicas, con metales que tengan un punto de fusión menor a 700°C, mediante la infiltración de metal líquido a presión por un gas inerte, a través de una preforma que esta previamente al vacío.

Partiendo de esa idea, se realizó un análisis de diseño, en el cual se definió el proceso general que se seguirá para la obtención de las espumas metálicas, identificándose los componentes necesarios para poder llevar a cabo el proceso, además se determinó una sistematización para el proceso.

Se elaboró un esquema del cómo se esperaría el comportamiento del proceso, estimando algunas variables de diseño y funcionamiento del dispositivo, que posteriormente se ajustarían o modificarían a lo largo de las pruebas de funcionamiento para la fabricación de las espumas.

2.1.2 Selección de materiales

Una vez definidos los parámetros del proceso, se determinó la disponibilidad de los materiales, equipos, tiempo y presupuesto económico. Con ello se establecieron criterios para realizar una selección de materiales, adecuados para la fabricación del dispositivo. Dicha selección se realizó de acuerdo al procedimiento denominado "*Método Sistemático para la Selección de Materiales*" desarrollado por Michael F. Ashby. El método de selección de materiales se realizó, tomando en cuenta los principales requerimientos

materiales y con la ayuda del software CES EduPack 2011. De aquí generaron los diagramas de Ashby necesarios para esta investigación

2.1.3 Diseño del reactor (CAD)

Una vez seleccionado el material ideal para la fabricación del reactor, se realizó un análisis acerca de la forma y dimensiones más apropiadas, para el diseño del reactor propuesto para llevar a cabo el proceso. Lo anterior tomando en consideración los siguientes parámetros:

- Dimensiones del horno con el que se trabajaría.
- Máximo aprovechamiento del volumen del recipiente.
- Mínima cantidad de material requerido.
- Hermeticidad del recipiente.
- Entrada y salida de los gases.
- Control de entrada/salida de los gases.
- Facilidad para introducir y remover el dispositivo del horno.
- Facilidad para extraer la espuma obtenida del dispositivo

Lo anterior, con el objetivo de obtener los dibujos de construcción necesarios para la fabricación del reactor, ya que éste es el elemento esencial del dispositivo y es donde se llevará a cabo la fabricación de las espumas. Los dibujos de construcción y algunos modelos del dispositivo se obtuvieron a partir de una modelación en 3D, mediante software CAD: Sketch Up 8pro y solidworks 2010.

2.1.4 Construcción del dispositivo

Una vez obtenidos los dibujos de construcción y los resultados de la selección de materiales, ambos se utilizaron para la fabricación del reactor principal del dispositivo, mediante la compra del material necesario y el uso de varios procesos de manufactura para su producción. Otros componentes necesarios para el dispositivo fueron cotizados y comprados ya fabricados, y solo se realizaron algunos ajustes para su montaje, los cual se describe en la sección de resultados denominados “construcción del dispositivo”.

2.2 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS

2.2.1 Diseño y obtención de la preforma

Se realizó un análisis cualitativo acerca de los materiales con los cuales se podía fabricar la preforma, considerando que ya se han fabricado espumas metálicas con preformas de diversos materiales los cuales están reportados en la literatura.^[1,8,11,18,31,38]

En el caso de los procesos de infiltración a presión con preforma soluble para la fabricación de espumas de Al, son comúnmente utilizadas las preformas de NaCl, ya que en comparación con otros materiales, con estas se obtiene un buen soporte, resistencia mecánica debido a la presión que es ejercida por el flujo de metal durante la infiltración, así como velocidad de disolución y un bajo costo. En el caso de este trabajo se dio lugar a la selección de una preforma alternativa, siendo seleccionado como material masa para pasta comestible, la cual está constituida por una mezcla de harina, NaCl y agua (figura 24). La elección de este material para la preforma se justifica con la idea de tener una preforma que cumpla con las características anteriormente señaladas pero que además sea moldeable, por lo que se pueden fabricar partículas de diferentes tamaños y formas, principalmente cuando se quiere obtener espumas de gran dimensión o con tamaños de poro grandes (las partículas grandes de NaCl son a menudo de forma irregular).



Figura 24.- Ingredientes de la masa para fabricar la preforma.

Para obtener la composición de la mezcla, se buscaron diversas características para lo cual se realizaron una serie de pruebas mezclando los diferentes ingredientes, dichas pruebas fueron consecutivas y se describen en la tabla 6.

Tabla 6.- Pruebas realizadas para obtener la composición ideal para la fabricación de las partículas de la preforma.

Etapa	Prueba	Característica buscada
No.1	Se realizaron diversas mezclas probando su consistencia, validando las composiciones con las cuales se pudiera formar manualmente partículas de aproximadamente 8 mm de diámetro	Pasta suficientemente moldeable para poder fabricar partículas de forma y tamaño homogéneo
No.2	Fue extruida una cantidad de pasta con composición similar a la obtenida en la etapa 1, aquí se observó y validó su comportamiento	Capacidad de ser extruida
No.3	Se colocaron varias partículas de composición validada en la etapa 1 en el horno a 100°C observando cada hora su consistencia y dureza	Deshidratación de las partículas en un tiempo razonablemente corto
No.4	Se colocaron varias partículas de composición validada de la etapa 3 en el horno a 400°C observando cada 5 minutos su consistencia y dureza	Las partículas se calcinan y sinterizaran sin perder su forma
No.5	Se colocaron en vasos de precipitados con agua diversas partículas validadas en la etapa 4 observando su comportamiento cada 30 min	Posterior al tratamiento térmico las partículas se desfragmentan y disuelve en agua

Como resultado de las pruebas anteriores, se obtuvo un diagrama de mezclas ternario donde se señala una zona óptima, donde la composición de la mezcla cumple con las características requeridas la cual esta descrita en el capítulo de resultados en el presente trabajo. Adicionalmente dichas pruebas sirvieron para diseñar un tratamiento térmico donde las partículas fabricadas fueran deshidratadas de tal forma que quedaran endurecidas, y posteriormente otro tratamiento térmico donde las partículas se calcinaran y sinterizaran, consiguiendo con esto la preforma necesaria.

Cabe señalar que todas las mezclas realizadas fueron elaboradas con una batidora de pedestal marca Hamilton Beach modelo 63326.

Del diagrama de mezcla se seleccionó la composición 66% de NaCl, 11% de harina y 23% de agua (% en peso) para la mezcla a utilizar en la fabricación de la espuma (la cual está señalada en el diagrama de mezclas elaborado), se calculó la cantidad necesaria para preparar 500g de pasta y se llevó a cabo su elaboración. Posteriormente se realizó la extrusión de la pasta a través de un dado con orificios de 5mm de diámetro con lo cual se obtuvieron largas tiras de la pasta (parecidas a un espagueti) las cuales fueron cortadas en pequeños trozos de aproximadamente 4 a 5 mm de largo dando como resultado partículas con una forma semicilíndrica.



Figura 25.- a) Proceso de mezclado b) Extrusor utilizado c) Partículas después de tratamiento de secado.

Finalmente se realizó el tratamiento térmico de secado y de hidratación, calcinación y sinterizado a las partículas, obteniendo con esto la preforma requerida para la fabricación de la espuma de Al.

2.2.2 Fabricación de espuma metálica

Una vez obtenida la preforma, se calculó la cantidad necesaria de Al, con base en el volumen de la preforma y se colocó en el reactor por encima de la preforma. Posteriormente se cerró el reactor, se introdujo en el horno y se conectó con el sistema de válvulas.

El aluminio utilizado fue una aleación comercial grado 5005 (UNS No.A95005).^[35]

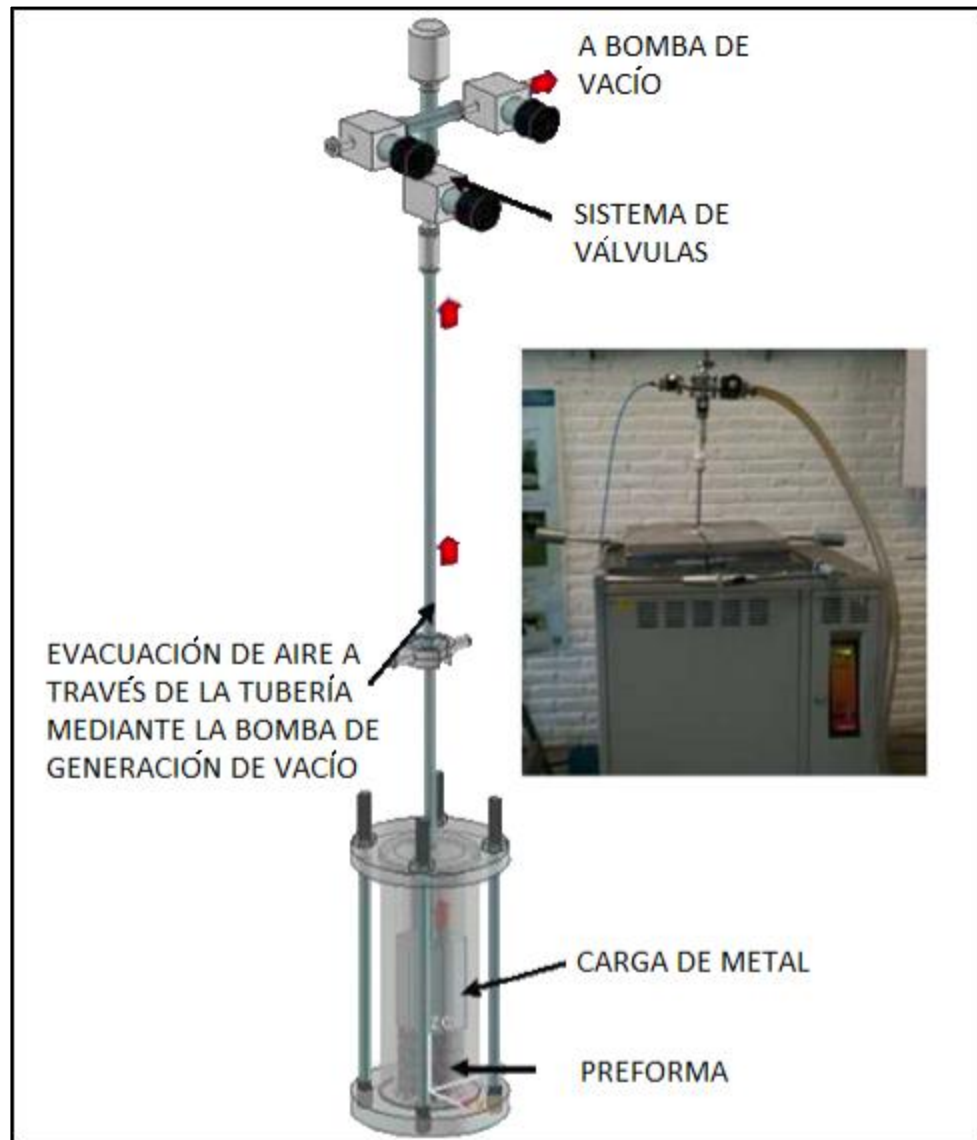


Figura 26.- Esquema representativo de la etapa de generación de vacío.

Las condiciones de vacío dentro del reactor se realizó con ayuda de una bomba de hélice marca Edwards modelo ED 10 conectada al sistema de válvulas. Este proceso se llevó a cabo durante 12 h, permitiendo que esta acción alcanzará el nivel de vacío deseado; valores aproximadamente de 10^{-3} torr (0.13Pa). Lo anterior con la intención de extraer el aire de todo el dispositivo, incluyendo el aire almacenado en los poros de la preforma, ya que el vacío en los canales de la preforma es la clave para la mejora de la infiltración propuesta por parte del proceso aplicado en este trabajo (Figura 26).

A continuación se llevó a cabo la fusión e infiltración del aluminio, en esta etapa los parámetros de temperatura y tiempo fueron elegidos con base en los procesos de vaciado de Al convencionales, la capacidad del horno utilizado y los datos publicados en la literatura para procesos similares con aluminio^[36] (Figura 27).

Dada la complejidad de extraer el aire de los canales de la preforma, durante esta etapa, la generación de vacío se mantuvo para evitar pérdidas de éste, y con esto también se obtuvo un medio de escape para los gases generados por la combustión de los componentes orgánicos remanentes en la preforma, evitando la contaminación del gas (Ar) durante la etapa de infiltración.

El proceso de generación de vacío fue suspendido por un lapso de 10 minutos, antes de la etapa de infiltración.



Figura 27.- Esquema representativo de la etapa de fusión.

Después de completarse el ciclo de calentamiento, en la etapa de fusión se continuó con la infiltración y posteriormente con el enfriamiento del reactor, de tal forma que como ya se había señalado antes, la generación de vacío fue interrumpida para realizar la inyección de gas (Ar) y se cambió el sensor pirani por el manómetro. La presión elegida para realizar la infiltración, se eligió con base en lo reportado en la literatura ^[9,37,37] para procesos similares. Esta etapa se llevó a cabo con el reactor dentro del horno durante 30 minutos y por fuera de este hasta enfriar a 400°C (Figura 28).

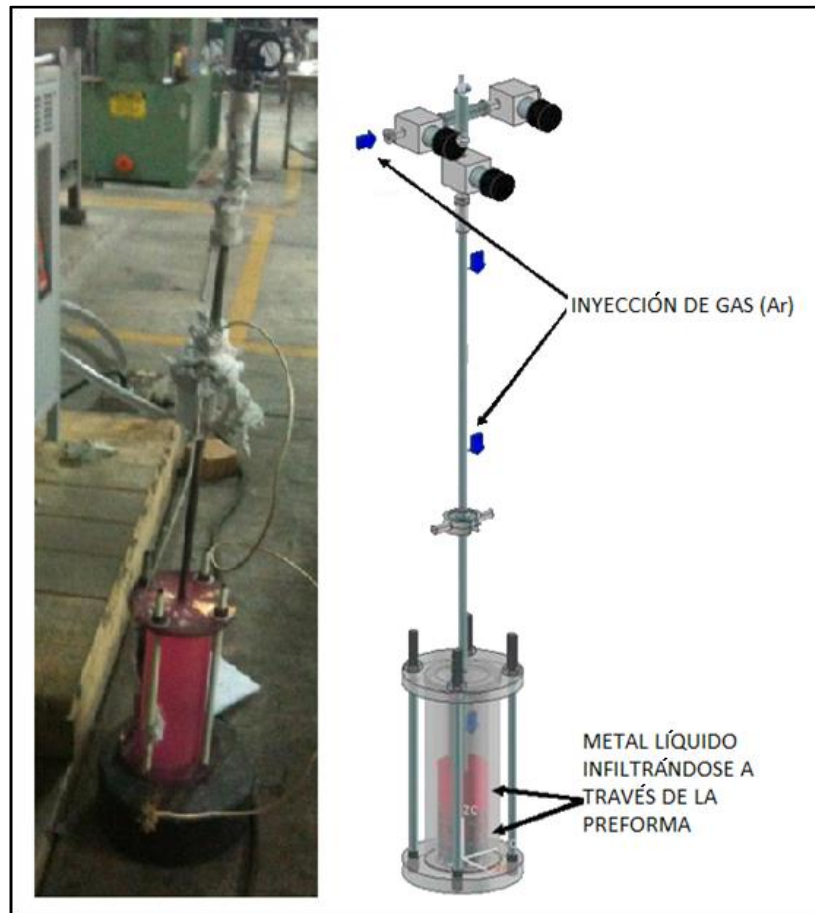


Figura 28.- Esquema representativo de la etapa de infiltración.

Cabe mencionar que el reactor se extrajo del horno con la presión de inyección constante y fue colocado en una base de cobre, para generar un enfriamiento de tipo direccional hacia la parte inferior del reactor (Figura 29).



Figura 29.- Reactor en diferentes etapas de enfriamiento, con la implementación de la placa de cobre para enfriamiento acelerado desde la parte inferior del reactor.

2.2.3 Caracterización estructural y mecánica de la espuma metálica

Tomando como referencia lo indicado en la norma ASTM E9- 89a^[38], para la fabricación de probetas destinadas a ensayos de compresión cuasiestáticos, se utilizó la espuma obtenida para obtener 4 probetas cilíndricas con diámetro de 30 ± 0.2 y 25 ± 1 de longitud. Esto se hizo con equipos convencionales de torno y corte (Figura 30).

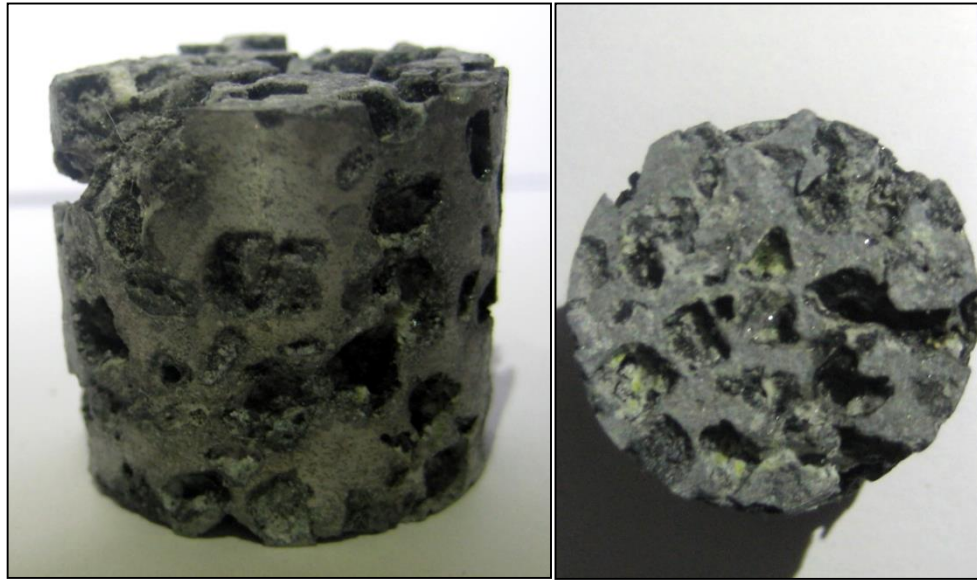


Figura 30.- Una de las probetas de la espuma obtenida después de ser cortada al tamaño ideal para ensayos cuasiestáticos de compresión.

