



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ESPUMAS MÉTALICAS
DE ALUMINIO REFINADO Y DISEÑO DE UN NUEVO MÉTODO DE
OBTENCIÓN DE ESPUMAS MÉTALICAS PARA ALEACIONES CON
MEMORIA DE FORMA”**

TESIS

**PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES**

PRESENTA

ING. NORMA ANGÉLICA HERNÁNDEZ ZALASAR

TUTOR

**DR. GABRIEL ÁNGEL LARA RODRÍGUEZ
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

COMITÉ TUTOR

**DR. JOSÉ GONZALO GONZALEZ
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

**M.C. EDGAR ISAAC RAMIREZ DÍAZ
FACULTAD DE INGENIERIA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

*“My father gave me the greatest gift
anyone could give another person, he
believed in me”.*

Jim Valvano

Agradecimientos

Agradezco enormemente al posgrado en ciencia e ingeniería de materiales por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional, agradezco también al instituto de investigaciones en materiales por todo el apoyo brindado durante mi estancia en dicha institución. Al programa de apoyo a los estudios de posgrado (PAEP) por creer en mí y financiar mi estancia de investigación en la Universidad Técnica Federico Santa Marial con sede en Valparaíso, Chile.

De la misma forma agradezco al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría con numero de CVU 863628.

A mi alma mater, la Facultad de Ingeniería quien me brindó una educación integral, libre y efectiva como ingeniera mecánica, de la misma forma, quiero agradecer a la empresa Robert Bosch por creer en los jóvenes talentos e impulsarlos a nunca abandonar sus sueños.

Al Dr. Gabriel A. Lara Rodríguez por su dirección durante el presente trabajo de investigación, por creer en mí y brindarme siempre la confianza y el completo apoyo durante mi estancia en el instituto de investigaciones en materiales, agradezco también cada una de sus enseñanzas que indudablemente contribuyeron en mi integra formación profesional.

Agradezco ampliamente al Dr. Luis Pérez Pozo por sus enseñanzas y aportaciones en la presente investigación, asimismo, agradezco a toda su familia por todo el cariño y el soporte brindado durante mi estancia en Chile.

A mis profesores quienes me han dejado grandes aprendizajes no solo en materia de ingeniería, sino como las extraordinarias personas que son, al Dr. Ignacio Figueroa Vargas, Dr. José Gonzalo González, Dr. Gabriel Torres Villaseñor, Dr. J. Raziel Álvarez Pérez. En especial, agradezco profundamente al maestro Edgar Isaac Ramírez Diaz por brindarme su apoyo incondicional, tanto en lo profesional como en lo personal.

A mi madre por todos sus cuidados, sus atenciones y sobre todo por el amor que me ha proporcionado a lo largo de toda mi vida, a mis hermanos por creer siempre en mí. Agradezco especialmente a mis tíos, Blanca, Ricardo, Juan, Teodoro y Daniel, que, a pesar de la distancia, siempre he podido contar incondicionalmente con ellos.

A la familia Acevedo y Piña por convertirse en mi nueva familia, compartir los buenos y malos momentos, por el apoyo incondicional y por mantenerse a mi lado en cualquier circunstancia.

A mis grandes amigos de ingeniería Cuitláhuac Paredes, Carolina Medina, Miguel Quijas, Rafael Paredes, Emilio Cruz, Raúl Benjamín, Víctor Manuel, Jonathan Pérez, Alan Michelle, Leonardo Hernandez, gracias por todas las risas compartidas durante mi formación profesional, gracias por creer en mi e impulsarme siempre a lograr mis metas.

A Luis Mendoza por ser mi amigo, mi compañero, mi confidente, por creer en mi e impulsarme a siempre ir por más, por su paciencia, por su comprensión.

A mis amigos y compañeros de laboratorio, Farid, Luis, Miguel, Alma, Daniela, Laura, Mauricio, Mauro, gracias por formar parte de una de las etapas más importantes de mi vida.

Especialmente, dedico este proyecto a mi padre quien me enseñó el valor del trabajo duro, a luchar por mis sueños, quien se preocupó por mí en cada momento y que siempre quiso lo mejor para mi porvenir. Aunque hoy ya no se encuentra conmigo, aún continúa guiándome, iluminando mis pasos, cuidando de mí. A pesar de que no fue posible contar con su presencia en cada uno de mis logros, mi padre me dio el mejor regalo que alguien podría dar a otra persona, él creía en mí.

Índice

<i>Agradecimientos</i>	<i>I</i>
<i>Índice</i>	<i>III</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>V</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>VIII</i>
<i>Introducción</i>	<i>9</i>
Capítulo I: Marco Teórico	10
1.1 Introducción a los materiales porosos	10
1.2 Características de los materiales porosos	12
1.3 Definición de espuma metálica	14
1.4 Comportamiento mecánico	14
1.5 Métodos de fabricación de las espumas metálicas	17
1.5.1 Espumado de metales	17
1.5.2 Espumas metálicas mediante Alporas®	18
1.5.3 Gasar, solidificación eutéctica de gas sólido	18
1.5.4 Hydro/Alcan, espumado por inyección de gas	20
1.5.5 Infiltración de metal en estado líquido	21
1.5.6 Sinterización de polvos metálicos	22
1.5.7 Alulight, espuma metálica mediante metalurgia de polvos	23
1.6 Aplicaciones de las espumas metálicas	23
1.6.1 Industria automotriz	24
1.6.2 Industria petrolera	25
1.6.3 Industria biomédica	26
1.6.4 Industria aeroespacial	27
1.6.5 Industria de la Construcción	27
<i>Hipótesis</i>	<i>29</i>
<i>Objetivo general</i>	<i>29</i>
<i>Objetivos particulares</i>	<i>29</i>
Capítulo II: Desarrollo Experimental	30
2. Introducción	30
2.1 Fabricación de la aleación Al-5Ti-0.25C	31
2.2 Estudio adicional de la aleación Al-5Ti-0.25C	33
2.3 Fabricación de Aluminio Refinado	34

2.4 Fabricación de espumas metálicas	35
2.5 Fabricación y preparación de muestras	37
2.6 Cálculo de la porosidad	38
2.6 Caracterización mecánica	39
2.7 Tratamientos térmicos	40
2.8 Estudio de homogeneidad de poro en espumas metálicas	42
<i>Capítulo III: Resultados Y Discusión</i>	44
3.1 Microestructura de la aleación Al-5Ti-0.25C	44
3.2 Resultados del estudio adicional de la aleación Al-5Ti-0.25C	45
3.3 Refinamiento de aluminio 1100	46
3.3.1 Aluminio con refinador en barra	46
3.3.2 Aluminio refinado con cintas	47
3.4 Evaluación de las propiedades mecánicas	48
3.5 Resultados de la fabricación de espumas metálicas.	49
3.6 Estudio de homogeneidad de poro en espumas metálicas	51
3.7 Resultados de porosidad	53
3.8 Caracterización microestructural de espumas metálicas	54
3.9 Evaluación de las propiedades mecánicas de espumas metálicas	55
3.10 Resultados de los tratamientos térmicos efectuados	57
3.11 Pruebas mecánicas posteriores al tratamiento térmico.	61
<i>CONCLUSIONES (PRIMERA PARTE)</i>	63
<i>Capítulo IV: Diseño de un nuevo Método de obtención de Espumas Metálicas para aleaciones con memoria de forma</i>	66
4.1 Fabricación de la aleación con memoria de forma Cu-Al-Be	66
4.2 Fabricación de espumas metálicas con aleación de memoria de forma	68
4.3 Resultados de la fase presente en las espumas metálicas.	71
<i>CONCLUSIONES (SEGUNDA PARTE)</i>	72
<i>Referencias</i>	73
<i>Anexos</i>	77

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplos de materiales porosos en la naturaleza, a) hueso esponjoso, b) panal de abejas.	10
Figura 2. Ejemplos de sólidos celulares: (a) estructura tipo "honeycomb", (b) estructura en tres dimensiones con poros interconectados, (c) estructura en tres dimensiones con poros aislados [2]......	11
Figura 3. Propiedades presentes en sólidos y diferentes tipos de espumas, (a) densidad, (b) conductividad, (c) módulo de Young y (d) resistencia [4].	12
Figura 4. Clasificación esquemática de los poros, según su disposición con el entorno; (a) poro cerrado, (b) y (f) poros abiertos solo en un extremo, (c), (d) y (g) poros abiertos, (e) poro abierto por dos extremos (a través del conducto del poro) [4]......	13
Figura 5. Ejemplos de estructuras tipo "Sándwich"[5].	13
Figura 6. Espuma metálica de aluminio fabricada a partir del método de infiltración en estado líquido.....	14
Figura 7. Curva esquemática esfuerzo-deformación de una espuma metálica sometida a compresión uniaxial [8]......	15
Figura 8. Curva esfuerzo-deformación para (a) un sólido y (b) para una espuma metálica [9].	15
Figura 9. Curva esfuerzo-deformación durante la absorción de energía [12]......	16
Figura 10. Clasificación de los procesos de fabricación de las espumas metálicas.	17
Figura 11. Espumado de metales por el método GASAR [23].	19
Figura 12. Estructura del poro de una espuma metálica producida por el método "gasar" (superficie paralela a la dirección de los poros) [23]......	19
Figura 13. Espumado directo de materiales fundidos mediante inyección de gas [29].	20
Figura 14. Ejemplificación del método de infiltración en estado líquido.	21
Figura 15. Espumas metálicas de magnesio obtenidas mediante metalurgia de polvos [32].	22
Figura 16. Sección transversal de una espuma metálica de plomo fabricada mediante polvos compactos.	23
Figura 17. Aplicaciones de materiales porosos según el tipo de porosidad [24].	24
Figura 18. Combinación ideal de propiedades mecánicas de las espumas metálicas para su aplicación en la industria automotriz[24].	25
Figura 19. Materiales porosos utilizados como prótesis óseas; a) cuerpo vertebral, b) hueso cigomático macizo facial [41-42]......	26
Figura 20. Estructura tipo "honeycomb" [44].	27
Figura 21. Materiales porosos implementados en la industria de la construcción.	28
Figura 22. Metodología seguida en el presente trabajo de investigación.	30
Figura 23. Aleación Al-5Ti con nano-carbono situado en el centro de la probeta antes del tratamiento térmico de difusión.	31
Figura 24. Proceso de fabricación del refinador Al-5Ti-0.25C.....	32

Figura 25. Diagrama representativo de la técnica "melt spinning".	33
Figura 26. Equipo melt spinner utilizado para la fabricación de cintas metálicas [50].	33
Figura 27. Proceso de colada convencional de aluminio refinado.	34
Figura 28. Aluminio refinado (a) y no refinado (b) montado en baquelita y atacado químicamente.	34
Figura 29. Dispositivo utilizado para la fabricación de espumas metálicas.	35
Figura 30. Ejemplificación del proceso de infiltración de una espuma metálica.	36
Figura 31. Fallas de infiltración presentes durante la producción de espumas metálicas, (a) exceso de presión de infiltración, (b) Insuficiente presión de infiltración.	36
Figura 32. Metal infiltrando a través de la preforma (a) 5% de infiltración, (b) 25% de infiltración y (c) 40% de infiltración.	37
Figura 33. Procedimiento de manufactura efectuado, (a) torneado, (b) cilindro obtenido y (c) probeta de compresión.	38
Figura 34. Probeta para ensayos de compresión según la norma ASTM E89.	38
Figura 35. Ejemplificación de un ensayo de compresión.	39
Figura 36. Resultados obtenidos a través de calorimetría de barrido diferencial (DSC).	40
Figura 37. Conteo de límites de grano mediante el software Image J.	41
Figura 38. Cortes transversales realizados a una espuma metálica.	42
Figura 39. Secciones obtenidas de dos tamaños de poro distintos (a) 1 -2 mm y (b) 2.38-3.35 mm.	42
Figura 40. Análisis realizado a cada sección de espuma metálica obtenida (a) ajuste de brillo y contraste, (b) selección de área a calcular y (c) cálculo de área.	43
Figura 41. (a) Refinador montado en baquelita y atacado químicamente, (b) microestructura de refinados a 5X.	44
Figura 42. Partículas de TiC observadas mediante microscopia electrónica de barrido 5000X.	45
Figura 43. Cintas obtenidas mediante la técnica "melt spinning".	45
Figura 44. Microscopia electrónica de barrido realizada a cintas de refinador a) 10,000X y b) 25,000X.	46
Figura 45. Metalografías realizadas al aluminio a) refinado 5X y b) no refinado 5X.	46
Figura 46. Conteo de partículas realizadas para (a) aluminio refinado y (b) aluminio sin refinar (aumento 5X).	47
Figura 47. Microestructura de aluminio refinado a partir de cintas 5X.	47
Figura 48. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para aluminio refinado y aluminio sin refinar.	48
Figura 49. Probetas ensayadas a compresión de Aluminio a) sin refinador y b) con refinador.	49
Figura 50. Espumas metálicas obtenidas del proceso de infiltración en estado líquido, (a) 1-2mm y (b) de 2.38-3.35 mm.	49
Figura 51. Ejemplificación de las probetas obtenidas de una espuma metálica.	50
Figura 52. Comportamiento de la porosidad superficial a lo largo de una espuma metálica.	52

Figura 53. Microestructura de las espumas metálicas observadas en microscopio óptico 50X: a) aluminio serie 1100, b) aluminio serie 1100 + Al-5Ti-0.25C.	54
Figura 54. Microestructura de las espumas metálicas observadas en microscopio electrónico de barrido 100X, (a) aluminio serie 1100 y (b) aluminio serie 1100 + Al-5Ti-0.25C.	54
Figura 55. Curva esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas (1-2mm).....	56
Figura 56. Curva esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas (2.38-3.35mm).	56
Figura 57. Microestructura de espuma metálica (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).	57
Figura 58. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 168 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).	57
Figura 59. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 336 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).	58
Figura 60. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 504 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).	58
Figura 61. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 672 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).	58
Figura 62. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 840 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).	59
Figura 63. Comportamiento del área del grano al aumentar el tiempo de tratamiento térmico.	60
Figura 64. Comportamiento del perímetro del grano al aumentar el tiempo de tratamiento térmico.	60
Figura 65. Gráfica esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas posterior a los tratamientos térmicos (1-2mm).	62
Figura 66. Gráfica esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas posterior a los tratamientos térmicos (2.38-3.35mm).	62
Figura 67. Fundición de elementos aleantes en horno de inducción magnética.	67
Figura 68. Crisol diseñado para la fabricación de espumas metálicas de CuAlBe, (a) esparrago sujetador de embolo, (b) embolo apisonador, (c) cuerpo principal del crisol y (d) tapa inferior roscada al cuerpo principal.	68
Figura 69. Proceso de Fabricación de espumas metálicas de CuAlBe.	69
Figura 70. Proceso de torneado de espuma metálica de CuAlBe.	70
Figura 71. Microscopia óptica realizada a espumas de Cu-Al-Be (a) fase martensítica, (b) fase austenítica 5x.	71
Figura 72. Microscopia óptica realizada a espuma metálica de Cu-Al-Be con Circonio (Zr) como elemento refinador 5x.	71

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Materiales porosos y sus requerimientos para diferentes aplicaciones.</i>	11
Tabla 2. Composición en peso de los elementos del agente refinador.	31
Tabla 3. Parámetros para la fabricación de espumas metálicas de aluminio.	37
Tabla 4. Porosidad superficial obtenida para el análisis de una espuma metálica dividida en 8 secciones (Tamaño de poro de 2.38-3.35).	51
Tabla 5. Porosidad superficial obtenida para el análisis de una espuma metálica dividida en 7 secciones (Tamaño de poro de 1-2 mm).	51
Tabla 6. Resultados obtenidos al medir porosidad en cada probeta.	53
Tabla 7. Resultados obtenidos del análisis de área bajo la curva realizado a las espumas metálicas.	55
Tabla 8. Resultados obtenidos del análisis de área bajo la curva realizado a las espumas metálicas posteriormente a los tratamientos térmicos.	61
Tabla 9. Cantidades utilizadas para la fabricación de la aleación en fase austenítica y martensítica.	66

Introducción

Recientemente las espumas metálicas han adquirido una gran importancia como materiales de ingeniería, sus propiedades permiten que este tipo de materiales puedan ser utilizado en diversas áreas; construcción, aeroespacial, petrolera, automovilística, biomédica, etcétera.

Una espuma metálica se fabrica a partir de un metal o aleación metálica, contiene en su estructura poros que permiten obtener propiedades como, baja densidad y en consecuencia, menor peso, ahorro en material, resistencia al impacto, absorción de energía al someter el material a esfuerzos de compresión, aislamiento acústico y térmico, entre otras propiedades.

Es por lo anterior que continuamente las espumas metálicas se encuentran en estudio, para mejorar las propiedades existentes y añadir nuevas a las mismas.

Actualmente existen diversos tipos de fabricación de este tipo de materiales, los cuales se dividen según el estado de la materia; solido, gaseoso o líquido.

Actualmente los métodos de fabricación más utilizados son; fabricación por metalurgia de polvos (sinterización), fabricación por método in situ, y fabricación por agente espaciante o método de infiltración;**Error! Marcador no definido.**

En el presente trabajo de investigación se aborda la fabricación de espumas metálicas de Aluminio serie 1100, a partir del método de infiltración en estado líquido a través de un material de preforma, en este caso Cloruro de Sodio. Sin embargo, dado el auge de este tipo de materiales, se busca modificar sus propiedades al añadir en el proceso de fabricación, el agente refinador Al-5Ti-0.25C.

Capítulo I: Marco Teórico

1.1 Introducción a los materiales porosos

Desde la aparición del hombre en la tierra, los diversos tipos de materiales han jugado un papel crucial para el desarrollo y crecimiento del ser humano. Los primeros materiales fueron empleados en la forma inicial en la que se presentaba la materia prima, sin embargo, el continuo desarrollo del hombre obligó a éste a desarrollar materiales con características específicas, los materiales porosos son un ejemplo de ello.

Se denomina material poroso a aquel que posee huecos en su estructura, pueden contener aire o algún otro tipo de fluido, este tipo de materiales pueden contener porosidades que van desde el 20 hasta el 95% [1]. Los panales de abejas son un ejemplo de ello, su maravillosa estructura es capaz de proporcionar un material con alta resistencia debido a las interconexiones formadas por los canales hexagonales huecos, haciendo de este un material poroso, que finalmente nos arroja como resultado un material liviano y tenaz. De la misma forma, los huesos del cuerpo humano entran en esta categoría, gracias a su gran similitud con una esponja son denominados “*huesos esponjosos*”. Su morfología está diseñada para brindar resistencia, estructura y movilidad (Figura 1).

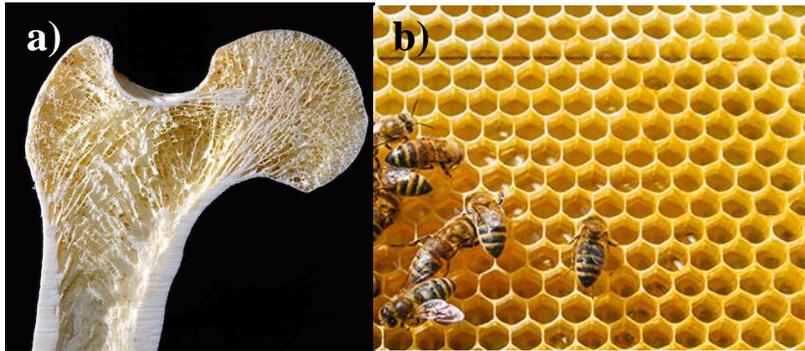


Figura 1. Ejemplos de materiales porosos en la naturaleza, a) hueso esponjoso, b) panal de abejas.

Por otra parte, los sólidos celulares son una clasificación de los materiales porosos; estos se constituyen por un conjunto de pequeños compartimentos con caras o bordes sólidos interconectados [2]. Existen tres estructuras típicas de los sólidos celulares, la primera se conforma de canales poligonales unidos mediante sus aristas, dada la similitud con un panal de abeja, estas estructuras son comúnmente llamadas “honeycombs”. La segunda configuración consiste en poliedros interconectados que atestán la red a lo largo de las tres dimensiones, de igual forma, en la tercera categoría, los poros se encuentran dispuestos en la red de manera análoga a la segunda, la única diferencia radica en que estos se localizan aislados unos de otros, la figura 2 ejemplifica los tres tipos de estructura.

Partiendo de la definición anterior, los poros se clasifican en dos tipos, aquellos que se localizan aislados de sus vecinos se denominan poros cerrados, mientras que los que se encuentran interconectados unos con otros son llamados poros abiertos.

Los materiales porosos son altamente utilizados en aplicaciones ingenieriles tales como filtros, absorbedores de energía, disipadores de sonido y temperatura, implantes biomédicos, entre otros. La principal aplicación que se dará a este tipo de materiales se encuentra estrechamente relacionada con la porosidad, la morfología del poro y el tamaño de poro, la Tabla 1 muestra los principales requerimientos de un material poroso para diversas aplicaciones.

Los materiales porosos pueden ser clasificados en distintas categorías, por ejemplo; tamaño de poro, morfología del poro, material o método de producción. Otra forma de categorizar este tipo de materiales en la literatura es por el porcentaje de porosidad; baja porosidad, media porosidad, alta porosidad [3].

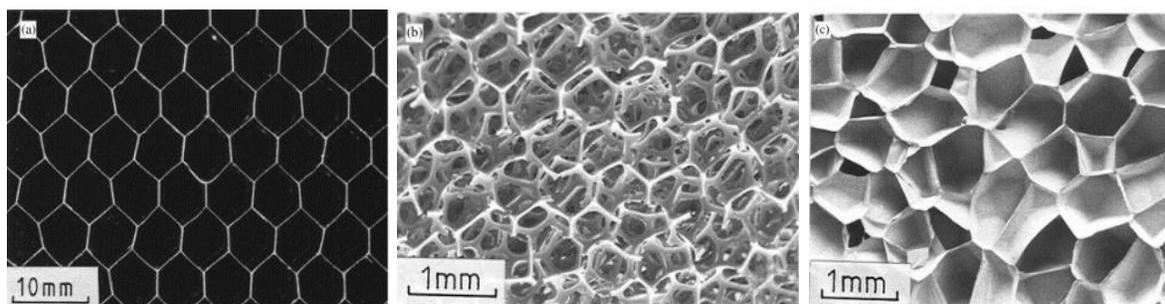


Figura 2. Ejemplos de sólidos celulares: (a) estructura tipo "honeycomb", (b) estructura en tres dimensiones con poros interconectados, (c) estructura en tres dimensiones con poros aislados [2].

Tabla 1. Materiales porosos y sus requerimientos para diferentes aplicaciones [3].

	Filtro	Catalizador	Biorreactor	Distribuidor de gas	Sensor
Porosidad abierta	>30	>30	>30	>30	>30
Tamaño de poro	Depende de la aplicación	Depende de la aplicación	Para bacterias: 5-30 μ m Para enzimas: 10-100nm	> μ m	Depende de la aplicación
Distribución del tamaño de poro	Estrecho	Estrecho (Depende de la aplicación)	Estrecho (Depende de la aplicación)	Estrecho	Estrecho
Superficie específica por unidad de volumen	Depende de la aplicación	1-2000 m ² /g	>1m ² /g	Depende del tamaño de poro	>1m ² /g
Permeabilidad	Alta	Depende de la aplicación	Depende de la aplicación	Alta	Depende de la aplicación
Resistencia mecánica	Alta	Depende de la aplicación	Alta	Alto, dependiendo de la aplicación	Depende de la aplicación
Otros	Resistencia química	Función de catálisis	Potencial de superficie apropiado		Función de detección Condición de superficie apropiada

1.2 Características de los materiales porosos

El comportamiento que presentan los materiales porosos es una conjunción de las características que posee el material base y la naturaleza de sus poros, como resultado de ello se pueden obtener diversos intervalos de propiedades mecánicas, acústicas y térmicas que son ideales para aplicaciones que requieren resistencia al impacto, estructuras ligeras, disipación de sonido o temperatura, entre otras. La figura 3 exhibe algunas de las características que posee un material sólido comparado con espumas de distinta especie.

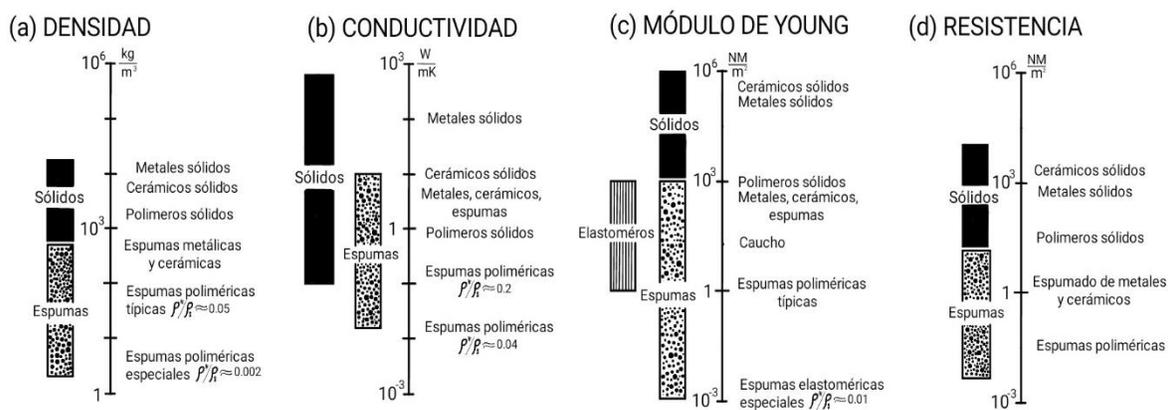


Figura 3. Propiedades presentes en sólidos y diferentes tipos de espumas, (a) densidad, (b) conductividad, (c) módulo de Young y (d) resistencia [4].

Como se mencionó con anterioridad, la geometría, distribución, tamaño y ubicación de los poros repercute de manera significativa en las propiedades finales de los sólidos porosos. Una de las clasificaciones más utilizada en la literatura consiste en categorizar los poros según su accesibilidad a los alrededores, tal como se expone en la figura 4. Los poros definidos por las letras (b), (c), (d), (e) y (f) son considerados poros abiertos ya que mantienen conexión con la superficie en al menos un extremo (b y f). Otro tipo de poros pueden tener contacto con el exterior en dos extremos a través de todo el conducto del poro, tal como se ejemplifica en el poro (e). En contraste, los poros cerrados son introducidos a la matriz mediante burbujas de aire o algún otro mecanismo térmico, lo que provoca que no exista ningún tipo de comunicación con sus poros vecinos (a) [4]. Este tipo de poros influye significativamente en las propiedades mecánicas del material, pero no se encuentra asociado con la permeabilidad ni la adsorción del mismo.