Cabe señalar que para la obtención de las probetas se consideró que estas tuvieran un tamaño relativo $\frac{L}{d} \geq 7$, lo anterior con la finalidad de cumplir con la norma ^[38,11], en nuestro caso la espuma mostro un tamaño de celda de $4\text{mm}=d$ y por lo tanto con una longitud de 30mm se obtuvo una relación de 7.5 la cual cumple con lo señalado.

A continuación se realizó la remoción de los residuos de la preforma sumergiendo las probetas en agua a 48°C durante 1 hora. Posteriormente con ayuda de una bomba colocada dentro del mismo recipiente, se generó un flujo dirigido hacia la muestra durante otros 30 min. Lo anterior con el objetivo de eliminar los residuos de las regiones superficiales y disminuir la resistencia de los remanentes en los poros internos de cada probeta. Después, con el fin de remover los residuos internos, la probetas fueron puestas en agua destilada a temperatura ambiente en un dispositivo con vibración ultrasónica marca Cole Palmer modelo 8890 (Figura 31) durante 90 min.



Figura 31.- Una de las probetas después de ser removidos completamente los residuos de la preforma.

Una vez removidos los residuos, las probetas fueron observadas en un microscopio estereográfico marca Olympus modelo SZX16 y se compararon con un patrón elaborado con un papel milimétrico visto a los mismos aumentos que las probetas, con lo cual se pudo obtener una escala de referencia. Las mediciones del tamaño de poro se realizaron con la ayuda del módulo de análisis de imágenes y verificación de redondez del programa Adobe Photoshop, realizándose entre 60 y 70 mediciones, tomando el promedio de las mismas. El

tamaño de celda se consideró como la distancia más larga encontrada entre cada poro.

De igual forma, las probetas fueron pesadas en una balanza analítica para calcular su densidad relativa y el porcentaje de porosidad.



Figura 32.- Balanza analítica marca Ohaus, modelo Pioneer utilizada para la obtención de los pesos de las probetas de espuma de Al, así como los compuestos de la preforma para fabricarlas.

Posteriormente con el propósito de evaluar las propiedades mecánicas de la espuma de Al obtenida, se realizó el ensayo de compresión uniaxial de las probetas (figura 33), teniendo en cuenta lo indicado en la norma ASTM E9- 89a [38], aplicables al ensayo de materiales metálicos a temperatura ambiente. Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayo universal INSTRON 5500R. Esta máquina está conectada a un sistema de adquisición de datos y a un ordenador personal, que permite su control y registro de datos mediante el software especializado, los parámetros del ensayo se muestran en el Apéndice I del presente trabajo.

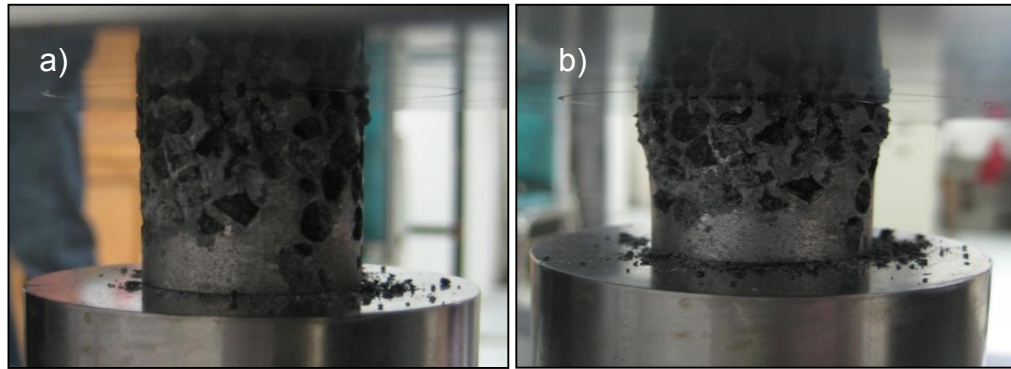


Figura 33.- Probeta ensayada a compresión a) 20% deformación b) 45% de deformación.

Con la información correspondiente al cambio de longitud de cada probeta ensayada (ΔL), y una medición de la carga aplicada (F), se determinaron los valores esfuerzo y deformación nominales, y posteriormente se realizó en una gráfica de curva esfuerzo-deformación para cada probeta. Finalmente se obtuvieron con ayuda de la gráfica las propiedades mecánicas de interés (Esfuerzo y Deformación de colapso plástico, Esfuerzo y Deformación de densificación, Módulo elástico y Energía absorbida) de cada probeta mecánicamente deformada^[11].

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVO

3.1.1 Planteamiento del sistema para proceso

Resultado del análisis de diseño en el cual se identificaron los componentes necesarios para poder llevar a cabo el proceso:

- Horno que alcance una temperatura igual o mayor a 700°C y que tenga control sobre esta en con un error menor o igual a 5°C.
- Tanque de gas inerte, el cual se decidió que fuera argón (Ar) por su disponibilidad y precio.
- Sistema de vacío, con capacidad para generar una presión de al menos 2.5×10^{-1} Torr.
- Reactor, el cual servirá como recipiente para realizar el proceso, se decidió que fuera de forma cilíndrica, para poder obtener un calentamiento y enfriamiento homogéneo, además así, formar un pistón fácilmente desarmable y con el que se puede obtener buena hermeticidad.
- Metal con punto de fusión menor a 700°C, el cual por disponibilidad se utilizó una aleación de aluminio comercial grado 5005 (UNS No.A95005).^[35]
- Preforma de partículas con forma y tamaño homogéneos y de material soluble y de bajo costo.
- Conexión de los sistemas de gas y vacío al reactor.
- Herramientas para poder introducir y extraer el reactor del horno con facilidad y seguridad.

El proceso general se ilustra en las Figura 34 y se describe a continuación:

- 1) Se colocan las partículas de la preforma dentro del reactor procurando dejar una superficie final lo más horizontal y homogénea que se pueda, y de no comprimirlas demasiado.
- 2) Se introduce el reactor y se realiza el tratamiento térmico para la preforma.
- 3) Se extrae el reactor del horno y sobre la preforma se ponen cuidadosamente los lingotes de aleación de Al calculando que la cantidad sea aproximadamente mayor a un 20% en volumen de la preforma.
- 4) Se cierra el reactor y se introduce al horno, cuidando de que no se balanceen los lingotes que contiene, ya que esto podría dañar la preforma.
- 5) Se conectan los sistemas de gas y vacío al sistema de válvulas y este a su vez a la entrada del reactor.
- 6) Se hace vacío aproximadamente de 1.5×10^{-1} Torr de presión interna.
- 7) Se calienta el horno a 700°C y se mantiene así unos minutos.
- 8) A continuación se introduce el gas inerte con una presión de aproximadamente 2Kg/cm^2 (0.2MPa) y se deja unos minutos.
- 9) Se extrae el reactor del horno para que se enfríe.
- 10) Se retira la presión del gas y se purga el reactor, posteriormente se desconecta el dispositivo de válvulas.
- 11) Se desarma el reactor y se retira la espuma obtenida.
- 12) Se maquina la superficie (cascara o piel de la espuma) para eliminar los defectos superficiales de la misma.

Es importante señalar que los parámetros de funcionamiento como las temperaturas y presiones así como la secuencia del proceso solo están plasmados en esta etapa como parámetros para el diseño; en forma descriptiva, sin ninguna optimización. La optimización se reportará en otros trabajos.

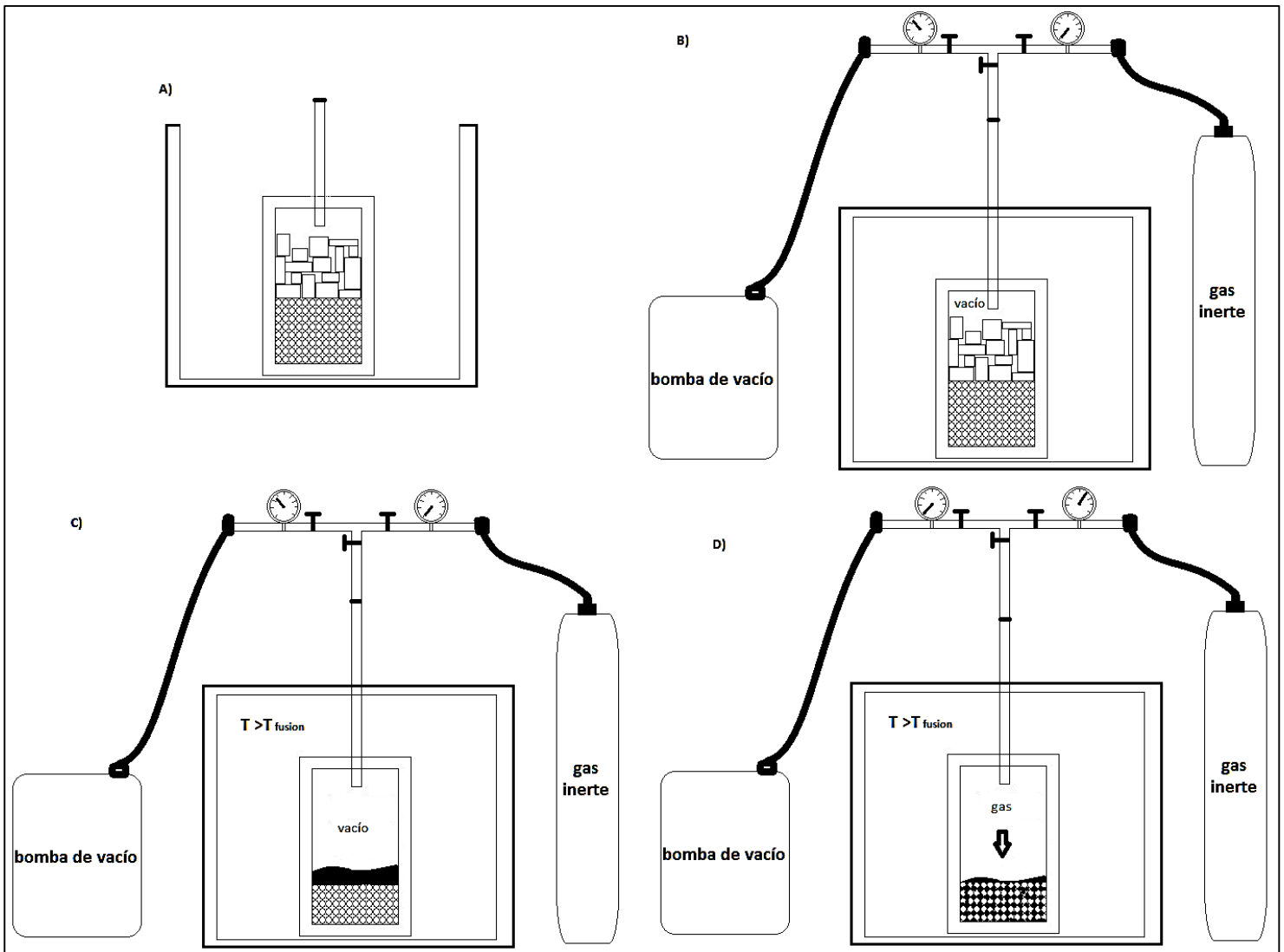


Figura 34.- Secuencia del proceso a realizar por el dispositivo diseñado para la fabricación de espumas metálicas.

3.1.2 Selección de materiales

Resultado del Método sistemático para la selección de materiales

En el diseño de un componente, estructura, dispositivo, producto hay que satisfacer ciertas exigencias:

- **Exigencias funcionales (F)**, como por ejemplo:
 - suficiente resistencia a la deformación plástica, flecha limitada, aislamiento térmico,...
 - masa limitada, costo limitado,...
- **Exigencias geométricas (G)**, como por ejemplo:
 - luz (tramo, vano), longitud, superficie,...
- **Propiedades de materiales (M)**, como por ejemplo:
 - densidad, precio, módulo elástico, conductividad térmica, amortiguamiento, resistividad eléctrica, límite elástico,...

Desempeño de un componente

El desempeño o performance (**P**) de un componente es una función de las exigencias y parámetros:

$$P = f (F, G, M,) \dots\dots\dots (7)$$

Es común separar las variables:

$$P = f_1 (F) \cdot f_2 (G) \cdot f_3 (M) \dots\dots\dots (8)$$

Por lo tanto, para la selección de materiales, el índice de desempeño (PI= performance-index) que es de interés, depende del material:

$$\mathcal{PI} = f(\mathcal{M}) \dots\dots\dots (9)$$

Las exigencias requeridas para el dispositivo a fabricar junto con la ecuación gobernante que describe cada fenómeno se describen a continuación:

- Máxima transferencia de calor.

$$Q_r = q * A = -kA \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots (10)$$

- Evitar falla al aumentar la presión en el dispositivo.

$$\sigma = \frac{\Delta p * r}{w} < \sigma_{falla} = \sigma_y = (\text{límite elástico}) \dots\dots\dots (11)$$

- Excelente resistencia a la corrosión en agua (pura y salina).
- Excelente resistencia a la degradación a altas temperaturas (mínima temperatura de servicio > 800°C).
- Excelente durabilidad en ambientes térmicos por encima de 800°C.
- Equipo, lo más ligero posible ($\rho =$ baja)
- Costo, lo más reducido posible (\$=bajo)
- Reciclable.

Q_r = flujo de calor en dirección radial (W) q = flux de calor (W/m ²) A_r = área perpendicular al radio (m ²) k = conductividad térmica (W/m°C) L = largo del cilindro (m) T_{in} = temperatura al interior del cilindro (°C) T_{ex} = temperatura al exterior del cilindro (°C) r_{in} = radio interno del cilindro (m) r_{ex} = radio externo del cilindro (m) ρ = densidad (Kg/m ³) m = masa (kg) V = volumen (m ³) $\$$ = costo (unidad monetaria) σ_y = limite elástico (Pa) P_{ex} = presión al exterior del cilindro (Pa) P_{in} = presión al interior del cilindro (Pa) W = espesor del cilindro (m) C^{te} = constante numérica
--

Obtención de los índices de desempeño

$$Q_r = q * A = -kA_r \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots (12)$$

$$A_r = 2\pi rL \dots\dots\dots (13)$$

Sustituyendo (12) en (13) se obtiene:

$$Q_r = -k2\pi rL \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots (14)$$

Al integrar y aplicar las condiciones de frontera

$$T=T_{in} \text{ en } r=r_{in} \dots\dots\dots (15)$$

$$T=T_{ex} \text{ en } r=r_{ex} \dots\dots\dots (16)$$

Se obtiene:

$$Q_r = \frac{2\pi kL(T_{in} - T_{ex})}{\ln(r_{in} / r_{ex})} \dots\dots\dots (17)$$

Por otra parte se tiene que:

$$m = \rho V = \rho\pi(r_{ex} - r_{in})^2 L \dots\dots\dots (18)$$

Debido a que se quiere el mayor valor de Q y el menor valor de m y $\$$

$$Q_r = m * \$ \dots\dots\dots (19)$$

Al despejar (19) y sustituir la ecuación (17), se tiene que:

$$C^{TE} = \frac{Q_r}{m * \$} = \frac{2\pi kL(T_{in} - T_{ex})}{m\$ \ln(r_{in} / r_{ex})} \dots\dots\dots (20)$$

Sustituyendo (18) en (20):

$$\frac{Q_r}{m * \$} = \frac{2\pi kL(T_{in} - T_{ex})}{(\rho\pi(r_{ex} - r_{in})^2 L)\$ \ln(r_{in} / r_{ex})} = \frac{2k(\Delta T)}{\rho\$w^2 \ln(r_{in}) - \ln(r_{ex})} \dots\dots\dots (21)$$

$$\sigma = \frac{(P_{ex} - P_{in}) * r}{w} < \sigma_{falla} = \sigma_y \text{ (límite elástico) } \dots\dots\dots (22)$$

Al despejar w de (22) se tiene:

$$w = \frac{\Delta P * r}{\sigma_y} \dots\dots\dots (23)$$

Sustituyendo w en (21)

$$\frac{Q_r}{m * \$} = \frac{2k(\Delta T)}{\rho \$ \ln(r_{in}) - \ln(r_{ex})} \left[\frac{\sigma_y^2}{\Delta P^2 r^2} \right] = \frac{\Delta T}{\Delta P^2} * \frac{2}{r^2 \ln(r_{in}) - \ln(r_{ex})} * \frac{k\sigma_y^2}{\rho \$} = f_1(F) * f_2(G) * f_3(M) \dots\dots (24)$$

$$\boxed{\therefore P.I. = f_3(M) = \frac{k\sigma_y^2}{\rho \$}} \dots\dots\dots (25)$$

Generando una relación logarítmica lineal a partir de (25) se tiene:

$$P.I. = f_3(M) = \frac{k\sigma_y^2}{\rho \$} = C^{te}$$

$$\log\left(\frac{k\sigma_y^2}{\rho \$}\right) = \log(k\sigma_y^2) - \log(\rho \$) = C^{te}$$

$$\boxed{\log(k\sigma_y^2) = \log(\rho \$) + C^{te}} \dots\dots\dots (26)$$

Por lo que la pendiente de la líneas guías=1. Con la ecuación obtenida se generó la gráfica correspondiente utilizando el programa CES EduPack 2011.

En las gráficas generadas por el programa CES EduPack 2011, los diferentes grupos de materiales se encuentran identificados por el siguiente código de color:

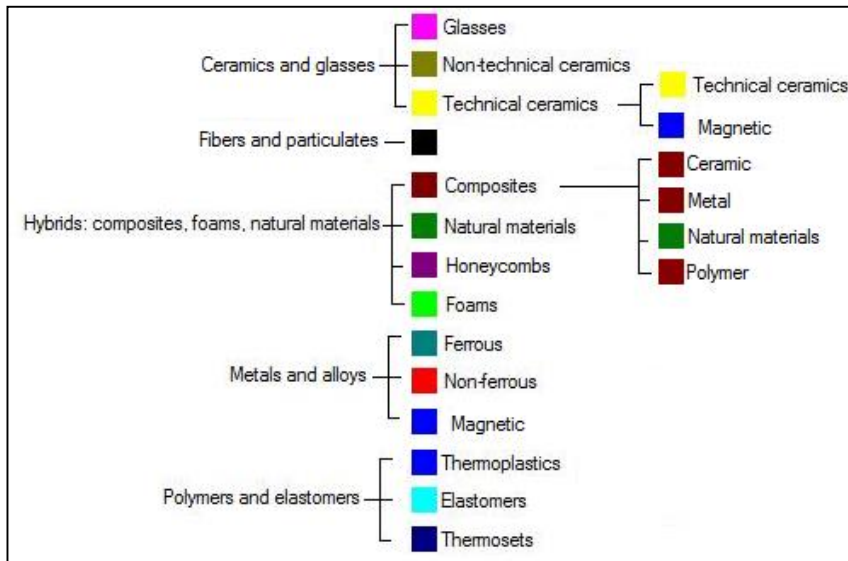


Figura 35.- Código de colores del software CES EduPack2011 para identificar cada grupo de materiales.

A partir de una base de datos de 98 tipos de materiales se obtiene la siguiente gráfica:

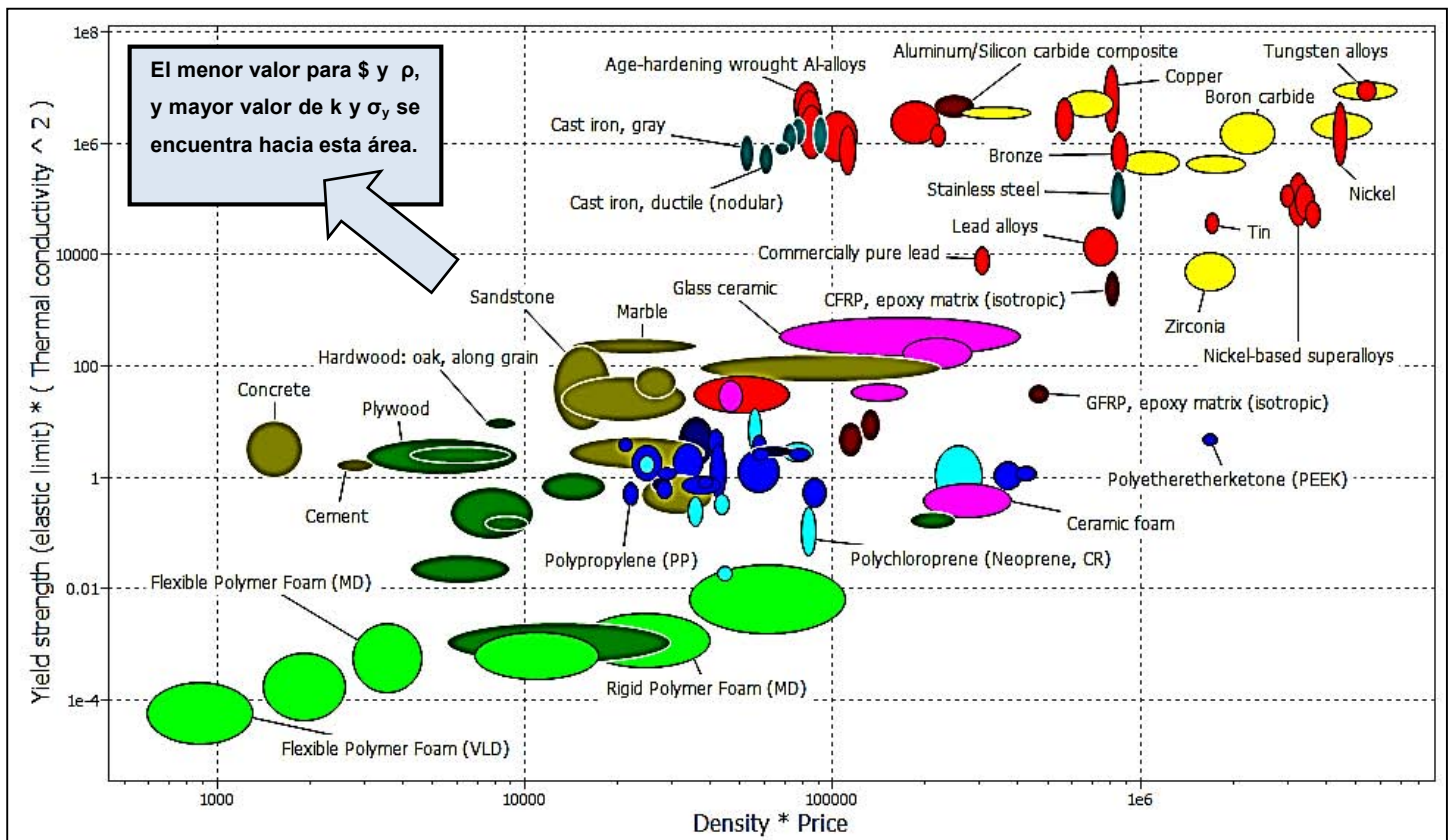


Figura 36.- Diagrama obtenido con la base de datos de 98 grupos y clases de materiales.

Al trazar una línea con la pendiente igual a uno y seleccionar los materiales que se encuentran hacia el área de interés, se obtiene una discriminación de varios materiales y solo quedan coloreados los materiales que cumplen nuestros criterios de selección (figura 37).

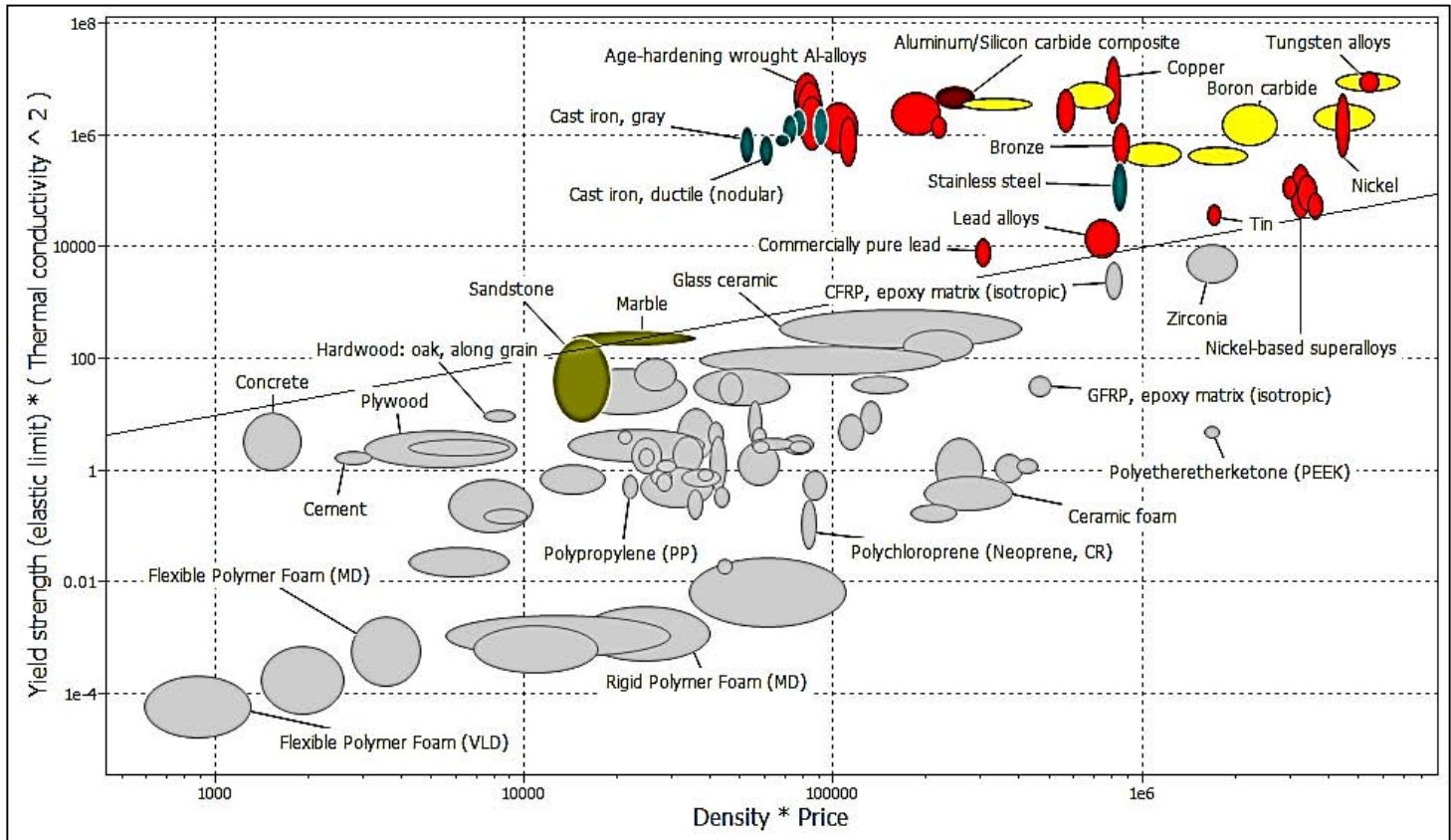


Figura 37.- Diagrama obtenido al trazar la línea de discriminación requerida para la selección.

A continuación se puso como límite las siguientes exigencias requeridas:

- Excelente resistencia a la corrosión en agua y soluciones salinas.
- Temperatura de servicio > 800°C.
- Excelente durabilidad en ambientes térmicos por encima de 800°C.
- Reciclabilidad.

Con lo anterior se obtiene el diagrama mostrado en la figura 38.

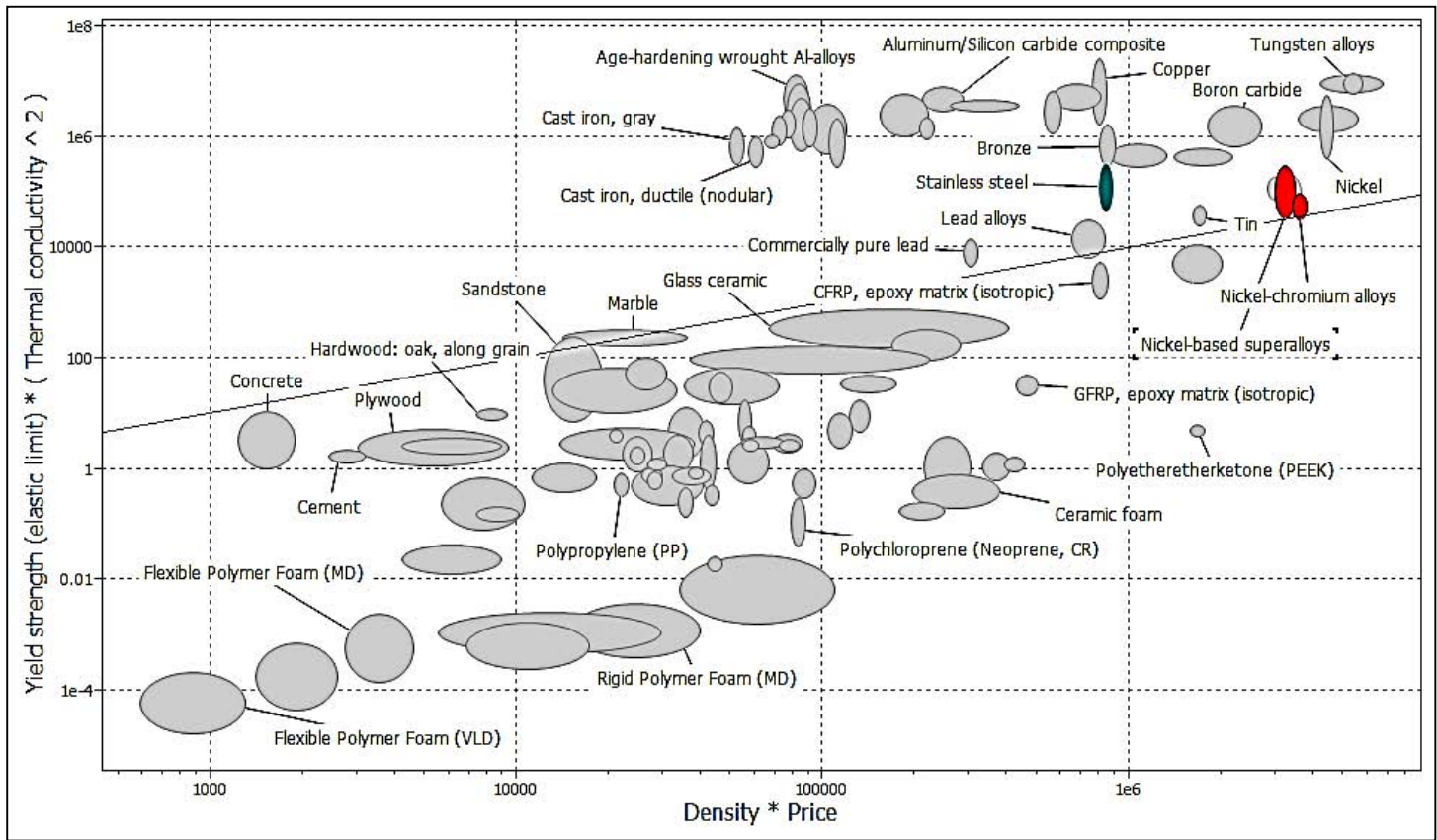


Figura 38.- Diagrama obtenido con la base de datos de 98 clases de materiales, poniendo como restricción la línea de discriminación y los límites de los requerimientos.

Se obtuvieron como resultado las siguientes familias de materiales:

Name	Yield strength (elastic limit) * (Thermal conductivity ^ 2)	Density * Price
Stainless steel	4.33e4 - 3.26e5	7.95e5 - 8.91e5
Nickel-based superalloys	3.55e4 - 2.97e5	3.02e6 - 3.49e6
Nickel-chromium alloys	3.3e4 - 9.28e4	3.42e6 - 3.78e6

Figura 39.- Resultados de la selección de materiales con una base de datos de 98 clases de materiales.

De aquí se observa que los mejores valores los tienen los aceros inoxidable, ya que son los más cercanos al área de interés antes señalada.

Al refinar la selección con una base de datos de 3831 materiales y seguir el mismo procedimiento que se siguió anteriormente se obtiene el diagrama mostrado en la figura 40.

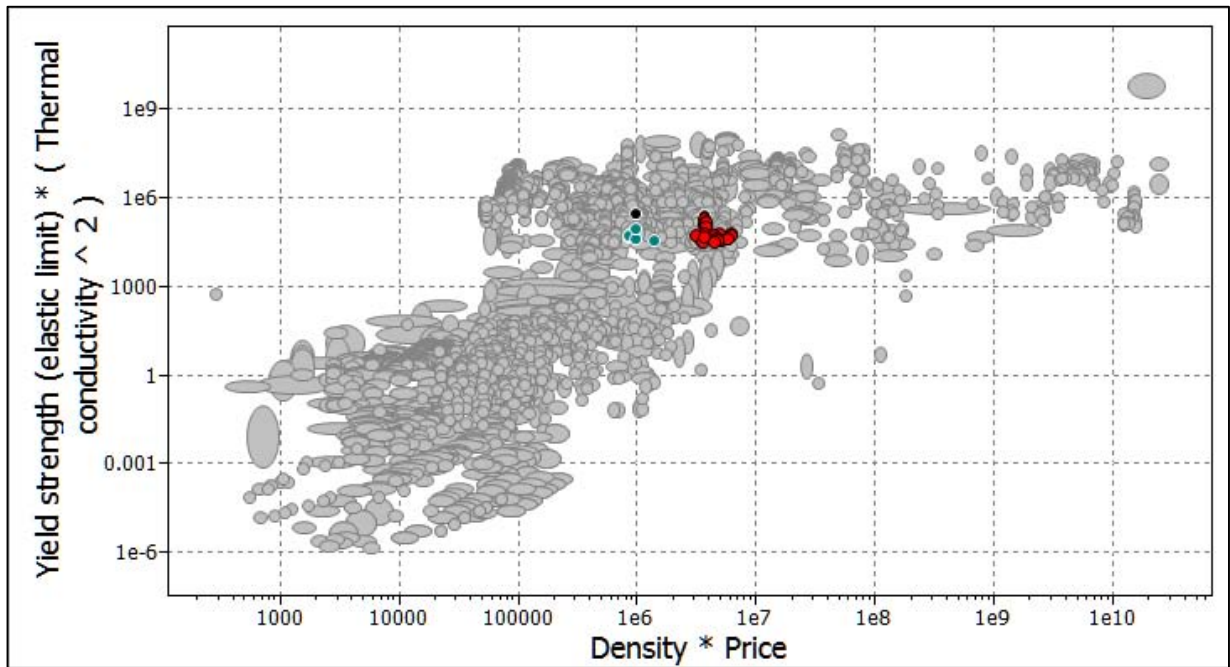


Figura 40.- Selección de materiales de una base de datos de 3881 materiales.

Finalmente al realizar un acercamiento, poniendo la línea de pendiente igual a uno y dejando solo los materiales que cumplen con los requerimientos impuestos, se obtiene el diagrama que se muestra en la figura 41, donde se encuentra el material de interés.