Una característica importante de este tipo de materiales que influye significativamente en las propiedades mecánicas es la porosidad. Esta se define como la cantidad de huecos presentes en la estructura del mismo. Existen diversos métodos y procesos para evaluar la porosidad de este tipo de materiales, una de las técnicas más usadas consiste en cuantificar el volumen neto del metal y el volumen total, de esta forma se obtiene la fracción de espacio ocupada por el material, dichos volúmenes pueden ser determinados a partir de la masa del material y su densidad, o a partir de la utilización de equipos como picnómetros de helio.

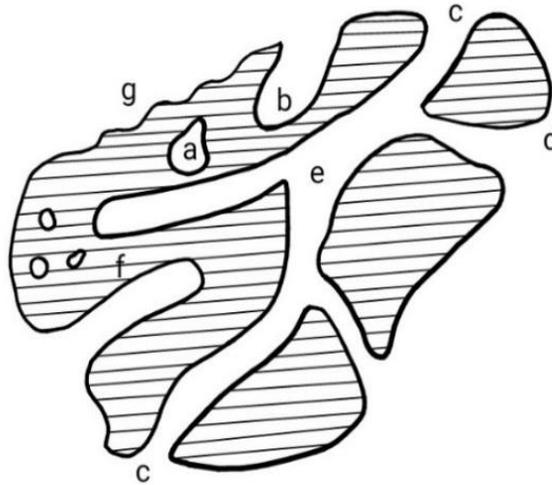


Figura 4. Clasificación esquemática de los poros, según su disposición con el entorno; (a) poro cerrado, (b) y (f) poros abiertos solo en un extremo, (c), (d) y (g) poros abiertos, (e) poro abierto por dos extremos (a través del conducto del poro) [4].

Otra cualidad que va de la mano con la porosidad es la densidad, gracias a esta propiedad se es posible fabricar elementos rígidos y ligeros utilizados en industrias como la aeroespacial, la medicina, en el área de la construcción, en el área automotriz entre otras.

De la misma forma, la rigidez es otra particularidad importante de estos materiales, gracias a la cantidad de poros presentes en su estructura, estos materiales son ideales para aplicaciones donde el amortiguamiento es primordial. Estructuras tipo “sándwich” han sido desarrolladas con la intención de mejorar la relación resistencia-peso; dicha estructura consiste en dos placas adheridas a una matriz porosa que las separa, tal como se observa en la figura 5, este tipo de configuraciones son excelentes cuando son sometidas a sollicitaciones de compresión y esfuerzos cortantes.

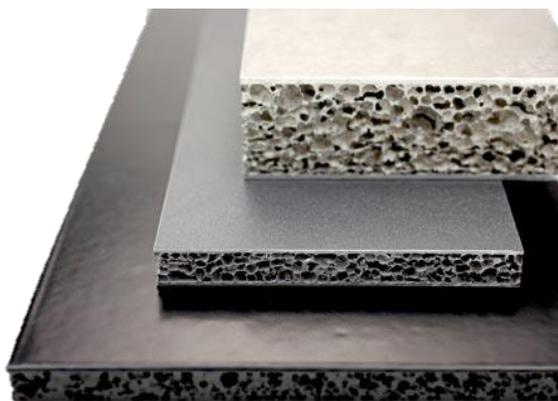


Figura 5. Ejemplos de estructuras tipo "Sándwich"[5].

1.3 Definición de espuma metálica

Una espuma metálica es un tipo de sólido celular compuesto por una matriz metálica con poros distribuidos en su estructura aleatoriamente, los cuales pueden contener aire o algún otro tipo de fluido. La figura 6 muestra una espuma metálica fabricada a partir del método de infiltración en estado líquido.

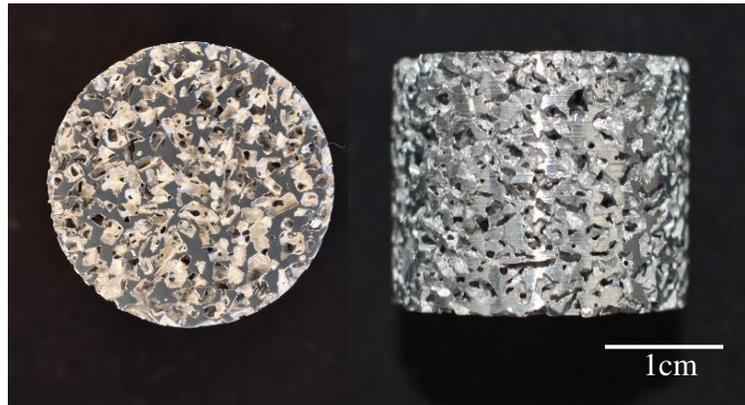


Figura 6. Espuma metálica de aluminio fabricada a partir del método de infiltración en estado líquido.

La fabricación de una espuma metálica debe llevarse a cabo desde el estado líquido del metal (o una temperatura muy cercana a ésta), para así garantizar condiciones de fluidez que permitan la formación de la espuma metálica [6] y evitar errores que pudieran presentarse durante el proceso, tales como falta de material en zonas específicas.

1.4 Comportamiento mecánico

Conocer las propiedades mecánicas de un material es fundamental para determinar las aplicaciones que éste tendrá. Una forma de conocer las propiedades mecánicas de una espuma metálica es a través de un ensayo de compresión uniaxial.

La curva esfuerzo-deformación que se obtiene de ensayar una espuma metálica se muestra en la figura 7. En ella se observan 3 zonas principales, la zona I corresponde a la deformación lineal de donde se pueden obtener datos como el módulo de Young o módulo de rigidez, es importante mencionar que el módulo de Young se encuentra estrechamente relacionado con el material de la pared celular.

Por otra parte, la zona II corresponde a una meseta cuasi-constante, que se lleva a cabo durante grandes deformaciones y aproximadamente a esfuerzo constante, la pendiente de dicha meseta puede modificarse o no, esto dependerá de la distribución de los poros en el material celular.

De acuerdo con el incremento de la carga aplicada, los poros que conforman la estructura comienzan a colapsar y a expulsar el fluido presente dentro de los poros, comúnmente aire. Una vez que las paredes de la celda tienen contacto entre sí se efectúa la última zona (zona

III), nombrada “densificación” debido a que se elimina totalmente el fluido de los poros y aumenta la densidad del material, en esta última etapa se necesitan grandes esfuerzos para continuar deformando el material [7].

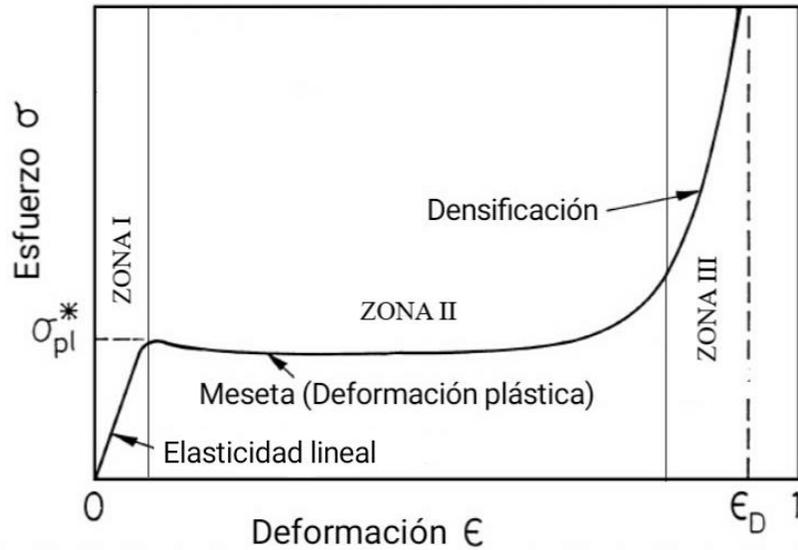


Figura 7. Curva esquemática esfuerzo-deformación de una espuma metálica sometida a compresión uniaxial [8].

Las espumas metálicas presentan buena capacidad de absorción de energía con elevada eficiencia, debido a que las fuerzas están controladas por el nivel de esfuerzo al que se absorbe la energía cinética [8]. Sin embargo, el comportamiento mecánico de una espuma metálica nunca será comparable con el del material sólido, la figura 8 expone el comportamiento de ambos tipos de materiales. En la imagen se puede observar que la energía absorbida por unidad de volumen en ambos materiales es la misma, no obstante, el valor del esfuerzo máximo posee una diferencia bastante notable.

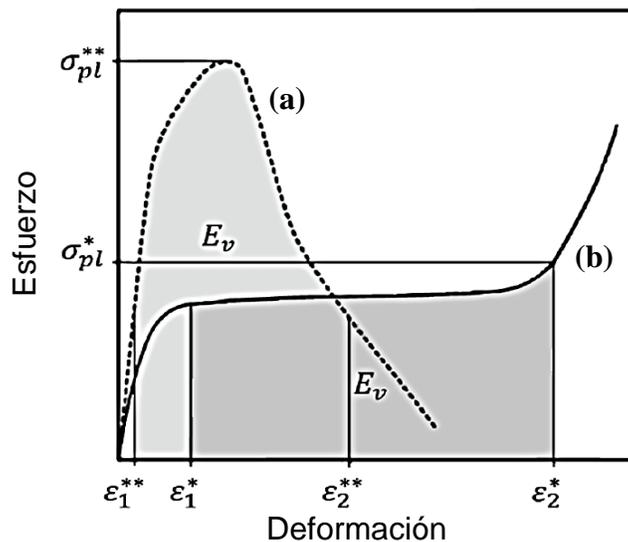


Figura 8. Curva esfuerzo-deformación para (a) un sólido y (b) para una espuma metálica [9].

El trabajo por unidad de volumen en un ensayo de compresión uniaxial en una espuma metálica se lleva a cabo al alcanzar un 50 a 70% de deformación. Dicha zona es la ideal en la que este material puede absorber la energía, es decir, el trabajo requerido para deformar la espuma es equivalente a la energía cinética de una masa, por lo cual con el espesor correcto se podría absorber toda la energía durante un impacto [10]. La figura 9 exhibe el comportamiento antes descrito.

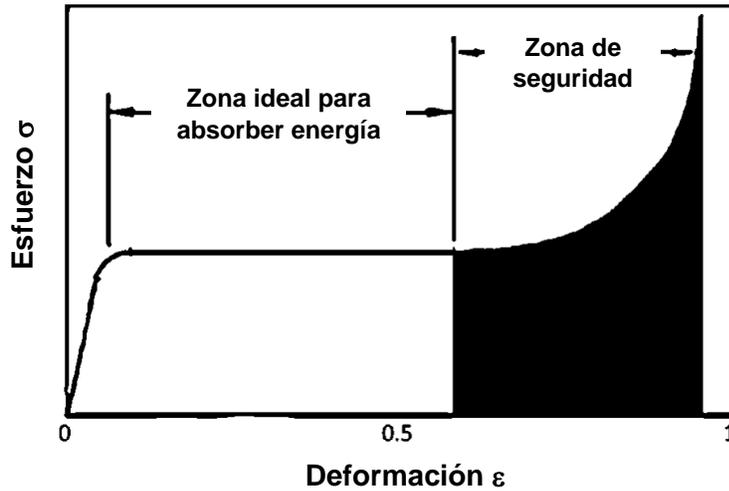


Figura 9. Curva esfuerzo-deformación durante la absorción de energía [12].

1.5 Métodos de fabricación de las espumas metálicas

A causa del auge que han tenido las espumas metálicas en los últimos 10 años [8], se han desarrollado distintos métodos para la producción de estos materiales. Dichos métodos son clasificados en la literatura según el estado en el que se encuentra el metal a espumar, esto es, metal en estado líquido, en polvo, vapor metálico, así como soluciones de iones metálicos, la figura 10 presenta una clasificación más amplia de lo aquí mencionado.

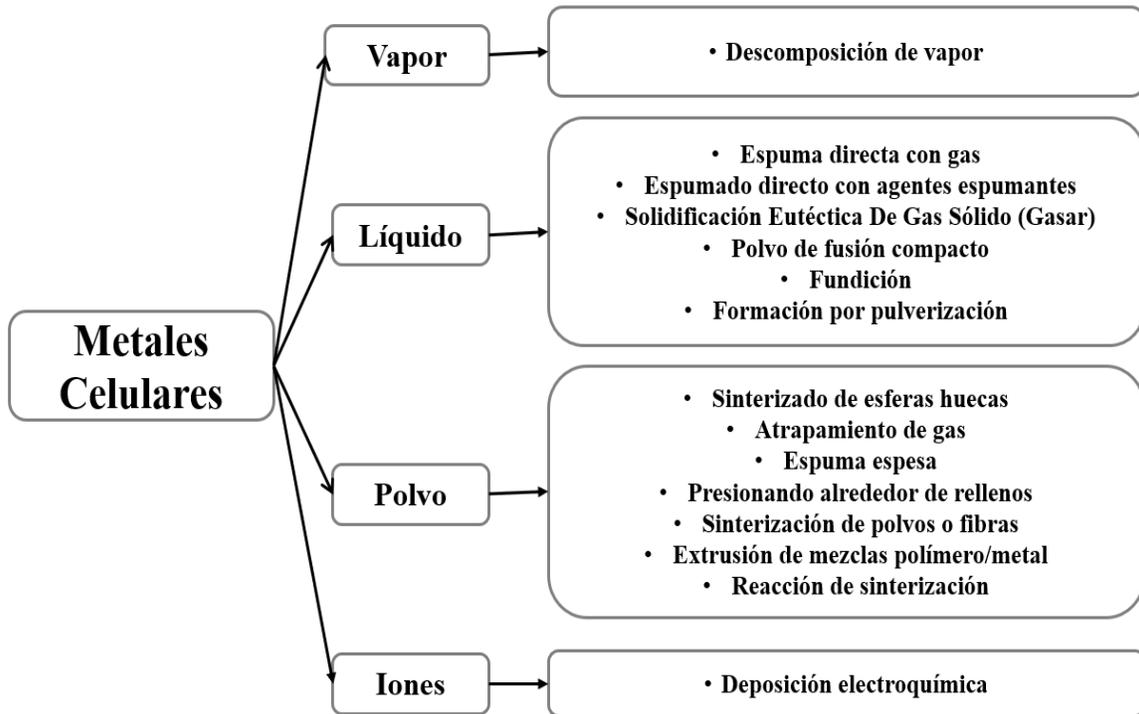


Figura 10. Clasificación de los procesos de fabricación de las espumas metálicas.

1.5.1 Espumado de metales

Aunque el espumado de metales surge como un infortunio, la constante exploración del tema llevo a perfeccionar esta técnica, si bien al inicio no se poseía un control total sobre este proceso, a través de los años se ha conseguido que este sea uno de los más utilizados para la fabricación de este tipo de materiales. La producción de espumas metálicas de metales como el aluminio, el magnesio o el zinc, ha sido viable gracias a este método de fabricación [11-18].

El espumado de metales consiste en elevar de manera considerable la viscosidad del metal a espumar, esto se lleva a cabo añadiendo partículas cerámicas o elementos de aleación que generan partículas estabilizadoras en el metal fundido, de este modo, se evita que el gas inyectado a la masa fundida suba rápidamente a causa de la diferencia de densidades.

1.5.2 Espumas metálicas mediante Alporas®

El método Alporas® fue desarrollado por la compañía japonesa Shinko, este consiste en añadir al metal en estado líquido un agente espumante el cual al llegar a una cierta temperatura reacciona expeliendo gas dentro de la masa fundida y generando altos porcentajes de porosidades. Gracias a este método, es posible generar grandes lotes de espumas metálicas de aluminio, con una estructura de celda cerrada ultraligera [19].

Para la correcta ejecución del método Alporas® es indispensable estabilizar las burbujas de gas dentro del metal con el objetivo de evitar que las fuerzas de flotación las transporten a la superficie. A fin de conseguir esto, se incorpora y mezcla el aluminio a 680 [°C] con 1.5% en peso de calcio con la intención de espesar el metal. Una vez que el metal ha alcanzado la viscosidad deseada, se añade a la mezcla 1.6% de hidruro de titanio (TiH₂) con la finalidad de liberar hidrogeno (gas) y titanio que entran en solución sólida [21].

Con las correctas agitaciones mecánicas es factible esparcir homogéneamente las burbujas dentro del metal, de manera que se tiene un mayor control de la dispersión y el tamaño de los poros. El procedimiento anterior, permite obtener tamaños de poro de 2 a 10 [mm], porosidades entre 84 y 95% y densidades en un rango de 0.18 y 0.24 [g/cm³]. Un bloque fabricado con esta técnica puede medir 45x 205 x 65 [cm] y pesar hasta 160 [kg]. Gracias a esta técnica, se posee un dominio más amplio del tamaño y la densidad de las celdas de acuerdo con la solicitud a cumplir.

1.5.3 Gasar, solidificación eutéctica de gas sólido

El procedimiento para el espumado de metales denominado Gasar [20] explota que algunos metales forman un sistema eutéctico con gas hidrogeno para conseguir una masa fundida saturada de hidrogeno, dicho proceso consiste en fundir algún metal en una atmosfera de alta presión (regularmente 50 atm), para posteriormente disminuir la temperatura y que el metal saturado de hidrogeno sufra una transición eutéctica en un sistema heterogéneo de dos fases “sólido + gas” [21].

Debido a que la composición eutéctica depende de la presión del sistema, la presión externa y el contenido de hidrógeno deben coordinarse. Si la composición del metal se localiza cerca de la concentración eutéctica, entonces se llevará a cabo una reacción de segregación. La solidificación direccional del metal se lleva a cabo con la eliminación del calor, conforme el frente de solidificación avanza a través del metal (velocidades de 0.05 a 5 [mm/s]), el contenido de hidrógeno aumenta y provoca la formación de burbujas. En la figura 11 se observan las etapas a ejecutarse para la producción de espumas mediante este método.

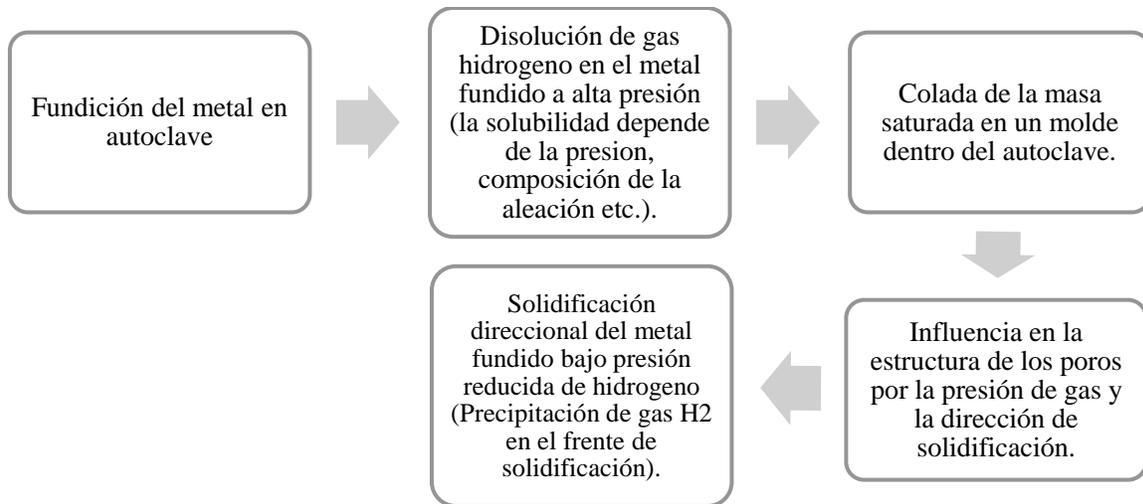


Figura 11. Espumado de metales por el método GASAR [23].

Este método de producción puede lograr porosidades en un intervalo de 5 al 75%, no obstante, los poros generados poseen una geometría alargada en dirección al frente de solidificación, consiguiendo un diámetro de 100 μm a 10 mm y una longitud de 100 μm a 300 mm [22]. En la figura 12 se aprecia una espuma metálica producida por el método descrito anteriormente.

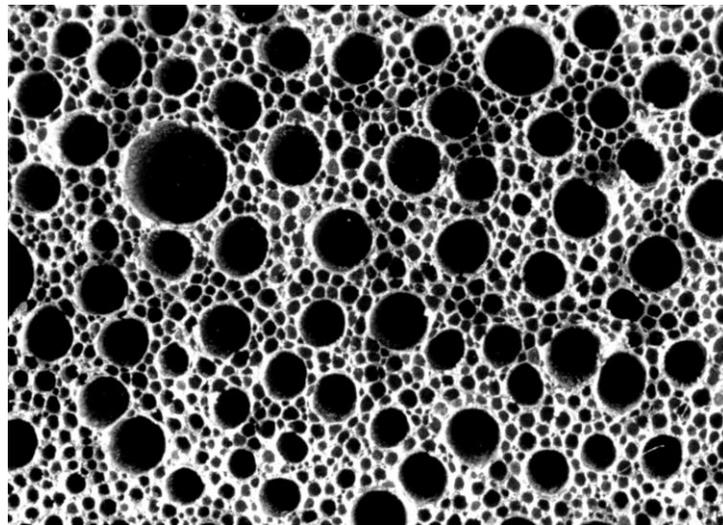


Figura 12. Estructura del poro de una espuma metálica producida por el método "gasar" (superficie paralela a la dirección de los poros) [23].

1.5.4 Hydro/Alcan, espumado por inyección de gas

La producción de espumas metálicas a partir del método Hydro/Alcan se lleva a cabo al añadir al metal en estado líquido, partículas cerámicas, las cuales pueden ser; óxido de aluminio, carburo de silicio u óxido de magnesio, dichas partículas son añadidas con la finalidad de aumentar la viscosidad del metal. Posteriormente es añadido gas (helio, argón o aire) por medio de impulsores giratorios. La función de los impulsores es producir burbujas distribuidas homogéneamente en la masa viscosa creada con anterioridad (aunque no siempre resulta de este modo).

La espuma metálica es expulsada a la superficie con ayuda de una banda transportadora donde se mantiene estable debido a las partículas cerámicas añadidas al inicio del proceso y donde da paso al proceso de solidificación. La figura 13 ejemplifica el proceso Hydro/Alcan.

El nombre “Hydro/Alcan” se debe a que Hydro Aluminium en Noruega y Alcan International en Canadá producen materiales utilizando las técnicas originales patentadas [24-28].

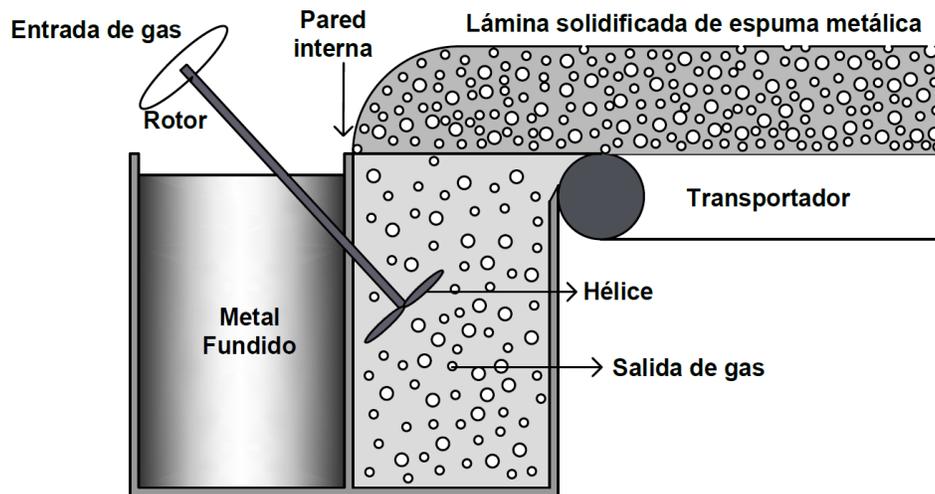


Figura 13. Espumado directo de materiales fundidos mediante inyección de gas [29].

La ventaja de este método de producción radica en que es relativamente económico y sencillo y las características de la espuma final pueden ser modificadas al cambiar los parámetros de operación. Con este proceso se pueden obtener placas continuas y espesores variados [8].

Por otra parte, la desventaja principal consiste en que este método no puede ser utilizado con cualquier metal, esto debido a que no todos los metales consiguen la viscosidad deseada, además, es complicado controlar completamente la dispersión del gas en el metal, por lo que pueden existir poros en la estructura que superan las dimensiones esperadas, repercutiendo así en sus propiedades mecánicas.

1.5.5 Infiltración de metal en estado líquido

El método de infiltración en estado líquido reside en la utilización de un material de preforma que es sacrificado una vez terminado el proceso, dicho material de preforma puede ser orgánico o inorgánico, la única restricción es que este sea de fácil disolución para poder retirarlo de la estructura del material y obtener una espuma metálica.

Una de las técnicas más frecuentemente usadas consiste en fundir el metal a espumar con el objetivo de disminuir su viscosidad y obligarlo a infiltrar a través de los huecos generados por partículas de cloruro de sodio (NaCl), sin embargo, este material de preforma restringe a los metales con los que puede ser utilizado, pues solo se puede implementar con aquellos cuyo punto de fusión se encuentre por debajo del punto de fusión del cloruro de sodio (801[°C]).

La figura 14 ejemplifica la manera en que se lleva a cabo la producción de espumas metálicas a partir de este método. Como resultado de este procedimiento se obtiene un material compuesto por el metal y la preforma, finalmente para la obtención de la espuma metálica final, la preforma es disuelta mediante distintos métodos (de acuerdo con la preforma utilizada) [30].

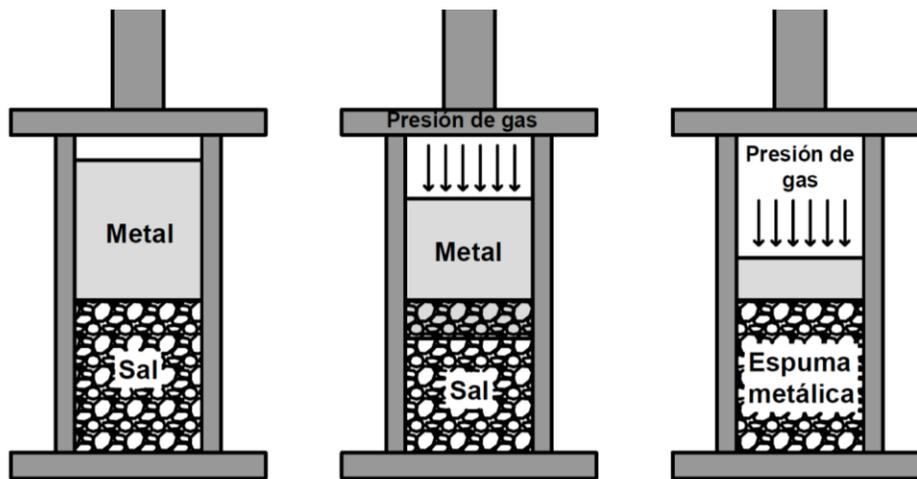


Figura 14. Ejemplificación del método de infiltración en estado líquido.