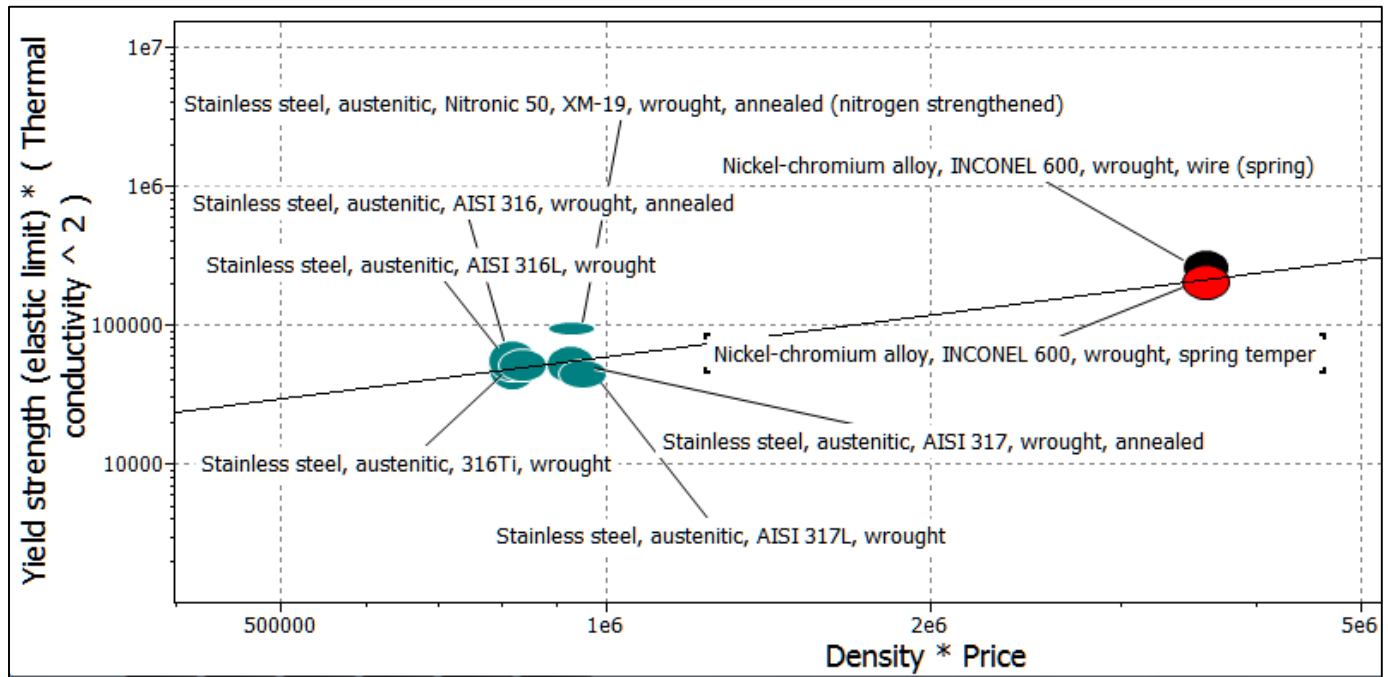


Figura 41.- Resultado final de la selección de materiales.

Con el resultado final de la selección de materiales señalado en la figura 36, se tiene que todos los materiales ahí mostrados cumplen con los requerimientos. Sin embargo el más óptimo es el que se encuentra más cercano al área de interés señalado en la misma figura. Por lo tanto, el acero inoxidable austenítico AISI 316 es el material seleccionado para la construcción del reactor del dispositivo. Sus propiedades y datos generales, proporcionados por el software CES EduPack 2011, son señalados en el **ANEXO II** de este trabajo.

3.1.3 Dibujos de construcción del reactor (CAD)

El resultado del análisis en relación a la geometría y dimensiones para el reactor fueron:

1. Se determinó que se realizaría en tres secciones. Esto con la finalidad de que fuera fácilmente desmontable y que se pudiese remplazar partes del dispositivo cuando fueran degradándose por el uso. Otro punto importante fue la consideración de extraer la espuma con mayor facilidad.
2. Se establecieron dos dimensiones, dependientes de las especificaciones del tamaño del horno que se adquirió, las cuales fueron:
 - Altura del reactor: ser menor a los 60cm que mide la altura del interior del horno.
 - Diámetro exterior del tubo que conecta hacía el exterior para la entrada de los gases: ser menor a 1.5 cm de diámetro, ya que el horno tiene la perforación en la tapa superior de esta medida.
3. Se dedujo que para una adecuada hermeticidad del reactor, se realizarían pequeñas cavidades en las dos tapas donde se embonaría la parte del cuerpo, pero dejando espacio suficiente para poder colocar los empaques de grafito flexible, y así conseguir un mejor sellado a altas presiones y temperaturas.
4. Se decidió cerrar mecánicamente el reactor con la ayuda de cuatro pernos que distribuyen la carga ejercida para el cierre. Es importante mencionar que solo se maquinaron las cuerdas de las perforaciones para los pernos en la tapa inferior, ya que es recomendable evitar en la medida posible el uso de cuerdas, porque son más susceptibles a corroerse a altas temperaturas y con esto hacer disfuncional la tapa.

5. El tubo que conecta con el exterior del reactor será soldado posteriormente a la tapa superior y será de alguna medida comercial menor a 1.5cm de diámetro exterior.
6. Los espesores de reactor fueron calculados conforme al código ASME sec. VIII para la fabricación de recipientes sometidos a presión. [40]

Cálculo del espesor del cuerpo y tapas de acuerdo a ASME Sec.VIII (Rules for construction of pressure vessel)

Datos:

$$R_o = 100 \text{ mm}$$

$E = 1$, ya que no existen soldaduras y se considera una total hermeticidad con las tapas
eficiencia de la soldadura

$$T_{dis} = 750^\circ\text{C}$$

$$S = 17.7 \text{ MPa (a } 750^\circ\text{C)}$$

R_o = radio exterior
E = eficiencia de la soldadura
t = espesor mínimo requerido (mm)
T_{dis} = temperatura de diseño ($^\circ\text{C}$)
P_{op} = presión de operación (MPa)
P_{dis} = presión de diseño (MPa)
$MAWP$ = máxima presión de operación (MPa)
S = máximo esfuerzo a la temperatura de diseño (MPa)

P_{op} = se determinó que la presión de diseño requerida sea de 0.2MPa

La presión de diseño tiene una relación de 1.5 veces la de operación por lo que:

$$\frac{P_{dis}}{P_{op}} = 1.5 \dots\dots\dots (27)$$

$$P_{dis} = 1.5 * P_{op} = 1.5 * 0.2\text{MPa} = 0.3 \text{ MPa} \dots\dots\dots (28)$$

El espesor mínimo requerido para la presión de diseño es:

$$t = \frac{P R_o}{SE+0.4P} = \frac{0.3\text{MPa} * 100\text{mm}}{17.7\text{MPa} * 1 + 0.4 * 0.3\text{MPa}} = 1.7\text{mm} \approx 2\text{mm} \dots\dots\dots (29)$$

Se decidió dar un sobre espesor de tal forma que se fabricara de 4mm el espesor del cuerpo y con esto se tendría mayor seguridad y un margen de presión de

operación mayor, dado que con el espesor mencionado se tiene una máxima presión de trabajo de:

$$MAPW = \frac{SEt}{R_o - 0.4t} = \frac{17.7MPa * 1 * 4mm}{100mm - 0.4 * 4mm} = 0.71MPa \dots\dots\dots (30)$$

Con esto se consigue un intervalo de presión de (0 - 0.7) MPa para optimizar el proceso.

El cálculo para las tapas se omitió ya que por la geometría del reactor el esfuerzo circunferencial es más crítico, además que por disponibilidad las tapas se construirán a partir de una placa de ½in por lo que el espesor está sobrado. Los dibujos para la fabricación del reactor obtenidos a partir de la modelación CAD se muestran a en el **ANEXO III** de este trabajo.

El resto del equipo necesario para el proceso; por ejemplo: el sistema de válvulas; fue sometido solo a un modelado CAD para ilustrar su ensamblaje pero no para su construcción. Lo anterior se debió a que todos los componentes necesarios se comprarían ya fabricados y solo se llevaría a cabo su montaje su montaje.

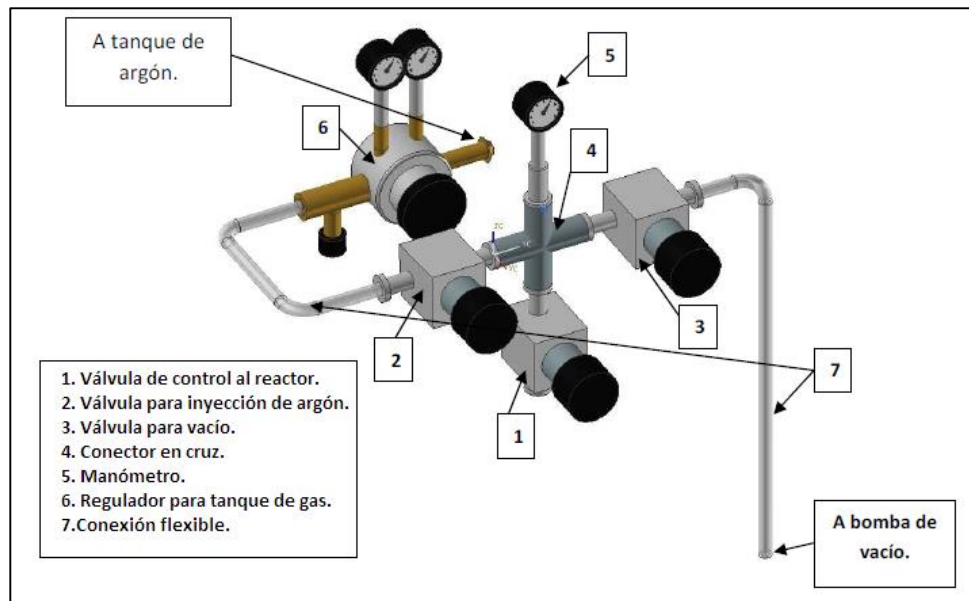


Figura 42.- Modelo de los componentes del sistema de válvulas.

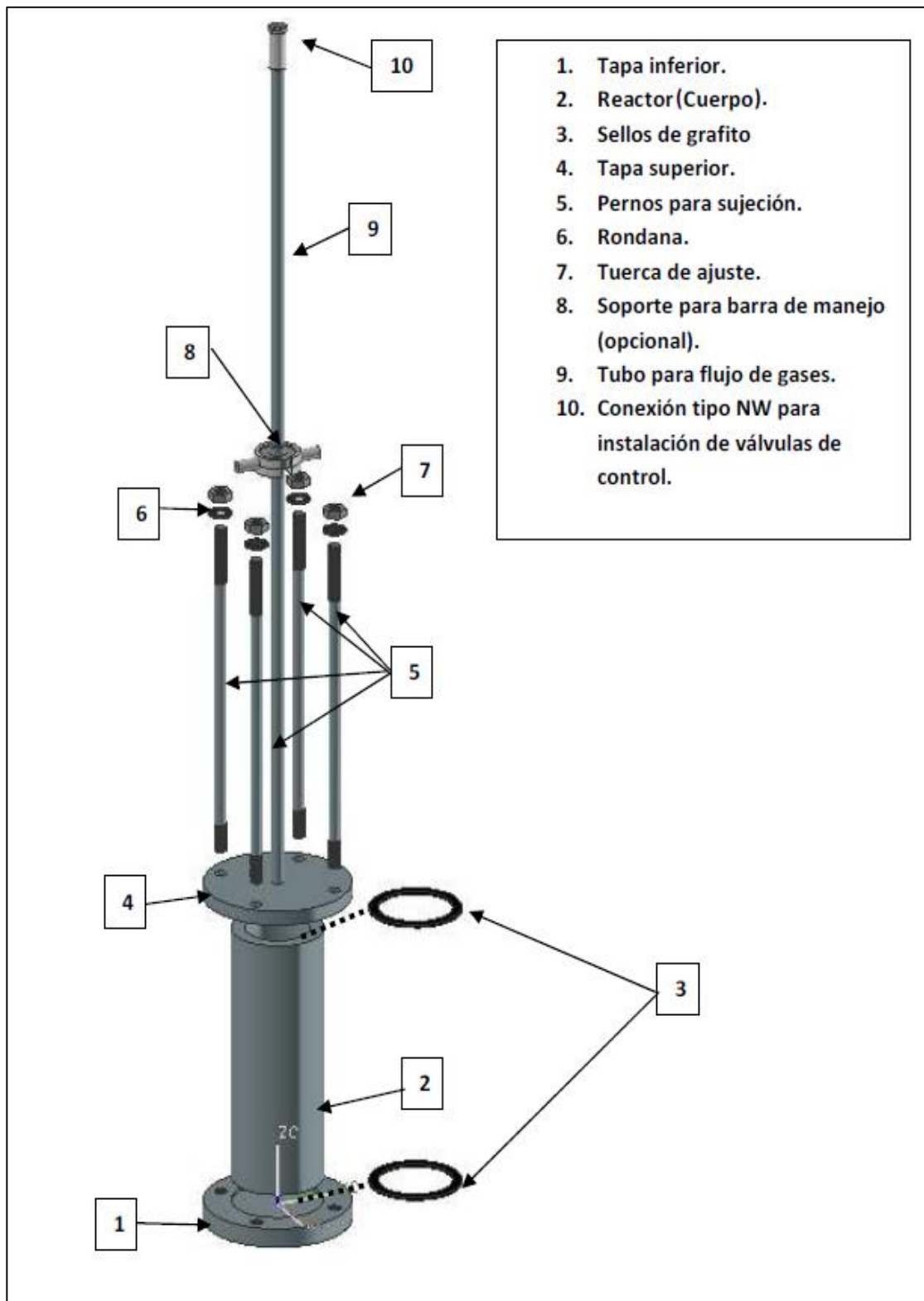


Figura 43.- vista de ensamble de los componentes del reactor.

3.1.4 Construcción del dispositivo

Por razones de disponibilidad se obtuvo una placa de acero inoxidable AISI 316 con especificación SA-480 con ½in de espesor para la fabricación de las tapas del reactor y un tubo de acero inoxidable AISI 316 de 70cm de largo con especificación SA-213, NPS=3½in y cedula=80 para el cuerpo del reactor.

Tanto la placa como el tubo conseguidos fueron analizados para cerciorarse de que tuvieran la composición adecuada de un inoxidable 316, lo anterior mediante espectrometría de dispersión de energía (EDS). Los resultados mostrados en la tabla 7, coinciden con la composición mostrada en los datos del acero AISI 316 requerido. [39] Por lo que se valida que es el material necesario.

Tabla 7.- Resultado del análisis de composición con EDS.

	Medición 1	Medición 2	Medición Promedio	Composición AISI 316
Elemento	%Peso			
Si	0.58	0.73	0.705	< 1
Cr	18.42	18.1	18.26	16-18.5
Mn	1.75	1.74	1.745	< 2
Ni	11.36	11.43	11.395	10-14
Mo	3.36	2.94	2.65	2-3
Fe	64.32	62.49	63.405	balance

Al emplear los planos generados del diseño CAD y los materiales necesarios se obtuvieron las diferentes partes del dispositivo, como se muestra en la figura 44 y detalla en los siguientes párrafos.

Para el caso de las tapas, se cortaron a partir de la placa dos cuadrados de 152 x 152 mm. Posteriormente se realizó un torneado hasta llegar a la forma circular con un diámetro de 148mm. Después, fue maquinada también con la ayuda de un torno, la cejilla de 4mm de grosor y dos 6mm de profundidad, las cuales sirven para la colocación de los sellos y así obtener mayor hermeticidad. Por último se perforaron los orificios para la entrada de los espárragos de cierre y la

entrada/salida de gases. Cabe señalar que en el caso de la tapa inferior, fue maquinada una cuerda para los espárragos.

En el caso del cuerpo del reactor fue recortado el tubo obteniendo una longitud de 260mm y después fue montado en el torno para disminuir su espesor hasta 4mm. Para un mejor desempeño del reactor tanto el cuerpo como las tapas del reactor, fueron maquinados con los parámetros necesarios para obtener un acabado con rugosidades similares a un No. 4 para aceros inoxidable; el cual es considerado como acabado para uso sanitario. Los valores de rugosidad, en promedio (medición tomada por quintuplicado sobre la superficie) fueron: $R_a = 29 \mu\text{in}$, $R_y = 207 \mu\text{in}$ y $R_z = 165 \mu\text{in}$.

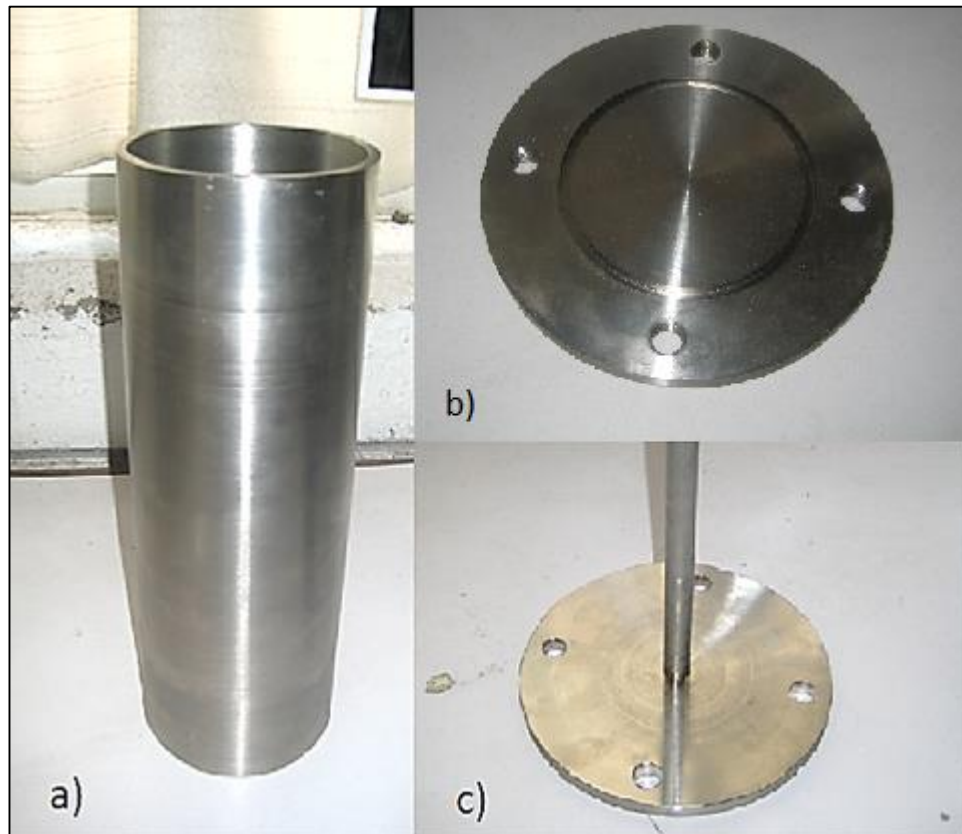


Figura 44.- a) Cuerpo o envoltorio del reactor, b) Tapa superior y c) Tapa inferior.