La utilización de este proceso permite obtener espumas metálicas con tamaño de poro que van desde 50 μm a 5 mm y porosidades de hasta un 80%. La principal desventaja de este método radica en las variables que no se pueden controlar, como lo son la geometría de los granos de sal, así como la localización de los mismos.

1.5.6 Sinterización de polvos metálicos

Para llevar a cabo el método de sinterización de polvos metálicos solo es necesario que el metal a espumar posea la capacidad de sinterizarse, es por ello por lo que este método resulta relativamente sencillo. Existe una gran variedad de metales que pueden emplearse con esta técnica, consiguiendo porosidades desde 20 a 50% [31].

Este procedimiento se lleva a cabo a partir de tres pasos fundamentales; preparación del polvo metálico, compactación del mismo y finalmente la sinterización [24]. Existen técnicas para aumentar la porosidad de este tipo de materiales, estas consisten en el empleo de esferas huecas en lugar de polvo metálico, de esta forma, la espuma metálica poseerá en su estructura una fracción de aire mucho mayor, afectando directamente la densidad del material final.

Las esferas empleadas en este método pueden llegar a poseer un diámetro que va desde 1.5 a 10 mm y con espesores de pared en un rango de 5 a 400 μm [33], gracias a esta forma de fabricación, se pueden obtener espumas metálicas de celda abierta y celda cerrada.

Una de las desventajas de este método reside en que la unión de las esferas en los puntos de contacto (sinterización), no es siempre sencilla, dado que metales como el aluminio forman una capa de óxido en su superficie, impidiendo que las esferas puedan unirse. Distintos procesos han sido desarrollados para resolver esta problemática, como lo son; la deformación previa del material a sinterizar o la adición de agentes auxiliares durante la sinterización.

Una de las principales ventajas de emplear este método consiste en la reproductibilidad de las espumas metálicas, puesto que, a diferencia de otros procedimientos, existe un mayor control del tamaño de los poros y la geometría de estos. En la figura 15 se pueden apreciar dos espumas metálicas de magnesio producidas por este método.

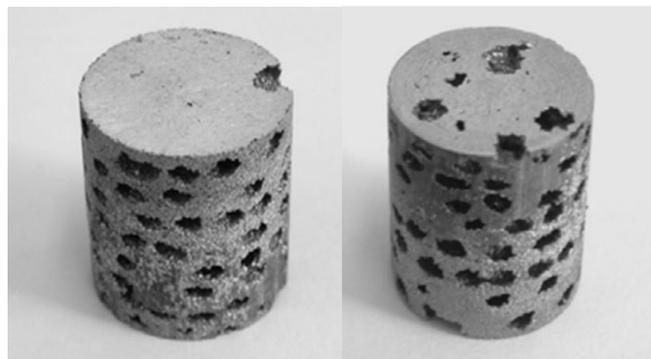


Figura 15. Espumas metálicas de magnesio obtenidas mediante metalurgia de polvos [32].

1.5.7 Alulight, espuma metálica mediante metalurgia de polvos

Alulight es el nombre de una compañía austriaca que produce este tipo de materiales, es por ello por lo que se le atribuye dicho nombre a este proceso de producción de espumas metálicas. Alulight consiste en la compactación de la mezcla del metal en polvo con un agente de expansión con la finalidad de obtener un producto más denso. El objetivo de la compactación es incrustar en la matriz metálica el agente de soplado añadido al inicio del proceso, aparentemente sin crear porosidades.

Una vez realizado esto, se incrementa la temperatura del material compuesto muy cerca de la temperatura de fusión del metal base. Es así como el agente de expansión se descompone y el gas expulsado es alojado dentro de la matriz metálica creando una gran cantidad de poros, este procedimiento puede llegar a tardar segundos o minutos, esto dependerá del agente de expansión empleado [33].

El método Alulight ha permitido obtener espumas metálicas de aluminio con poros de tamaño milimétrico, así como porosidades que van de 63 al 89%. La figura 16 expone una espuma metálica fabricada a partir de este método.

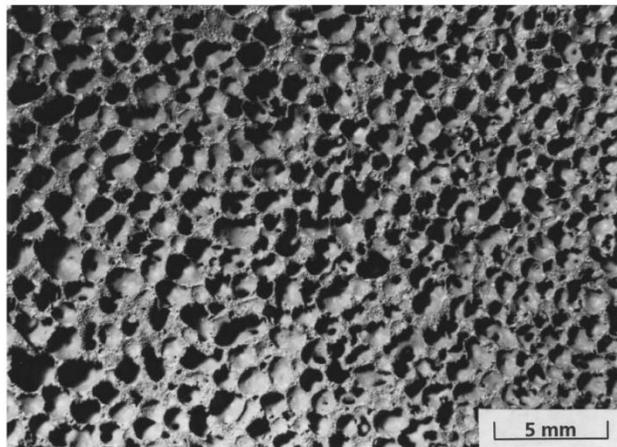


Figura 16. Sección transversal de una espuma metálica de plomo fabricada mediante polvos compactos.

1.6 Aplicaciones de las espumas metálicas

Las espumas metálicas poseen propiedades que dependen en gran cantidad de la morfología, distribución y tamaño de los poros que esta posea en su estructura. Existen actualmente una gran variedad de técnicas y procesos para espumar un metal. Por tanto, las propiedades finales de la espuma metálica dependerán del proceso por el cual se produjo y en menor cantidad del material de la pared celular.

Por ejemplo, espumas metálicas de poros esféricos y celda cerrada son empleadas en su mayoría en aplicaciones donde se requiere mayor absorción de energía, mientras que las espumas que poseen poros irregulares de celda abierta son ideales para aplicaciones de

permeabilidad. En la figura 17 se puede observar la relación entre tipo de aplicación para las espumas metálicas y la porosidad.

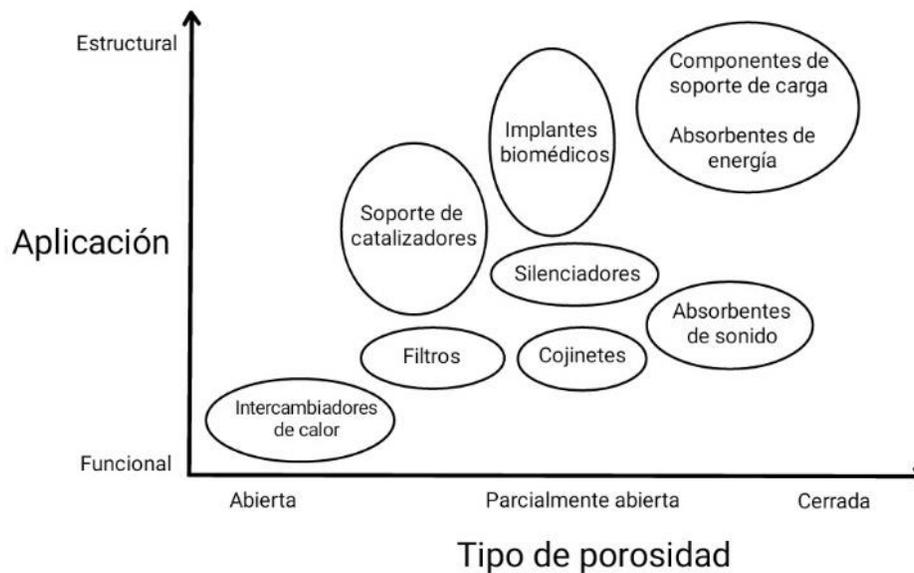


Figura 17. Aplicaciones de materiales porosos según el tipo de porosidad [24].

Otro aspecto importante que considerar para determinar la aplicación de las espumas metálicas es el costo de producción, ya que es necesario que estos sean viables para su producción a gran escala.

1.6.1 Industria automotriz

La industria automotriz es una de las industrias más beneficiadas por los materiales porosos, ya que estos suelen poseer mayor resistencia cuando son sometidos a pruebas de impacto [34]. Además de esto, las espumas metálicas representan para esta industria un ahorro en peso y por ende en combustible, reducen las emisiones acústicas, disipan el calor debido a la gran cantidad de área superficial que estos materiales poseen y por supuesto, por la cantidad de energía que son capaces de disipar al someterlas a fuerzas de impacto.

En la figura 18 se aprecia la combinación ideal de los aspectos mencionados con anterioridad, usualmente, la combinación de estos aspectos se puede encontrar en espumas metálicas de celda abierta fabricadas con aluminio.

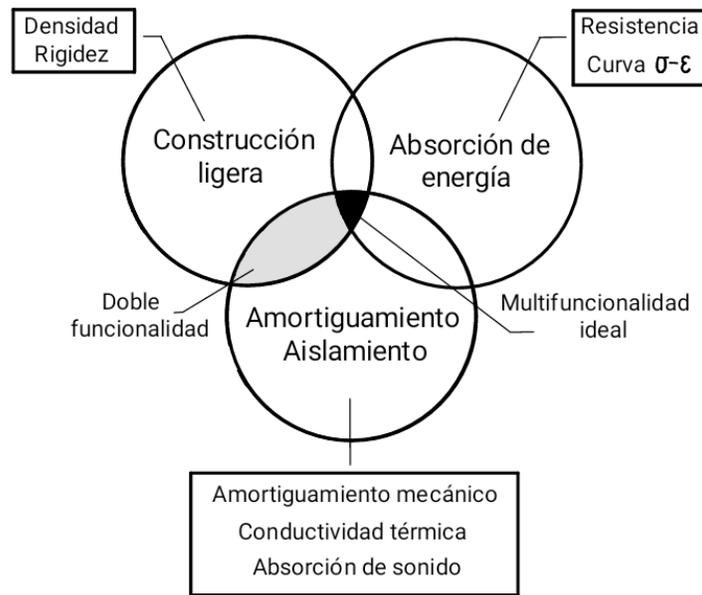


Figura 18. *Combinación ideal de propiedades mecánicas de las espumas metálicas para su aplicación en la industria automotriz[24].*

1.6.2 Industria petrolera

Los materiales porosos son altamente utilizados en la industria petrolera y en aquellas industrias donde filtrar fluidos como; refrigerantes, gasolina, corrientes de aire, aceites, suspensiones etc. sea la principal necesidad.

El aprovechamiento de esta característica se encuentra estrechamente relacionado con la propiedad de permeabilidad que este tipo de materiales poseen, dicha propiedad se refiere a la capacidad de un material de permitir el paso de un fluido a través de él sin que este produzca cambios en su estructura [35]. Tal propiedad aumenta conforme aumenta la porosidad y el tamaño de los poros, sin embargo, también se encuentra estrechamente relacionada con la naturaleza del fluido, es decir, velocidad, presión, viscosidad, etc. [36]

Las espumas metálicas de cobre son un claro ejemplo de ello, éstas son utilizadas como filtros para imposibilitar que suciedades, óxidos u otros agentes no esperados crucen a través de las líneas de suministro de aire para interferir con las válvulas y los controles. De igual modo, metales como el bronce, el níquel y el acero inoxidable poroso [37] son continuamente utilizados para filtrar partículas de tamaño micrométrico que pueden contaminar el sistema y el fluido en cuestión [38].

Se han desarrollado en los últimos años, aplicaciones novedosas para las espumas metálicas de celda abierta, tal es el caso de las espumas de magnesio, las cuales brindan una alternativa a los problemas ambientales actuales. Este tipo de espumas poseen la propiedad de absorber

CO₂ (dióxido de carbono) a partir de una reacción química que tiene lugar dentro de la estructura del material [39].

1.6.3 Industria biomédica

Muchos de los materiales empleados en la ingeniería son réplicas de aquellos que se encuentran en la naturaleza, este es el caso de los materiales porosos. El cuerpo humano posee dos tipos de estructura ósea; cortical y trabecular; esta última es también llamada “hueso esponjoso” ya que posee una gran similitud con una esponja. De acuerdo con varios autores, un implante poroso debe poseer un módulo de Young equivalente al hueso que se va a sustituir, de esta forma se pueden desarrollar implantes con el módulo adecuado para asegurar el correcto funcionamiento del implante, así como garantizar una buena compatibilidad biológica y estimular el crecimiento óseo a través de los poros de la espuma metálica de celda abierta [40].

Metales como el titanio y el cobalto-cromo son ampliamente utilizados en esta industria gracias a su biocompatibilidad. Implantes y prótesis de estos materiales han sido desarrollados como recubrimientos porosos debido a que permite el crecimiento del tejido a partir de la estructura porosa del material. La figura 19 muestra algunas aplicaciones de las espumas metálicas en la industria de la medicina.

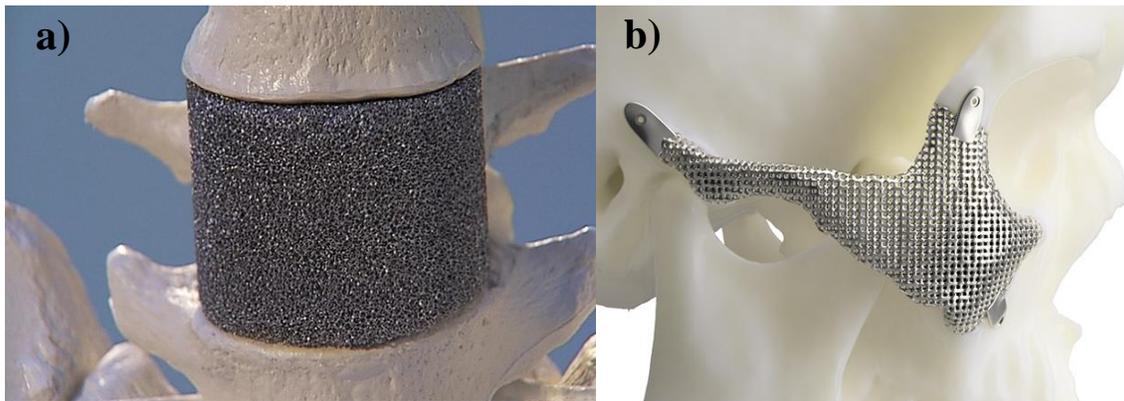


Figura 19. Materiales porosos utilizados como prótesis óseas; a) cuerpo vertebral, b) hueso cigomático macizo facial [41-42].

El magnesio también es un material altamente utilizado para la fabricación de implantes biodegradables, esto se debe a que una vez que el tejido ha crecido a través de los huecos del material poroso, el cuerpo humano tiene la capacidad de absorber este metal gradualmente eliminándolo así del sistema [43].

1.6.4 Industria aeroespacial

La industria aeroespacial al igual que la industria automotriz es beneficiada por las mismas propiedades y características de las espumas metálicas, sin embargo, para la industria aeroespacial la reducción de costos es primordial. Una forma de reducir considerablemente los costos de los materiales utilizados por esta industria es cambiando las costosas estructuras tipo “honeycombs” (figura 20) por paneles tipo “sándwich” o placas de aluminio espumado [24], las cuales además de ser más económicas, poseen una mayor resistencia al pandeo.

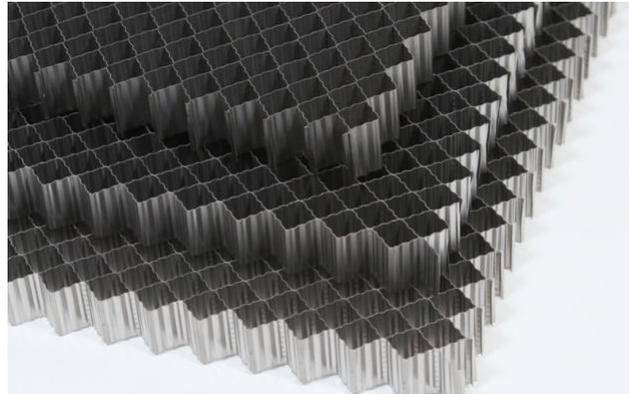


Figura 20. Estructura tipo "honeycomb" [44].

Además de lo mencionado anteriormente, otra ventaja importante de las espumas metálicas es que pueden adquirir distintas geometrías, mientras que las estructuras “honeycombs” son por lo regular de una geometría determinada. Por dicha razón, algunos fabricantes de helicópteros ya se encuentran cambiando los componentes de panel de abeja utilizados actualmente, por piezas de espuma metálica [24].

Para la industria aeroespacial las propiedades que poseen las espumas metálicas como rigidez y amortiguamiento representan una combinación muy valiosa. Actualmente las espumas metálicas de aluminio se hallan en valoración como elementos de choque que absorben energía para las plataformas de aterrizaje de vehículos espaciales y como refuerzo para estructuras de soporte de carga en satélites, reemplazando materiales que causan problemas en las condiciones ambientales adversas en el espacio [24].

1.6.5 Industria de la Construcción

Pese a que las espumas metálicas aun no son totalmente utilizadas en el área de la construcción, los sólidos celulares representan una gran ventaja en esta área, esto debido a la relación resistencia peso que se puede obtener con ellos, un claro ejemplo de ello son las estructuras tipo “sándwich” descritas en la sección 1.2.

Otra ventaja importante de este tipo de materiales que es aprovechada por la industria de la construcción reside en que además del ahorro en peso y material, este tipo de estructuras permiten el paso de la luz y el aire a través de ellas, mejorando así la apariencia de las construcciones y significando un ahorro energético en las mismas (Figura 21). Aunado a esto,

los sólidos celulares exhiben propiedades adicionales que son ventajosas en este tipo de aplicaciones, por ejemplo, propiedades acústicas o la resistencia al calor.



Figura 21. Materiales porosos implementados en la industria de la construcción.

Ahora bien, las espumas metálicas de aluminio podrían ser muy útiles para disminuir el consumo de energía de los ascensores. A causa de la frecuente aceleración y desaceleración y la alta velocidad de los ascensores modernos, la construcción liviana es un tema importante. A pesar de ello, no siempre las normas de seguridad admiten la aplicación de materiales ligeros. En vista de que las espumas de aluminio pueden actuar como absorbentes de energía y como material estructural rígido al mismo tiempo, estas aplicaciones parecen muy prometedoras [24].

Hipótesis

- Espumas metálicas fabricadas con aluminio refinado mostrarán un incremento en su capacidad de absorción de energía en comparación con espumas fabricadas de aluminio puro.
- Será factible obtener espumas metálicas de poro abierto de aleaciones de memoria de forma mediante el proceso de infiltración en estado líquido con matrices austenítica y martensítica.

Objetivo general

- Aumentar la capacidad de absorción de energía de espumas metálicas de aluminio 1100 de poro abierto fabricadas mediante el proceso de infiltración en estado líquido.
- Diseñar y manufacturar proceso de fabricación de espumas metálicas de poro esférico y celda abierta de aleaciones con memoria de forma.

Objetivos particulares

- Fabricar la aleación refinante Al-5Ti-0.25C
- Estudiar el efecto que ocasiona la aleación Al-5Ti-0.25C al ser añadida al aluminio durante el proceso de fundición.
- Fabricar espumas metálicas refinadas y no refinadas de dos tamaños de poro distintos mediante el proceso de infiltración en estado líquido.
- Realizar análisis microestructurales a ambos tipos de espumas metálicas (espumas refinadas y no refinadas).
- Observar el comportamiento mecánico de espumas metálicas de aluminio puro y aluminio refinado para determinar si existe o no beneficio al añadir el compuesto Al-5Ti-0.25C.
- Fabricar espumas metálicas de aleaciones con efecto de memoria de forma con celda abierta y poro esférico mediante el proceso de infiltración en estado líquido.

Capítulo II: Desarrollo Experimental

2. Introducción

El Propósito principal del presente trabajo de investigación radica en modificar las propiedades mecánicas de las espumas metálicas de aluminio sin alteraciones considerables en la composición química. Es por ello por lo que se realizaron diversos procedimientos para conseguir el objetivo antes mencionado, tal metodología se muestra en la figura 22.

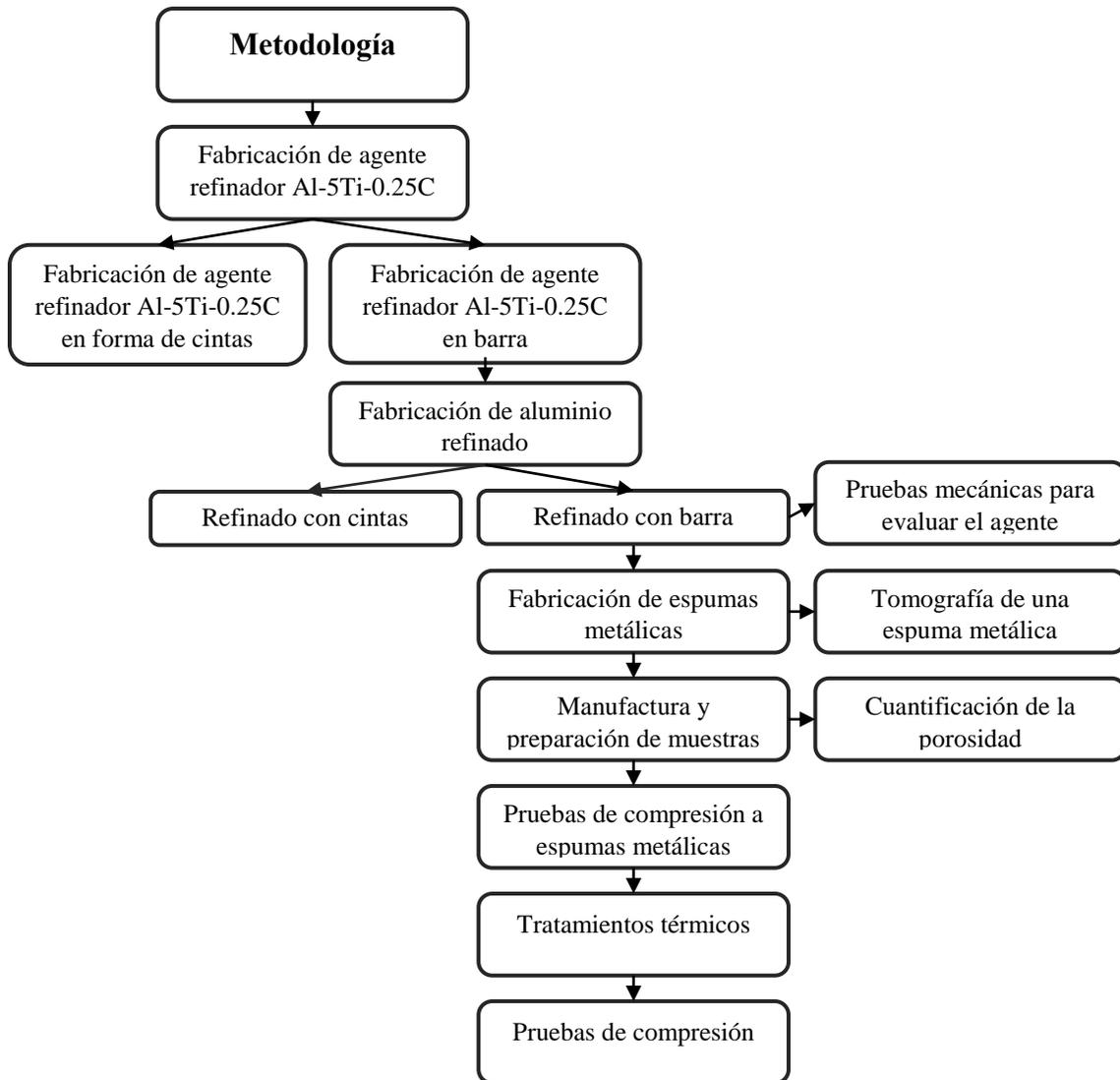


Figura 22. Metodología seguida en el presente trabajo de investigación.

2.1 Fabricación de la aleación Al-5Ti-0.25C

Los compuestos de Al-Ti son altamente utilizadas como refinador de grano en aleaciones de aluminio; distintas composiciones y sus efectos han sido reportados en la literatura [45-48]. El compuesto Al-5Ti-0.25C ha sido examinado previamente para demostrar su eficacia como refinador de grano en aluminio de alta pureza [49]. Por lo anterior, se determinó dicha aleación como refinador de grano en el presente proyecto de investigación.

Se fabricaron 150 gramos de la aleación Al-5Ti-0.25C de acuerdo con los porcentajes y los pesos mostrados en la Tabla 2. Para una correcta elaboración del agente refinador, se fundieron previamente 149.625 gramos de la liga Al-Ti en un horno de arco eléctrico Edmund Bühler MAM 1, la homogeneidad de la fundición fue ratificada, mediante agitación mecánica y debido a las corrientes naturales de convección por campo eléctrico de horno.

Tabla 2. Composición en peso de los elementos del agente refinador.

	Porcentaje [%]	Masa [g]
Aluminio	94.75	142.125
Titanio	5	7.5
Carbono	0.25	0.375
	Masa Total	150 gramos

La aleación Al-Ti obtenida fue sometida a un proceso de cilindrado para eliminar la escoria superficial y facilitar la difusión del carbono a través de todo el material. Dicho procedimiento se llevó a cabo colocando 0.375 gramos de nano-carbono situado al centro del lingote obtenido (figura 23) y sometido a un tratamiento térmico de difusión a 1000[°C] durante 3 horas en un horno tubular marca Lindberg® con un flujo de argón de 0.02 [MPa] para garantizar la completa difusión del carbono en la liga Al-Ti.



Figura 23. Aleación Al-5Ti con nano-carbono situado en el centro de la probeta antes del tratamiento térmico de difusión.

La figura 24 expone cada uno de los pasos llevados a cabo para la correcta fabricación del agente refinador. El procedimiento anterior encuentra justificación en el diagrama Ti-C, ya que, si los tres elementos que componen el agente refinador se funden en un solo paso, existe la posibilidad de formar fases intermetálicas que podrían obstruir el objetivo principal de este compuesto.

La composición final de la aleación fue analizada mediante un equipo de fluorescencia de rayos-X (XRF) marca Brunker® modelo Titan S1 con el objetivo de asegurar que posea los porcentajes correctos de cada uno de los elementos aleantes.

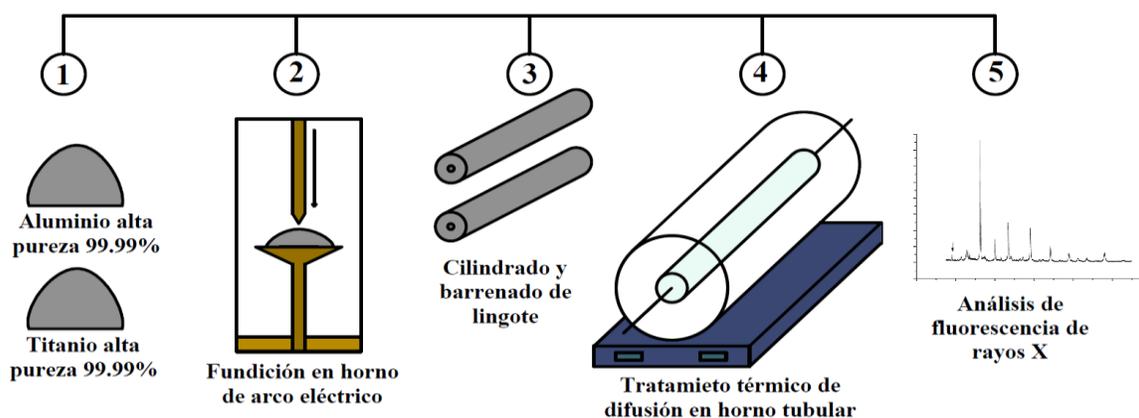


Figura 24. Proceso de fabricación del refinador Al-5Ti-0.25C.

2.2 Estudio adicional de la aleación Al-5Ti-0.25C

Debido a que las partículas generadoras de los principales puntos de nucleación durante la solidificación son carburos de titanio TiC y el compuesto Al₃Ti, se fabricaron cintas del refinador Al-5Ti-0.25C mediante la técnica “melt spinning” (figura 25) la cual consiste en la solidificación rápida de un “hilo” de metal fundido que desciende sobre un disco de cobre que gira a altas velocidades, obligando al metal a solidificar en cuanto entra en contacto con el disco. Cintas de refinador fueron obtenidas mediante esta técnica utilizando un equipo “melt spinner” marca Edmund Bühler GmbH® ilustrado en la figura 26, con una velocidad de disco de $20 \left[\frac{m}{s} \right]$ ya que a esta velocidad se consigue una mayor homogeneidad en el ancho y longitud de la cinta. Las cintas fabricadas fueron añadidas a la fundición del aluminio en relación de 3 gramos de refinador por cada 200 gramos de aluminio serie 1100.

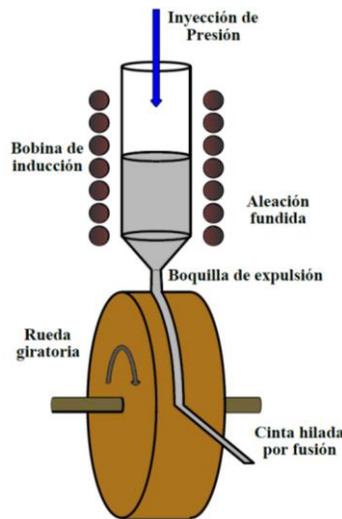


Figura 25. Diagrama representativo de la técnica "melt spinning".

El objetivo de este estudio radica en analizar el efecto que causa “congelar” la fase de alta temperatura, impidiendo la ordenación de átomos mediante la solidificación extremadamente rápida. Las velocidades de enfriamiento que se logran a partir de este método van de los 10^4 a los $10^7 \left[\frac{K}{s} \right]$ [51].



Figura 26. Equipo melt spinner utilizado para la fabricación de cintas metálicas [50].

2.3 Fabricación de Aluminio Refinado

Aluminio refinado fue fabricado en un horno de inducción EMA 40 KVA utilizando atmosfera controlada de argón de alta pureza (99.99). Se añadieron 1973.23 [mg] de agente refinador a 500 [g] de aluminio serie 1100, seguido de un proceso de colada convencional en una lingotera de acero tratada previamente (figura 27).



Figura 27. Proceso de colada convencional de aluminio refinado.

Para evaluar el efecto ocasionado por el refinador en la microestructura del aluminio serie 1100 se cortaron dos muestras de cada especie, es decir, aluminio refinado y aluminio sin refinar. Cada una de las muestras fueron encapsuladas en baquelita conductora y pulidas metalográficamente por técnica convencional dando un acabado espejo. La microestructura y la macroestructura fueron reveladas con los reactivos; ácido hidrofúrico (0.5% ácido fluorhídrico + 99.5% Agua)[52], y (60% ácido clorhídrico + 30% ácido nítrico + 5% ácido fluorhídrico + 5% agua) respectivamente. Las muestras fueron estudiadas mediante microscopía óptica (Olympus Vanox AHMT3) y electrónica de barrido (Microscopio de barrido Benchtop SEM modelo JCM6000). El macroataque observado en el aluminio refinado y sin refinar se observa en la figura 28.

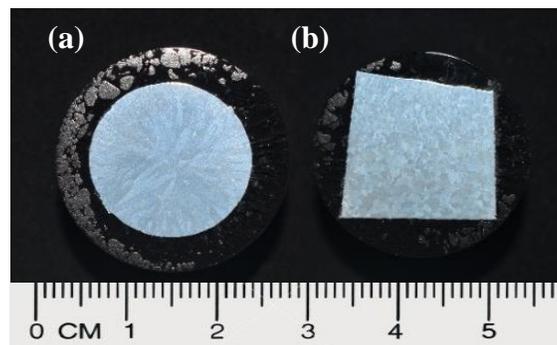


Figura 28. Aluminio refinado (a) y no refinado (b) montado en baquelita y atacado químicamente.

2.4 Fabricación de espumas metálicas

Espumas metálicas de aluminio refinado y no refinado fueron fabricadas mediante el método de infiltración en estado líquido y haciendo uso de cloruro de sodio (NaCl) como material de preforma. Ya que el objetivo principal del presente trabajo de investigación se centra en modificar las propiedades mecánicas de espumas metálicas de aluminio serie 1100, dos tamaños de partícula fueron fabricados (1-2 y 2.38-3.35 mm respectivamente), esto con la finalidad de verificar que las propiedades mecánicas presentan alteraciones debido al agente refinador añadido durante la fundición y no atribuido a otros factores como; tamaño de poro, porosidad o tamaño de pared de poro.

El método de infiltración en estado líquido consiste en fundir el metal en cuestión y hacerlo pasar por los orificios formados entre cada una de las partículas de la preforma. Dicho material de preforma debe cumplir ciertas especificaciones, tales como; estabilidad química con el metal fundido, fácil disolución sin perjudicar el metal, mayor punto de fusión que el material a espumar, entre otras.

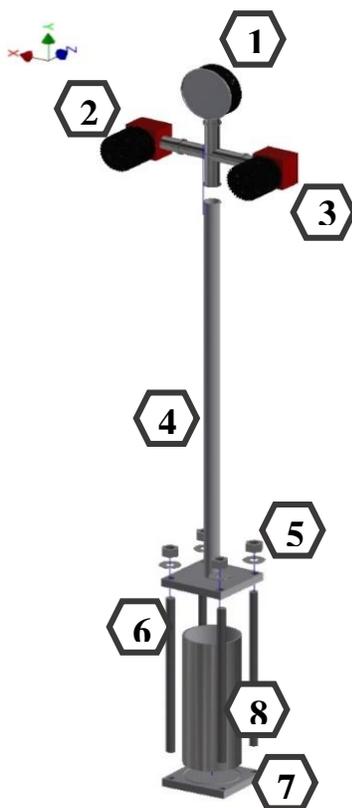


Figura 29. Dispositivo utilizado para la fabricación de espumas metálicas.

Para la fabricación de las espumas metálicas se utilizó el dispositivo mostrado en la figura 29, dicho dispositivo cuenta con un sistema de válvulas que posibilitan el acceso al crisol. La válvula 2 es conectada a una bomba de vacío que permite eliminar todas las impurezas presentes antes de la fundición, la válvula 3 regula el acceso de gas argón que además de generar una atmósfera inerte, es fundamental para la correcta infiltración del metal a través

de los huecos formados por el material de preforma, asimismo, el manómetro señalado con el número 1 otorga la lectura de la presión dentro del dispositivo durante todo el proceso de fabricación. Por otra parte, el mecanismo se conforma de 2 tapas, una superior (4) y una tapa inferior (7), las cuales junto con un sistema de espárragos (6) y tuercas (5) tienen como objetivo sellar completamente el dispositivo para evitar derrame de material durante la infiltración. La parte más importante del proceso se lleva a cabo dentro del crisol señalado con el número (8). Dentro de él es colocada la preforma en la parte inferior, en este caso cloruro de sodio (NaCl), mientras que el metal a espumar es colocado sobre éste, tal como se observa en la figura 30. El dispositivo es introducido a un horno eléctrico vertical marca Carbolite® a una temperatura de 780 [°C] durante una hora, para garantizar que el metal funda completamente.

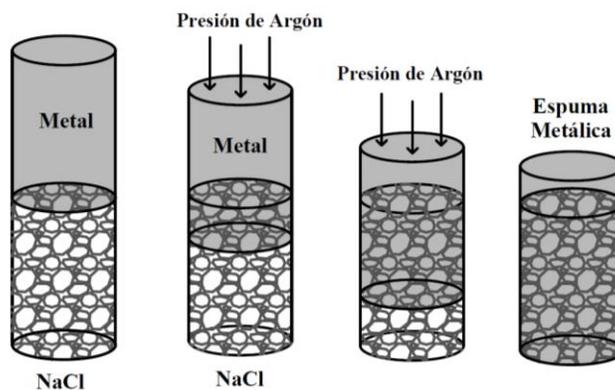


Figura 30. Ejemplificación del proceso de infiltración de una espuma metálica.

Una vez que el metal ha fundido completamente e infiltrado por algunos poros superficiales de la preforma, es añadida una presión de argón llamada “presión de infiltración”, dicha presión tiene como objetivo ayudar al metal a infiltrar completamente por cada uno de los poros de la preforma. La presión de infiltración juega un papel importante en el proceso de fabricación, ya que, si la presión añadida excede del valor permitido, la preforma se compactará y el metal no podrá infiltrar. De la misma forma, si la presión resulta insuficiente, la espuma metálica resultante tendrá grandes zonas de “no infiltración”, es decir, la espuma metálica no será homogénea en toda su estructura. La figura 31 ilustra estos típicos errores cometidos durante la producción de espumas metálicas.

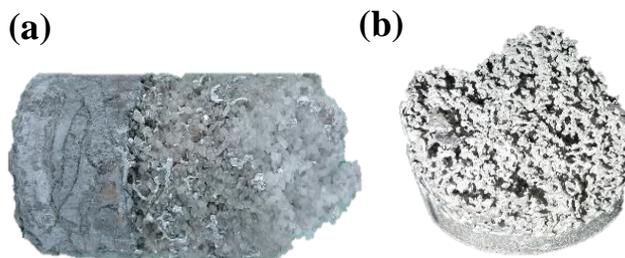


Figura 31. Fallas de infiltración presentes durante la producción de espumas metálicas, (a) exceso de presión de infiltración, (b) Insuficiente presión de infiltración.

Los parámetros utilizados para la fabricación de espumas metálicas en el presente trabajo de investigación se muestran en la tabla 3. Dichos parámetros fueron obtenidos a partir de la realización de una simulación (figura 32) la cual imita el metal líquido infiltrando a través de la preforma, con el objetivo de localizar los puntos críticos durante la infiltración y obtener los parámetros adecuados.

Tabla 3. Parámetros para la fabricación de espumas metálicas de aluminio.

Parámetros de fabricación de espumas metálicas poro 1-2 [mm]		
Vacío	1.3×10^{-1}	[Torr]
Temperatura	780	[°C]
Presión inicial	0.5	$\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$
Presión de infiltración	1.5	$\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$
Parámetros de fabricación de espumas metálicas poro 2.38-3.35 [mm]		
Vacío	1.3×10^{-1}	[Torr]
Temperatura	780	[°C]
Presión inicial	0.5	$\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$
Presión de infiltración	1.25	$\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$

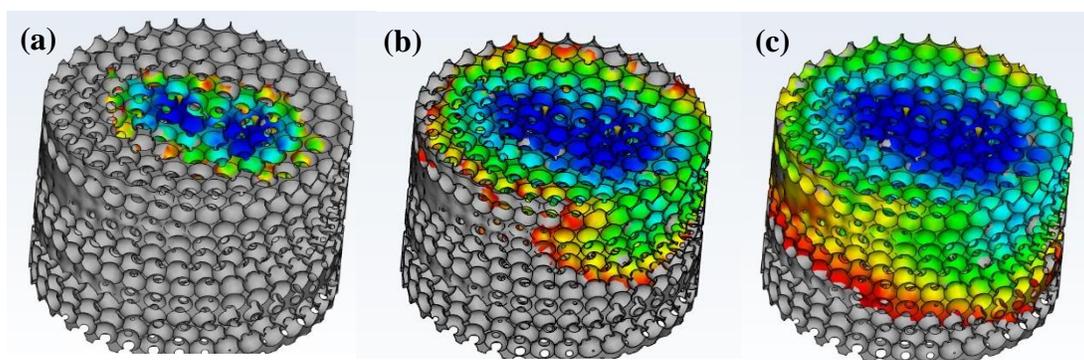


Figura 32. Metal infiltrando a través de la preforma (a) 5% de infiltración, (b) 25% de infiltración y (c) 40% de infiltración.

2.5 Fabricación y preparación de muestras

Una vez obtenidas las espumas metálicas se procedió a la realización del maquinado de las mismas. Cabe mencionar que el proceso de manufactura debe realizarse cuando la espuma metálica aún conserva la sal en su estructura, ya que de lo contrario esta podría deformarse.

El maquinado se realizó a una velocidad de cabezal de 500 [rpm] y cortes sucesivos de 25 milésimas de pulgada hasta obtener un diámetro de 25.4 [mm], para posteriormente realizar

cortes cada 20 [mm] y obtener probetas para ensayos de compresión según lo que establece la norma ASTM E89. En la figura 33 se puede observar el procedimiento efectuado.

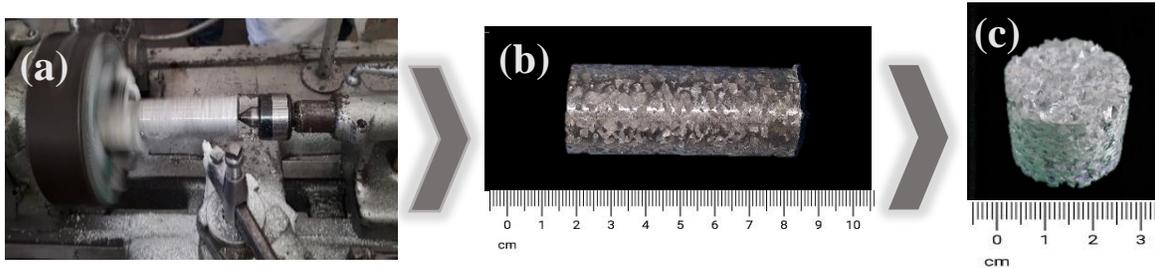


Figura 33. Procedimiento de manufactura efectuado, (a) torneado, (b) cilindro obtenido y (c) probeta de compresión.

Una vez conseguidas las dimensiones deseadas, las muestras fueron sometidas a una limpieza profunda para eliminar todo el cloruro de sodio presente en su estructura. La primera disolución se llevó a cabo sumergiendo la espuma dentro de agua destilada durante 30 minutos. Posteriormente se realizaron 3 baños ultrasónicos de 20 minutos cada uno para garantizar la completa eliminación de la preforma utilizada dentro de la estructura del metal. Al finalizar la disolución, las muestras fueron ingresadas a un secador marca Riossa® a 150 [°C] durante 30 minutos para retirar toda la humedad. Las probetas obtenidas se observan en la figura 34. Es importante mencionar que suprimir totalmente el material utilizado como preforma afianza los resultados obtenidos.



Figura 34. Probeta para ensayos de compresión según la norma ASTM E89.

2.6 Cálculo de la porosidad

Con el objetivo de disminuir las variantes que se pudieran presentar en cada una de las probetas fabricadas y que pudieran ocasionar alteraciones en la cuantificación de la energía absorbida, se llevó a cabo el cálculo de la porosidad en cada una de las muestras, esto se realizó mediante dos procedimientos.

El primer procedimiento se efectuó pesando cada una de las probetas antes y después del proceso de disolución de la sal, posteriormente a partir de la fórmula; $\rho = \frac{m}{V}$ y haciendo uso

de la densidad del aluminio ($2.7 \left[\frac{g}{cm^3}\right]$) se obtuvo el volumen total y el volumen del metal. Una vez obtenidos estos datos se cuantificó la porosidad empleando la siguiente fórmula:

$$Porosidad = \frac{Volumen_{Total} - Volumen_{Metal}}{Volumen_{Total}} \times 100 \dots \dots (Ec. 1)$$

El segundo procedimiento para medir la porosidad se realizó de manera más exacta, pues la cuantificación del volumen del metal presente en la espuma metálica se llevó a cabo con la ayuda de un picnómetro de helio marca Ultrapyc 1200e®. El funcionamiento de dicho equipo se fundamenta en la ley de Boyle-Mariotte que relaciona la presión y el volumen de una determinada cantidad de gas, a una temperatura constante, es decir, cuantifica el desplazamiento del volumen del gas ingresado a la cámara, en este caso helio, realizando una medición muy precisa del volumen real de un sólido, una vez obtenido el volumen, la fórmula anterior fue aplicada del mismo modo para obtener el valor de la porosidad.

Ambas mediciones fueron efectuadas a cada una de las probetas ensayadas para un control más preciso de las características de cada espuma.

2.6 Caracterización mecánica

Dado que la hipótesis planteada indica que las espumas metálicas de aluminio absorberán mayor energía al añadir Al-5Ti-0.25C como elemento refinador, es importante corroborar que en el material sin espumar se cumple esta premisa. Por ello, se realizaron pruebas de compresión en una maquina universal INSTRON® modelo 5500R a 6 probetas sólidas de aluminio refinado y aluminio sin refinar, el ensayo se realizó a una velocidad de cabezal de $0.5 \left[\frac{mm}{min}\right]$ y con una frecuencia de adquisicion de datos de $5 \left[\frac{pts}{seg}\right]$. La figura 35 ejemplifica el ensayo de compresión y la curva esfuerzo-deformación que se obtiene, la cual fue sometida a un analisis de área bajo la curva para demostrar si existe una mayor cantidad de absorcion de energía al someter las muestras a dicho ensayo.

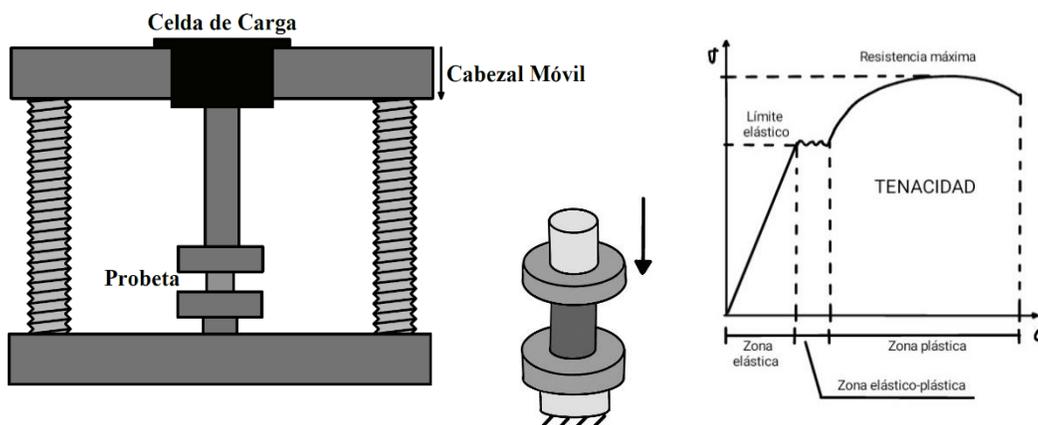


Figura 35. Ejemplificación de un ensayo de compresión.

Las mismas pruebas de compresión se realizaron a las espumas metálicas refinadas y no refinadas, el análisis se llevó a cabo en 6 muestras de cada especie para efectuar un estudio estadísticamente correcto.

2.7 Tratamientos térmicos

Con el objetivo de aumentar la absorción de energía de las espumas metálicas sometidas a pruebas de compresión, se realizó un estudio de calorimetría de barrido diferencial (DSC) con la finalidad de identificar la temperatura a la cual los granos presentes en el aluminio comenzaban a formar una estructura más homogénea, recrystalizando unos a partir de otros.

El estudio DSC permitió conocer la temperatura adecuada para realizar los tratamientos térmicos, siendo está de 480[°C] (figura 36), sin embargo, dado que se desconocían los tiempos óptimos para realizar dicho procedimiento, muestras de espumas metálicas fueron sometidas a tratamientos de 24, 48, 72, 168, 336, 504, 672 y 840 horas, en una mufla convencional marca Carbolite®.

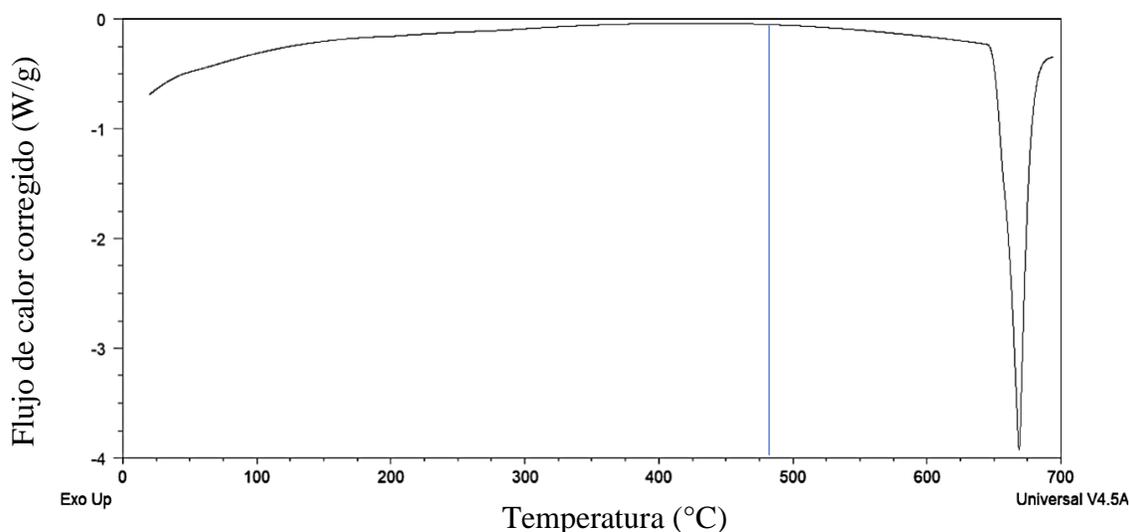


Figura 36. Resultados obtenidos a través de calorimetría de barrido diferencial (DSC).

Todas las muestras fueron analizadas por microscopía óptica (Olympus Vanox AHMT3) y electrónica de barrido (Microscopio de barrido Benchtop SEM modelo JCM6000) con el propósito de realizar un conteo de límites de grano y hallar los parámetros correctos para la realización de los tratamientos térmicos. El conteo de límites de grano se llevó a cabo a partir del software Image J; la figura 37 muestra el análisis realizado y el conteo de partículas presentes en un área determinada.

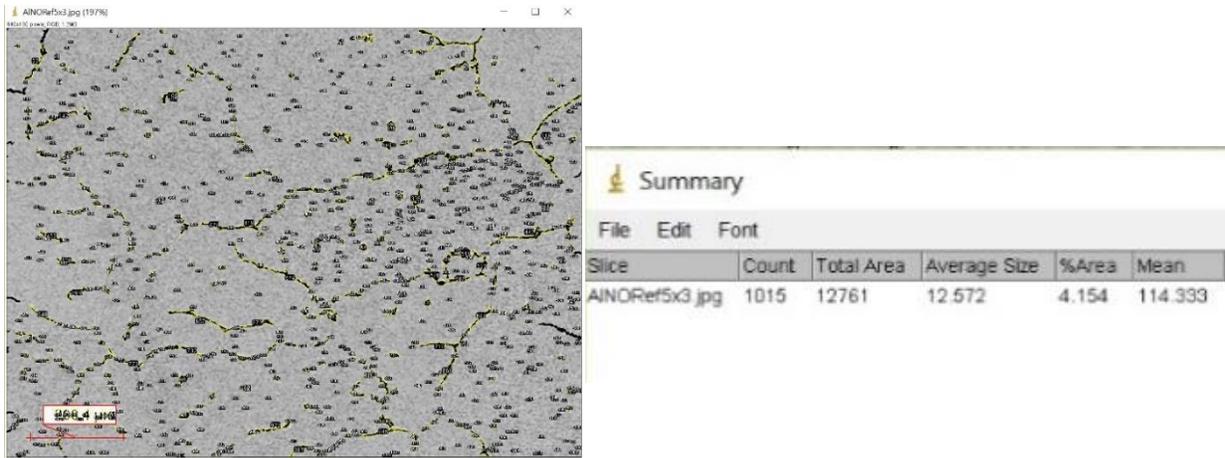


Figura 37. Conteo de límites de grano mediante el software Image J.

Una vez que el tiempo y la temperatura de los tratamientos térmicos fue determinada, se realizaron nuevamente ensayos de compresión de espumas refinadas y no refinadas para examinar si existe beneficio en la absorción de energía de las espumas metálicas sometidas a tratamientos térmicos. Seis espumas metálicas de cada especie (refinadas y no refinadas) fueron ensayadas a compresión para realizar un estudio comparativo estadísticamente correcto. Se realizó un análisis de área bajo la curva de cada uno de los diagramas esfuerzo-deformación obtenidos para calcular la tenacidad de cada una de las probetas.

2.8 Estudio de homogeneidad de poro en espumas metálicas

Puesto que el método de fabricación empleado en el presente trabajo de investigación carece del control total de variables tales como; geometría del agente espaciador, localización de las partículas, control de porosidad, infiltración adecuada a lo largo de toda la estructura, entre otras, se decidió realizar una tomografía en espumas en dos tamaños de poros distintos (1-2 mm y 2.38-3.35 mm). Dicha tomografía consiste en 8 cortes transversales a lo largo de la espuma metálica con la finalidad de medir la superficie en cada uno de los cortes y corroborar que la espuma metálica es homogénea en toda su estructura. La figura 38 ejemplifica los cortes realizados en la espuma metálica.

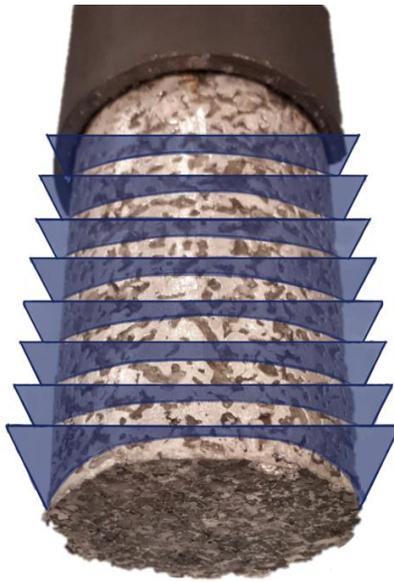


Figura 38. Cortes transversales realizados a una espuma metálica.

Se obtuvieron 8 secciones de cada espuma metálica las cuales fueron pintadas y pulidas para resaltar su superficie y realizar un adecuado conteo del área en cada una de ellas. En la figura 39 se pueden apreciar las secciones finales en dos tipos de tamaño de poro distintos.