Posteriormente fue soldado un tubo a la tapa superior, del mismo material AISI 316 con 13.8mm de diámetro y una longitud de 90cm de largo (figura 45–a). Este fue suficientemente largo como para que el calor se disipe y no incremente demasiado la temperatura del sistema de válvulas que va conectado al reactor. De igual forma fue soldado al final del tubo una boquilla capaz de conectarse con el sistema de válvulas de entrada y salida de gas (figura 45-b), dichas uniones fueron realizadas con soldadura eléctrica GMAW (Gas Metal Arc Welding) utilizando un electrodo AWS A5.4 clasificación E316-XX. Las soldaduras fueron revisadas después de su elaboración con el objetivo de verificar que no tuvieran ninguna discontinuidad como socavados, falta de fusión, etc. Lo anterior con la finalidad de que no repercutiera en la integridad mecánica del reactor al momento de llevar a cabo su puesta en funcionamiento.



Figura 45.- a) Soldadura de la tapa superior con el tubo de entrada y salida de gases, b) Soldadura de la boquilla al final del tubo de entrada y salida de gases.

Como ya se había mencionado, algunos de los componentes del dispositivo se compraron ya fabricados, como es el caso de los empaques los cuales fueron de hoja de grafito de 1/8in de espesor los cuales ayudan a que la hermeticidad del recipiente sea adecuada.

Así mismo, los espárragos de cierre fueron fabricados únicamente cortando secciones de varilla comercial con cuerda (figura 46).

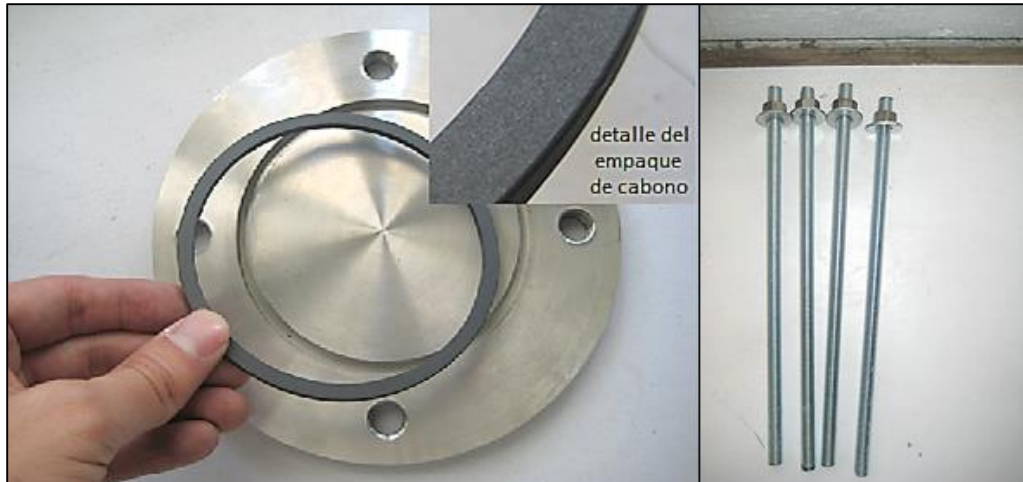


Figura 46.- Empaques de grafito utilizados para la hermeticidad (sello) del recipiente y pernos de sujeción para cerrar el reactor.

Finalmente se armó el reactor para verificar que todo ensamblara de acuerdo al diseño (figura 47).



Figura 47.- Reactor ensamblado y comparación con su modelo CAD.

El sistema de válvulas que conecta al tanque de argón y la bomba de vacío con el reactor fue ensamblado a partir de los siguientes elementos comerciales (figura 48):

- 1 Conexión de cruz de acero inoxidable de 1/2in
- 2 Reductores de acero inoxidable 0.5x0.25 in
- 2 Válvulas tipo membrana (Speedivalves) tamaño SP10K marca Edwards.
- 1 Válvula tipo membrana (Speedivalves) tamaño SP25K marca Edwards.
- 8 abrazaderas de diferentes tamaños.
- Manguera de vacío

Se usaron válvulas de tipo membrana con terminales en bridas tipo NW10 y NW25, y conexiones de desmontado rápido tipo abrazadera. Esto por sus características de flujo bidireccional, además de su acoplamiento más sencillo al resto del conjunto.

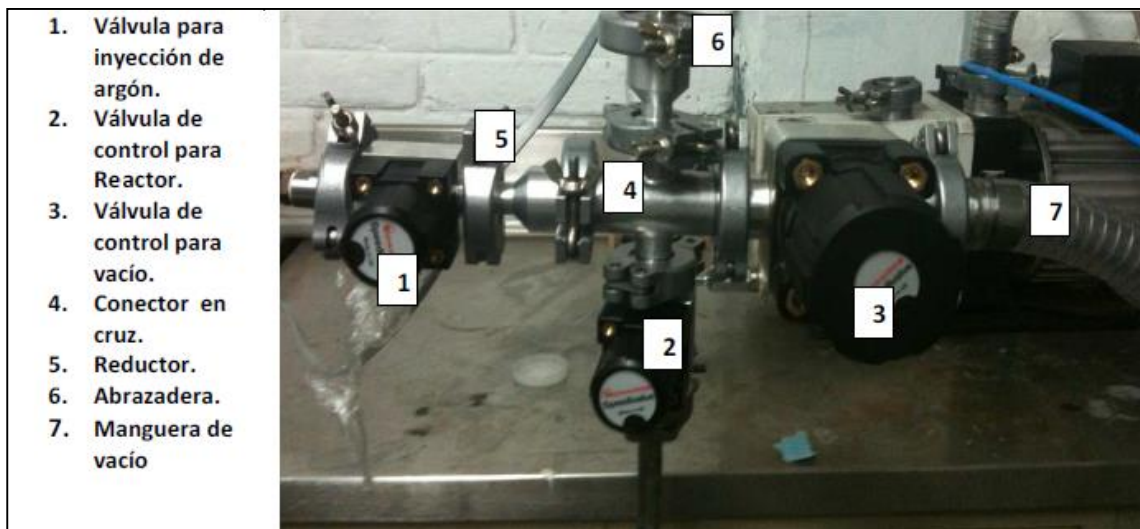


Figura 48.- Sistema de válvulas.

Para la medición de la presión se utilizaron dos dispositivos. Durante la etapa de generación de vacío se empleó un sensor tipo Pirani y para las etapas de fusión e infiltración se instaló un manovacuómetro.

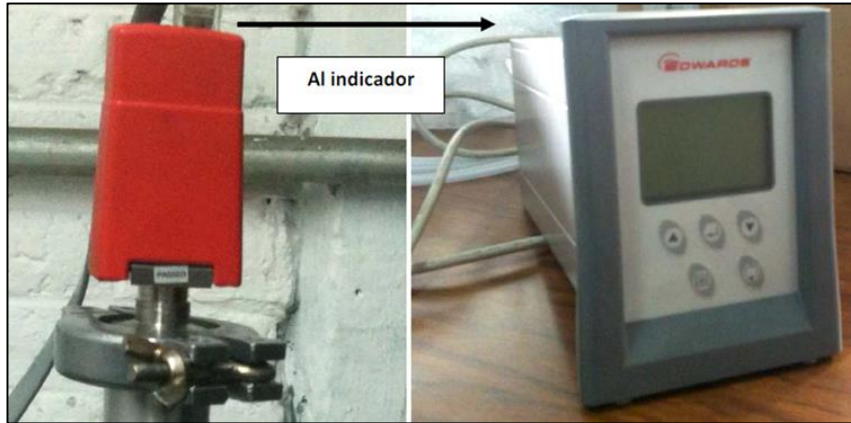


Figura 49.- Sensor "Pirani" y display indicador de vacío.

También se maquinó un gancho que fue soldado a dos tubos de acero al carbono; como se muestra en la figura 50. Esta parte se hizo con la finalidad de utilizarlo como herramienta para introducir y extraer el reactor del horno. Dicho tubo embona con la boquilla soldada al final del tubo de entrada-salida de los gases y con ello se puede cargar el reactor de forma tal que pueda extraerse con facilidad del horno de manera vertical.



Figura 50.- Herramienta (gancho) para remover e introducir el reactor al horno.

En la figura 51 se muestra el horno utilizado para realizar el proceso de fabricación de espumas metálicas el cual es marca Carbolite modelo SNF. Este

horno cuenta con un control numérico digital para la temperatura. También tiene un orificio necesario en la tapa, de tal forma que pueda salir el tubo que conecta el reactor con el sistema de válvulas.



Figura 51.- a) Horno, b) Horno abierto, c) Lanceta-tapón y tapa con orificio.

3.2 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMA METÁLICA

3.2.1 Diseño y obtención de preforma

Resultado de las pruebas realizadas con diversas combinaciones de NaCl, agua y harina se obtuvo como resultado un diagrama de mezclas ternario (figura 52). Aquí se observa una zona denominada “A” donde la mezcla tiene buena consistencia, dando lugar a que se puedan moldear partículas pequeñas con la mano y que se pueda extrudir con facilidad. Por otro lado, la zona denominada “B” también tiene una buena consistencia, similar que en la zona “A”, sin embargo, estas partículas tienen la cantidad de NaCl necesaria para que las partículas se fragmenten y disuelvan después de ser tratadas térmicamente.

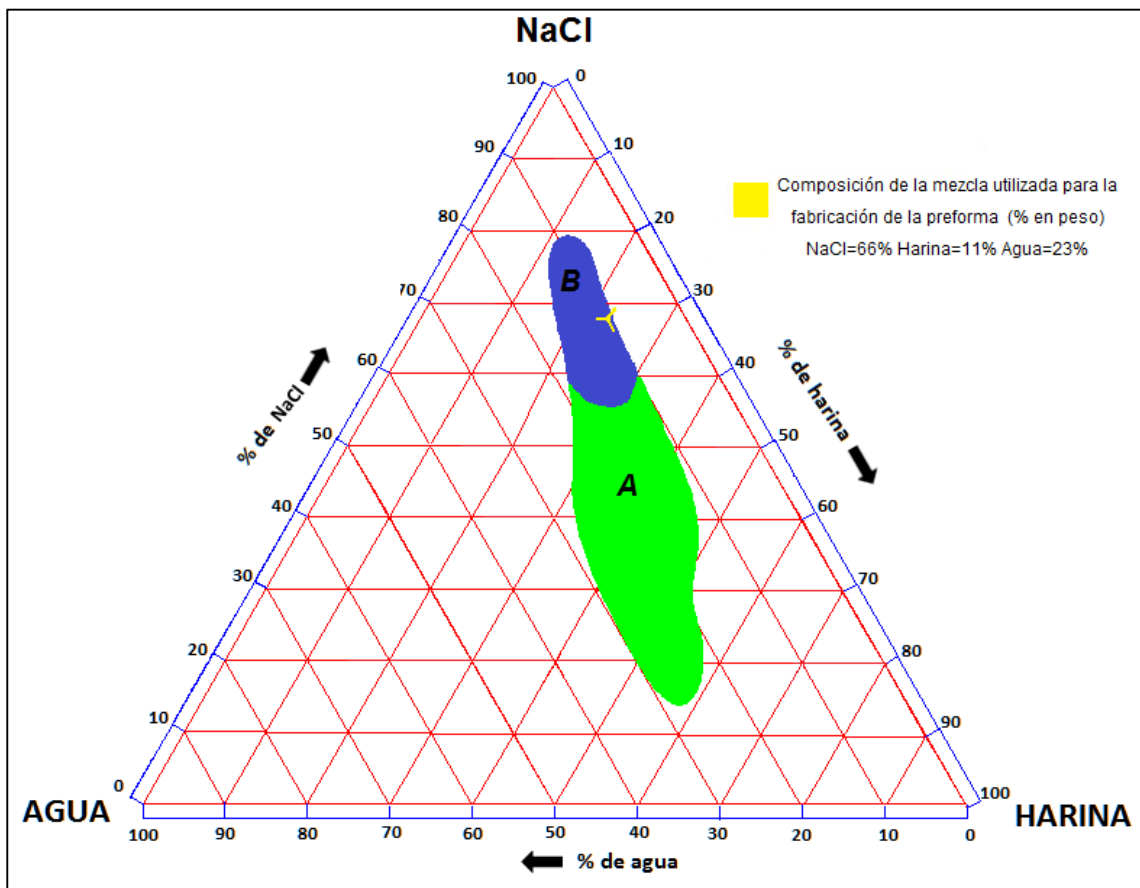


Figura 52.- diagrama de mezclas para la masa con la que se fabricará la preforma.

Después de las pruebas realizadas, se determinó que las partículas elaboradas con mezclas con composiciones que se localizan en la zona “B” del diagrama cumplen con las siguientes características:

- Son moldeables (se pueden producir partículas de al menos 4mm).
- Se puede realizar la extrusión de la pasta.
- Se deshidratan en un tiempo razonable, endureciendo y manteniendo la geometría deseada.
- Se pueden calcinar y sinterizar quedando unidas pero guardando pequeños huecos entre ellas.
- Mantienen una estructura estable a través del tiempo.
- Se fragmentan y disuelven en agua después de ser tratadas térmicamente en un periodo de tiempo relativamente corto.

Para la fabricación de la espuma de Al, en el presente estudio, se fabricó una cantidad de 700g de pasta con la composición señalada en el diagrama. Con ella, se elaboraron partículas mediante el método ya descrito anteriormente. Dichas partículas tenían una morfología en su mayoría semiesférica y un porcentaje reducido de tipo cilíndrico, con tamaño promedio de 5mm. Posteriormente las partículas fueron sometidas a un tratamiento de secado inicial (sin unir las), este tratamiento endurece cada partícula individualmente, con lo cual se obtiene la fijación de forma deseada y evitando aglomeraciones entre ellas, generando el espacio disponible para la infiltración del metal líquido (figura 53).

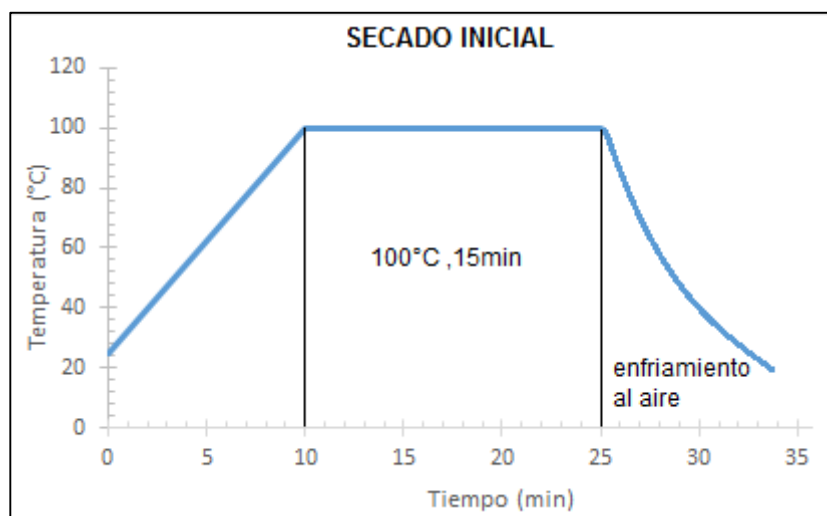


Figura 53.- Tratamiento térmico de secado inicial de las partículas de la preforma.

Después, las partículas fabricadas se colocaron dentro del reactor; aplicando una presión aproximada de 1Kg/cm^2 sobre ellas, con el fin de garantizar la resistencia de las partículas. La preforma fabricada fue de 6cm de altura por 8cm de diámetro. Es importante señalar que el reactor fue preparado previamente recubriéndose con pintura de nitruro de boro la cual servirá como aislante entre el Al líquido y las paredes del reactor, impidiendo su reacción a altas temperaturas. Además sirve como agente lubricante y desmoldeante a la hora de extraer la espuma ya solidificada.



Figura 54.- Partículas obtenidas para la fabricación de la preforma y reactor con las partículas ya colocadas.

Posteriormente, las partículas fueron tratadas térmicamente (tratamiento térmico señalado en la figura 55), con la finalidad de deshidratarlas completamente, evitando que las partículas de la preforma se expandan durante el tratamiento de calcinación y que se reduzca el espacio para la infiltración del metal líquido. Enseguida, la preforma se calienta para que las partículas sean calcinadas y sinterizadas, eliminando los compuestos orgánicos que puedan afectar durante el proceso de infiltración y uniendo las partículas de forma tal que la preforma quede totalmente estructurada y unida.

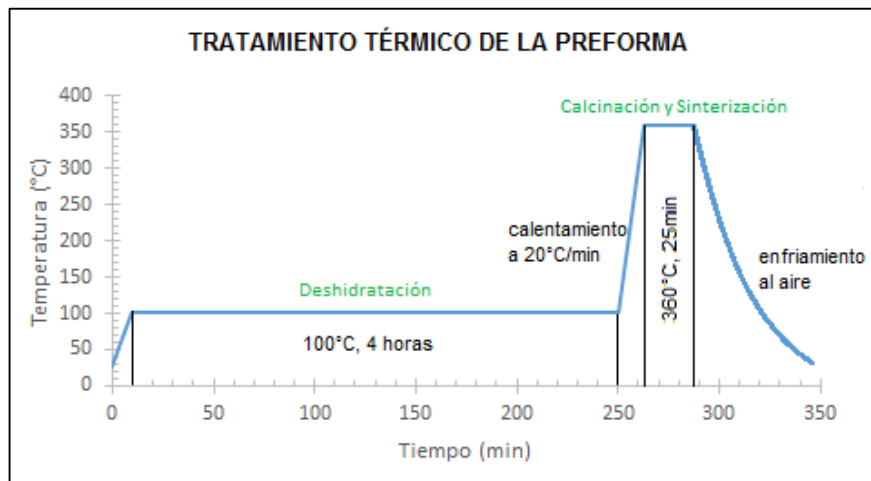


Figura 55.- Tratamiento térmico de preforma.

Después de efectuar el tratamiento térmico, se obtuvo una preforma estable en su estructura y composición, lista para ser infiltrada por el metal fundido.



Figura 56.- Preforma después de someterla al tratamiento térmico.

3.2.2 Fabricación de espuma metálica

Una vez obtenida la preforma se realizó el cálculo para la carga de Al, como se muestra a continuación:

Considerando que la densidad del Al es de 2.7g/cm³.