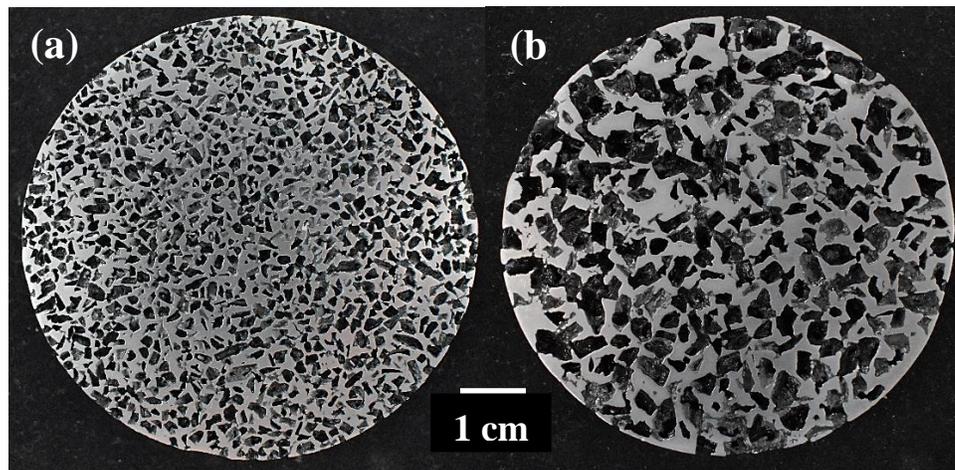


Figura 39. Secciones obtenidas de dos tamaños de poro distintos (a) 1 -2 mm y (b) 2.38-3.35 mm.

El análisis realizado se llevó a cabo nuevamente con ayuda del software Image J, primeramente, se modifican los parámetros de brillo y contraste para tener una mejor visualización de la espuma metálica, posteriormente se rellena el área a calcular para finalmente realizar el conteo de la superficie (figura 40). El estudio descrito anteriormente se efectuó a cada una de las ocho piezas obtenidas de cada espuma metálica para corroborar si la estructura es uniforme a lo largo de toda la espuma.

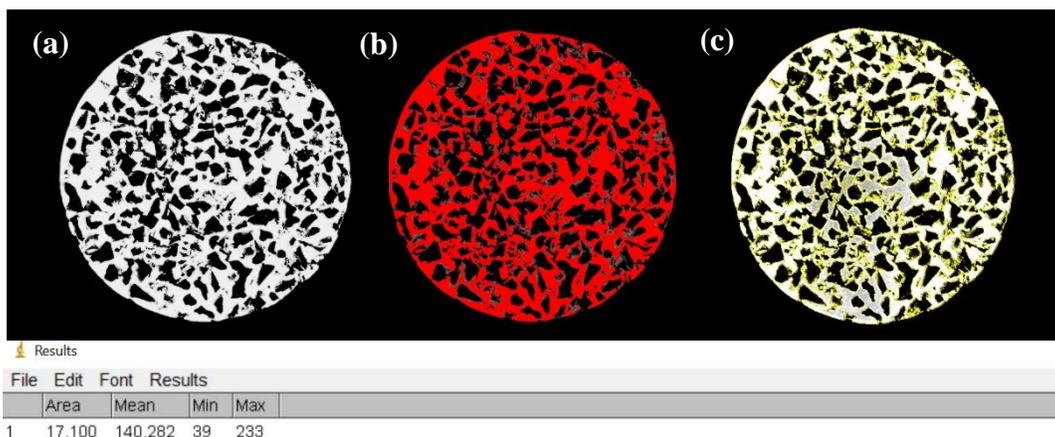


Figura 40. Análisis realizado a cada sección de espuma metálica obtenida (a) ajuste de brillo y contraste, (b) selección de área a calcular y (c) cálculo de área.

Capítulo III: Resultados Y Discusión

3.1 Microestructura de la aleación Al-5Ti-0.25C

El ataque químico efectuado a la aleación Al-5Ti-0.25C reveló la microestructura de las fases presentes, observado la fase Al_3Ti en forma de agujas sobre una matriz de aluminio (figura 41), más adelante dicha conjetura fue corroborada través de análisis de fluorescencia de rayos-X. Además de esto, se observó que el agente refinador exhibía distribuido homogéneamente en toda su estructura el compuesto carburo de titanio, significando un correcto proceso de fabricación de este material.

La morfología y la cantidad de las fases Al_3Ti y TiC presente el en agente refinador, posee una importancia relevante en el presente trabajo de investigación dado que, durante la solidificación del metal a refinar, los principales puntos de nucleación son aquellos formados a partir de dichas fases.

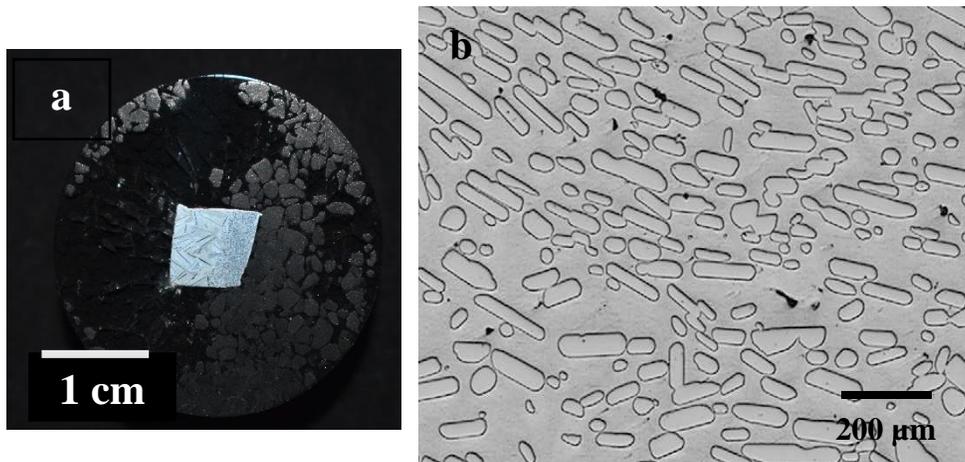


Figura 41. (a) Refinador montado en baquelita y atacado químicamente, (b) microestructura de refinados a 5X.

En la figura 41 se logra observar la morfología de la fase Al_3Ti cuyo tamaño oscila entre 30 y 260 [μm]. Cabe destacar que la fase se encuentra distribuida homogéneamente a lo largo de toda la pieza fundida, por lo cual podemos concluir que el tratamiento térmico de difusión fue realizado satisfactoriamente.

Por otra parte, el análisis de microscopía electrónica de barrido reflejó que partículas de carburo de titanio (TiC) se encontraban distribuidas en el agente refinador de forma uniforme (figura 42), tales partículas presentaron dimensiones de 0.3 a 1.5 [μm], lo cual denota que el agente refinador fue fabricado de forma adecuada y fue reproducido conforme a lo reportado en la literatura [51,53].

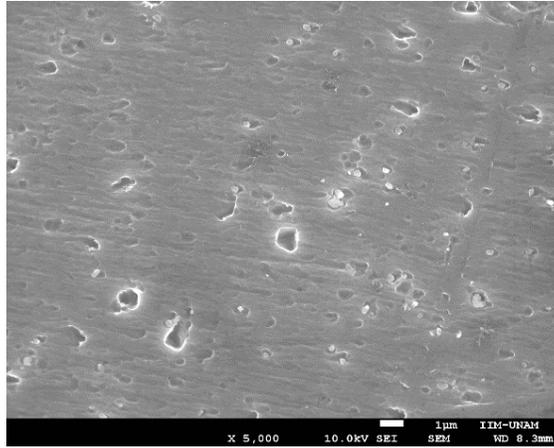


Figura 42. Partículas de TiC observadas mediante microscopia electrónica de barrido 5000X.

3.2 Resultados del estudio adicional de la aleación Al-5Ti-0.25C

Las cintas metálicas obtenidas a partir de la técnica “melt spinning” (figura 43), mostraron en su superficie una microestructura tipo granular con partículas de TiC distribuidas dentro de los granos, dichas partículas con un intervalo de magnitud que varió de 0.25 a 0.75 [μm] (figura 44). Se puede argumentar que los parámetros utilizados para la producción de este tipo de materiales fueron los correctos, esto fundamentado en la cantidad y la distribución de partículas de TiC en toda la microestructura, lo cual, como ya se mencionó con anterioridad, propician los principales puntos de nucleación durante la solidificación.

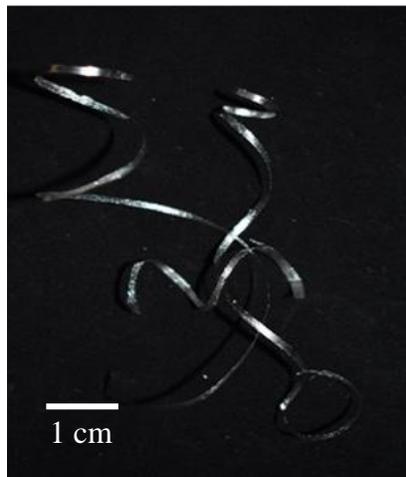


Figura 43. Cintas obtenidas mediante la técnica “melt spinning”.

La razón principal por la cual se realizó el presente estudio se centra en los beneficios que se pueden obtener de la solidificación rápida. Al elevar a grandes temperaturas la aleación Al-5Ti-0.25C, propiciamos la formación y distribución de nuevas partículas de Al_3Ti y TiC las cuales al entrar en contacto con el disco de cobre quedan “congeladas” dentro del material.

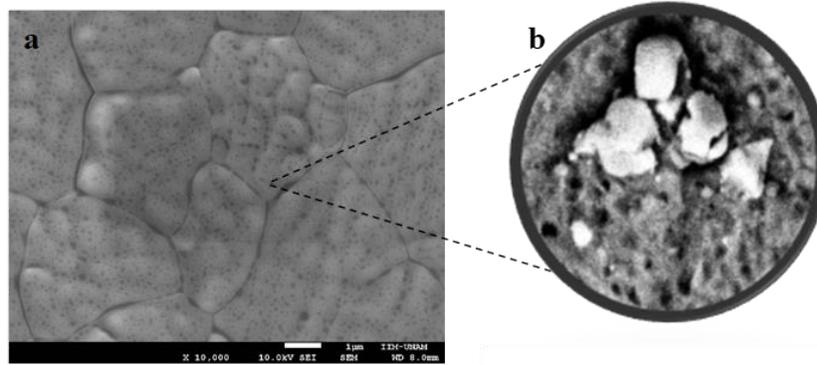


Figura 44. Microscopia electrónica de barrido realizada a cintas de refinador a) 10,000X y b) 25,000X.

3.3 Refinamiento de aluminio 1100

El refinamiento del aluminio serie 1100 se llevó a cabo mediante dos técnicas; a través de refinador en barra y con cintas metálicas fabricadas mediante solidificación rápida, los resultados obtenidos de ambos procedimientos se presentan a continuación.

3.3.1 Aluminio con refinador en barra

El efecto obtenido en el aluminio serie 1100 al añadir durante el proceso de fundición el agente refinador Al-5Ti-0.25C se observa en la figura 45. Pese a que a primera instancia el macroataque revelara una estructura columnar en el aluminio refinado, el análisis de microscopia óptica dejó ver que existía una reducción considerable en el tamaño de grano.

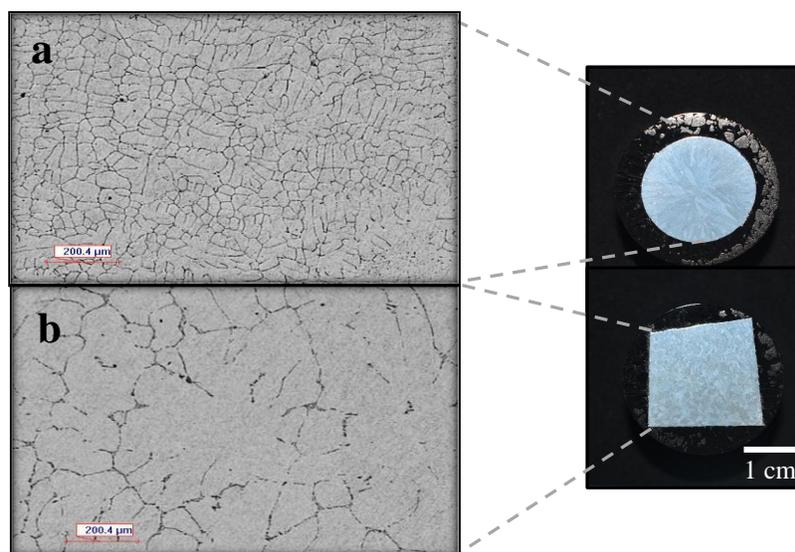


Figura 45. Metalografías realizadas al aluminio a) refinado 5X y b) no refinado 5X.

Con el objetivo de cuantificar la eficacia del agente Al-5Ti-0.25C como elemento refinador, se realizó una cuantificación del área ocupada por los límites de grano presentes en la estructura con ayuda del software image J, revelando que estos ocupaban un 10.54% más área en comparación con los límites de grano presentes en el aluminio de fundición, la figura 46 exhibe el conteo de partículas realizado por el software para cada una de las imágenes.

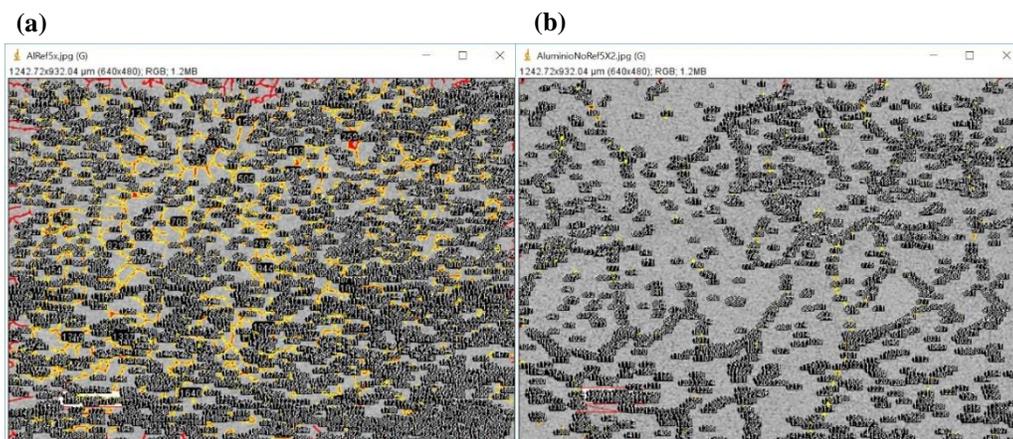


Figura 46. *Conteo de partículas realizadas para (a) aluminio refinado y (b) aluminio sin refinar (aumento 5X).*

De igual manera, se llevó a cabo una evaluación del tamaño de grano obtenido al refinar el aluminio comercial serie 1100, dando como resultado un tamaño promedio de 38.3 [μm] al medir 200 granos de forma aleatoria a lo largo de toda la microestructura.

3.3.2 Aluminio refinado con cintas

El procedimiento descrito con anterioridad fue ejecutado del mismo modo para cuantificar la eficacia del agente refinador Al-5Ti-0.25C en forma de cintas. El análisis realizado con el software Image J exhibió un aumento del 3.76% en la cantidad de límites de grano en el aluminio refinado con esta modalidad en comparación con el aluminio serie 1100 de fundición. Sin embargo, al observar la microestructura obtenida (figura 47) es posible apreciar que aún existe estructura dendrítica dentro de los granos, lo cual resulta poco favorable para la mejora de las propiedades mecánicas.

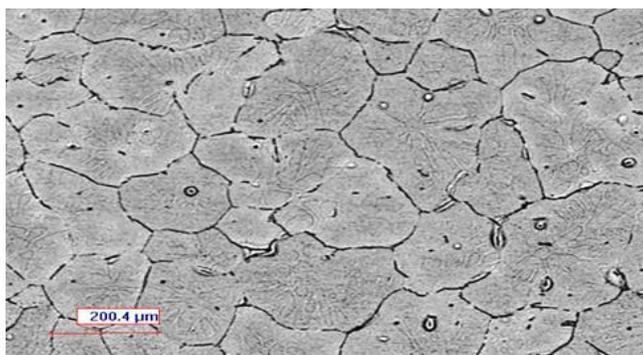


Figura 47. *Microestructura de aluminio refinado a partir de cintas 5X.*

Del mismo modo se realizó la medición aleatoria de 200 granos a lo largo de toda la muestra con lo cual se obtuvo un promedio de tamaño de grano de 250.27 [μm], 6.5 veces más grandes que las partículas en el aluminio refinado con barra. No obstante, presentó una microestructura más homogénea en toda la muestra.

En vista de que el aluminio refinado con cintas presentaba microestructura dendrítica y un tamaño de grano mayor que el aluminio refinado en barra, se estipuló continuar con la investigación haciendo uso de este último.

3.4 Evaluación de las propiedades mecánicas

Con la finalidad de evaluar el efecto causado en las propiedades mecánicas del aluminio debido al refinador de grano, ensayos de compresión fueron efectuados a aluminio refinado y aluminio sin refinar de acuerdo a lo que establece la norma ASTM E89. Para un estudio estadísticamente correcto, 6 muestras de cada especie fueron ensayadas y sometidas a un análisis de cálculo de área bajo la curva esfuerzo-deformación, de esta forma se evaluó la cantidad de absorción de energía de cada probeta.

La figura 48 expone las curvas obtenidas de los ensayos efectuados para aluminio refinado y aluminio sin refinar. Como puede apreciarse en la imagen, el aluminio refinado requirió mayor cantidad de esfuerzo para su deformación, de la misma manera, el estudio realizado a ambas curvas reveló que el aluminio refinado absorbía un 5% más energía en comparación con el aluminio serie 1100 de fundición, lo cual se atribuye directamente a la adición del compuesto Al-5Ti-0.25C durante la fundición. Asimismo, se constata que el tamaño de grano presente en el material influye en la anisotropía del mismo[54], pues al poseer una microestructura con mayor homogeneidad a lo largo de todo el material, las propiedades mecánicas como la absorción de energía se verán enriquecidas.

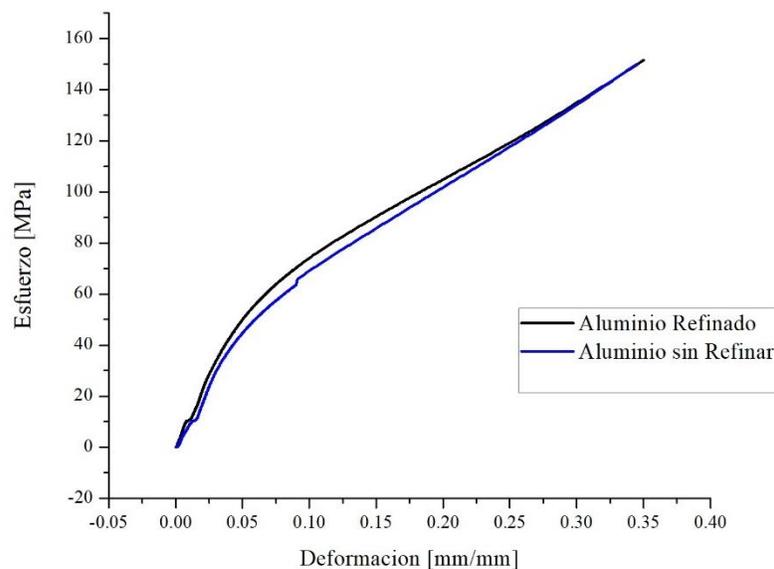


Figura 48. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para aluminio refinado y aluminio sin refinar.

Por otra parte, la figura 49 expone la deformación efectuada a ambos tipos de aluminio (refinado y no refinado), con lo cual se puede apreciar que en la probeta que contenía refinador de grano se llevó a cabo una deformación más homogénea, es decir, el abarrilamiento de la muestra se produjo con mayor uniformidad en comparación con la muestra de aluminio serie 1100, esto se encuentra estrechamente relacionado con la morfología, distribución y tamaño de grano.

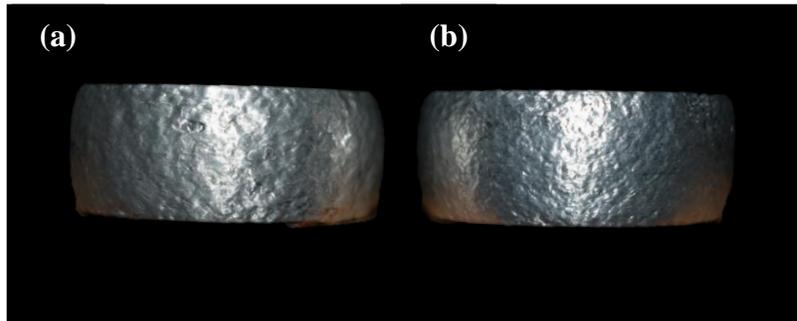


Figura 49. Probetas ensayadas a compresión de Aluminio a) sin refinador y b) con refinador.

3.5 Resultados de la fabricación de espumas metálicas.

Espumas metálicas de aluminio refinado y sin refinar fueron obtenidas a partir del método de infiltración en estado líquido. Considerando que el objetivo principal del presente estudio es incrementar la absorción de energía de este tipo de materiales, sin realizar modificaciones significativas en la composición, se fabricaron 2 tipos de poro; 1-2 mm y 2.38-3.35 mm, esto con la finalidad de corroborar que las alteraciones en las propiedades mecánicas sean debido a la adición del compuesto Al-5Ti-0.25C y no debido a otros factores como; tamaño de poro, porosidad, distribución de los poros, entre otros.

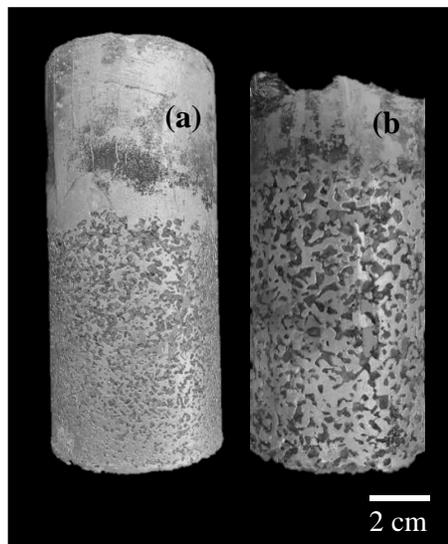


Figura 50. Espumas metálicas obtenidas del proceso de infiltración en estado líquido, (a) 1-2mm y (b) de 2.38-3.35 mm.

La figura 50 muestra las espumas obtenidas a partir de este método, cada una con un diámetro de 6.5 [cm] y 13 [cm] de altura. Ya que el método de infiltración en estado líquido utilizando cloruro de sodio como preforma contiene variables que no son factibles de controlar durante el proceso de fabricación, como lo son; la geometría y la distribución de las partículas de NaCl, la sinterización entre ellas durante la fundición, la porosidad, el tamaño de pared de poro, entre otros factores, se optó por evaluar las propiedades mecánicas de 6 probetas obtenidas de una misma espuma metálica, esto con el fin de reducir las variables antes mencionadas y evitar que tengan algún efecto sobre la determinación de las propiedades mecánicas (figura 51).

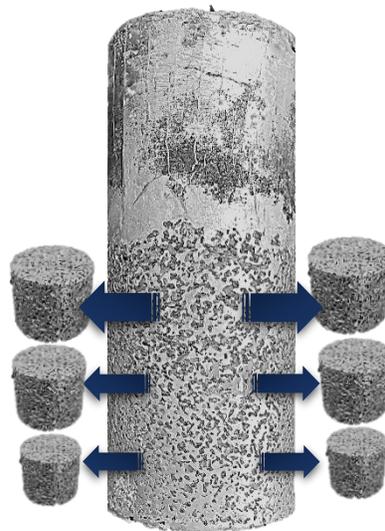


Figura 51. Ejemplificación de las probetas obtenidas de una espuma metálica.

3.6 Estudio de homogeneidad de poro en espumas metálicas

El análisis efectuado a lo largo de las espumas metálicas dejó ver que el método de infiltración en estado líquido para ambos tamaños de poro se realizó correctamente con los parámetros mencionados en la sección 2.4. El área contabilizada en cada una de las 8 secciones obtenidas de fraccionar las espumas metálicas, mostraron un comportamiento similar, por lo cual se puede argumentar que las espumas metálicas mantienen una estructura homogénea a lo largo de la misma. Las Tabla 4 y 5 exponen el área contabilizada en cada una de las 8 secciones obtenidas para ambos tamaños de poro, así como la porosidad superficial obtenida para cada muestra.

Tabla 4. Porosidad superficial obtenida para el análisis de una espuma metálica dividida en 8 secciones (Tamaño de poro de 2.38-3.35).

ESPUMAS DE PORO GRANDE 2.38-3.35 MM			
ESPUMA	Área ocupada por los poros	% de área ocupada por metal	Porosidad superficial
1	12.872	41.029	58.971
2	13.438	42.833	57.167
3	13.880	44.242	55.758
4	13.002	41.443	58.557
5	13.478	42.961	57.039
6	12.623	40.235	59.765
7	12.645	40.305	59.695
8	13.355	42.568	57.432

Tabla 5. Porosidad superficial obtenida para el análisis de una espuma metálica dividida en 7 secciones (Tamaño de poro de 1-2 mm).

ESPUMAS DE PORO CHICO 1-2 MM			
ESPUMA	Área ocupada por los poros	% de área ocupada por metal	Porosidad superficial
1	17.260	55.015	44.985
2	16.982	54.129	45.871
3	17.150	54.665	45.335
4	17.521	55.847	44.153
5	16.993	54.164	45.836
6	17.182	54.767	45.233
7	17.215	54.872	45.128

Como se puede observar en ambas tablas, las secciones mostraron un comportamiento muy similar entre ellas, con lo cual se puede descartar que la alteración en las propiedades mecánicas se deba a una variación en la morfología de las muestras ensayadas. La figura 52 ejemplifica el comportamiento de la porosidad de acuerdo con la altura a la que fueron obtenidas las muestras. Cabe destacar que este estudio se realizó con la finalidad de comprobar que los parámetros de fabricación fueron los adecuados para cada uno de los dos tamaños de poro trabajados en la presente investigación, asimismo, se buscó minimizar el error debido a las variables que son inasequibles de controlar durante el proceso de fabricación.

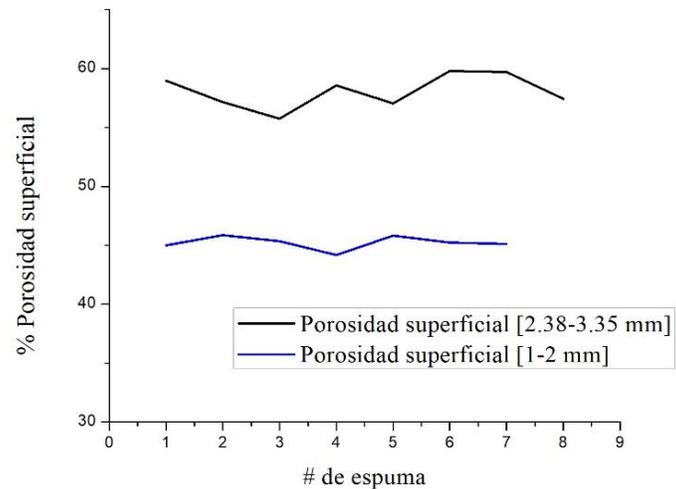


Figura 52. Comportamiento de la porosidad superficial a lo largo de una espuma metálica.

3.7 Resultados de porosidad

Una vez obtenidas las probetas para ensayos de compresión y eliminado toda la sal presente en la estructura, las muestras se sometieron a un estudio de medición de porosidad tanto teórica como experimentalmente. Los resultados de ambas mediciones se muestran en la tabla 6 para ambos tipos de tamaño de poro.

Tabla 6. Resultados obtenidos al medir porosidad en cada probeta.

		<i>Medición Experimental</i>		<i>Picnómetro</i>		Porcentaje de error 1-2mm	Porcentaje de error 2.38-3.35mm
		2.38-3.35 [mm]	1-2 [mm]	2.38-3.35 [mm]	1-2 [mm]		
		Porosidad [%]	Porosidad [%]	Porosidad [%]	Porosidad [%]		
<i>Espumas metálicas sin refinador de grano</i>	1	64.23	63.92	64.89	65.1	1.81	1.02
	2	62.9	63.4	65.23	62.9	0.79	3.57
	3	63.1	62.87	64.6	63.25	0.60	2.32
	4	62.8	64.99	63.14	64.23	1.18	0.54
	5	63.4	65.7	64.2	64.34	2.11	1.25
	6	62.9	63.8	63.5	64.76	1.48	0.94
<i>Espumas metálicas con refinador de grano</i>	1	64.1	63.6	65.23	63.45	0.24	1.73
	2	63.5	62.8	65.122	63.56	1.20	2.49
	3	63.8	63.5	65.1	63.87	0.58	2.00
	4	62.9	63.4	63.98	64.12	1.12	1.69
	5	63.7	64.8	64.1	64.29	0.79	0.62
	6	63.9	64.33	62.98	65.4	1.64	1.46

Los resultados obtenidos con ambos procedimientos dejan ver que la porosidad para ambos tipos de espumas metálicas se encuentra en un rango de 64% de porosidad, con lo cual se puede garantizar que poseen características similares y que cualquier alteración en la medición de las propiedades mecánicas no está asociado a cambios en la porosidad.

De la misma forma, al comparar ambos métodos para cuantificar la porosidad de las muestras, el error relativo más grande que se obtiene resulta ser de 3.57 y el menor de 0.60, dichos valores se localizan en un intervalo permitido para los fines del presente trabajo de investigación.

3.8 Caracterización microestructural de espumas metálicas

El análisis metalográfico efectuado a ambos tipos de espumas metálicas (refinadas y sin refinar), se muestra en la figura 53. En ella se observa claramente las modificaciones sufridas por el aluminio al añadir el compuesto Al-5Ti-0.25C durante el proceso de fabricación, de la misma forma se percata que la estructura posee una distribución más homogénea, así como una mayor cantidad de límites de grano en comparación con la espuma metálica fabricada con aluminio puro.

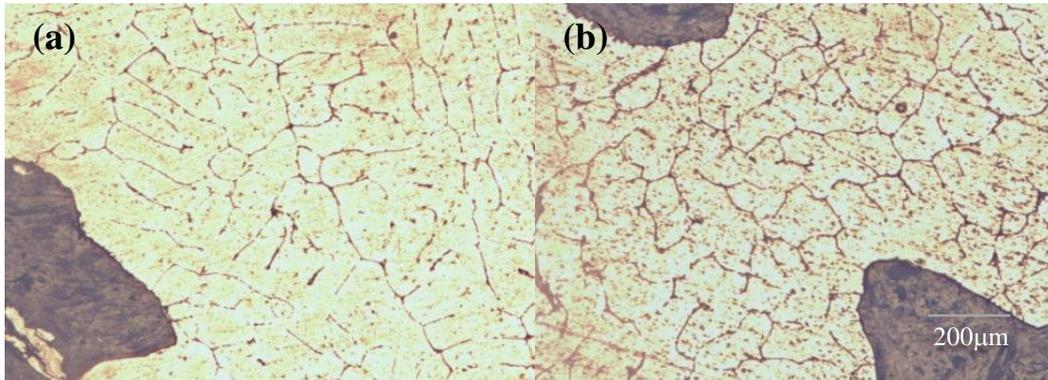


Figura 53. Microestructura de las espumas metálicas observadas en microscopio óptico 50X: a) aluminio serie 1100, b) aluminio serie 1100 + Al-5Ti-0.25C.

Asimismo, el análisis de microscopía electrónica de barrido efectuado a las espumas metálicas exhibe de forma más evidente el aumento de partículas mencionado anteriormente (figura 54). En dicha imagen se observa una reducción clara del tamaño de dendritas presentes en el aluminio comercial al añadir el agente refinador, de igual manera se aprecia una mayor homogeneización de las mismas. Las modificaciones sufridas se deben a que la adición del compuesto Al-5Ti-0.25C provocó un aumento en el número de embriones durante el proceso de solidificación, dando lugar a la nucleación de los cristales, modificado así la estructura del aluminio, los resultados son satisfactoriamente comparados con los reportados en la literatura [55].

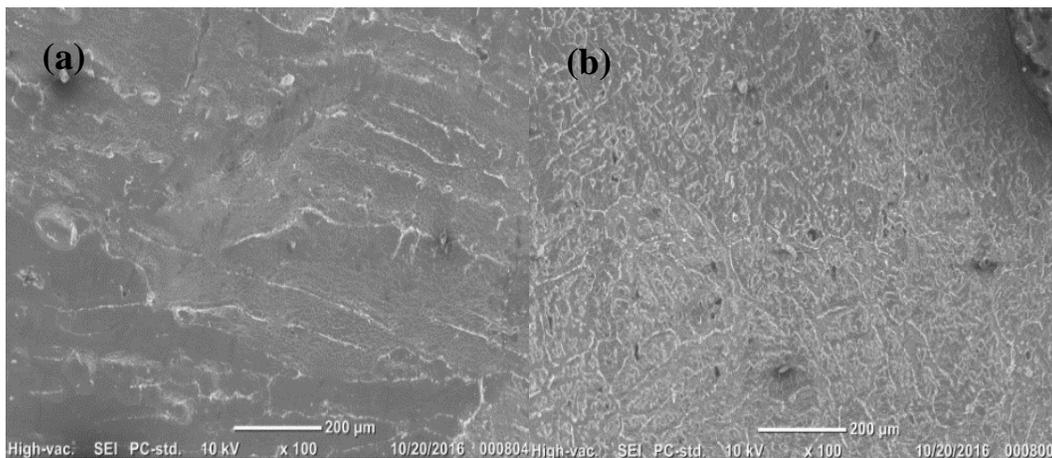


Figura 54. Microestructura de las espumas metálicas observadas en microscopio electrónico de barrido 100X, (a) aluminio serie 1100 y (b) aluminio serie 1100 + Al-5Ti-0.25C.

La cuantificación del aumento de partículas se realizó con ayuda del software Image J. El análisis se llevó a cabo en un área unitaria de cada una de las diferentes fotografías expuestas anteriormente, en el aluminio comercial se contabilizaron 5670 partículas, mientras que en aluminio refinado se encontraron 16214, representando esto un aumento de partículas de 185% en la microestructura del aluminio refinado.

3.9 Evaluación de las propiedades mecánicas de espumas metálicas

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las pruebas de compresión realizadas a ambos especímenes, exhibieron que las espumas metálicas que contienen el agente Al-5Ti-0.25C absorbían mayor cantidad de energía. La tabla 7 evidencia los resultados obtenidos al realizar el análisis de área bajo la curva en cada una de las 6 espumas ensayadas para cada especie.

Tabla 7. Resultados obtenidos del análisis de área bajo la curva realizado a las espumas metálicas.

ESPUMAS METÁLICAS				
	Energía absorbida [MPa]			
	Refinada	Sin Refinar	Refinadas	Sin Refinar
	1-2 mm	1-2 mm	2.38-3.35 mm	2.38-3.35 mm
1	8.039	7.23	11.169	10.2
2	8.99	7.53	11.678	10.6
3	9.05	7.82	11.98	10.98
4	8.32	7.89	11.78	11.17
5	8.78	7.12	12.12	10.66
6	8.94	8.12	12.45	11.22
PROMEDIO	8.69	7.62	11.86	10.81

Como se puede observar en la Tabla 7, las espumas metálicas de tamaño de poro de 1-2 mm absorbieron 13.38% más energía en comparación con aquellas que no contenían refinador. De la misma forma, las espumas metálicas de tamaño de poro de 2.38-3.35 mm absorbieron un 9.71% más energía que las espumas metálicas sin refinar.

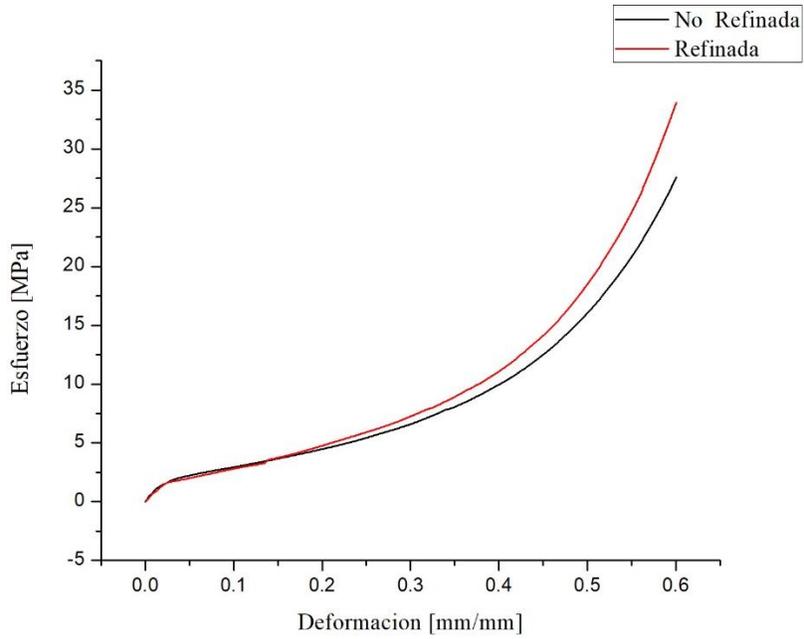


Figura 55. Curva esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas (1-2mm).

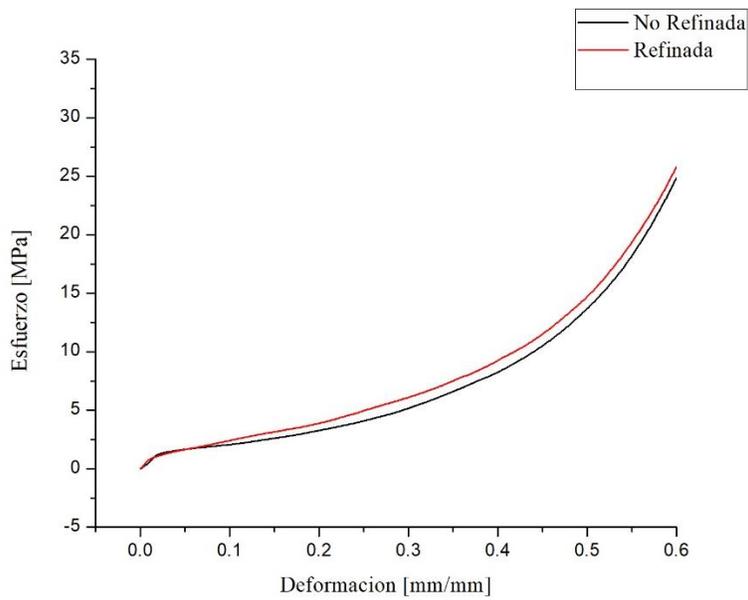


Figura 56. Curva esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas (2.38-3.35mm).

3.10 Resultados de los tratamientos térmicos efectuados

Con la finalidad de aumentar la cantidad de energía absorbida por las espumas metálicas que contenían refinador de grano, estas se sometieron a un tratamiento térmico de 480°C a diferentes tiempos.

Debido a que no se encontraron grandes variaciones en la microestructura en los tratamientos térmicos efectuados a 24, 48, y 72 horas, se decidió continuar con el tratamiento a 168, 336, 504, 672 y 840 horas.

Las siguientes imágenes muestran el comparativo realizado en la microestructura de las espumas metálicas sometidas a los tratamientos térmicos antes mencionados, así como su comparación con aquellas que no poseían el compuesto Al-5Ti-0.25C.

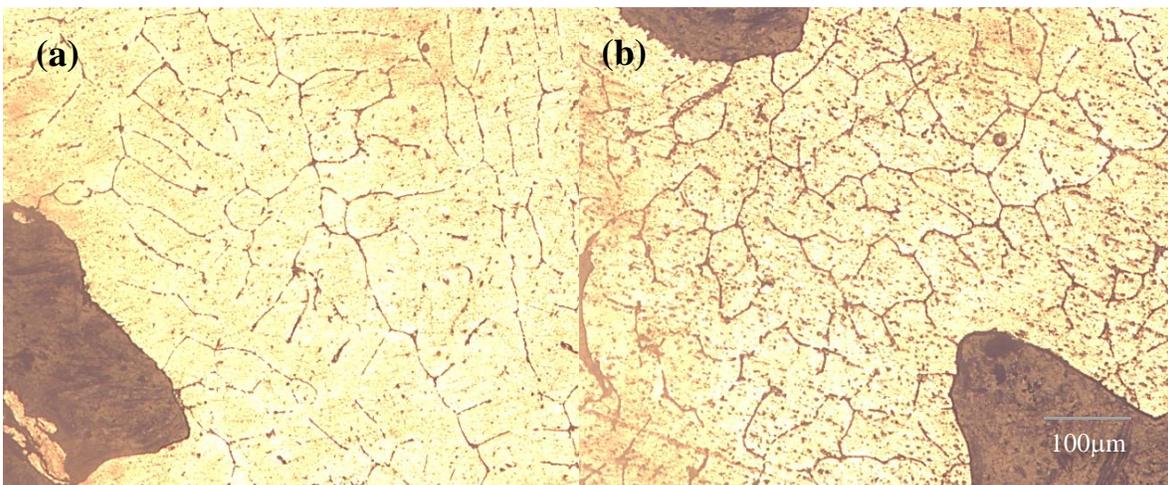


Figura 57. Microestructura de espuma metálica (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).

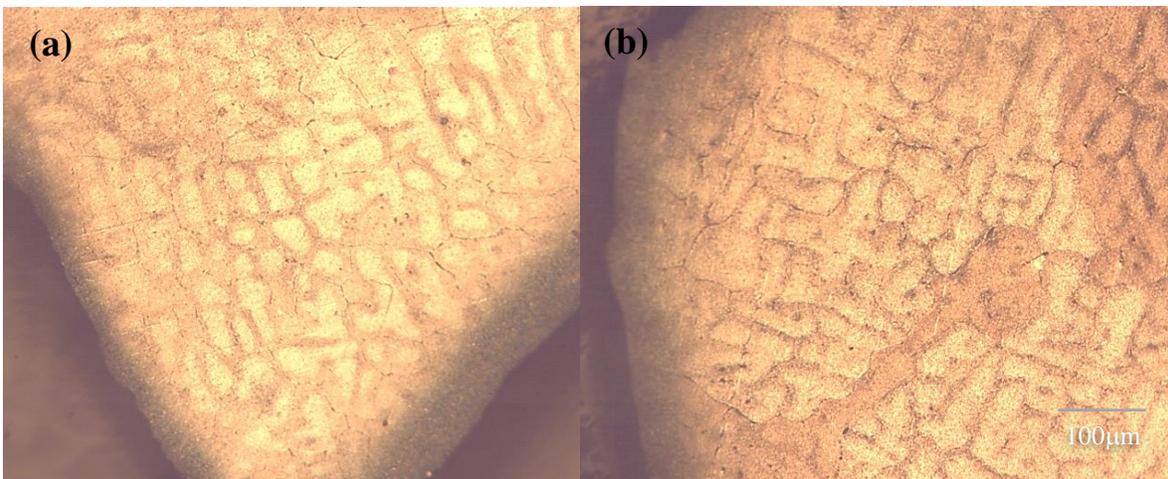


Figura 58. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 168 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).

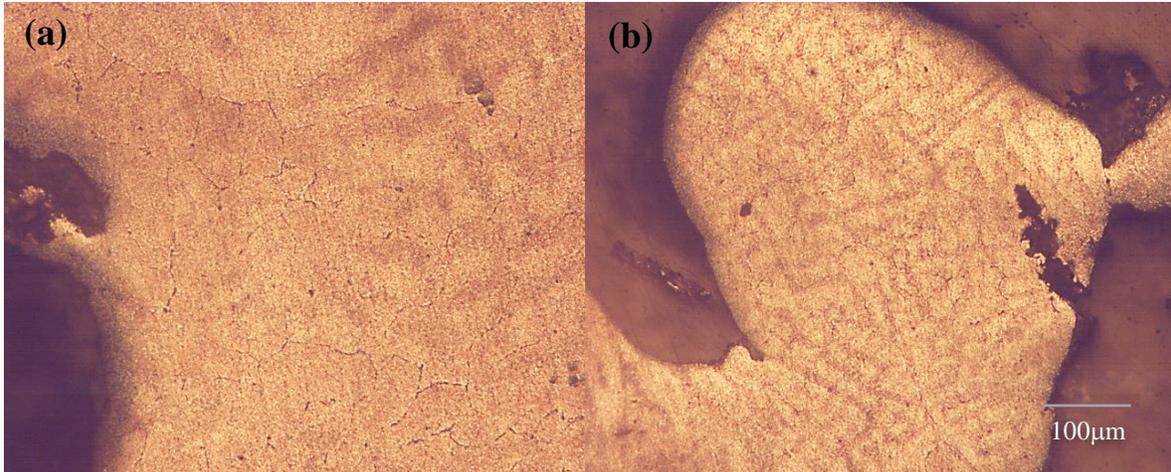


Figura 59. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 336 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).

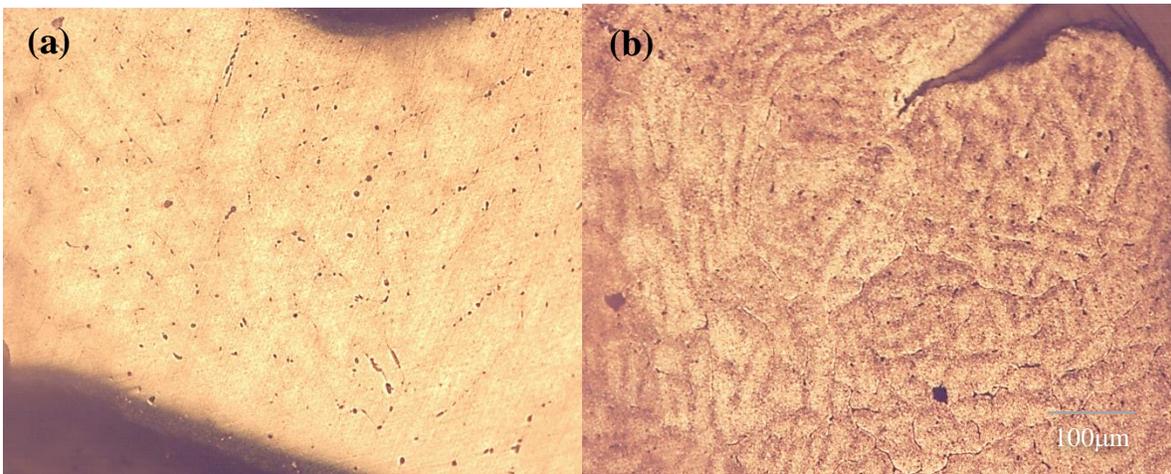


Figura 60. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 504 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).

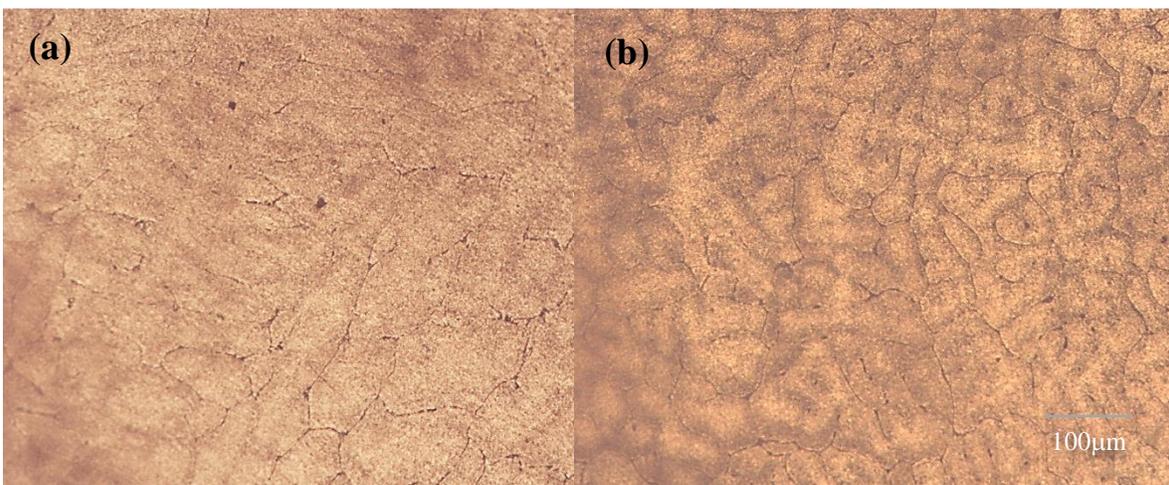


Figura 61. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 672 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).

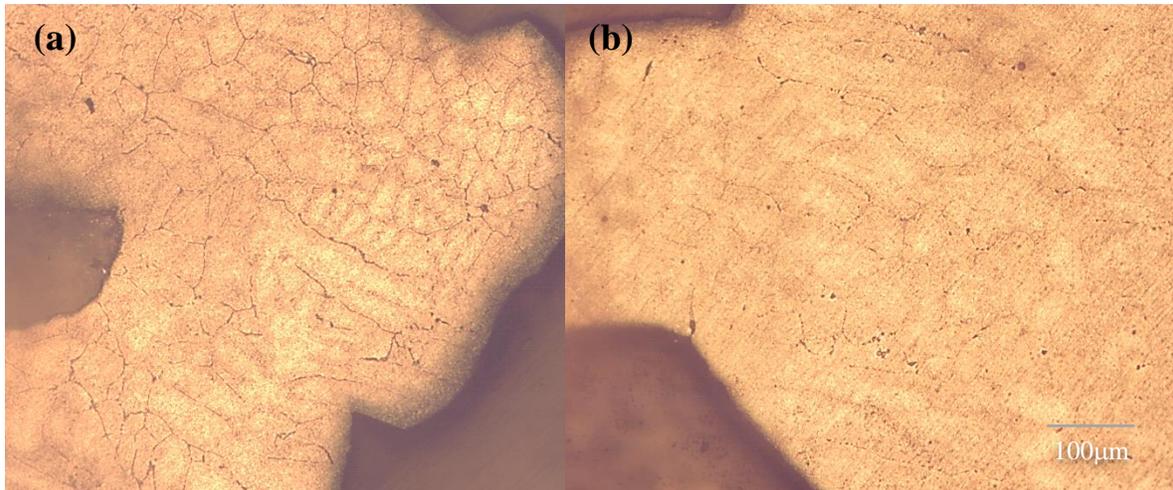


Figura 62. Microestructura de espumas metálicas sometidas a tratamiento térmico de 840 horas (a) sin agente refinador, (b) con agente refinador (Aumento 5X).

Como se puede observar en las imágenes anteriores, los tiempos de 504 y 672 horas mostraron una mayor homogeneización de los límites de grano, así como un aumento en la cantidad de los mismos, sin embargo, el análisis óptico no resulta suficiente para establecer un tiempo adecuado de tratamiento térmico, por dicha razón, se realizó una medición del área y el perímetro de 100 granos en cada una de las muestras tratadas, con la finalidad de conocer cual poseía el tamaño de grano más pequeño ya que este es el objetivo principal de añadir el compuesto Al-5Ti-0.25C durante la producción de espumas metálicas.

Como producto de la medición de 100 granos en cada una de las muestras tratadas térmicamente, se construyeron las gráficas mostradas a continuación. La figura 63 muestra el comportamiento del área del grano al aumentar el tiempo de tratamiento térmico, en esta grafica se puede observar que el grano más pequeño se consigue alrededor de las 500 horas.

De la misma forma, la figura 64 presenta el comportamiento del perímetro del grano al aumentar el tiempo de tratamiento térmico e igualmente que, en el caso anterior, el tamaño más pequeño de grano se localiza alrededor de las 500 horas.

Resulta evidente en ambas imágenes que la adición del compuesto Al-5Ti-0.25C altera considerablemente el tamaño de grano presente en la microestructura de las espumas metálicas, por lo cual se valida la eficacia y la correcta producción de este compuesto como agente refinador, tal como se ha reportado en la literatura con otras series de aluminio [56].

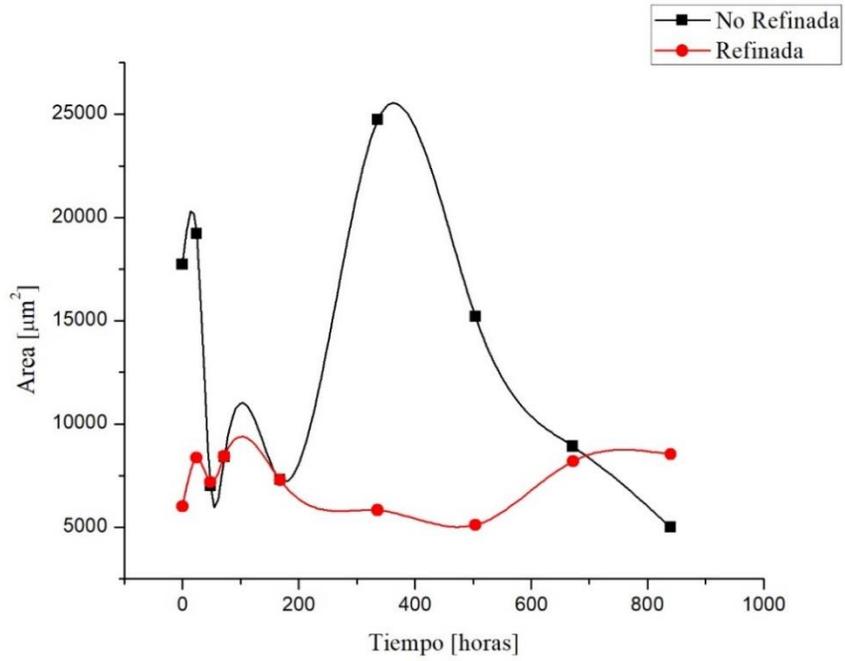


Figura 63. Comportamiento del área del grano al aumentar el tiempo de tratamiento térmico.