La cantidad de Al necesaria para llenar el volumen cilíndrico de la preforma que es de 8cm de diámetro por 10 de largo.

$$V_{preforma} = \pi * \left(\frac{\text{diámetro}}{2}\right)^2 * \text{largo} \dots \dots \dots (31)$$

$$V_{preforma} = \pi * \left(\frac{8\text{cm}}{2}\right)^2 * 10\text{cm} = 160\pi = 502.65\text{cm}^3$$

$$\text{masa de Al} = V_{preforma} * \text{densidad Al} \dots \dots \dots (32)$$

$$\text{masa de Al} = 502.65\text{cm}^3 * 2.7\text{g/cm}^3 = 1357\text{g}_{Al} = 1.357\text{Kg}_{Al}$$

Considerando que la porosidad de la preforma es de 60% entonces la cantidad de Al en la preforma es:

$$1357\text{g}_{Al} * 0.6 = 813.6\text{g}_{Al} \approx 814\text{g}_{Al}$$

Agregando un 20% para garantizar la total infiltración del material en la preforma, y disminuyendo la cantidad de defectos así como la posibilidad de rechupes.

$$814\text{g}_{Al} * 0.2 = 162.8\text{g}_{Al}$$

$$814\text{g}_{Al} + 162.8\text{g}_{Al} = 976.8\text{g}_{Al} \approx 977\text{g de Al}$$



Figura 57.- Al puesto encima de la preforma para ser fundido e infiltrado.

Para la etapa de fusión e infiltración se aplicó un calentamiento de 25°C/min hasta llegar a los 750°C. Esta temperatura es superior a la del punto de fusión del Al, con esto se busca mantener una fluidez adecuada (disminuir la viscosidad) del Al durante la infiltración.

Al alcanzar los 90 min a 750°C el sistema de vacío fue interrumpido y se aplicó la inyección del gas (Ar) con una presión desde 1.5 Kg/cm² (0.15MPa) hasta 2Kg/cm² (0.2MPa) como máximo, con un flujo de 0.252Kg/cm² (0.02MPa) por minuto (figura 58).

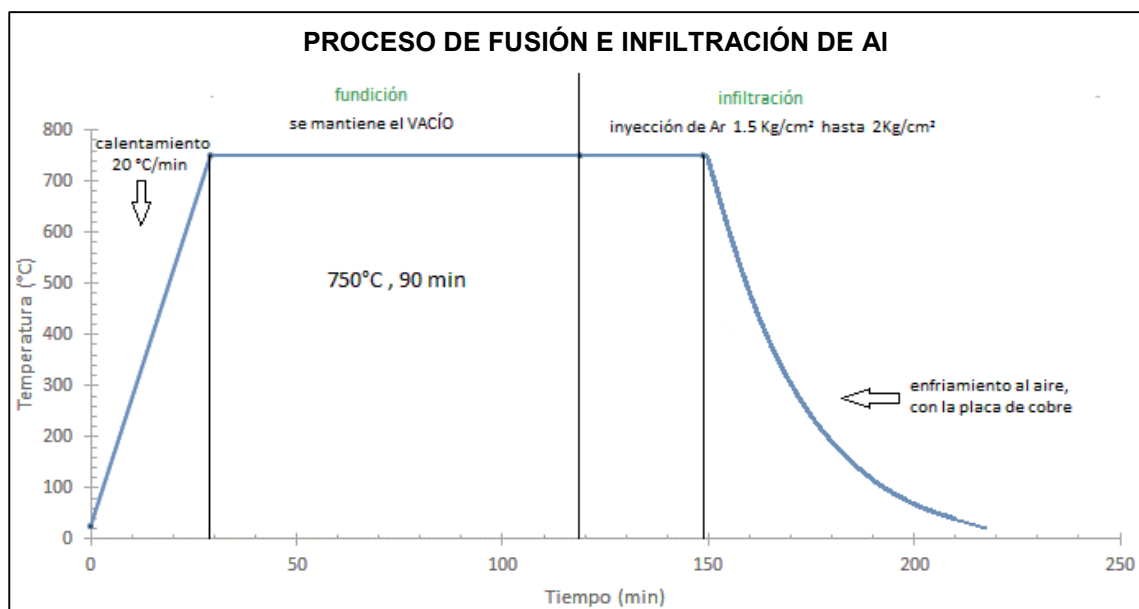


Figura 58.- Parámetros durante la fusión e infiltración de Al.

Después de que el sistema se enfrió, se interrumpió la inyección de Ar, se desconectó el sistema de válvulas al reactor y este se desensambló para poder extraer la espuma de Al resultante del proceso (figura 59).

Finalmente la espuma se maquinó con un torno, con la finalidad de quitar la capa superficial de Al denominada “piel” (figura 59).



Figura 59.- Espuma metálica resultado del proceso antes y después de ser removida la capa superficial de Al.

Durante el procesamiento de la espuma de Al se tuvieron las siguientes observaciones:

En cuanto al reactor, no fue observado ningún comportamiento desfavorable, de igual forma no se observaron fisuras, deformaciones plásticas, etc. en ninguno de sus componentes. El desempeño del mismo fue como se había predicho en la etapa de diseño.

En cuanto a la hermeticidad del reactor no se observaron fugas de gases durante el proceso. Sin embargo se requirió de un tiempo considerable para lograr el vacío adecuado, el vacío alcanzado es equiparable con el requerido por otros equipos o procesos. De igual forma, el sistema de cierre de pernos requirió de un elevado torque de apriete de los mismos y al finalizar el proceso, dichos pernos presentaron deformaciones plásticas por las elevadas temperaturas a las que fueron sometidos, por lo que se recomienda cambiar este material por acero inoxidable austenítico.

En relación a la preforma, ésta se comportó de la forma esperada, resistiendo la presión y la fricción asociada al flujo del metal durante la etapa de infiltración.

Por otra parte, el sistema de válvulas no presentó fugas ni desperfectos durante el proceso permitiendo hacer cambios de flujo sin tener que desmontar algún elemento del sistema.

Después de extraer la espuma del reactor, se observó un cambio de coloración en el interior del cuerpo y tapa inferior, posiblemente debido a las altas temperaturas manejadas en el proceso. De igual forma, aun cuando se empleó un buen acabado superficial y la capa de nitruro de boro (BN) la cual disminuye los efectos de la reactividad del cromo (Cr) y el aluminio (Al) se llegaron a presentar algunos indicios de corrosión por picaduras, aunque no de manera importante como para considerarlo como una falla.

Con lo anteriormente descrito, de alguna forma se validó satisfactoriamente el diseño del dispositivo en cuanto a fallas de operación se refiere, ya que no se presentó ningún desperfecto de consideración.

Es importante señalar que la presión de inyección ($2\text{Kg/cm}^3 = 196\text{ KPa}$) es relativamente baja, pero al tener el sistema en condiciones de vacío, esta presión fue suficiente para lograr la infiltración del metal a través de toda la preforma, en un tiempo relativamente corto. Lo anterior incrementa de manera substancial el interés en la implementación comercial ya que se convierte en un proceso de bajo costo y de alta calidad.

3.2.3 Caracterización estructural

Como resultado de la caracterización estructural de las probetas de la espuma de Al obtenidas, se tienen las fotografías tanto de la cara superior inferior y laterales, las cuales fueron capturadas por medio de microscópica óptica.



Figura 60.-espuma de Al obtenida "Probeta número 2".

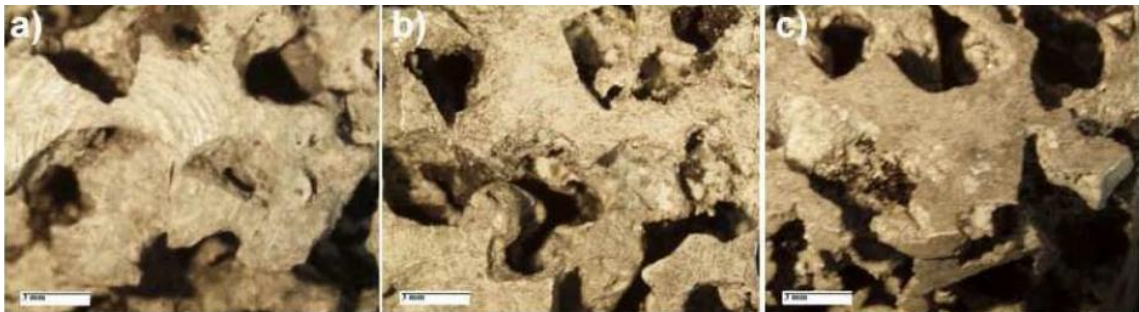


Figura 61.- Ejemplo representativo de las fotografías de las espumas tomadas con el microscopio estereográfico.

Probeta No.2 a) cara inferior, b) cara lateral y c) cara superior.

Tabla 8.- Características estructurales observadas con el microscopio estereográfico.

Observación microscópica	
Tipo de celda	Abierta , existen espacios interconectando
Morfología de la celda	Poligonal irregular
Características de los bordes y caras de las celdas	Algunos bordes presentan un espesor considerable (al menos de la mitad del tamaño de celda)
Defectos estructurales	Presentan gran cantidad de bordes perdidos así como protuberancias y residuos de la preforma en los bordes

Al analizar el tipo de celda en las 4 muestras de las espumas de Al producidas, se observó una buena interconectividad, pero algunas celdas se encontraron cerradas en gran parte por remanentes de preforma que no dejan observar si la celda tiene conexión con otras. Con esto es evidente que el método para remover la preforma después de ser infiltrada debe de ser optimizado, para poder así tener una buena caracterización y una mejor calidad en la espuma producida. También se observa que las 4 probetas presentan una morfología similar, lo cual indica que en toda la espuma se logró la misma reproducción de la preforma. Los defectos encontrados se deben a la aplicación de esfuerzos sobre la preforma en alguna etapa del proceso, pudiendo ser provocados durante la presión de infiltración, la carga inicial del metal infiltrado, contracciones o expansiones por la temperatura de infiltración o la compactación de partículas durante la elaboración de la preforma. Lo que sugiere que este proceso tiene que ser revisado para encontrar cual es el principal precursor de defectos y así tratar de mitigarlo en la medida posible.

La tabla 9 muestra los resultados del promedio de las mediciones del tamaño de celda, realizado en dos secciones diferentes para cada una de las probetas. Este resultado se obtuvo mediante el análisis de las imágenes, tomadas con el microscopio estereográfico.

Tabla 9.- Resultado de las mediciones del tamaño de celda promedio

Probeta	Sección	Tamaño de celda promedio(mm)
1	Superior	5.634
	Lateral	4.681
2	Superior	4.292
	Lateral	4.164
3	Superior	4.218
	Lateral	4.503
4	Superior	4.469
	Lateral	4.880
	Promedio	4.605

Al analizar los datos obtenidos de las mediciones de tamaño de celda promedio, se observa un intervalo de entre 4.164 mm y 5.634 mm, donde los tamaños de celda más grande se encontraron puntualmente en la cara superior de la probeta 1, lo cual indica que en esa sección ocurrió una mala infiltración. Sin embargo, las demás secciones medidas resultan ser de un tamaño de celda similar, lo cual indica una homogeneidad en la preforma fabricada. No obstante, al realizar la preforma se puede establecer una medida más rigurosa en la fabricación de las partículas y una selección más estricta en la forma de éstas, ya que como se observa, esto tiene una relación directa con la homogeneidad del tamaño de celda resultante en la espuma.

En la tabla 10 se muestran los resultados del análisis volumétrico realizado a las 4 probetas los cuales se obtuvieron de la siguiente forma:

Ejemplo de cálculo para análisis volumétrico de la probeta 1

considerando que : $\rho_{solido} = 0.0027g/mm^3$ y $P_{espuma} = 20.086g$

$$V_{espuma} = \pi \left(\frac{D_{espuma}}{2}\right)^2 * A_{espuma} = \pi \left(\frac{28mm}{2}\right)^2 * 25mm = 15394mm^3 \dots\dots\dots (33)$$

$$P_{solido} = V_{espuma} * \rho_{solido} = 15394mm^3 * 0.0027g/mm^3 = 41.56g \dots\dots\dots (34)$$

$$\%Aluminio = P_{espuma} \left(\frac{100\%}{P_{solido}}\right) = 20.086g \left(\frac{100\%}{41.56g}\right) = 48.3\% \dots\dots\dots (35)$$

$$\%Porosidad = 100\% - \%Aluminio = 100\% - 48.3\% = 51.7\% \dots\dots\dots (36)$$

$$\rho_{espuma} = \left(\frac{P_{espuma}}{V_{espuma}}\right) = \left(\frac{20.086g}{15394mm^3}\right) = 0.0013g/mm^3 \dots\dots\dots (37)$$

$$\rho_{relativa} = \left(\frac{\rho_{espuma}}{\rho_{solido}}\right) = \left(\frac{0.0013g/mm^3}{0.0027g/mm^3}\right) = 0.483 \dots\dots\dots (38)$$

Tabla 10.- Resultado de las mediciones del tamaño de celda promedio.

	Probeta				Promedio
	1	2	3	4	
Peso espuma (g)	20.086	23.939	28.072	29.542	25.4
Diámetro espuma(mm)	28	28	28	28	28
Altura espuma (mm)	25	25	25	25	25
Volumen espuma (mm ³)	15394	15394	15394	15394	15394
Densidad del solido (g/mm ³)	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027
Peso del solido (g)	41.563	41.563	41.563	41.563	41.56
% de porosidad	51.7	42.4	32.5	28.9	38.9
% de Aluminio	48.3	57.6	67.5	71.1	61.1
Densidad espuma (g/mm ³)	0.0013	0.0016	0.0018	0.0019	0.0017
Densidad relativa de la espuma	0.483	0.576	0.675	0.711	0.611

Las probetas 3 y 4 presentan un valor de densidad relativa (y por lo tanto porosidad) un tanto similar. La probeta 2 también podría considerarse en un intervalo no tan lejano, no así la probeta 1 que tiene hasta un 20% de diferencia con respecto a las demás. Esto es congruente con la dispersión presentada en la medición del tamaño de celda, donde las celdas medidas con mayor tamaño

corresponden a la probeta 1, debiéndose a las regiones sin bordes altamente porosas. De igual forma, la diferencia en el peso de las espumas y por lo tanto en su densidad relativa es provocada por los remanentes de preforma que se encontraron en la observaciones microscópicas.

Las espumas 3 y 4 fueron las que presentaron la mayor cantidad de estos residuos dentro de las celdas, lo anterior fue comprobado al finalizar los ensayos de compresión, donde al ser comprimidas las probetas, los remanentes de preforma en el seno de la espuma fueron expulsados de ella en forma de polvos. Por lo tanto, como ya se mencionó anteriormente, el proceso de remoción de la preforma después de la infiltración debe ser optimizado no solo para obtener una excelente interconectividad sino que también para que la espuma adquiera una homogeneidad en su densidad relativa y por lo tanto en sus propiedades mecánicas.

También es evidente que estos resultados sugieren el uso de una mezcla con mayor capacidad para disolverse en el agua. Es decir, con mayor cantidad de NaCl y la utilización de tamaños de partícula más grandes para tener una mayor interconexión y facilitar la disolución.

3.2.4 Caracterización mecánica

Resultado de las pruebas a compresión, se obtuvieron los datos de la reducción en la longitud de la muestra, ΔL , y carga aplicada, F , los cuales fueron usados para el cálculo de los valores de deformación nominal, ε_N , y esfuerzo nominal, σ_N , según las expresiones:

$$\sigma_N = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (39)$$

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots (40)$$

Siendo, L_0 la longitud inicial de la probeta (antes de ser ensayada) y A_0 el área inicial de su sección transversal calculada con el diámetro efectivo de la espuma. Una vez obtenidos ε_N y σ_N , los valores de deformación verdadera, ε , y esfuerzo verdadero, σ , se obtendrían por medio de:

$$\sigma = \sigma_N \cdot (1 + \varepsilon_N) \dots\dots\dots (41)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_N) \dots\dots\dots (42)$$

Sin embargo el uso de las expresiones anteriores para el cálculo del esfuerzo verdadero en este estudio presenta un inconveniente, ya que la misma se obtiene luego de considerar que:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} \dots\dots\dots (43)$$

y que por conservación de volumen:

$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = 1 + \varepsilon_N, \dots\dots\dots (44)$$

Es necesario mencionar que la espuma metálica sufre un cambio de volumen durante el proceso de deformación plástica, por lo que es inconsistente con el

cálculo planteado. Es por esta razón que en la literatura científica y especializada, el comportamiento mecánico a compresión de las espumas metálicas y sus propiedades están referidos a sus curvas esfuerzo nominal-deformación nominal ($\sigma_N-\epsilon_N$).

Es importante señalar que para la determinación del esfuerzo y la deformación, también se ha de tener en cuenta los efectos de la deformación elástica de los componentes de la máquina de ensayo. No obstante, en vista de que dichos componentes suelen ser fabricados de acero u otro material más rígido (con un módulo de Young superior a 200 GPa), su deformación elástica se consideró insignificante, ya que la diferencia de rigidez que tienen con la espuma de Al es muy grande.

La figura 62 muestra las curvas esfuerzo nominal-deformación nominal ($\sigma_N-\epsilon_N$) de las pruebas a compresión de las espumas de Al fabricadas. La tabla 11 muestra las principales propiedades mecánicas obtenidas de las curvas, para las probetas ensayadas.

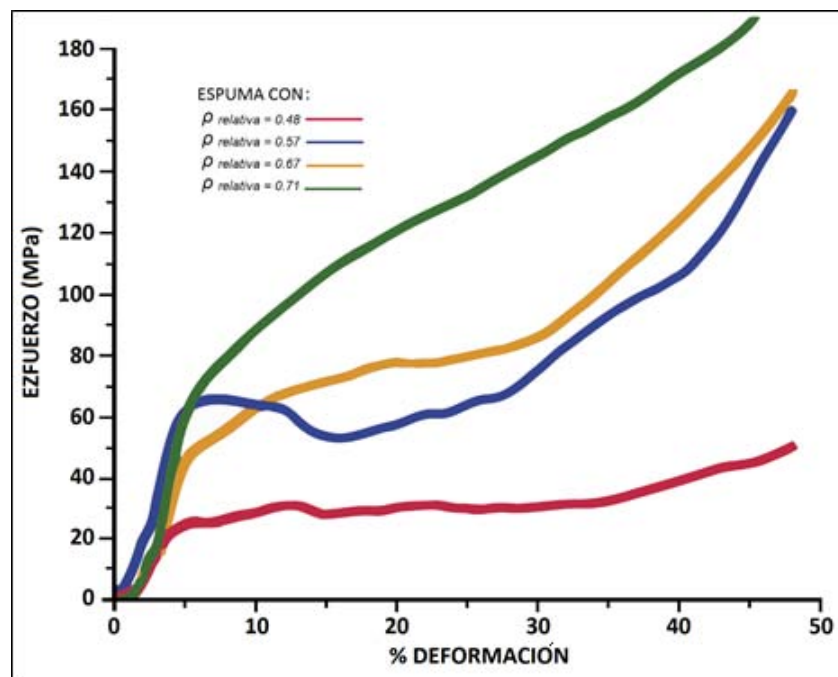


Figura 62.- Gráfica Esfuerzo –Deformación nominales para las espumas de Al ensayada a compresión.