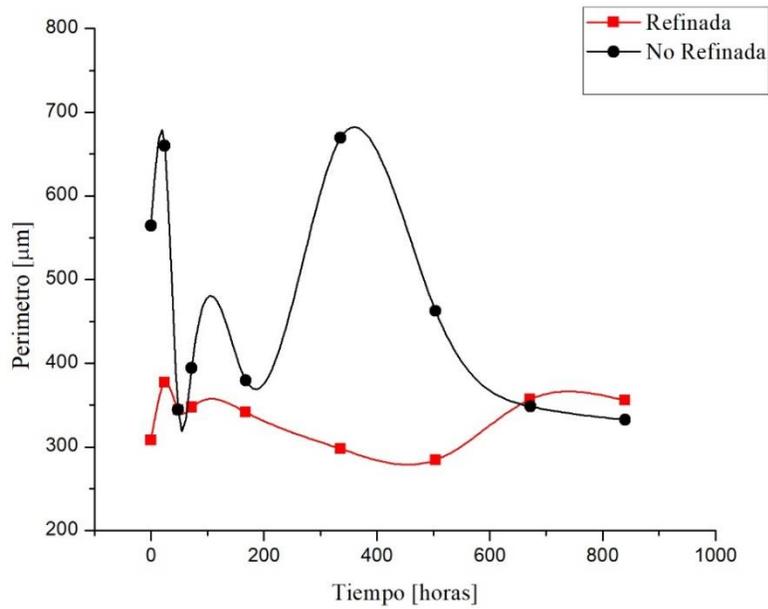


Figura 64. Comportamiento del perímetro del grano al aumentar el tiempo de tratamiento térmico.

3.11 Pruebas mecánicas posteriores al tratamiento térmico.

Con el objetivo de cuantificar el beneficio de los tratamientos térmicos en la absorción de energía de las espumas metálicas, se realizaron nuevamente pruebas de compresión. Dichas pruebas de compresión fueron realizadas de la misma manera a las espumas que no contenían refinador, esto con la finalidad de obtener un estudio comparativo correcto.

La Tabla 8 evidencia la cantidad de energía absorbida por cada una de las 6 muestras ensayadas de los dos tipos de poro sometidas a un 60% de deformación. Como se puede observar en ella, las espumas metálicas de tamaño de poro de 2.38-3.35 mm absorbieron en promedio un 19.16% más energía en comparación con aquellas que no poseían el agente refinador. Por otra parte, las espumas fabricadas con un tamaño de poro de 1-2mm absorbieron un 31.2% más energía que las espumas sin refinar. Gracias a estos resultados es posible aseverar que el aumento en la cantidad de absorción de energía está relacionado con la adición del compuesto Al-5Ti-0.25C y no debido a otros factores, diversos autores han estudiado el efecto del titanio y el carbono en las aleaciones de aluminio, obteniendo resultados comparables con los aquí reportados [56-57].

Tabla 8. Resultados obtenidos del análisis de área bajo la curva realizado a las espumas metálicas posteriormente a los tratamientos térmicos.

ENERGÍA ABSORBIDA [MPA]				
	Refinada	Sin Refinar	Refinadas	Sin Refinar
	1-2 mm	1-2 mm	2.38-3.35 mm	2.38-3.35 mm
1	23.49	17.58	24.53	21.38
2	22.35	18.01	25.32	22.55
3	22.28	17.29	25.52	21.91
4	23.47	18.29	25.8	22.02
5	23.59	17.52	26.89	21.42
6	23.86	17.23	27.85	21.6
PROMEDIO	23.17	17.65	25.99	21.81

Las gráficas obtenidas de los ensayos de compresión realizados se observan en la figura 65 y 66. Resulta evidente el beneficio obtenido en la capacidad de absorción de energía de las espumas metálicas al añadir el compuesto Al-5Ti-0.25C.

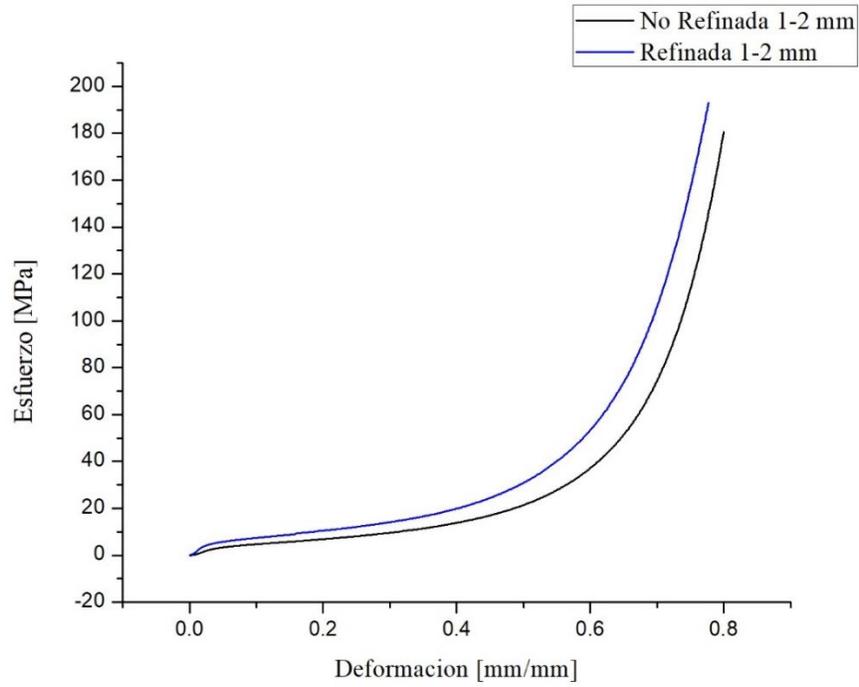


Figura 65. Gráfica esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas posterior a los tratamientos térmicos (1-2mm).

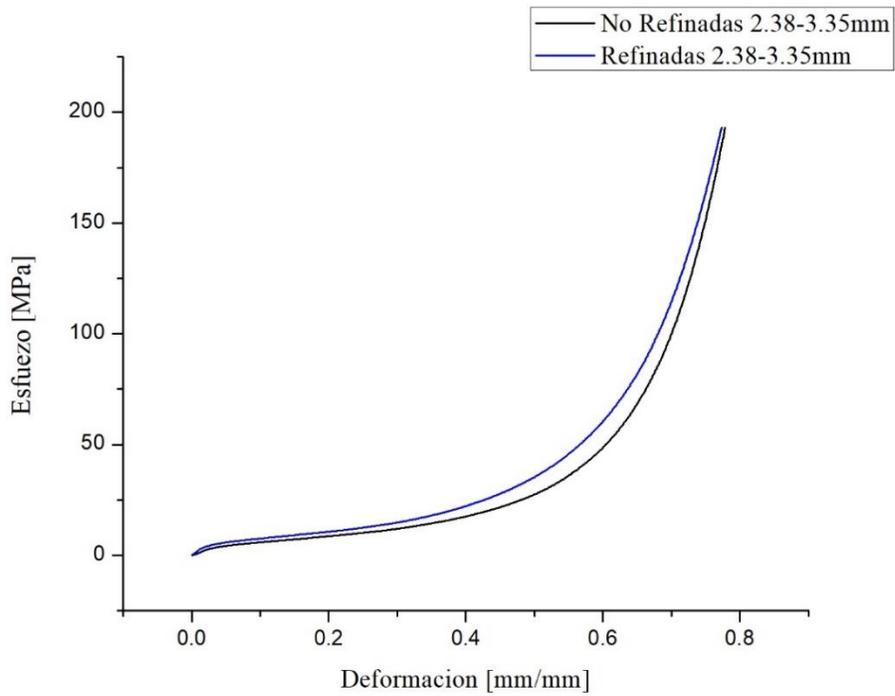


Figura 66. Gráfica esfuerzo-deformación de espumas metálicas refinadas y no refinadas posterior a los tratamientos térmicos (2.38-3.35mm).

Conclusiones (Primera Parte)

De acuerdo con los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, se puede concluir lo siguiente:

- El agente refinador Al-5Ti-0.25C fue fabricado de forma adecuada mediante el procedimiento descrito en el presente trabajo de investigación, de la misma forma se lograron obtener las fases Al_3Ti y TiC, mismas que fungieron como principales puntos de nucleación durante la solidificación.
- Se corroboró mediante la técnica de microscopía óptica y electrónica de barrido, que el aluminio que contiene el compuesto Al-5Ti-0.25C posee mayor cantidad de granos en comparación con el aluminio serie 1100 de fundición, de la misma forma se observó una mayor homogenización de los mismos a lo largo de toda la estructura.
- De la misma forma, el análisis realizado al aluminio que fue refinado con el mismo compuesto, pero fabricado a partir del método “melt spinning” (cintas metálicas), deja ver que aunque la microestructura posee una mayor homogeneidad, aun se observaban gran cantidad de dendritas en la misma y un tamaño de grano mayor que el obtenido en el aluminio con el agente refinador en barra, por dicha razón este tipo de refinador no fue utilizado en los estudios posteriores, ya que el crecimiento dendrítico ocasiona desventaja en las propiedades mecánicas.
- Las pruebas de compresión realizadas al aluminio refinado y no refinado dejaron ver que el primero presentaba una mayor absorción de energía, así como una deformación más homogénea respecto al aluminio que no contenía refinador.
- Se logró determinar los parámetros correctos para la fabricación de espumas metálicas de aluminio y aluminio refinado mediante simulaciones numéricas. Existe una importante relevancia en la presión de infiltración ya que, si la presión es escasa, el material solo fundirá por encima de la preforma, de la misma manera, si la presión de infiltración es excedida, solo se conseguirá compactar el material de preforma, en este caso sal, impidiendo que el metal fundido infiltre a través de este.
- Gracias a la disección realizada a dos espumas metálicas fabricadas a partir del método de infiltración en estado líquido, se comprobó que estas eran homogéneas a lo largo de toda su estructura. Esto es importante ya que descartamos la posibilidad de que la modificación en las propiedades mecánicas se deba a una alteración en la espuma metálica como puede ser; cambio en la porosidad, geometría de los poros, localización de los mismos, etcétera.

- Adicional a lo anterior, los estudios de porosidad efectuados a cada una de las espumas metálicas obtenidas, exhibió que esta oscilaba entre un 62 y un 65%, encontrándose todas las probetas en este intervalo. Resulta de suma importancia asegurarse que las probetas ensayadas posean las mismas características unas de otras, ya que un cambio en la porosidad repercute significativamente en las propiedades mecánicas del material, esto debido a que existe menor cantidad de material contenido en la pared celular, provocando que el esfuerzo requerido para deformar sea menor que cuando existe mayor cantidad de metal en el mismo volumen.
- Se corroboró mediante microscopia óptica que el agente refinador Al-5Ti-0.25C provocaba cambios significativos en la microestructura de las espumas metálicas, esto se debió a que las fases Al₃Ti y TiC actuaron como principales puntos de nucleación durante la solidificación.
- Las pruebas mecánicas realizadas a ambos especímenes (espumas refinadas y sin refinar), revelaron que las espumas metálicas que contenían refinador de grano aumentaron su capacidad de absorción de energía un 9.71% las espumas de tamaño de poro de 2.38-3.35mm y un 13.38% las espumas de 1-2mm. Comprobando así el beneficio de añadir el compuesto Al-5Ti-0.25C al aluminio durante la fundición.
- Gracias al estudio de calorimetría de barrido diferencial (DSC) fue posible identificar la temperatura a la cual los granos presentes en el aluminio comenzaban a formar una estructura más homogénea (480 °C), esto debido a que recrystalizan a partir de otros granos.
- Fue posible determinar los tiempos adecuados para la realización de los tratamientos térmicos, obteniendo la microestructura más conveniente para aumentar las propiedades mecánicas de las espumas metálicas, resultando este tiempo de 500 horas a una temperatura de 480°C. Con la realización de dicho tratamiento térmico fue posible obtener un tamaño de grano que ronda en los 5000 μm^2 de superficie y 300 μm de periferia.
- Una vez realizadas las pruebas de compresión posteriores a los tratamientos térmicos, fue posible cuantificar el área bajo la curva de cada una de las espumas ensayadas; 6 espumas metálicas refinadas y 6 espumas metálicas sin refinar, esto para cada uno de los dos tipos de poro trabajados en la presente investigación. En análisis de área bajo la curva, reveló que el beneficio obtenido al añadir el compuesto Al-5Ti-0.25C al proceso de fundición del aluminio, es incrementado considerablemente con la realización de los tratamientos térmicos, ya que las espumas metálicas de tamaño de poro de 2.38-3.35mm absorbieron un 19.16% más energía en comparación con aquellas espumas que no poseían agente refinador, de la misma forma, las espumas metálicas de tamaño de poro de 1-2mm absorbieron un 31.2% más energía.

- A partir de lo anterior es posible concluir que la capacidad de absorción de energía de las espumas metálicas de aluminio fue aumentada satisfactoriamente, esto sin alterar considerablemente la composición química del metal base y haciéndolas aptas para aplicaciones ingenieriles, donde la absorción de energía juega un papel de suma importancia como lo es en el caso de la industria automotriz.

Capítulo IV: Diseño de un nuevo Método de obtención de Espumas Metálicas para aleaciones con memoria de forma

4.1 Fabricación de la aleación con memoria de forma Cu-Al-Be

Para la fabricación de la aleación de memoria de forma se utilizó la ecuación de Belkahla [58] la cual establece una correlación entre la composición de cobre, aluminio, berilio y la temperatura de transformación martensítica (M_s). Dicha ecuación establece que:

$$M_s(^{\circ}C) = 1245 - 71\%Al - 893\%Be... \text{ (Ec. 2)}$$

La ecuación anterior solo es válida para intervalos de 10-12.50 porcentaje en peso de aluminio y 0.30-0.65 porcentaje en peso de berilio.

Siguiendo lo establecido por Belkahla, se fabricaron 2[kg] de dos aleaciones con distinta temperatura de transformación, la primera corresponde a -5.41 [$^{\circ}C$], se estableció esta temperatura con la finalidad de obtener fase martensítica de fundición. La segunda aleación fue fabricada para obtener fase austenítica a una temperatura de -107.3 [$^{\circ}C$].

Debido a que el berilio es comercializado aleado con cobre, en la relación Cu-4wt%Be, se efectuaron los cálculos correspondientes para determinar el gramaje de cada elemento a utilizar según la temperatura de transformación deseada, la Tabla 9 señala las cantidades utilizadas para la fabricación de dos kilogramos de cada aleación.

Tabla 9. *Cantidades utilizadas para la fabricación de la aleación en fase austenítica y martensítica.*

Austenita		
	%wt	Gramos
Cobre	87.9%	1758
Aluminio	11.5%	230
Berilio	0.6%	12
Martensita		
Cobre	87.83%	1756.60
Aluminio	11.7%	234
Berilio	0.47%	9.40

La fundición de los elementos aleantes se llevó a cabo en un horno de inducción magnética marca EMA 40KVA, dentro de un crisol de grafito cubierto con nitruro de boro y bajo atmósfera controlada de argón de alta pureza (99.99) (figura 67). Se realizó un proceso de colada convencional en una lingotera de acero tratada de igual forma con nitruro de boro para

evitar la adhesión del metal fundido al molde. La aleación obtenida de este procedimiento fue posteriormente utilizada para la fabricación de espumas metálicas.

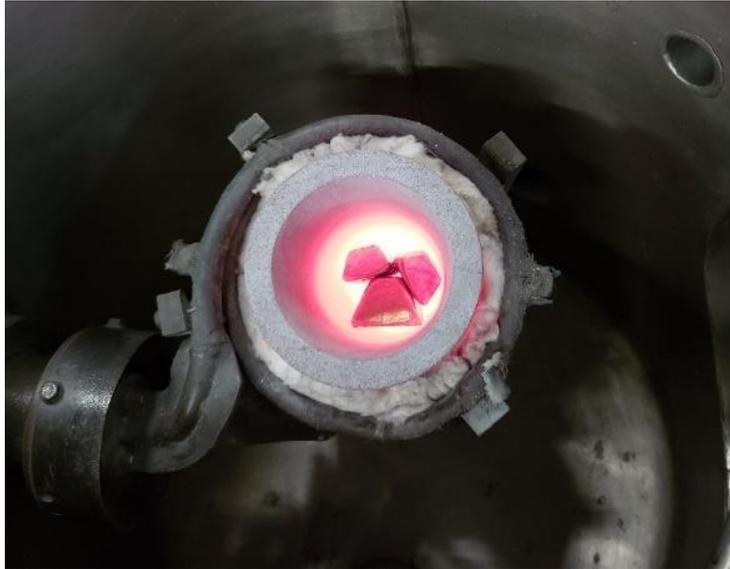


Figura 67. Fundición de elementos aleantes en horno de inducción magnética.

4.2 Fabricación de espumas metálicas con aleación de memoria de forma

Para la producción de este tipo de espumas metálicas fue necesario diseñar un nuevo proceso de fabricación, ya que el punto de fusión del cobre (1085 °C) no posibilita que se utilice cloruro de sodio como material espaciador tal como se realizó con las espumas metálicas de aluminio. El dispositivo fue diseñado con ayuda del software Inventor, este consta de cuatro partes fundamentales mostradas en la figura 68, un crisol de grafito isostático (c) con tapa desmontable (d) y un embolo (b) roscado a un esparrago (a) cuya función es ejercer presión sobre el material de preforma para que este infiltre en el metal fundido.

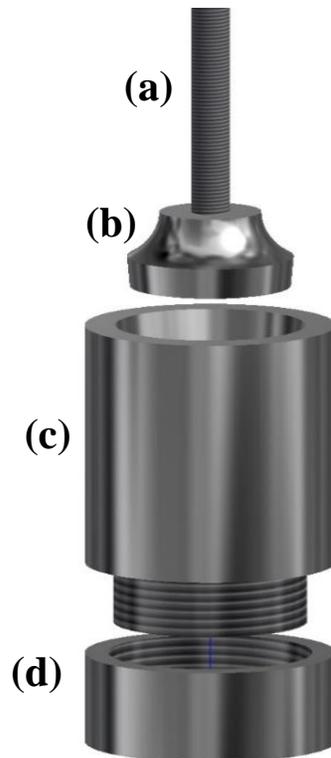


Figura 68. Crisol diseñado para la fabricación de espumas metálicas de CuAlBe, (a) esparrago sujetador de embolo, (b) embolo apisonador, (c) cuerpo principal del crisol y (d) tapa inferior roscada al cuerpo principal.

Dada la complejidad de producción de este tipo de materiales, el diseño del equipo cuenta con diversas especificaciones, entre ellas; un ángulo de desmolde de 4° al interior del crisol, una tapa desmontable que permite la expulsión del material final con mayor facilidad, un embolo con venas de desahogo que posibilitan la expulsión del aire dentro del crisol al momento de la infiltración, entre otras.

Una vez manufacturado el equipo para la producción de espumas metálicas de CuAlBe, cada una de las piezas fue recubierta con una capa de nitruro de boro e ingresadas a un secador marca Riossa® modelo HSCF a una temperatura de 200 [°C] durante 2 horas. Con el recubrimiento a cada una de las partes que conforman el crisol, garantizamos que durante la fabricación el metal fundido no se adhiera a las paredes del mismo y por consecuencia exista una mayor facilidad de desmoldeo.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, el material de preforma debe poseer un punto de fusión mayor que el metal a espumar, por dicha razón y debido al punto de fusión más alto presente en los elementos a alear (Cobre 1085[°C]) se eligió dióxido de silicio (SiO_2) como material de preforma ya que es un material química y biológicamente estable y cuyo punto de fusión se encuentra por encima de los 1710 [°C].

El dióxido de silicio fue empleado en forma de silica gel, más comúnmente utilizado para la absorción de humedad y cuya geometría es esférica, lo cual, representa una gran ventaja en la fabricación de materiales porosos dado que posteriormente será disuelta de la estructura dando paso a poros completamente esféricos.

Debido a la principal aplicación del óxido de sílice, es de suma importancia realizar un tratamiento térmico previo a su utilización para eliminar cualquier resto de humedad presente en ella, ya que, en caso contrario al ser elevada a grandes temperaturas, el agua que pudiese contener podría ser expulsada violentamente. Por esta razón, se le realizó un secado a 300°C durante 2 horas para posteriormente ingresarla en un horno a 700 °C por 3 horas, de esta forma garantizamos eliminar cualquier resto de humedad. Una vez retirada la humedad, las partículas de silica fueron sometidas a un proceso de tamizado con la finalidad de categorizarlas según su diámetro.

Para la fabricación de las espumas metálicas, se efectuó la fundición de 1500 gramos de la aleación dentro del mismo dispositivo colocado en un horno de inducción magnética marca EMA 40 KV y con atmosfera inerte de alta pureza (argón 99.99%). Una vez que el metal se encontraba en estado líquido, alrededor de 1200 [°C], se añadió al crisol 500 gramos de silica previamente calentada a 700°C y mediante fuerza mecánica fue obligada a infiltrar dentro del metal fundido, tal como se muestra en la figura 69.

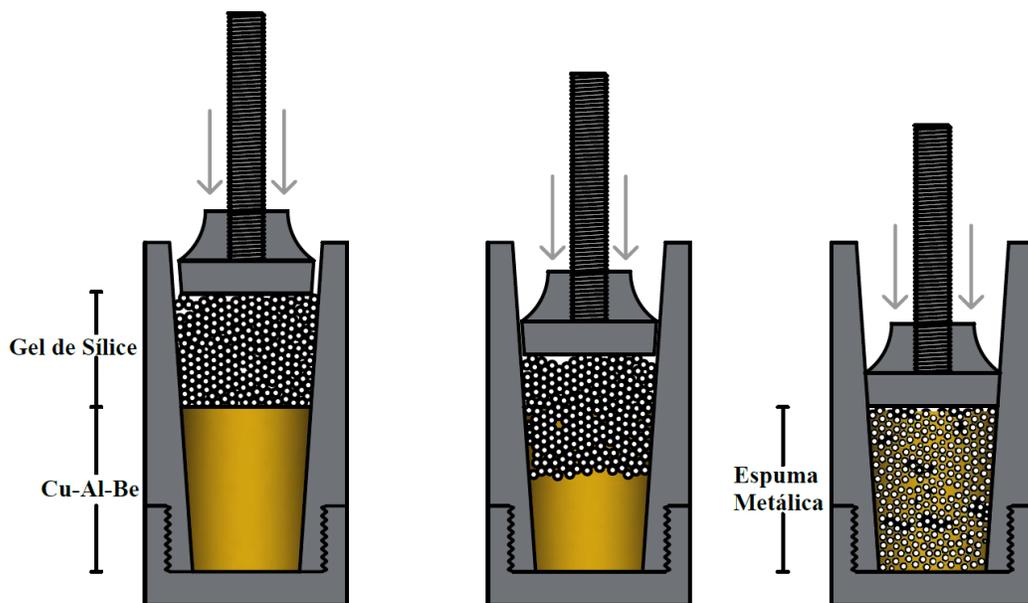


Figura 69. Proceso de Fabricación de espumas metálicas de CuAlBe.

La cantidad de sílica añadida durante el proceso de fabricación posee relevante importancia debido a que mediante ella se garantiza que la espuma metálica tendrá completamente una estructura de celda abierta, asegurando así, que toda la preforma será disuelta posteriormente.

Para la obtención de las muestras finales, la espuma metálica fue sometida a un proceso de maquinado para obtener muestras de una pulgada de diámetro por 20 mm de altura. El maquinado se realizó manteniendo el material de preforma dentro de la estructura para brindar mayor soporte y evitar daños a las muestras (figura 70).

Una vez obtenidas las dimensiones deseadas, las muestras fueron tratadas químicamente con ácido fluorhídrico al 40% durante 6 horas para eliminar todo el material de preforma dentro de la estructura de la espuma metálica.



Figura 70. Proceso de torneado de espuma metálica de CuAlBe.

4.3 Resultados de la fase presente en las espumas metálicas.

Dos tipos de espumas metálicas fueron fabricadas, una en fase austenítica y otra en fase martensítica. Cada una de ellas fue observada mediante microscopía óptica Olympus Vanox AHMT3 para corroborar la fase presente.

La figura 71 corrobora que se obtuvo fase martensítica (a) y fase austenita (b) en las espumas fabricadas, lo cual corrobora que la ecuación de Belkahala fue empleada de manera correcta.

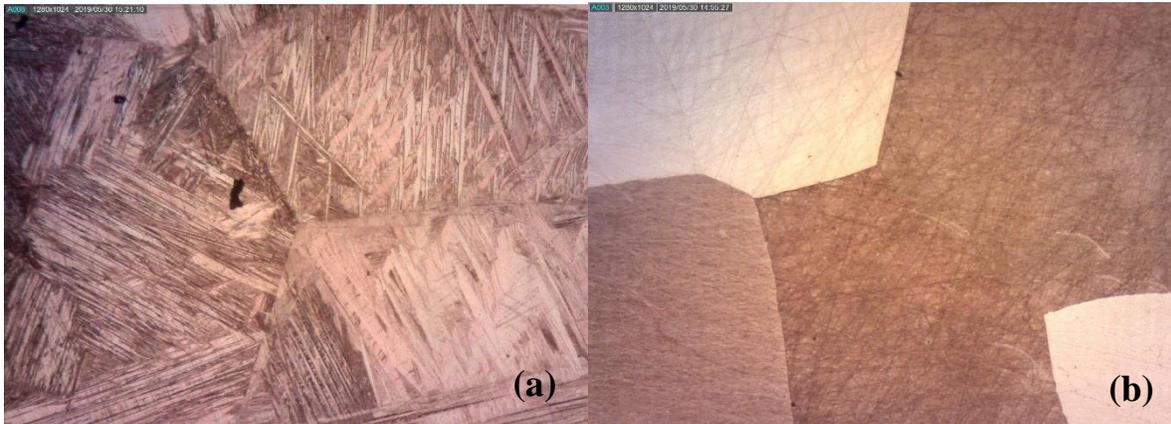


Figura 71. Microscopía óptica realizada a espumas de Cu-Al-Be (a) fase martensítica, (b) fase austenítica 5x.

Debido a que el objetivo del presente trabajo de investigación se centró en aumentar la cantidad de absorción de energía de las espumas metálicas al modificar su microestructura, se fabricó una espuma metálica adicional añadiendo Zirconio como micro-aleante durante la fundición, esto con la finalidad de reducir el tamaño de grano presente en su estructura. La figura 72 expone la microestructura obtenida, donde claramente se aprecia un cambio significativo en el tamaño de grano presente, por otra parte, también es posible apreciar la presencia de ambas fases (martensita y austenita).