Tabla 11.- Valores de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las curvas esfuerzo-deformación.

Probeta	1	2	3	4
Densidad relativa	0.48	0.57	0.67	0.71
Esfuerzo de colapso plástico (MPa)	25.38	65.60	48.81	71.33
Deformación de colapso plástico	0.058	0.072	0.056	0.064
Esfuerzo de densificación (MPa)	32.72	67.84	97.57	160
Deformación de densificación	0.35	0.27	0.335	0.40
Módulo elástico (MPa)	796.54	1491.28	1584.4	1746.55
Energía absorbida (MJ/m ³)	8.84	12.69	20.94	42.94

Es posible apreciar en las curvas resultantes un comportamiento típico de compresión en un material celular caracterizado por tres zonas (figura 63):

- I) Zona elástica: donde el material a bajas cargas se comporta similar al material sólido.
- II) Región de meseta: donde disminuye significativamente la pendiente, tendiendo a un comportamiento horizontal debido a la falla de las paredes de celda.
- III) Densificación: en donde nuevamente se observa un comportamiento de material sólido, debido a la densificación del material.



Figura 63.- Curva esfuerzo- deformación de la probeta 1 donde se describen las diferentes zonas típicas del comportamiento de materiales celulares.

Como ya se había mencionado, el modelo micromecánico involucrado en este comportamiento describe que la respuesta elástica inicial está relacionada a la flexión de los bordes de celda, en las espumas de celda abierta. Sin embargo, la flexión de los bordes y alargamiento de las caras para las espumas de celda cerrada. [13]

En las gráficas de esfuerzo-deformación resultante, se puede observar una relación entre el comportamiento del material a compresión y el valor de la densidad específica de éste, de tal forma que las espumas con densidades altas presentan un desarrollo más parecido al de un material sólido. Lo anterior debido a la mayor resistencia que proporciona la eliminación de las paredes de la espuma durante el proceso de la deformación. [14]

En cuanto al módulo elástico, se observa de igual forma que está en función de la densidad relativa de cada espuma, se puede observar que el mayor valor del módulo elástico, corresponde a la espuma número 4, la cual tiene el mayor valor de densidad relativa (0.71). El valor más bajo del módulo elástico corresponde a la probeta 1 con una densidad relativa igual a 0.41.

Por el contrario, los valores del esfuerzo y deformación del colapso plástico y de densificación, no presentaron un comportamiento en función de la densidad relativa como se esperaba. Esto puede deberse a que el esfuerzo del colapso plástico se presenta a una deformación más elevada, debido a que mostró una estructura celular más homogénea. En el caso particular de la probeta 3, la cual tiene una región considerable de metal sólido, al aplicarle un mismo esfuerzo, la concentración del esfuerzo será mayor en los bordes de las celdas, por lo que estos colapsarán más rápido que en una espuma con una estructura celular homogénea. Lo anterior debido a que los esfuerzos se distribuirán por todo el volumen de la muestra homogéneamente.

Para la probeta 4 se observa que por su elevada cantidad de Al presente en su estructura se produjo un colapso plástico con un incremento constante del esfuerzo de compresión. Este comportamiento puede ser debido a la resistencia de las paredes con mayor espesor, generándose el efecto de densificación antes

de colapsar cada celda, asemejando su comportamiento al de un metal sólido. Sin embargo, este comportamiento mecánico sigue siendo característico de espumas de celda cerrada con alta densidad.

En cuanto al valor de la absorción de energía, se observa, también, que presenta una relación con la densidad relativa de cada espuma. Esto puede ser explicado en términos de la magnitud del esfuerzo de compresión alcanzado durante la etapa de colapso plástico. También se podría asociar a los efectos estructurales como resistencia de bordes y cara en las espumas de mayor densidad (probeta 4), además de la fricción generada por la cantidad de Al.

CAPÍTULO IV. CONCLUSION Y OBSERVACIONES

Se concluye que es posible fabricar espumas de aluminio mediante la infiltración del metal líquido a presión, a través de una preforma que se encuentra previamente al vacío, obteniendo espumas que presentan una buena interconectividad de celdas y un comportamiento mecánico típico al de un material celular.

De igual forma durante la realización de este trabajo se realizaron diversas observaciones de donde se deducen los siguientes puntos:

- **Selección de materiales**

Debido a los parámetros exigidos al material del reactor para su buen funcionamiento, el material más apropiado para su fabricación es acero inoxidable austenítico AISI 316.

- **Diseño y construcción del dispositivo**

La construcción del dispositivo es relativamente fácil, lo determinante es poder cubrir los gastos que se requiere para la compra de los materiales y equipo necesarios. El presente trabajo indica los planos, materiales y componentes que se necesitan para reproducir u optimizar en cualquiera de sus partes el dispositivo diseñado y/o el proceso utilizado. Con ello, poder experimentar con la fabricación de espumas metálicas de diversas aleaciones y con cambios en las diversas variables del proceso.

- **Diseño y obtención de preforma**

Existen determinadas mezclas del sistema Agua-Harina-NaCl, que cumplen los requerimientos del proceso para el material de la preforma. Lo cual se ve reportado en el diagrama de mezclas obtenido.

Las partículas que se produzcan se deben de someter a un secado inicial para evitar la aglomeración o deformación.

- **Fabricación de espuma metálica**

El proceso y los valores de los parámetros utilizados para la fabricación de la espuma fueron validados no presentándose ningún problema durante el proceso de tratamiento térmico, fusión e infiltración; Sin embargo; se deducen las siguientes ventajas y desventajas del proceso propuesto en este trabajo:

Ventajas

- Fácil de llevarlo a cabo a escala de producción.
- Buena calidad de las espumas.
- Bajos costos de procesamiento en comparación con otros métodos de fabricación.
- Posibilidad de obtener espumas con zonas de diferentes características y distribución de tamaño de poros de forma controlada.
- Poco tiempo de disolución de las partículas de la preforma en partículas de tamaño grande (>6mm).
- Facilidad para obtener espumas de tamaño de poro grande pero guardando una morfología de celda homogénea.

Desventajas

- Proceso lento (gran número de pasos)
- Se requiere de un buen sistema para generar el vacío de lo contrario es tardado llegar al valor requerido.
- Se requiere el uso de metales que no reaccionen con el NaCl o una completa remoción de este para evitar el deterioro de la espuma.
- Mucho tiempo para una eficiente disolución del NaCl en partículas de tamaños menores a 6 mm de diámetro.

- **Caracterización mecánica**

Se encontró la presencia significativa de residuos de la preforma en las espumas fabricadas por lo que es recomendable un cambio en el método de evaluación de la capacidad de la preforma para disolverse en agua, empleando las observaciones pertinentes; no solo en las partículas de la preforma; si no en espumas ya fabricadas.

Se obtuvo un tipo de celda mixta en su mayoría abierta y con buena interconectividad, las celdas que se encontraron cerradas fue por remanentes de la preforma o por falta de infiltración, por lo cual se concluye que para las condiciones del proceso seleccionadas, es mejor utilizar tamaños de partícula mayores a 5mm y una mezcla con mayor cantidad de NaCl para una disolución de la preforma más efectiva.

El % de porosidad (38.9%) y la densidad relativa (0.61) obtenidos se encuentran dentro del intervalo típico para espumas metálicas.

El control de tamaño de celda en la espuma fabricada es relativamente alto, la variación entre el tamaño de celda promedio y el tamaño promedio de partícula fue de aproximadamente 7.9% lo cual indica una buena reproducción de la preforma. La variación antes mencionada se debió a la contracción durante la calcinación por lo que es importante estudiar este hecho con mayor profundidad, con la finalidad de optimizar el control de tamaño de celda.

- **Caracterización mecánica**

El comportamiento mecánico de las probetas de espuma sometidas al ensayo a compresión presentaron, las tres regiones típicas del comportamiento para espumas metálicas, con la peculiaridad de que al presentar un valor de densidad relativa mayor, la espuma se comporta mecánicamente más parecida a un material sólido. Sin embargo, a valores más pequeños se obtienen las características mecánicas típicas para un material celular.

Se observó que los valores del módulo elástico y energía absorbida, tienen una relación directamente proporcional a la densidad relativa de la espuma.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **P. Fernández, L. J. Cruz, J. Coletto.** *Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida*, Revista de Metalurgia, 44 (6) Septiembre-Octubre, p.540-555 (2008).
- [2] **J. Banhart.** *Foam metals: The recipe*. Europhysics News. 30, p.17-20 (1999).
- [3] **John Banhart, D. Weaire.** *On the road again: metal foams find favor*, Physicstoday Vol.55, p.37-42 (2002).
- [4] **D. Stauffer y A. Aharony.** *Introduction to Percolation Theory*. 2nd ed., Taylor & Francis, Londres, Inglaterra, p. 354-378 (1994).
- [5] **I. A. Irausquín,** *Caracterización Mecánica de Espumas Metálicas y su Aplicación en Sistemas de Absorción de Energía*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento De Mecánica De Medios Continuos y Teoría De Estructuras, Leganés, (2012).
- [6] **G. J. Davies, Shu Zhen.** *Metallic foams: their production, properties and applications*. Journal of Materials Science. Vol 18, Issue 7, p 1899-1911 (1983).
- [7] **J. Banhart.** *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metals foam*. Progress in Material Science. Vol.46, Issue 6, p.595-632 (2001).
- [8] **H. N. G. Wadley.** *Cellular Metals Manufacturing*. Advanced Engineering Materials. Vol.4, No.10, p.726-733 (2002).
- [9] **J. F. Diez, L. Giraldo, P. Fernández-Morales,** *Obtención de Metales Celulares de Poro Abierto Utilizando Materiales Cerámicos como Preforma Removible*. INGENIAR UPB, p.51-62 (2013).
- [10] **E. Solórzano.** *Espumas de Aluminio: Proceso de Espumado, Estructura Celular y Propiedades*, Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, Facultad de Ciencias, Departamento de física de la materia condensada, cristalografía y mineralogía, España, (2008).
- [11] **M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.G.N. Wadley,** *Metal Foams: a design guide*, Butterworth-Heinemann, Oxford, Inglaterra, (2000).
- [12] **J. Bin, W. Zejun, Z. Naiqin.** *Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams*. Scripta. Materialia. Vol 56, Issue 2, p.169-172. (2007).
- [13] **L. GIBSON.** *Mechanical Behavior of Metallic Foams*. Annual Review of Materials Science. Vol 30, p.191- 227 (2000).

- [14] **J.A. Gutiérrez-Vázquez, J. Oñoro.** *Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones*, Revista De Metalurgia, Vol 44 (5), p.457-476 (2008).
- [15] **E. Andrews, G. Gioux, P. Onck, L. Gibson.** *Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results*, International Journal of Mechanical Sciences. Vol 43, pp.701-713 (2001).
- [16] **U. Ramamurty Y A. Paul.** *Variability in mechanical properties of a metal foam*. Acta Materialia. Vol 52, p.869-876 (2004).
- [17] **H.P. Degischer, B. Kriszt.** *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. (2002).
- [18] **A. Bastawros, H. Bart-Smith, A. Evans** *Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 48(2), p.301-322 (2000).
- [19] **P. Tobolka, J. Kováik.** *Young's modulus and loss factor of aluminium foams from free vibrations of a square plate*. Mater. Vol 34, Kovové Materiály, Metallic Materials Issue 1, p.20-24 (1996).
- [20] **J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck (Editors).** *Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, Verlag MIT Puublishing (MetFoam 2001), Bremen Alemania, (2001).
- [21] **N. A. Fleck y J. W. Hutchinson.** *Strain gradient plasticity*. Advances in Applied Mechanics. Vol 33, p.295-361 (1997).
- [22] **D.D. Radford, V.S. Deshpande y N.A. Fleck.** *The use of metal foam projectiles to simulate shock loading on a structure*. International Journal of Impact Engineering. Vol 31, Issue 9, p1152-1171 (2005).
- [23] **J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck (Editors).** *Metal Foams and Porous Metal Structures*. Verlag MIT Puublishing (MetFoam 1999), Bremen Alemania, (1999).
- [24] **A.G. Evans, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck, M.F. Ashby, H.N.G. Wadley.** *The topological design of multifunctional cellular metals*. Progress in Materials Science. Vol 46, Issues 3-4, pp.309-327 (2001).
- [25] **B. Chalmers.** Metalurgia física, 2ª edición. Aguilar S.A. de Ediciones Madrid, España, pp. 447-452. (1968)
- [26] **F. Simancik, H. P. Degischer, H. Wörz,** *Foamed Aluminium-Light Structural and Insulation Material*. Euromat (1995), Venice/Padua, Italia, Associazione Italiana di Metallurgica, Milan, Italia, pp.191-196 (1995)
- [27] **S. Feliu y M. C. Andrade,** *Corrosión y Protección Metálica Vol. 1*, CSIC, Madrid, España, pp. 261-266 (1991)
- [28] **U.R. Evans.** *Corrosiones Metálicas*, Ed. Reverté Barcelona, México, 1ª edición, pp. 319-327 (1987)
- [29] **K. Iida, K. Mizuno, K. Kondo** Imagen (tabla) tomada de la patente estadounidense: US 4, 726, 444 (1988).

- [30] **Hittite Microwave Corporation**, Imagen tomada del sitio: <http://www.hittite.com>. Consultada en: junio 2012.
- [31] **R. J. Reglero**. *Fabricación y caracterización de espumas de aluminio: aplicaciones en el sector aeronáutico*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, Facultad de Ciencias, Departamento de física de la materia condensada, cristalografía y mineralogía, España (2007).
- [32] **ERG Materials and Aerospace**. Imagen tomada del sitio: <http://www.ergaerospace.com> Consultada en: junio 2012.
- [33] **M-PORE GMBH**, Imagen tomada del sitio: <http://www.m-pore.de>. Consultada en junio 2012.
- [34] **Alusion Co**. Imagen tomada del sitio: <http://alusion.com>. Consultada en junio 2012.
- [35] **ASM Handbook Volume 2**, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Edition 10, p. 343-346.
- [36] **E.S. Eardley, H.M. Flower**. *Infiltration and solidification of commercial purity aluminum matrix composites*. *Material Science and Engineering A*, A359, p 303-312 (2003).
- [37] **Despois J, Marmottant A Mortense A**. *Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminum foams*. *Materials Science and Engineering A*, A462, p.68-75 (2007).
- [38] **ASTM E9-89a**, *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*, ASTM International (2000).
- [39] **ASM Handbook Volume 1**, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys Section: Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys*, Edition 10, p.1303-1306.
- [40] **ASME Boiler and pressure vessels code**. *Division 1, Sec. VIII Rules for construction of pressure vessel*, edition 2010.

ANEXO I (Parámetros utilizados en las pruebas de compresión)

Tipo de ensayo: Compresivo

Unidades: Métrico

Número de probetas: 4

Forma geometría: Cilíndrica

Tipo de máquina: 5500R

Control máquina: ESTANDAR

Frecuencia datos: 10.000000 ptos/sec

Extensómetro: Desactivado

Entrada de dimensión separada: Activado

Velocidad cruceta: 1.50000 mm/min

Temperatura: 73 Grados F

Humedad: 50 %

Diámetro: 14.5600004 mm

Distancia inicial probeta: 25.0000000 mm

Distancia del pla.:25.0000000 mm

Carga máxima: 854.33230 kgf

Extensión máxima: 12.00059 mm

Rapidez de deformación 1E-3 s-1

Velocidad de deformación 1.5 mm/min

Celda de carga 10 ton

ANEXO II (Propiedades de material utilizado para la fabricación del reactor)

(Las propiedades aquí referidas son literalmente las indicadas por el software CES EduPack 2011)

Stainless steel, austenitic, AISI 316

General properties

Designation

AISI 316

Density	7.87e3	-	8.07e3	kg/m ³
Price	* 97.9	-	108	MXN/kg

Composition overview

Composition (summary)

Fe/<.08C/16-18.5Cr/10-14Ni/2-3Mo/<2Mn/<1Si/<.045P/<.03S

Mechanical properties

Young's modulus	189	-	205	GPa
Flexural modulus	* 189	-	205	GPa
Shear modulus	74	-	82	GPa
Bulk modulus	134	-	152	GPa
Poisson's ratio	0.265	-	0.275	
Shape factor	62			
Yield strength (elastic limit)	205	-	310	MPa
Tensile strength	515	-	620	MPa
Compressive strength	* 205	-	310	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	205	-	310	MPa
Elongation	30	-	50	% strain
Hardness - Vickers	190	-	220	HV
Hardness - Brinell	149	-	197	MPa
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	228	-	252	MPa
Fracture toughness	55	-	75	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 9.5e-4	-	0.0013	

Thermal properties

Maximum service temperature	750	-	925	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	13	-	17	W/m.°C
Specific heat capacity	490	-	530	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	15	-	18	µstrain/°C

Electrical properties

Electrical resistivity	69	-	81	µohm.cm
------------------------	----	---	----	---------

Durability: flammability

Flammability	Non-flammable			
--------------	---------------	--	--	--

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Acceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Excellent
Organic solvents	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
Oxidation at 500C	Excellent

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	77.2	-	85.3	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	4.85	-	5.36	kg/kg
Water usage	112	-	337	l/kg

Material processing: energy

Coarse machining energy (per unit wt removed)	0.776	-	0.857	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	3.48	-	3.85	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 6.49	-	7.17	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	0.0582	-	0.0643	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.261	-	0.288	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.486	-	0.538	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✓			
Recycle fraction in current supply	35.5	-	39.3	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	×			
Landfill	✓			
Biodegrade	×			
A renewable resource?	×			

Notes

Typical uses

Architectural sections; catering equipment; filters; food-processing equipment; heat exchangers; process plant parts; pulp and paper equipment.

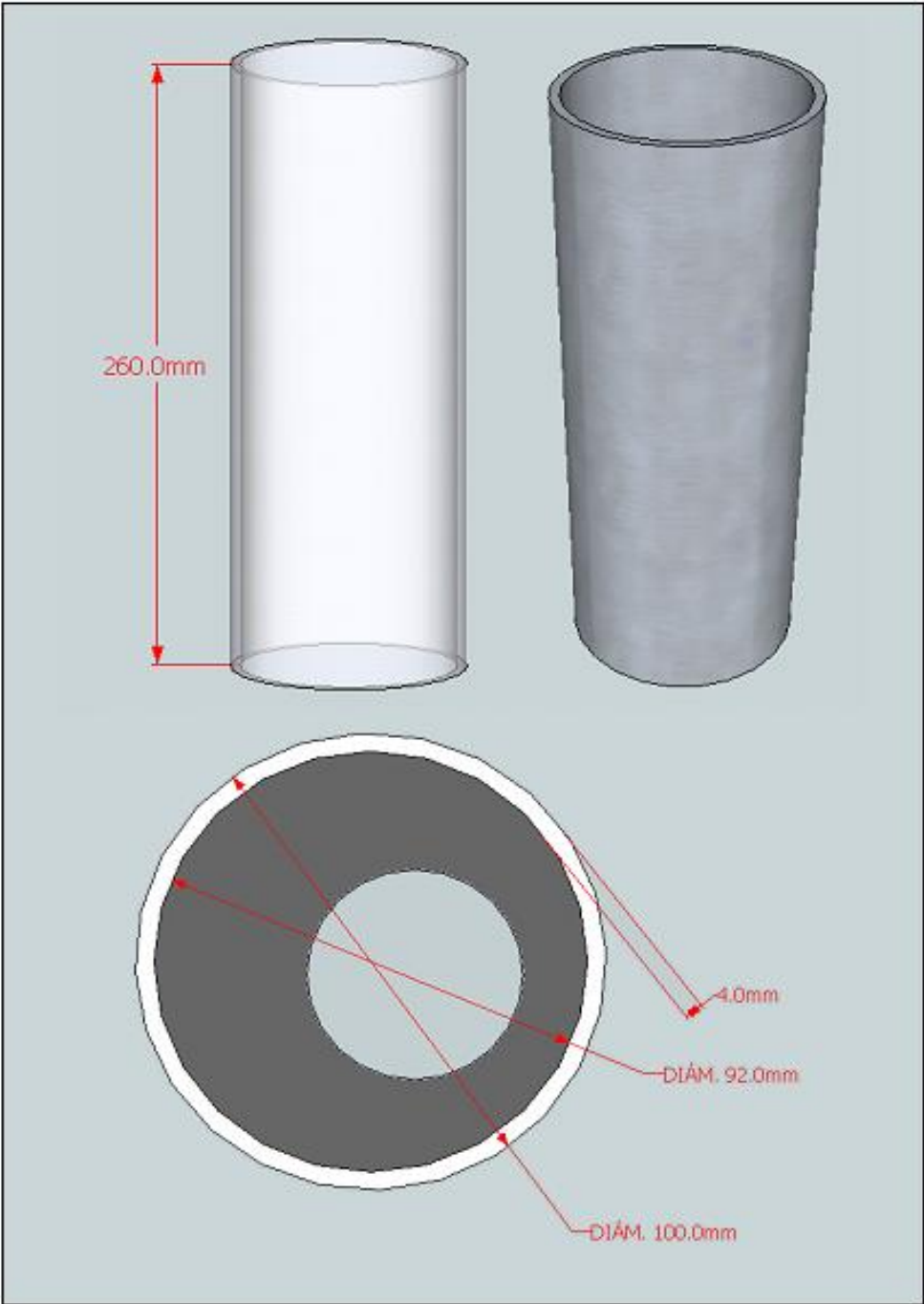
Reference sources

Data compiled from multiple sources. See links to the References table.

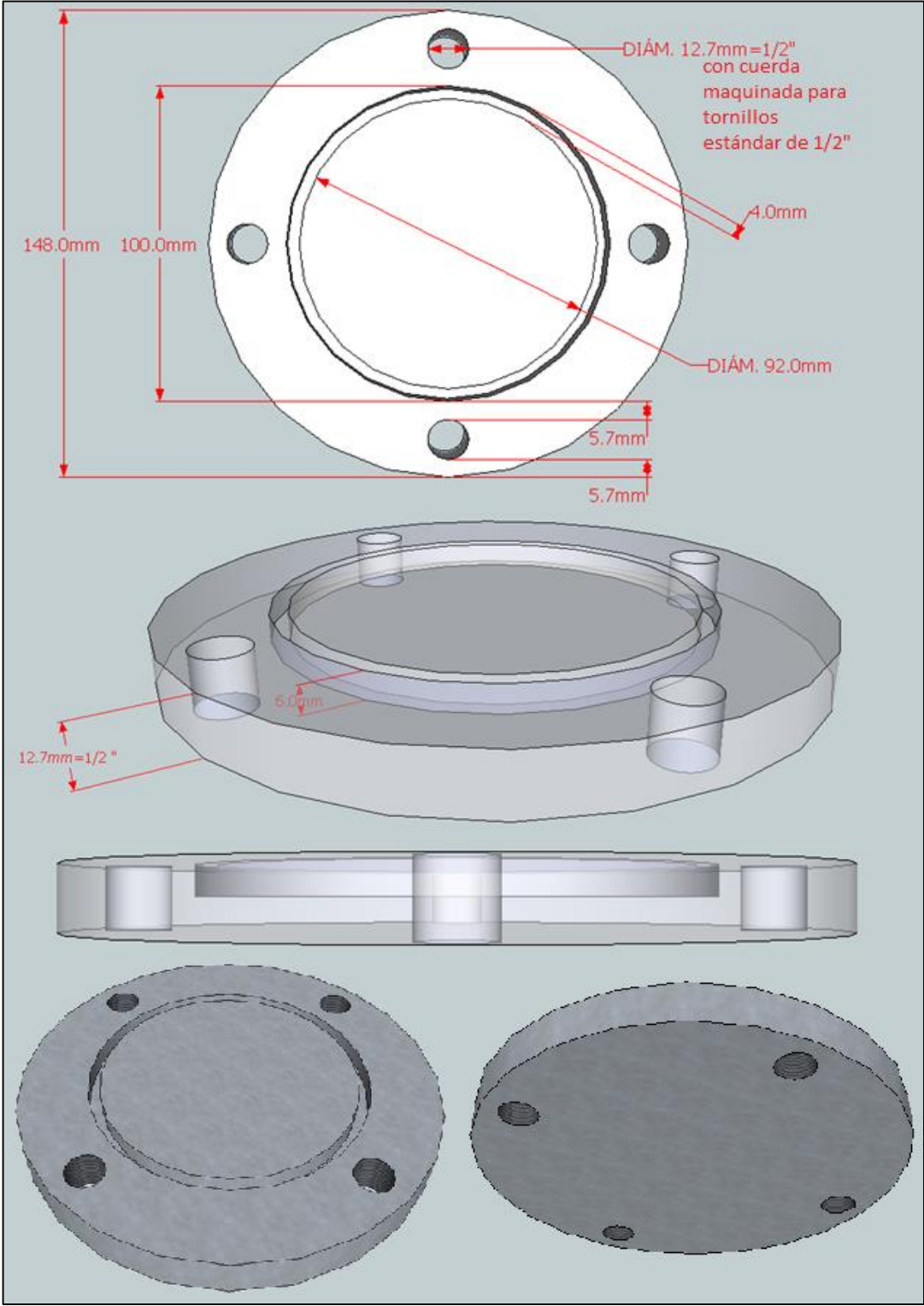
No warranty is given for the accuracy of this data. Values marked * are estimates.

ANEXO III (Dibujos de fabricación del reactor)

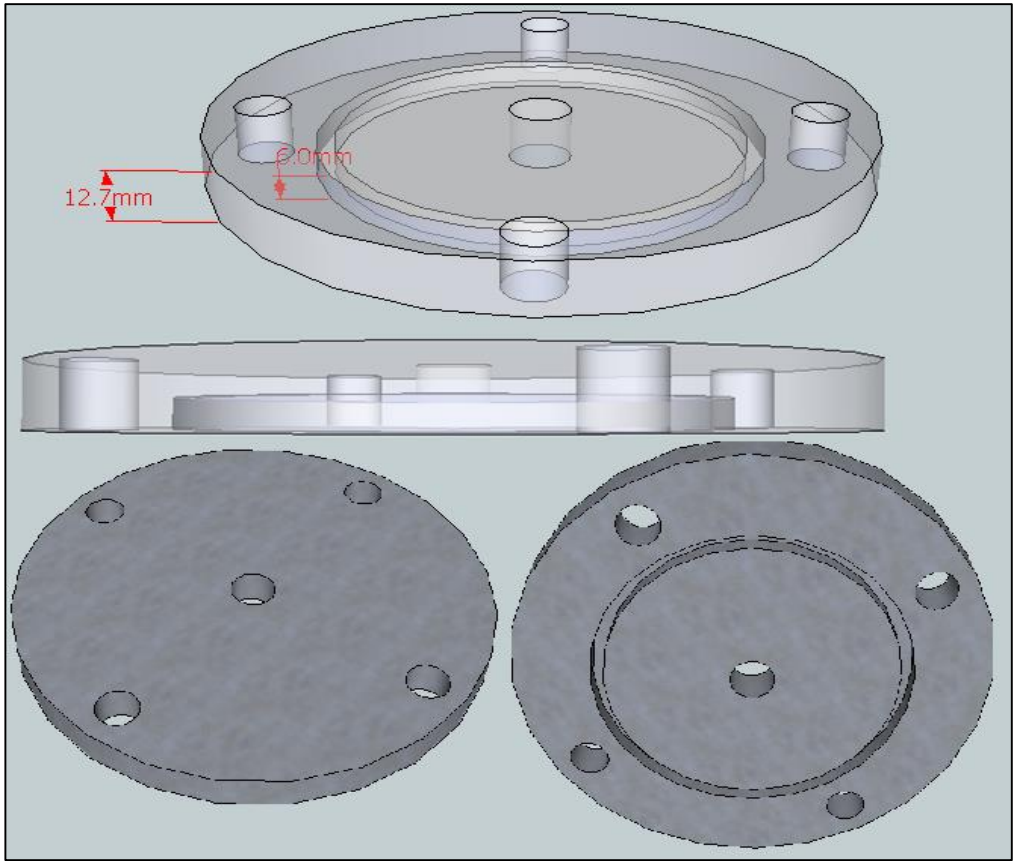
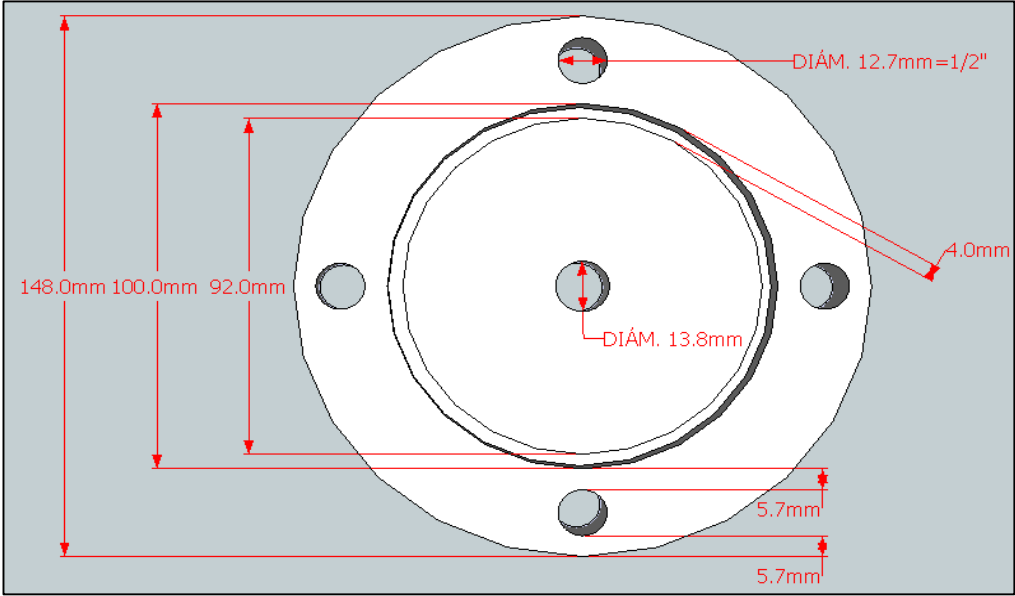
REACTOR (CUERPO)



TAPA INFERIOR



TAPA SUPERIOR



ANEXO IV (Propiedades de material utilizado para la fabricación de la espuma)

(Las propiedades aquí referidas son literalmente las indicadas por en el ASM Handbook, Vol. 1 [39])

Aluminum 5005 0.8Mg

Specifications

ASTM. Sheet and plate: B 209. Wire, H19 temper: B 396. Stranded conductor: B 397. Rivet wire and rod: B 316. Rolled rod: B 531. Drawn tube: B 210, B 483

SAE. J454

UNS number. A95005

Government. Rivet wire and rod: QQ-A-430

Foreign. France: NF A-G0.6. United Kingdom: BS N41. Germany: DIN AlMg1. ISO: AlMg1

Chemical Composition

Composition limits. 0.30 Si max, 0.7 Fe max, 0.20 Cu max, 0.20 Mn max, 0.50 to 1.1 Mg, 0.10 Cr max, 0.25 Zn max, 0.05 max other (each), 0.15 max others (total), bal Al

Applications

Typical uses. Electrical conductor wire, cooking utensils, appliances, and architectural applications. Medium strength and good resistance to corrosion are two characteristics of 5005 similar to those of 3003. When anodized, film on 5005 is clearer and lighter than on 3003 and gives better color match with 6063 architectural extrusions.

Mechanical Properties

Tensile properties. See Tables 52 and 53. Tensile strength and elongation are slightly lower in transverse direction than in longitudinal direction.

Table 52 Typical mechanical properties of alloy 5005

Temper	Tensile strength ^(a)		Yield strength ^(b)		Elongation ^{(c)(d)} , %	Hardness ^(e) , HB	Shear strength	
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi
O	124	18	41	6	25	28	76	11
H12	138	20	131	19	10	...	97	14
H14	159	23	152	22	6	...	97	14
H16	179	26	172	25	5	...	103	15
H18	200	29	193	28	4	...	110	16
H32	138	20	117	17	11	36	97	14
H34	159	23	138	20	8	41	97	14
H36	179	26	165	24	6	46	103	15

(a) Strengths and elongations unchanged or improved at low temperatures.

(b) 1.6 mm ($\frac{1}{16}$ in.) thick specimen.

(c) 500 kg load; 10 mm diam ball

Table 53 Mechanical property limits for alloy 5005 sheet and plate

Temper	Tensile strength				Yield strength (min)		Elongation (min), % ^(d)
	Minimum		Maximum		MPa	ksi	
	MPa	ksi	MPa	ksi			
O	105	15	145	21	35	5	12-22
H12	125	18	165	24	95	14	2-9
H14	145	21	185	27	115	17	1-8
H16	165	24	205	30	135	18	1-3
H18	185	27	...	...	...	...	1-3
H32	120	17	160	23	85	12	3-10
H34	140	20	180	26	105	15	2-8
H36	160	23	200	29	125	18	1-4
H38	180	26	...	...	...	...	1-4
H112							
0.250-0.492 in. thick	115	17	...	...	...	...	8
0.492-1.60 in. thick	105	15	...	...	...	...	10
1.60-3.20 in. thick	100	15	...	...	...	...	16

(a) In 50 mm (2 in.) or $5d$, where d is diameter or reduced section of tensile test specimen. Where a range of values appears in this column, the specified minimum elongation varies with thickness of the mill product.

Shear yield strength. Approximately 55% of tensile yield strength

Compressive yield strength. Approximately the same as tensile yield strength

Hardness. See Table 52.

Poisson's ratio. 0.33

Elastic modulus. Tension, 68.2 GPa (9.90×10^6); shear, 25.9 GPa (3.75×10^6 psi); compression, 69.5 GPa (10.1×10^6 psi)

Mass Characteristics

Density. 2.70 g/cm³ (0.097 lb/in.³) at 20 °C (68 °F)

Thermal Properties

Liquidus temperature. 652 °C (1205 °F)

Solidus temperature. 632 °C (1170 °F)

Coefficient of thermal expansion. Linear:

Temperature range		Average coefficient	
°C	°F	μm/m · K	μin./in. · °F
-50 to 20	-58 to 68	21.9	12.2
20 to 100	68 to 212	23.7	13.2
20 to 200	68 to 392	24.6	13.7
20 to 300	68 to 572	25.6	14.2

Volumetric: $68 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{K}$ ($3.77 \times 10^{-5} \text{ in.}^3/\text{in.}^3 \cdot ^\circ\text{F}$) at 20 °C (68 °F)

Specific heat. 900 J/kg · K (0.215 Btu/lb · °F) at 20 °C (68 °F)

Thermal conductivity. 205 W/m · K (118 Btu/ft · h · °F) at 20 °C (68 °F)

Electrical Properties

Electrical conductivity. Volumetric, O and H38 tempers: 52% IACS at 20 °C (68 °F)

Electrical resistivity. O and H38 tempers: 33.2 nΩ · m at 30 °C (68 °F); temperature coefficient, 0.1 nΩ · m per K at 20 °C (68 °F)

Electrolytic solution potential. -0.83 V versus 0.1 N calomel electrode in an aqueous solution containing 53 g NaCl plus 3 g H₂O₂ per liter

Fabrication Characteristics

Annealing temperature. 345 °C (650 °F); holding at temperature not required

Hot-working temperature. 260 to 510 °C (500 to 950 °F)