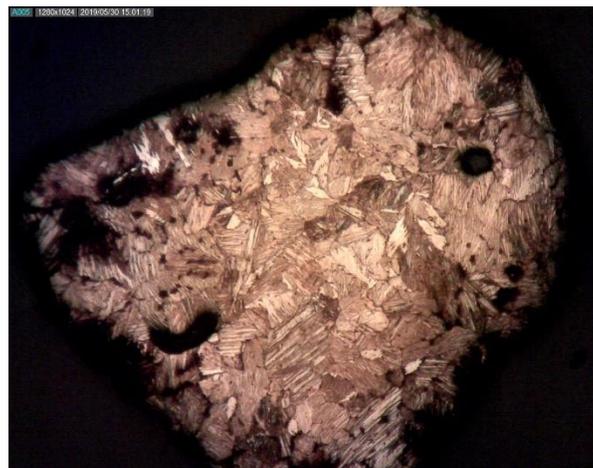


Figura 72. Microscopía óptica realizada a espuma metálica de Cu-Al-Be con Circonio (Zr) como elemento refinador 5x.

A causa de las limitaciones del tiempo se tomó la decisión de delimitar el presente trabajo de investigación hasta esta sección, sin embargo, en investigaciones posteriores se llevarán a cabo pruebas de mecánicas en las espumas metálicas obtenidas, para evaluar el efecto que poseen los poros esféricos en su estructura, así como también evaluar si es posible aumentar la cantidad de absorción de energía con la adición de elementos microaleantes durante la fundición.

Conclusiones (Segunda Parte)

Como parte de la segunda sección del presente trabajo de investigación, se puede concluir lo siguiente:

- La ecuación de Belkahala fue empleada de forma correcta, ya que fue posible obtener dos fases distintas en la microestructura de las espumas metálicas de Cu-Al-Be (Austenita y Martensita).
- Fue de suma importancia colocar los pesos exactos de cada elemento durante la fundición, ya que una variación, por mínima que esta sea, resulta perjudicial para la fase final, ya que esta puede cambiar completamente.
- La implementación de softwares fue crucial para el diseño de un nuevo dispositivo para la producción de espumas metálicas de la aleación Cu-Al-Be, ya que se pudieron prever algunas fallas y se corrigieron antes de la producción.
- El estudio químico de la silica y su tratamiento previo a su utilización como material espaciante fueron cruciales para el diseño de este nuevo método, ya que fue posible disolver completamente la preforma una vez obtenida la espuma metálica.
- Como parte de esta línea de investigación, serán realizadas pruebas mecánicas en las espumas metálicas producidas por este método con la finalidad de evaluar su capacidad de absorción de energía.
- Es importante destacar que el diseño de este dispositivo se llevó a cabo desde cero, lo cual implicó desde el maquinado, hasta la realización de varios ensayos para lograr obtener satisfactoriamente espumas metálicas de Cu-Al-Be de celda abierta con poros esféricos.

Referencias

- [1] Ishizaki K., Komarneni S. & Nanko M (1998). Porous materials: Process technology & Applications. Great Britain: Kluwer Academic Publishers.
- [2] Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby 1999 Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge University USA. Cambridge University Press.
- [3] P.S. Liu & G.F. Chen. (2014). Porous Materials, Processing and Applications. USA: ELSEVIER.
- [4] B.D. Zdravkov et al. Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. Central European Journal of Chemistry 5(2) 2007 385–395.
- [5] <https://www.raumprobe.de/material/pohltec-metalfoam-gmbh/afs-platte-aluminium-foam-sandwich/datenblatt/06/08/2019>
- [6] J.A. Gutiérrez-Vázquez, J. Oñoro. Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista de metalurgia, ISSN: 0034-8570 (2008).
- [7] J. H. Cadena, I. A. Figueroa, M. A. Suarez, O. Novelo-Peralta, G. González, G.A. Lara-Rodríguez, I. Alfonso, production of al foams using the sdp method: processing parameters and introduction of a new sintering device, J. Min. Metall. Sect. B-Metall. 52 (1) B pág. 47–52 (2016)
- [8] Cristóbal Granados M. Producción y caracterización de espumas metálicas de Al y Mg de poro abierto. Tesis de Maestria Universidad Nacional Autónoma de México. Marzo 2018
- [9] Hans P., Kriszt B., Handbook of cellular metals – Production, processing and applications, Wiley VCH, Austria, 2002.
- [10] Valencia A., Las espumas metálicas; metal foams, Revista CINTEX, Colombia, 2013.
- [11] Niebylski LM, Jarema CP, Immethun PA. US Patent 3,794,481, (1974).
- [12] Elliot JC. US Patent 2,983,597, (1961).
- [13] Bjorksten J, Rock EJ. US Patent 3,707,367, (1972).
- [14] Fiedler WS. US Patent 3,214,265, (1965).
- [15] HardyPW, Peisker GW. US Patent 3,300,296, (1967).
- [16] Niebylski LM. German Patent 2,006,445, (1970).
- [17] BerryCB. US Patent 3,669,654, (1972).
- [18] Niebylski LM, Jarema CP, Lee TE. US Patent 3,940,262, (1976).
- [19] T. Miyoshi, M. Itoh Aluminum Foam," Alporas ": The Production Process, Properties and Applications.

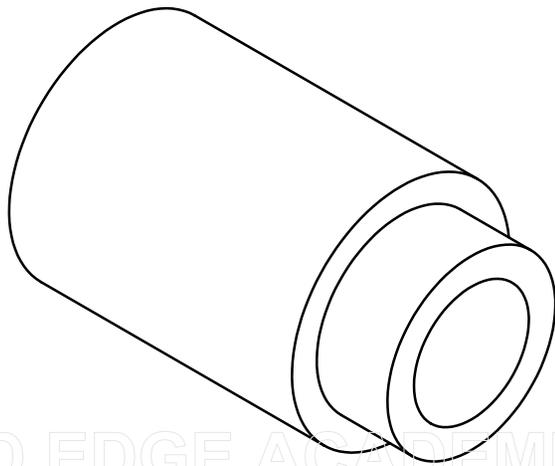
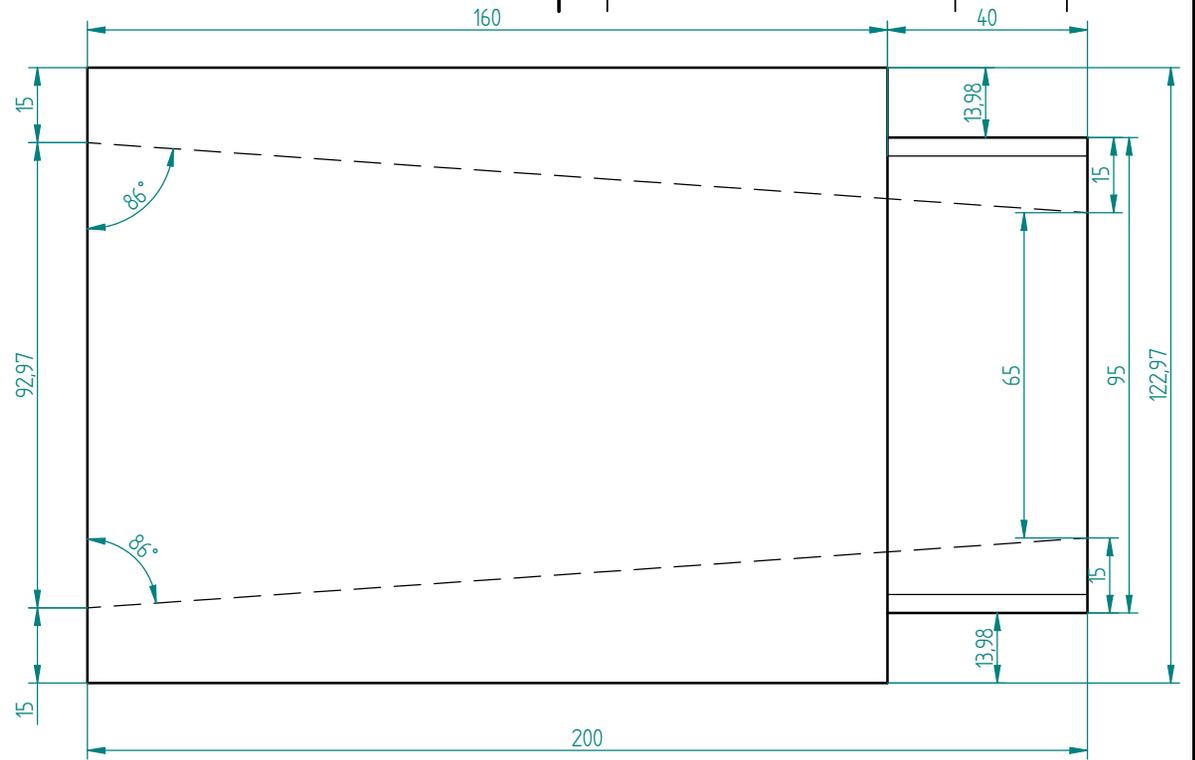
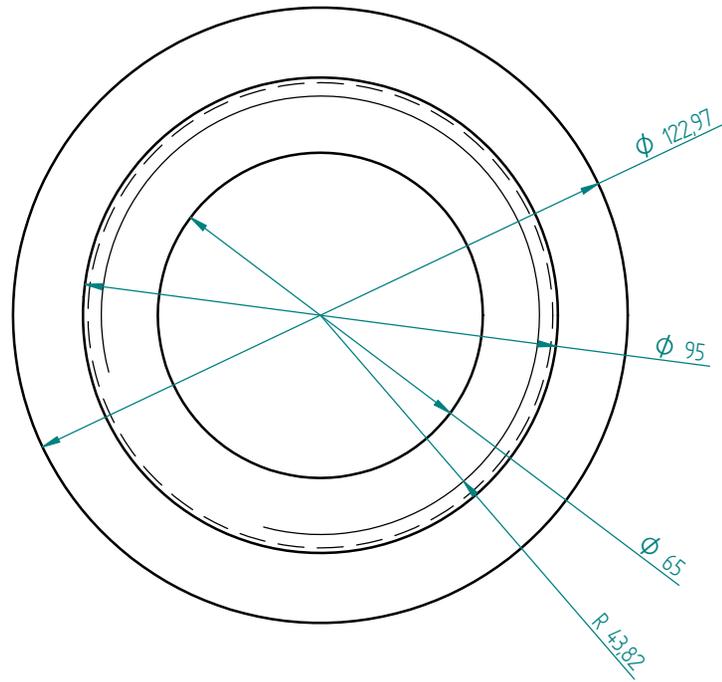
- [20] Miyoshi T, Itoh M, Akiyama S, Kitahara A. Porous and cellular materials for structural applications. p. 133. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, WadleyHNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521 (1998).
- [21] J. Banhart, Production Methods for Metallic Foams, Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research, P. 3-11 Bremen, Germany.
- [22] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, 559–632 Progress in Materials Science 46 (2001).
- [23] Shapovalov VI. Private communication, 1999.
- [24] Jin I, Kenny LD, Sang H. US Patent 4,973,358 (=Int. Patent Application WO 91/03578), (1990).
- [25] Sang H, Thomas M, KennyLD. Int. Patent Application WO 92/03582, (1992).
- [26] Thomas M, Kenny LD, Sang H. Int. Patent Application WO 94/17218, (1994).
- [27] Jin I, Kenny LD, Sang H. US Patent 5,112,697, (1992).
- [28] Ruch W, Kirkevåg B. Int. Patent Application WO 91/01387 (=European Patent Application EP0,483,184, B1), (1991).
- [29] Banhart J, Ashby M. F. Metal foams and porous metal structures. In: Fleck NA, p. 133 editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag (1999).
- [30] J.O. Osorio-Hernández a, M.A. Suarez a, R. Goodall b, G.A. Lara-Rodriguez a, I. Alfonso a, I.A. Figueroa, Manufacturing of open-cell Mg foams by replication process and mechanical properties, Materials and Design 136–141 (2014).
- [31] A. Kennedy, Porous Metals and Metal Foams Made from Powders, Manufacturing Division, P. 31-46 University of Nottingham, Nottingham, UK.
- [32] L. Pérez, S. Lascano, C. Aguilar, D. Estay, U. Messner, I.A. Figueroa, I. Alfonso. DEM–FEA estimation of pores arrangement effect on the compressive Young’s modulus for Mg foams. Computational Materials Science 110 (2015) 281–286.
- [33] J. Banhart, Manufacturing Routes for Metallic Foams. Solidification Science (2000).
- [34] X. Luo, J.-Y. Xu, E.-L. Bai, W. Li, Mechanical properties of ceramics-cement based porous material under impact loading, 778e784 Mater. Des. 55 (2014).
- [35] Petrophysics, theory and practice of measuring reservoir rocks and fluid transport properties. Djebbor Tiab and Erle C. Donaldson, Third edition (2012).
- [36] J. Qin, Q. Chen, C. Yang, Y. Huang. Research process on property and application of metal porous materials, p.39-44, Journal of Alloys and Compounds 654 (2016).
- [37] F.V. Lenel, "Powder Metallurgy Principles and Applications" (Metal Powder Industries Federation, London, (1980).
- [38] D. C. Dilley, Mach. Prod. Eng. 125 (1974).

- [39] M. Velasco-Castro, I.A. Figueroa*, H. Pfeiffer, J.F. Gómez-García, Enhanced CO₂ capture capacity on open-cell Mg foams via humid impregnation with lithium at low temperatures, p. 73–80 *Thermochimica Acta* 664 (2018).
- [40] Wheeler KR, Karagianes MT, Sump K.R. Conf. Titanium Alloys in Surgical Implants. Philadelphia, p. 241. USA: American Society for Testing and Materials, (1983).
- [41] <https://blog.chirurgia3d.com/en/scaffold-the-future-of-metal-implants/> 20/06/19
- [42] <https://www.dw.com/en/metal-foam-a-material-for-new-bones/av-16633125>
- [43] Niemeyer M., 1999, DFG Symposium 11–12. Bonn, Germany, (November 1999).
- [44] <https://www.indyhoneycomb.com/products/structural-honeycomb/> 08/07/19
- [45] K. T. Kashyap and T. Chadrashekar, Effects and Mechanisms of Grain Refinement in Aluminum Alloys, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 24, No. 4, August 2001, pp. 345-353.
- [46] Enzhao Wang, Tong Gao, Jinfeng Nie, Xiangfa Liu, Grain refinement limit and mechanical properties of 6063 alloy inoculated by Al-Ti-C (B) Master Alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 594 (2014) 7-11.
- [47] A. L. Greer, a. M. Bunn, A. Tronche, P. V. Evans and D. J. Bristow. Modelling of Inoculation of Metallic Melts: Application to Grain Refinement of Aluminum by Al-Ti-B. *Acta Mater.* 48 (2000) 2823-2835.
- [48] Berker T. Gezer, Fatin Toptan, Sibel Dagleilar, Isil Kerti, *Materials and Design* 31 (2010) S30-S35, Production of Al-Ti-C Grain Refiners with the Addition of Elemental Carbon.
- [49] Hernandez Mecinas E.. Estudio y caracterización de la adición de carbono nanométrico al sistema Al- Ti, para aplicaciones como refinador en aluminio comercial. Tesis de Maestria Universidad Nacional Autónoma de México. Marzo 2016
- [50] <http://www.chemcokorea.com/h/material-science/melt-spinning/?ckattempt=1>
24/05/19
- [51] Susumu Kase Tatsuki Matsuo. Studies on melt spinning. I. Fundamental equations on the dynamics of melt spinning. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers*. Volume3, Issue7 July 1965, Pages 2541-2554.
- [52] De "Metals Handbook", 1948, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- [53] Jinfeng Nie, Xiangfa Liu, Xiaoguang Ma. Influence of Trace Boron on the Morphology of Titanium Carbide in an Al-Ti-C-B Master Alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 422 (2006) 128-131.
- [54] Waney Hayden, Wiliam G. Moffatt, John Wulff. Introducción a la ciencia e Ingeniería de materiales, Tomo III: Propiedades mecánicas, Editorial Limusa, Mexico 1968.
- [55] Anil Kumar Birru, D. Benny Karunakar. Effects of grain refinement and residual elements on hot tearing of A713 aluminium cast alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26(2016) 1783–1790

- [56] Bondan T. Sofyan, Daniel J. Kharistal, Lukfawan Trijati, Kaspar Purba, Ragil E. Susanto. Grain refinement of AA333 aluminium cast alloy by Al-Ti granulated flux. *Materials and Design* 31 (2010) S36–S43.
- [57] Choongdo Lee. Effect of Ti-B addition on the variation of microporosity and tensile properties of A356 aluminium alloys. *Materials Science & Engineering A668* (2016) 152–159.
- [58] S. Belkahla*, H. Flores Zuffiiga** and G. Guenin (1993). Elaboration and characterization of new low temperature shape memory Cu-Al-Be alloys. *Materials Science and Engineering, A* 169 119-124.

A continuación, se incluyen los planos diseñados y empleados para la fabricación del dispositivo con el cual se produjeron las espumas metálicas con efecto de memoria de forma.

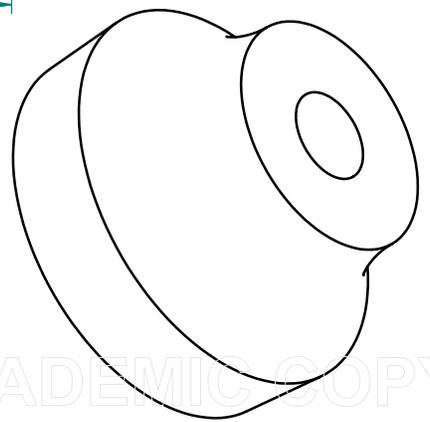
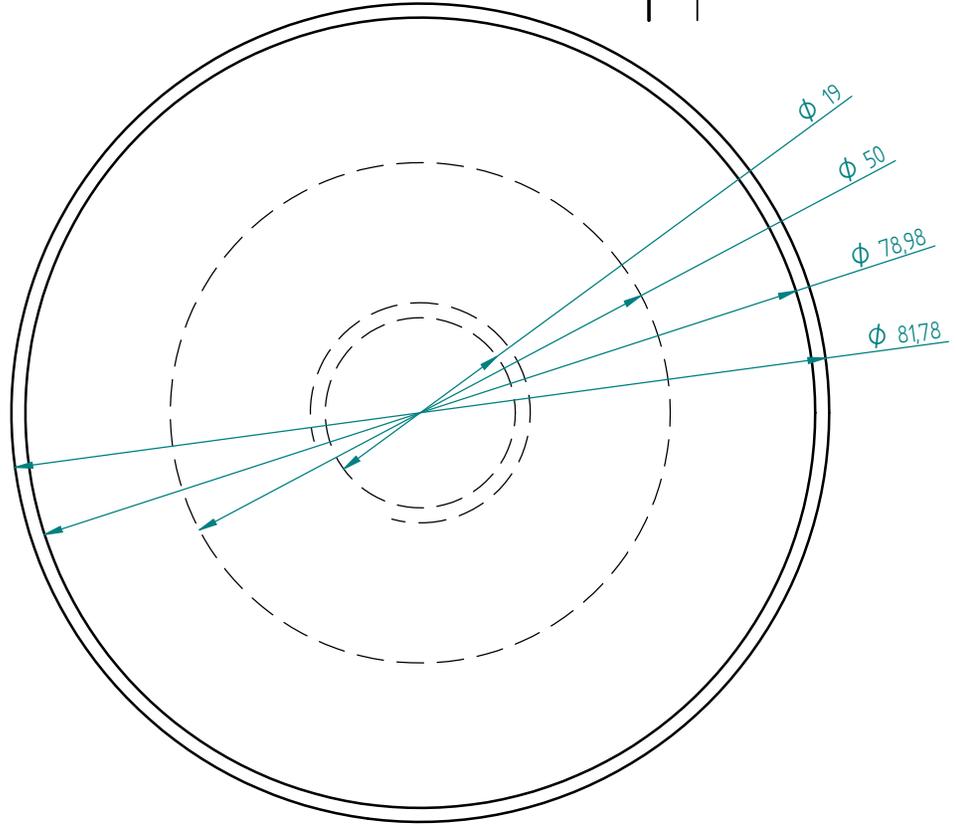
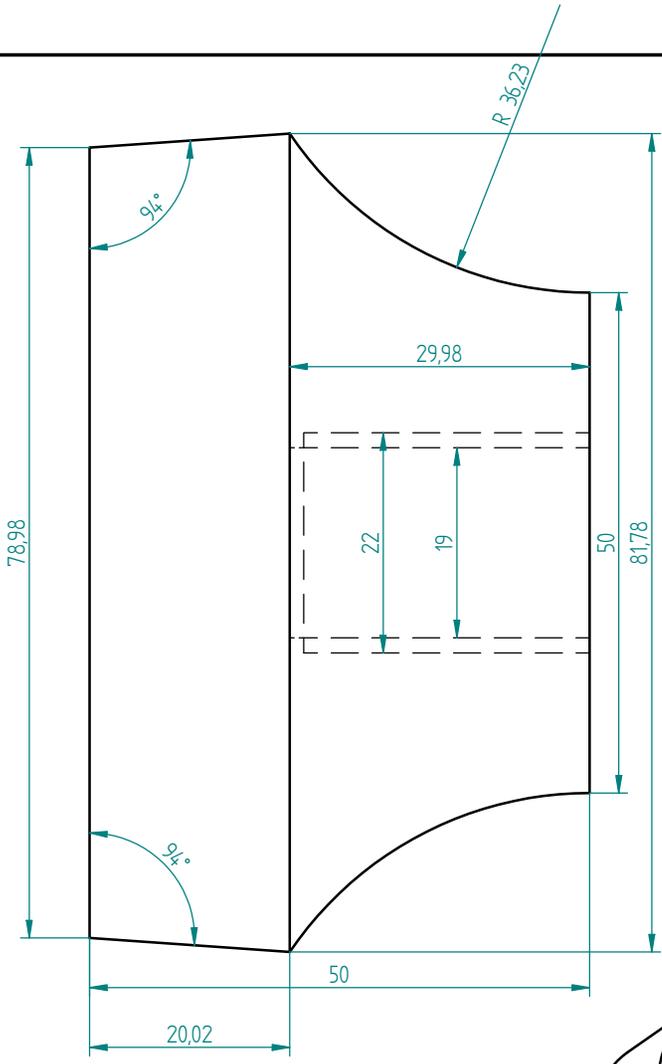
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Mareva	Error: Sin referencia			
Comprobado			Título		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Plano	Rev
			Archivo: Plano5		
			Escala	Peso	Hoja 1 de 1

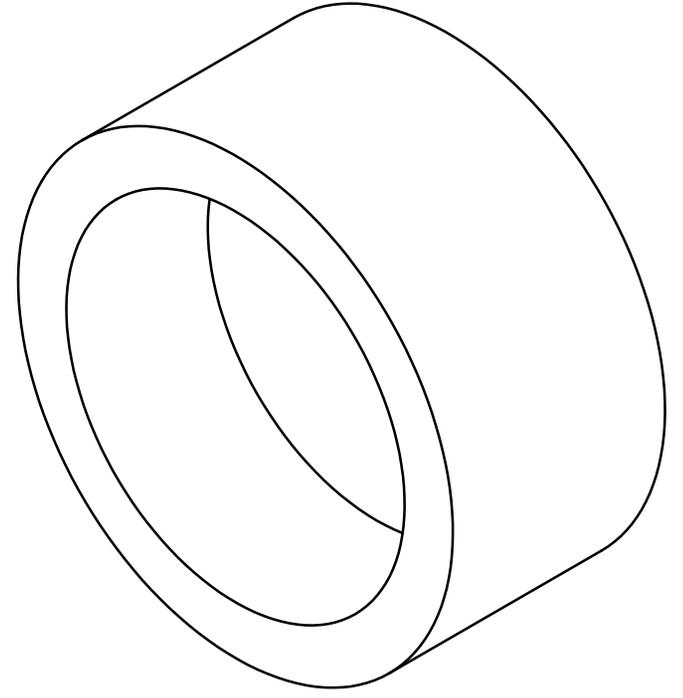
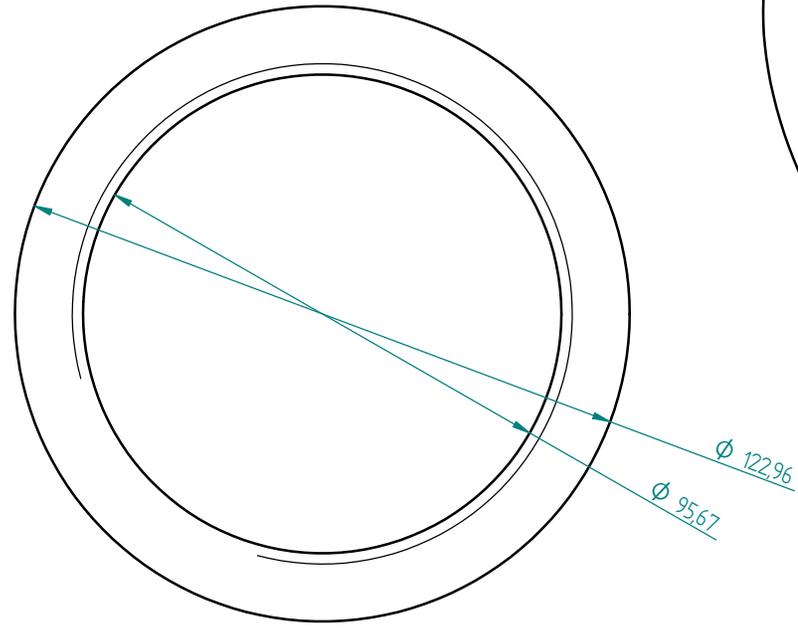
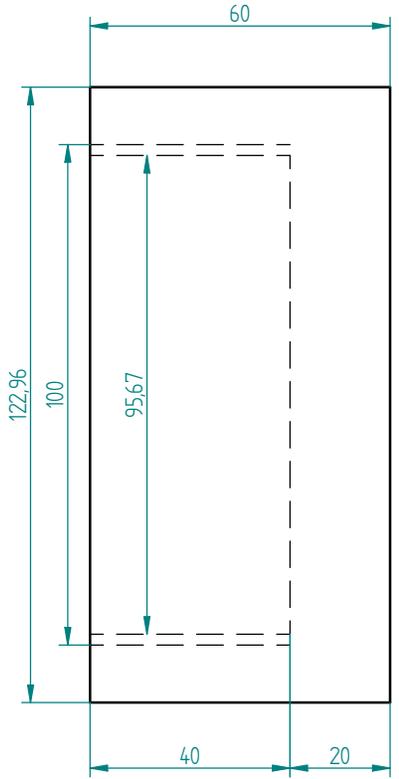
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Nombre	Fecha	Solid Edge ST	
Dibujado: Mareva	Error: Sin referencia	Siemens PLM Software	
Comprobado		Título	
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		A3	Plano
		Archivo: Plano7	
		Escala	Peso
		Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	Mareva	Error: Sin referencia			
Comprobado			Título		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A3	Plano	Rev
			Archivo: Plano6		
			Escala	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY