



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMAS
METÁLICAS DE ALUMINIO DE CELDA ABIERTA PARA
APLICACIONES DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE IMPACTO
EN EL CAMPO AUTOMOTRIZ”**

TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: TRABAJO EXPERIMENTAL

Presentado para optar al grado académico de:
INGENIERO AUTOMOTRIZ

AUTORES: ALEX DARÍO PACHA CHICAIZA
BRAULIO GABRIEL CHANGO MONTACHANA
DIRECTOR: ING. EDISON PATRICIO ABARCA PÉREZ MSC

Riobamba – Ecuador
2019

©2019, Alex Darío Pacha Chicaiza & Braulio Gabriel Chango Montachana

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el derecho de autor.

Nosotros Alex Darío Pacha Chicaiza & Braulio Gabriel Chango Montachana declaramos que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos del trabajo de titulación. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 19 de noviembre de 2019



Alex Darío Pacha Chicaiza

CI:180387221-5



Braulio Gabriel Chango Montachana

CI: 180488018-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: tipo: Trabajo Experimental, “**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS DE ALUMINIO DE CELDA ABIERTA PARA APLICACIONES DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE IMPACTO EN EL CAMPO AUTOMOTRIZ**”, realizado por el señores: **ALEX DARÍO PACHA CHICAIZA; BRAULIO GABRIEL CHANGO MONTACHANA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos PRESIDENTE DE TRIBUNAL	 _____	19/11/2019 _____
Ing. Edison Patricio Abarca Pérez MSc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	19/11/2019 _____
Ing. David Víctor Bravo Morocho MIEMBRO DE TRIBUNAL	 _____	19/11/2019 _____

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y guiándome por el buen camino para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar, salud y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ello que soy lo que soy ahora. Los amos con mi vida.

Alex Darío Pacha Chicaiza

El presente trabajo de titulación está dedicado a Dios. Ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera.

A mi madre, porque siempre estuvo a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona con ejemplo de fortaleza, aguante y perseverancia.

A mis hermanos, por su apoyo incondicional los cuales estuvieron a mi lado en cada momento difícil y nunca quisieron verme desfallecer.

A mis familiares, amigos y seres importantes que ya no están conmigo que siempre estuvieron velando por mí, en este camino que condujo a la realización de este logro.

Braulio Gabriel Chango Montachana

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más. A mi madre por ser la persona que me ha acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida, a mis hermanas quienes han velado por mí durante este arduo camino para convertirme en un profesional. A mi padre quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera profesional. Por último, a mis compañeros de tesis que gracias a la amistad que se formó logramos llegar hasta el final del camino y al Ing. Edison Patricio Abarca Pérez, por la colaboración brindada en todo momento.

Alex Darío Pacha Chicaiza

En primer lugar, doy infinitamente gracias a Dios, por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida. A mi madre por la confianza y apoyo brindado, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me ha demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos. A mis hermanos quienes con sus consejos me han ayudado a enfrentar los retos que se me han presentado en mi vida, por último al Ing. Edison Patricio Abarca Pérez, y Ing. Víctor David Bravo Morocho, por toda la colaboración brindada, durante la elaboración de este proyecto.

Braulio Gabriel Chango Montachana

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1 MARCO CONCEPTUAL.....	2
1.1 Tema.....	2
1.2 Antecedentes	2
1.3 Planteamiento del Problema.....	3
1.3.1 <i>Formulación del Problema de Investigación.....</i>	<i>3</i>
1.4 Justificación	4
1.4.1 <i>Justificación teórica</i>	<i>4</i>
1.4.2 <i>Justificación metodológica.....</i>	<i>4</i>
1.4.3 <i>Justificación práctica</i>	<i>5</i>
1.5 Objetivos	5
1.5.1 <i>Objetivo general</i>	<i>5</i>
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	<i>5</i>
CAPÍTULO II	
2 MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Sólidos celulares	6
2.2 Espumas metálicas	6
2.2.1 <i>Características de las espumas metálicas</i>	<i>7</i>
2.2.2 <i>Clasificación de espumas metálicas</i>	<i>8</i>
2.2.3 <i>Diferencia de estructuras de celda cerrada y abierta.....</i>	<i>9</i>
2.2.4 <i>Parámetros característicos.....</i>	<i>10</i>
2.2.5 <i>Rutas principales de fabricación de materiales celulares metálicos</i>	<i>12</i>
2.3 Métodos de caracterización.....	20
2.3.1 <i>Caracterización estructural.....</i>	<i>20</i>
2.3.2 <i>Determinación de la densidad.....</i>	<i>21</i>
2.3.3 <i>Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.....</i>	<i>22</i>
2.3.4 <i>Tomografía computarizada de rayos X</i>	<i>22</i>
2.3.5 <i>Densidad relativa y tamaño del poro</i>	<i>22</i>
2.4 Aplicaciones de los materiales metálicos celulares.....	27
2.4.1 <i>Aligeramiento de estructuras.....</i>	<i>28</i>

2.4.2	<i>Absorción de impactos</i>	29
2.4.3	<i>Absorción acústica y de vibraciones</i>	30
2.4.4	<i>Intercambio de calor, filtrado y catálisis</i>	30

CAPÍTULO III

3	METODOLOGÍA	32
3.1	Esquema investigativo	32
3.2	Enfoque de la investigación	32
3.3	Alcance de la investigación.....	33
3.4	Procesamiento y análisis de información	33
3.4.1	<i>Plan de recolección de información</i>	33
3.5	Materiales y equipos	33
3.5.1	<i>Material para la preforma</i>	33
3.5.2	<i>Metal para la infiltración</i>	34
3.5.3	<i>Horno de Crisol</i>	34
3.5.4	<i>Molde cilíndrico</i>	35
3.5.5	<i>Horno mufla eléctrico para fundición de metales</i>	36
3.5.6	<i>Bomba de vacío</i>	37
3.5.7	<i>Tanque de gas argón</i>	37
3.5.8	<i>Sistema de válvulas</i>	38
3.5.9	<i>Lámina de grafito</i>	39
3.5.10	<i>Grafito en polvo</i>	39
3.5.11	<i>Pirómetro</i>	40
3.5.12	<i>Tamices de laboratorio</i>	41
3.5.13	<i>Agitador mecánico de tamices</i>	41
3.5.14	<i>Procedimiento para la obtención de espumas metálicas</i>	42
3.6	Esquema del equipo para obtener espuma metálica de celda abierta por el método de infiltración	46

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS	47
4.1	Caracterización estructural.....	47
4.1.1	<i>Caracterización muestra 2, Número de poros por milímetro lineal</i>	48
4.1.2	<i>Caracterización muestra 2, Número de poros por superficie cuadrada</i>	49
4.1.3	<i>Caracterización muestra 2, espesor de ligamentos</i>	50
4.1.4	<i>Caracterización muestra 2, tamaño superficial de poros</i>	52
4.1.5	<i>Caracterización muestra 2, tamaño de largo y ancho de poros</i>	54
4.1.5.1	<i>Caracterización muestra 2, tamaño de largo de poros</i>	55
4.1.5.2	<i>Caracterización muestra 2, tamaño de ancho de poros</i>	56

4.1.6	<i>Caracterización muestra 2, porcentaje de porosidad</i>	56
4.2	Ensayo de compresión uniaxial	58
4.3	Discusión.....	61
4.3.1	<i>Análisis de resultados de la caracterización estructural de las espumas.</i>	61
4.3.2	<i>Interpretación de los resultados obtenidos de las caracterizaciones mecánicas.</i>	66
CAPÍTULO V		
5	ESTUDIO DE COSTOS	69
5.1	Costos directos	69
5.2	Costos Indirectos.....	69
5.3	Tasa mínima del proyecto	70
5.4	VAN (Valor Actual Neto).....	70
5.5	Relación Beneficio Costo.....	72
5.6	Periodo Real de Recuperación	72
5.7	TIR	72
CONCLUSIONES		73
RECOMENDACIONES		75
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido	22
Tabla 1-3: Características técnicas del horno modelo 4-9 de la empresa Samothermal.	36
Tabla 2-3: Procedimiento para la obtención de espumas metálicas de aluminio.	42
Tabla 1-4: Cálculos de densidad relativa de las muestras obtenidas.....	47
Tabla 2-4: Calculo y datos de porosidad de las cuatro muestras de espumas metálicas.	48
Tabla 3-4: Número de poros por milímetro lineal muestra 2 (25.4mm), (espuma metálica de celda abierta)	49
Tabla 4-4: Número de poros muestra 2 (espuma metálica de celda abierta)	50
Tabla 5-4: Resultado de medidas de los espesores mejor configurados muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).....	51
Tabla 6-4: Medidas de los espesores de ligamento mejor configurados entre poros de la muestra 2 (espuma metálica de celda abierta.	51
Tabla 7-4: Área superficial del tamaño de poros mejor configurados muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).....	53
Tabla 8-4: Medidas de área superficial del tamaño de poros mejor configurados muestra 2 (espuma metálica de celda abierta)	53
Tabla 9-4: Resultados de la medición de largo y ancho de poros de mejor geometría.	54
Tabla 10-4: Distribución de frecuencia del largo de poros mejor configurados de la muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).	55
Tabla 11-4: Distribución de frecuencia de ancho de poros mejor configurados de la muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).	56
Tabla 1-5: Costos directos del proyecto.....	69
Tabla 2-5: Costos indirectos	69
Tabla 3-5: Tasa mínima del proyecto.	70
Tabla 4-5: Valor actual Neto.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Aspectos a considerarse de las espumas metálicas	7
Figura 2-2:	Características de espumas metálicas	7
Figura 3-2:	Clasificación de espumas metálicas.....	8
Figura 4-2:	Espuma de aluminio de poro cerrado.....	8
Figura 5-2:	espuma de aluminio de poro abierto	9
Figura 6-2:	Principales usos de acuerdo a su tipo de poro.....	9
Figura 7-2:	Parámetros adicionales.....	11
Figura 8-2:	Clases de procesos para la fabricación de.....	12
Figura 9-2:	Propiedades de la espuma metálica.....	12
Figura 10-2:	Rutas para fabricar espuma metálica	13
Figura 11-2:	Esquema de la fabricación de una espuma de aluminio.....	13
Figura 12-2:	Etapas del procedimiento realizadas en la fabricación	15
Figura 13-2:	Etapas del procedimiento de metalurgia	15
Figura 14-2:	Etapas del procedimiento utilizando un polímero o precursor.....	17
Figura 15-2:	Etapas del procedimiento utilizando para crear espumas de níquel de celda.....	18
Figura 16-2:	Etapas del procedimiento de replicación para la fabricación de espumas	19
Figura 17-2:	Parámetros a ser evaluados en la estructuras de espumas metálicas.....	23
Figura 18-2:	Parámetros a ser evaluados en la estructura.....	23
Figura 19-2:	Esquema de las tres zonas (región lineal elástica)	25
Figura 20-2:	Diagramas esfuerzo-deformación a compresión uniaxial practicado a: a) una espuma CYMAT y b) espuma Alporas.....	26
Figura 21-2:	(a) Resistencia a la fluencia a compresión determinado por el pico inicial de la curva. (b) Resistencia a la fluencia a compresión determinada por la intersección de dos pendientes: la de la carga inicial y la de la meseta de esfuerzo.....	26
Figura 22-2:	Características para la aplicación de materiales metálicos	27
Figura 23-2:	Aplicaciones de los metales celulares agrupados.....	28
Figura 24-2:	Principales campos de aplicación automotriz de espumas metálicas	28
Figura 25-2:	Paneles sándwich -AFS- basados en espuma de aluminio	29
Figura 26-2:	Uso de espumas metálicas en vehículos	29
Figura 27-2:	Uso de espuma metálica como filtros o intercambiadores de calor	30
Figura 1-3:	Metodología de la investigación	32
Figura 2-3:	Granos de sal tamizadas para usarse en la infiltración.....	33
Figura 3-3:	Horno de crisol utilizado para fundir el aluminio puro.....	34

Figura 4-3:	Molde cilíndrico. (a) Cámara cilíndrica. (b) Tapas ranuradas superior	35
Figura 5-3:	Horno modelo 4-9 (Empresa Samothermal).	37
Figura 6-3:	Bomba de vacío QUALITY Model QVP 800,	37
Figura 7-3:	Tanque de gas argón presurizado.....	38
Figura 8-3:	Sistema de válvulas utilizado en el experimento.	38
Figura 9-3:	Lámina de grafito utilizada como material	39
Figura 10-3:	Grafito en polvo.	40
Figura 11-3:	Pirómetro utilizado en la medición de	40
Figura 12-3:	Tamices estándares de laboratorio.	41
Figura 13-3:	Agitador mecánico empleado para.....	41
Figura 14-3:	Procedimiento de obtención de espumas metálicas de aluminio	42
Figura 15-3:	Esquema del equipo para obtener espumas metálicas de celda abierta.....	46
Figura 1-4:	Muestra 1 estimacion de masa = 132 gr.....	47
Figura 2-4:	Muestra 2 de espuma seccionada en donde se observan.....	48
Figura 3-4:	Espuma metálica de celda abierta), números de poros	49
Figura 4-4:	Espesor de ligamentos (espuma de celda abierta), basado en.....	50
Figura 5-4:	Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 6-4.....	52
Figura 6-4:	Tamaño de poros mejor configurados muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).	52
Figura 7-4:	Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 8-4.....	53
Figura 8-4:	Medición del tamaño longitudinal y ancho de poros muestra 2.....	54
Figura 9-4:	Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 10-4.....	55
Figura 10-4:	Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 11-4.....	56
Figura 11-4:	Porcentaje de porosidad (espuma metálica de celda abierta).....	57
Figura 12-4:	Máquina universal de ensayo de compresión uniaxial del laboratorio de resistencia de materiales de la facultad de mecánica de la ESPOCH	59
Figura 13-4:	Diagrama Esfuerzo - Deformación (Probeta 2) a partir del ensayo	61
Figura 14-4:	Porcentaje del número de ligamentos según el rango de espesor correspondiente, analizado en 2 muestras	62
Figura 15-4:	Porcentaje del número de poros según el rango de tamaño superior correspondiente, analizado en 2 muestras	63
Figura 16-4:	Porcentaje del número de poros según el rango del tamaño del largo correspondiente,	64
Figura 17-4:	Porcentaje del número de poros según el rango de tamaño de ancho	65
Figura 18-4:	Caracterización de porosidad de la espuma metálica.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS

ISO	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)
ANSI	Instituto Nacional de Normas Americanas (American National Standards Institute)
CYMAT	Inyección de gas en el metal fundido
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
INCO	Proceso de deposición de metales en preformas celulares
CVD	Descomposición química de vapor

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Resultados de ensayos de las 4 muestras de espumas metálicas.

ANEXO B. Resultados de la caracterización de la muestra 2 y muestra 4.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación tecnológica se realizó el estudio de la obtención y caracterización de espumas metálicas de aluminio de celda abierta para aplicaciones de absorción de energía de impacto en el campo automotriz. La toma de muestras se realiza en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Automotriz, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en el desarrollo se procede con el dimensionamiento y determinación de los parámetros técnicos de los elementos que conformara el equipo, y con la selección y adquisición del equipamiento y materiales, para realizar el ensamblaje de los elementos que conformaran el equipo, en ello se debe realizar las respectivas pruebas de funcionamiento del equipo. Para la obtención de las espumas metálicas de celda abierta se trabaja con granos de Cloruro de sodio y del aluminio, realizando 4 muestras en la cuales se realizan la caracterización morfológica mediante la determinación de: forma de ligamentos, densidad relativa, isotropía observada, tamaño de poro, poli dispersión, porcentaje de celdas abiertas y la caracterización mecánica por medio del ensayo de compresión. Los resultados de los valores de porosidad están en la muestra 2 en un 66.35 % y en la muestra 4 un valor de 53.8 %, lo que identifica que la porosidad es relativamente alta, pero su densidad relativa no es tan baja un factor que determina la porosidad de la espuma metálica es la cantidad de NaCl, que aumenta el tamaño de la misma o reduce la densidad dependiendo de la cantidad utilizada, por ello la variación de la porosidad de las muestras 2 y 4 de la espuma metálica. Se recomienda la implementación del proyecto en industrias automotrices sabiendo que es un aporte tecnológico y es rentable respectivamente.

Palabras claves: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <ING. AUTOMOTRIZ>, <ESPUMAS METÁLICAS>, <CELDA ABIERTA>, <CLORURO DE SODIO>, <DENSIDAD RELATIVA>, <ISOTROPÍA>, <POROSIDAD>.



ABSTRACT

In the present research work, was studied to obtain and characterise of metallic foams of open-cell aluminium for impact energy absorption applications in the automotive field was carried out. The sampling was carried out in the laboratory of the School of Automotive Engineering, in the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo , in the development we proceed with the sizing and determination of the technical parameters of the elements that will make up the equipment, and with the selection and acquisition of equipment and materials, to carry out the assembly of the elements; that will conform the equipment, in this the respective tests of operation of the equipment must be performed. To obtain the open cell metal foams, we work with grains of sodium chloride and aluminium, making 4 samples in which the morphological characterization is carried out by determining: ligament shape, relative density, observed isotropy, size of pore, poly dispersion, percentage of open cells and mechanical characterization by means of the compression test. The results of the porosity values are in sample 2 at 66.35% and in sample 4 a value of 53.8%, which identifies that the porosity is relatively high, but its relative density is not so low a factor that determines the Porosity of the metallic foam is the amount of NaCl, which increases its size or reduces the density depending on the amount used, hence the variation in the porosity of samples 2 and 4 of the metallic foam. The implementation of the project in automotive industries is recommended knowing that it is a technological contribution and is profitable respectively.

Keywords: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <ING. AUTOMOTIVE>, <METAL FOAMS>, <OPEN CELL>, <SODIUM CHLORIDE>, <RELATIVE DENSITY>, <ISOTROPY>, <POROSITY>.



INTRODUCCIÓN

Desde una perspectiva global la utilización de la espuma metálica son sólidos celulares que ofrecen importantes beneficios para una amplia gama de aplicaciones estructurales y funcionales. Su baja densidad y la combinación de adecuadas propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas, han hecho que adquieran especial interés para la investigación científica y aplicada durante los últimos veinte años.

La sociedad actual incentiva y motiva a la investigación en el campo de los materiales de ingeniería, especialmente en las universidades, principalmente aplicado en el campo automotriz el mismo que se encuentra en incesante desarrollo y progreso.

Se puede mencionar que los metales porosos son el resultado de la combinación de metal y gases, en donde los gases en forma de burbujas ocupan entre un 50 % y un 90 % de la estructura total, esto da a notar que alcanzan densidades muy bajas (entre 0,03-0,2 gr/cm³), el resultado es ello es que se obtiene un material con excelentes características térmicas y mecánicas que son especialmente interesantes en aplicaciones de estructuras ultraligeras, así como sistemas de alta resistencia al impacto, elementos de disipación de calor y aislamiento acústico.

La investigación se desarrolla en función de los siguientes capítulos:

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA; Planteamiento del Problema, Formulación del Problema, su limitación, Objetivos, y Justificación.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO; Antecedentes de la Investigación, Fundamentación Teórica, Definición de Términos Básicos de las variables de la Investigación y del análisis vibratorio.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA; Diseño de la Investigación, modalidad de investigación, tipo de investigación, identificación de Variables, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Técnicas de Procesamientos de Análisis de Datos, Materiales y equipos, Procedimiento.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS, Se desarrolla la conceptualización de la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta, sistematizando su obtención desde la selección y ensamblaje de equipos, recopilación de información y el análisis de su morfología y caracterización mecánica.

CAPÍTULO I

1 MARCO CONCEPTUAL

1.1 Tema

Obtención y caracterización de espumas metálicas de aluminio de celda abierta para aplicaciones de absorción de energía de impacto en el campo automotriz.

1.2 Antecedentes

Desde una perspectiva global la utilización de la espuma metálica son sólidos celulares que ofrecen importantes beneficios para una amplia gama de aplicaciones estructurales y funcionales. Su baja densidad y la combinación de adecuadas propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas, han hecho que adquieran especial interés para la investigación científica y aplicada durante los últimos veinte años.

Cabe mencionar que las espumas metálicas fueron propuestas en 1943 por Benjamin Sosnik. Pese a que la tecnología de la época por ende el proceso original de fabricación era muy arriesgado y no abastecía lo suficiente para crearlas industrialmente y, Sosnik logró hacer una espuma metálica de aluminio con mercurio. En los últimos tiempos la tecnología de creación de espumas metálicas ha mejorado en los últimos años, sin embargo, sus aplicaciones siguen en desarrollo y revisión.

Entre las principales aplicaciones de las espumas metálicas esta la industria automotriz esto se debe al aumento de seguridad en los automóviles esto es equivalente a un aumento de peso en el vehículo. De la misma manera, en países como Japón se requieren autos de menor tamaño y con características similares o mejores de seguridad, por lo que los mencionados requerimientos técnicos dan lugar a problemas con la disipación del calor ya que están muy compactos todos sus componentes, para ello las espumas elásticas son las más comunes y da lugar a la fabricación de estructuras ligeras, filtros, intercambiadores de calor, paneles de absorción de ruido, dispositivos de amortiguamiento mecánico, electrodos, sensores en implantes biomédicos y estructuras y dispositivos para absorción de energía de impacto.

1.3 Planteamiento del Problema

La sociedad actual incentiva y motiva a la investigación en el campo de los materiales de ingeniería, especialmente en las universidades, principalmente aplicado en el campo automotriz el mismo que se encuentra en incesante desarrollo y progreso.

Se puede mencionar que los metales porosos son el resultado de la combinación de metal y gases, en donde los gases en forma de burbujas ocupan entre un 50 % y un 90 % de la estructura total, esto da a notar que alcanzan densidades muy bajas (entre 0,03-0,2 gr/cm³), el resultado es ello es que se obtiene un material con excelentes características térmicas, mecánicas y acústicas que son especialmente interesantes en aplicaciones de estructuras ultraligeras, así como sistemas de alta resistencia al impacto, elementos de disipación de calor y aislamiento acústico (Gutierrez J & Oñoro j, 2008),

Varios rasgos macroscópicos de su morfología (tamaño de poro, tipo de celda, curvatura de paredes de celda, la densidad específica) tienen una marcada significancia sobre la respuesta mecánica y demás características, estos parámetros pueden ser controlados mediante técnicas de procesamiento complejas y costosas, de ahí la dificultad de realizar estos métodos de aplicación de espumas metálicas. (Abarca, 2017)

Debido a los aspectos ya mencionados es necesario realizar un estudio acerca de la obtención de espumas metálicas de celda abierta, para aplicación de absorción de impacto en el campo automotriz basándose en la necesidad de mejorar la absorción de energía de impacto al momento de un choque o colisión de vehículos, para reducir las lesiones a los ocupantes (evitar latigazos cervicales).

1.3.1 Formulación del Problema de Investigación

¿De qué manera el estudio de obtención y caracterización de espumas metálicas de aluminio de celda abierta contribuye al desarrollo de materiales de absorción de energía de impacto en el campo automotriz?

Delimitación del Problema

Objeto de estudio: Espumas metálicas de aluminio de celda abierta

Campo de acción: Automotriz

Límite espacial: La presente investigación será realizada en la Carrera de Ingeniería Automotriz, de la ESPOCH, en la provincia de Chimborazo.

Delimitación temporal: La presente investigación se llevará a cabo en el año 2019.

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación teórica

En investigaciones que se han realizado a nivel del mundo, desde hace mucho tiempo, han dotado de información relevante para la obtención de espumas metálicas de celda abierta. En estas también se pueden encontrar varios métodos de obtención de las espumas metálicas, que se establecen en técnicas que abarcan la descomposición de partículas o el uso de preformas removibles, unos de los principales métodos que permiten esta obtención es: procesos de sinterización y disolución, infiltración por fundición de moldes con rellenos removibles, fundición de precisión con preforma de poliuretano (moldeo por inyección en cera perdida), descomposición de partículas (agente espumante) en líquido y sólido, electrodeposición, entre otras.

Con el argumento bibliográficos, en el presente trabajo investigativo se pretende obtener espumas metálicas de aluminio de celda abierta por el método de infiltración, en donde el cloruro de sodio (NaCl) es la preforma removible por disolución en agua. Se ha elegido este método por que puede brindar un alto grado de control sobre la estructura final y también por su simplicidad experimental. Además, sin considerar los costos de los equipos los costos de la materia prima que se utiliza no son de gran cantidad en este caso sal en grano y aluminio reciclado precisando como un proceso sencillo, económico y práctico.

1.4.2 Justificación metodológica

En la descripción metodológica inicialmente se procede a realizar la investigación bibliográfica para identificar el marco teórico reglamentario. La investigación utilizará ésta modalidad que es imprescindible y se acudirá a fuentes bibliográficas con información secundaria conseguidas en libros, revistas, publicaciones, folletos; así también en fuentes de información primaria obtenidas en documentos válidos y confiables, desde una perspectiva deductiva.

El enfoque técnico de la investigación es experimental, en la cual se desarrolla la conceptualización de la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta,

sistematizando su obtención desde la selección y ensamblaje de equipos, recopilación de información y el análisis de su morfología y caracterización mecánica.

Como herramientas metodológicas se utiliza el registro fotográfico, videos, y pruebas del equipo.

1.4.3 Justificación práctica

En el Ecuador no existen industrias dedicadas a la producción de espumas metálicas, lo que motiva a continuar investigaciones en este campo, siendo esta investigación un aporte significativo al desarrollo tecnológico del país, y aporte teórico práctico para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Automotriz. Cabe recalcar también que las espumas son potenciales para aplicar en el campo automotriz debido a su absorción de impacto.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Obtener y caracterizar espumas metálicas de aluminio de celda abierta por el método de infiltración de metal fundido en preformas solubles para aplicaciones de absorción de energía de impacto en el campo automotriz.

1.5.2 Objetivos específicos

- Recopilar toda la información necesaria acerca de la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta por el método de infiltración de metal fundido en preformas solubles.
- Seleccionar el protocolo experimental más viable para la obtención de estas espumas.
- Seleccionar y ensamblar los elementos del equipo para obtener espumas metálicas de celda abierta.
- Obtener espumas metálicas de aluminio de celda abierta.
- Caracterizar mecánicamente (Ensayo de compresión estático) y morfológicamente (tamaño de poro, espesor de ligamento, densidad relativa) las muestras de espumas metálicas de aluminio de celda abierta obtenidas.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sólidos celulares

El sólido celular se establece que son estructuras bifásicas donde una fase sólida continua está compuesta por gas disperso a lo largo de la misma. Por tanto, el gas disperso da origen a una estructura ya sea de poros abiertos o cerrados. Por ejemplo, cuando la manufactura del material celular es llevada a cabo mediante la dispersión de gas en el material base en estado líquido se forma una espuma, consecuentemente luego de su enfriamiento y solidificación puede pasar a llamarse espuma sólida o espuma. (Banhart, 2014)

Un sólido en estado líquido obligatoriamente tiene viscosidad y tensión superficial apropiada que de alguna manera se pueda generar un modelo de estructura que corresponda a una espuma, para que consecuentemente, luego de su enfriamiento se mantenga la estructura y posteriormente se convierta en espuma. (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

En resumen, se puede concluir que un sólido celular se refiere a una estructura sólida que está formada por la dispersión de un gas. En este sentido de acuerdo a su viscosidad puede variar el modelo de la estructura y finalmente puede convertirse en espuma.

2.2 Espumas metálicas

La espuma metálica se considera casos especiales de materiales celulares. Por otro lado, las espumas metálicas, son medios porosos realizados por el ser humano, considerando como base principal una matriz sólida de metal con huecos vacíos. (Gonzalez, 2015)

Partiendo del término de espuma, básicamente se debe identificar la diferencia entre espumas de sólidos o líquidos. En este sentido, la espuma de un sólido es el resultado del enfriamiento de una espuma líquida debajo del punto de fusión del material. Mientras que la espuma de un líquido, constituye la dispersión fina de burbujas del gas en un líquido. (Mentor Ashby & otros, 2012).

Las espumas metálicas se consideran un caso particular de los sólidos celulares, las espumas metálicas adicionalmente, son una especie de material relativamente nueva de bajas densidades y

con características bastante innovadoras cuyas propiedades comprenden las físicas, mecánicas, eléctricas, térmicas y acústicas. (Mentor Ashby & otros, 2012)

2.2.1 Características de las espumas metálicas

las características principales que hacen las empresas que trabajan con espumas metálicas han podido identificar que estos materiales son más utilizados para la fabricación de aislamientos acústicos y térmicos, sistemas de protección contra incendios, estructuras de poco peso resistentes al impacto, etc. (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

En este sentido, las espumas de aluminio son las más utilizadas en cuanto a los siguientes aspectos:

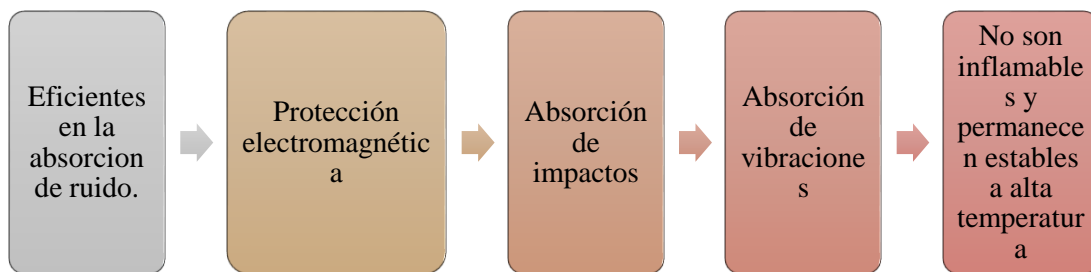


Figura 1-2. Aspectos a considerarse de las espumas metálicas

Fuente: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

En la actualidad, la mayoría de la investigación de dichos materiales se basa en las espumas de aluminio debido a las siguientes características:

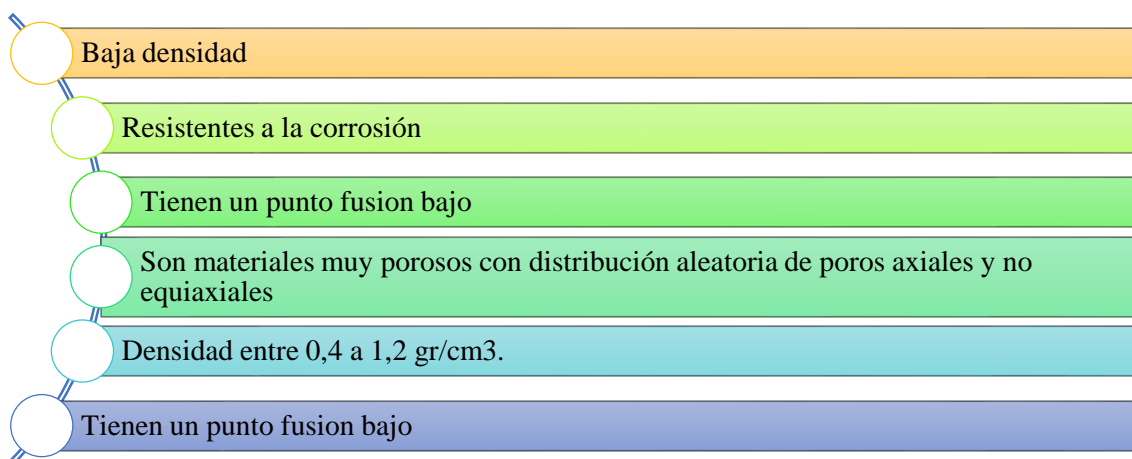


Figura 2-2. Características de espumas metálicas

Fuente: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

2.2.2 Clasificación de espumas metálicas

Existen varios criterios de clasificación, particularmente pueden clasificarse de la siguiente manera (Nebreda, 2014):

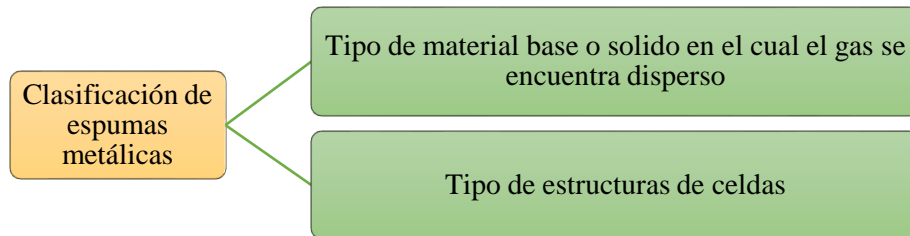


Figura 3-2: Clasificación de espumas metálicas

Fuente: (Nebreda, 2014)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

En cuanto al tipo de materia base, se refiere a los elementos constituyentes que lo conforman, en otras palabras, su composición. Por otro lado, cuando hablamos de estructura celular, se refiere específicamente, cuando está directamente relacionado a la forma en la que la fase gaseosa se encuentra difundida dentro de la matriz sólida (Abarca, 2017). En este sentido, cuando nos referimos a la estructura celular podemos distinguir dos tipos:

- a) De celda cerrada.
- b) De celda abierta.

✓ Estructuras de celda cerrada

Las estructuras de celda cerrada constituyen cuando el gas está confinado en el interior de cada poro. (Nebreda, 2014)

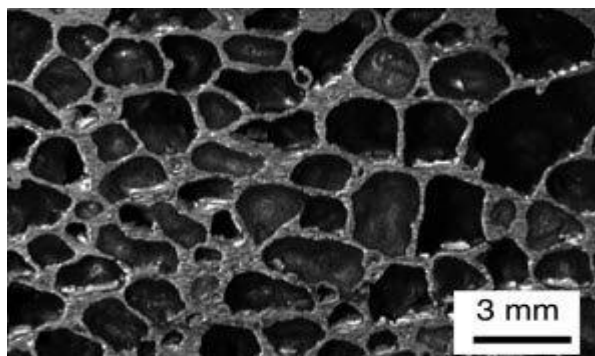


Figura 4-2: Espuma de aluminio de poro cerrado

Realizado por: (Nebreda, 2014)

✓ Estructura de celda abierta

Las estructuras de celda abierta constituyen cuando todos los poros están enlazados, como se muestra en figura 5-2, obteniendo como consecuencia una fase gaseosa continua por todo el material. Adicionalmente, cuando se habla de una espuma metálica de poro abierto. (Nebreda, 2014)

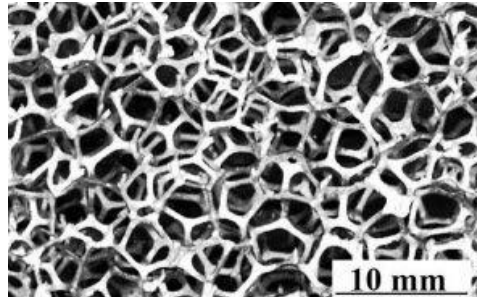


Figura 5-2: Espuma de aluminio de poro abierto

Realizado por: (Nebreda, 2014)

Las de poro abierto se utilizan por sus propiedades térmicas (son grandes disipadoras del calor). La fabricación de espumas de poro abierto se basa en la utilización de materiales de relleno que luego son eliminados.

2.2.3 Diferencia de estructuras de celda cerrada y abierta

De acuerdo a lo que establece, , ambas opciones pueden tener un uso determinado, pero la diferencia radica en lo siguiente (Gozalez, 2015):

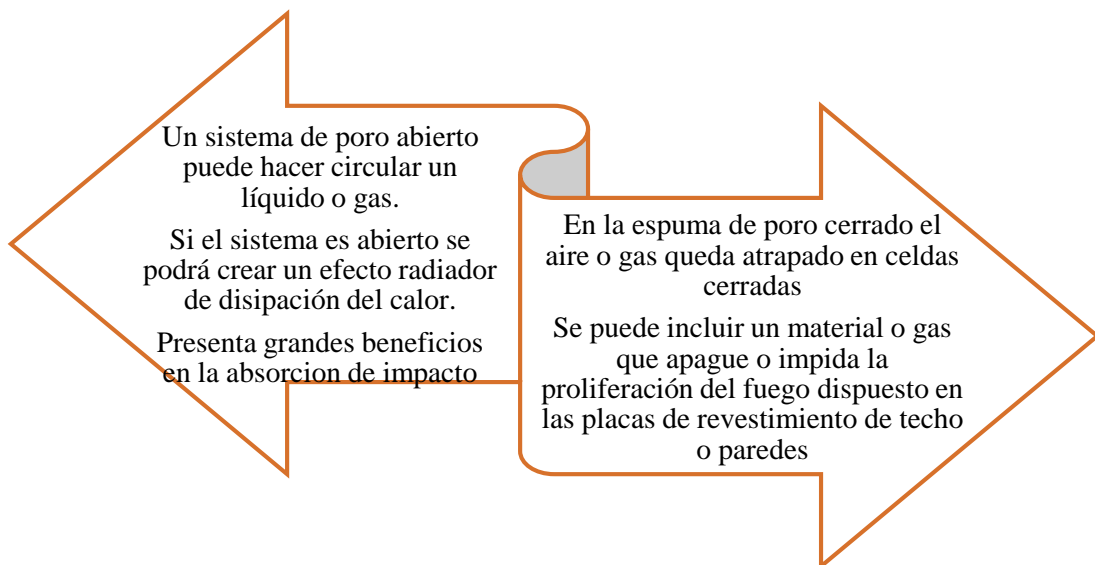


Figura 6-2: Principales usos de acuerdo a su tipo de poro.

Fuente: (Gozalez, 2015)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

2.2.4 Parámetros característicos

Las espumas metálicas se consideran materiales altamente porosos, de tal forma que dicha característica se presenta en la densidad relativa, siendo esta uno de los parámetros más esenciales que influye sobre las propiedades de la espuma. La densidad relativa (1), variara de cero a uno, siendo cero el material infinitamente poroso y uno el material completamente sólido. (Mentor Ashby & otros, 2012)

Para ello, a continuación, se presenta la fórmula de cálculo:

$$Pr = \frac{P}{Ps} \quad (1)$$

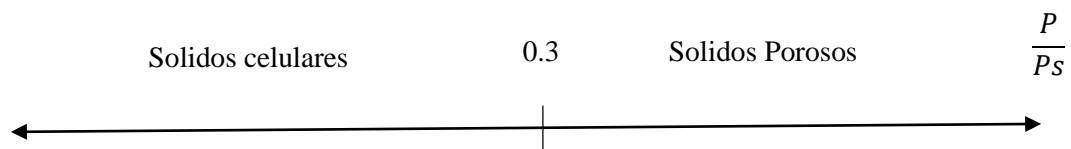
Donde:

Pr: Densidad relativa

P: Densidad del material celular

Ps: Densidad del material base

Dicho de otra manera, los sólidos celulares y los sólidos porosos se diferencian según su densidad relativa, tal como se muestra:



Fuente: (Irausquin, 2012)

Cuando se analiza o caracteriza los materiales celulares, se debe considerar además la cantidad de gas dilucido dentro de la estructura, es decir, la porosidad (p). La fórmula (2) que se presenta posteriormente hace referencia a la fracción volumétrica de gas presente en la estructura:

$$p = \frac{Ps - P}{Ps - Pg} \quad (2)$$

Donde:

p: porosidad

P: Densidad del material celular

Ps: Densidad del material base

Pg: densidad del gas disperso en el material celular

La fórmula (2) establece que debido a la densidad del gas con respecto a la densidad del material base, de esta manera, la porosidad está directamente relacionada con la densidad relativa. (Mentor Ashby & otros, 2012)

$$p \approx 1 - \frac{P}{P_S} = 1 - pr \quad (3)$$

En este sentido, la porosidad al igual que la densidad relativa, puede variar entre cero y uno. La porosidad representa el gas presente en la espuma, y la densidad relativa representa al metal base presente en la espuma.

Al momento de programar la fabricación de espuma, es necesario establecer el grado de expansión de manera esporádica, dicho parámetro indica el número de veces en las que se ha incrementado el volumen del material base cuando se introduce el gas en su interior, en este contexto, está la densidad relativa y la porosidad está directamente relacionada, para ello se ve la necesidad de aplicar la siguiente fórmula (4), (Nebreda, 2014).

$$G = \frac{V}{V_S} = \frac{P_S}{P} = \frac{1}{Pr} \quad (4)$$

Donde:

G: Grado de expansión

V: Volumen del material celular

Vs: Volumen del material base antes de la infiltración

Adicional a ello, se menciona que, a más de los parámetros mencionados, existen otros principales al momento de definir los materiales celulares, es importante mencionarlos en la figura 7-2 los parámetros adicionales (Nebreda, 2014):

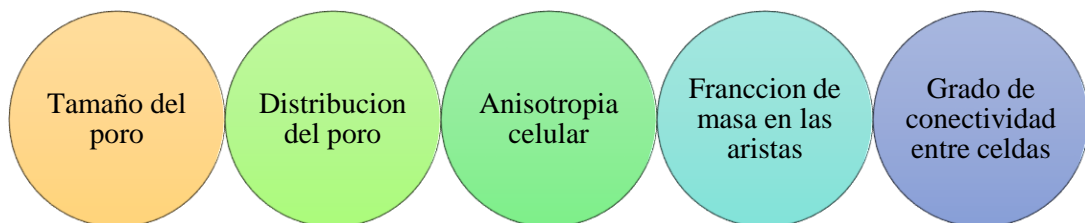


Figura 7-2: Parámetros adicionales

Fuente: (Irausquin, 2012)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

2.2.5 Rutas principales de fabricación de materiales celulares metálicos

Los procesos para la fabricación de espumas metálicas se dividen en cuatro clases (Mentor Ashby & otros, 2012):

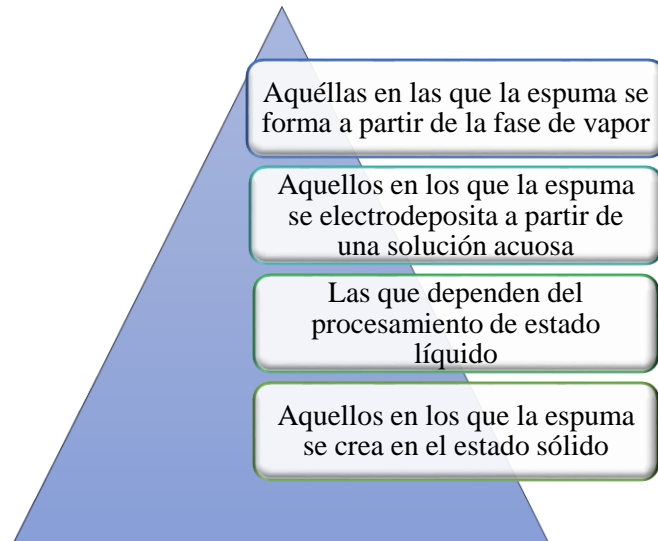


Figura 8-2: Clases de procesos para la fabricación de espumas metálicas

Fuente: (Mentor Ashby & otros, 2012)

Elaborado por: Pacha & Chango, 2019

En este contexto, cada uno de los métodos, puede utilizarse dentro de un subconjunto de metales, para de esta manera crear material poroso con rangos limitados de densidades relativas y tamaños de celdas. Sin embargo, diferentes materiales producen espumas de celda abierta, mientras que otros producen espumas donde mayoritariamente las celdas están cerradas.

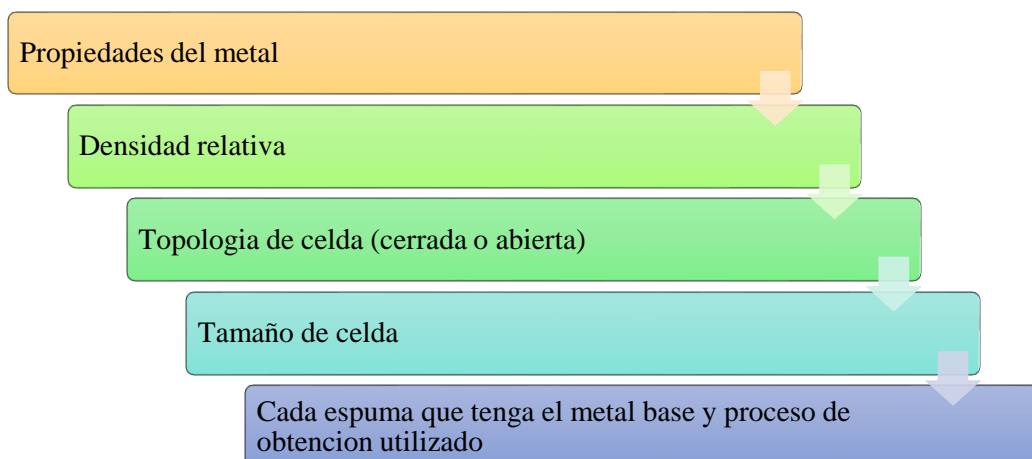


Figura 9-2: Propiedades de la espuma metálica

Fuente: (Mentor Ashby & otros, 2012)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Por otro lado, las propiedades de la espuma metálica dependen de los siguientes aspectos, se muestra en la siguiente figura 9-2:

Es menester considerar estos factores como propiedades que de una u otra manera conllevan a la elaboración de las rutas para la fabricación de espumas, en consecuencia, a ello, se han determinado nueve rutas distintas de proceso para fabricar espumas metálicas, las mimas que no son relativamente conocidas, por eso se considera solo seis rutas se han establecido comercialmente, dicha ruta se detalla a continuación en la siguiente figura 10-2:

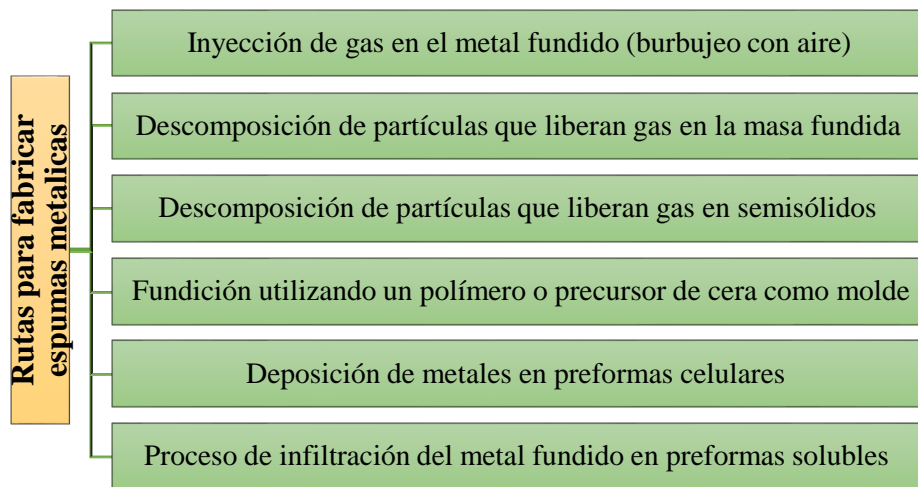


Figura 10-2: Rutas para fabricar espuma metálica

Fuente: (Mentor Ashby & otros, 2012)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

❖ **Inyección de gas en el metal fundido (burbujeo con aire).**

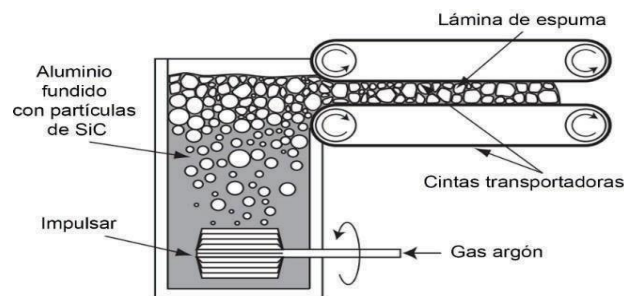


Figura 11-2: Esquema de la fabricación de una espuma de aluminio por el método de inyección de gas en el metal fundido (procesos CYMAT e HYDRO).

Realizado por: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

El nombre comercial del proceso de inyección de gas en el metal fundido se denomina CYMAT, como se observa en la figura 11-2. Consecuentemente, los procesos de inyección de gas se consideran que al ser implementados son más factiblemente cuando se incluyen en aleaciones de aluminio ya que tienen una baja densidad y no sufren oxidación relevante cuando la masa fundida entra en contacto con el aire u otros gases que incluyen oxígeno. (Jose Gutierrez & Juan Oñoro, 2015)

Los metales puros en estado líquido no pueden ser fácilmente espumados por burbujeo de gas, esto se da porque el líquido drena por las paredes de las burbujas demasiado rápido lo que impide que permanezca estable el tiempo suficiente hasta solidificarse. Sin embargo, la viscosidad del metal líquido es elevada a través de la adición del 10-30% de partículas cerámicas (carburo de silicio, óxido de aluminio, óxido de magnesio), para así retrasar el drenaje en la membrana de burbujas, estabilizando de esta manera la espuma, adicionalmente, el tamaño de estas partículas puede estar entre 5-20 μm . (Jose Gutierrez & Juan Oñoro, 2015)

❖ **Descomposición de partículas que liberan gas en la masa fundida.**

De acuerdo el nombre comercial del proceso de descomposición de partículas que liberan gas en la masa fundida se denomina Alporas, como se detalla en la figura 12-2. Comienza a través de la fundición del metal, más favorablemente el aluminio, para posteriormente estabilizar su temperatura entre 670 y 690 °C., con la finalidad de impedir que las burbujas de gas se unan, floten, o escapen al exterior. Sin embargo, también menciona que, consecuentemente, se eleva su viscosidad añadiendo 1 – 2% de calcio, el mismo rápidamente se oxida y forma finas partículas dispersas de CaO y CaAl₂O₄ (Pedro Cruz, Luis Fernandez & javier Coletto, 2008).

Subsiguientemente, se menciona que la masa fundida es agitada rápidamente y se añade el agente espumante, para el caso del aluminio el más ampliamente utilizado, es el hidruro de titanio (TiH₂) en una cantidad de 1 – 2 %, este puede presentarse en forma de partículas de diámetro de 5 – 20 μm , adicional a eso, al calentarse por encima de 465 °C aproximadamente, se empieza a descomponerse en Ti y H₂, es decir, el Ti se agrega al metal base como solución sólida y el H₂ es el gas que encierra la burbuja, normalmente tarda diez minutos para descomponerse totalmente (Jose Gutierrez & Juan Oñoro, 2015).

El agente espumante se dispersa en la masa fundida, el sistema de agitación se retira y se deja que se forme una espuma sobre la masa fundida. Además, el control del proceso se consigue ajustando la sobrepresión, el tiempo y la temperatura. Posteriormente, cuando se completa la formación de espuma, se enfría la masa fundida para solidificarse antes de que escape el hidrógeno y las

burbujas se unan o se colapsen. En este sentido, se crea burbujas que pueden conducir a una espuma con una estructura predominantemente de celda cerrada (Banhart, 2014).

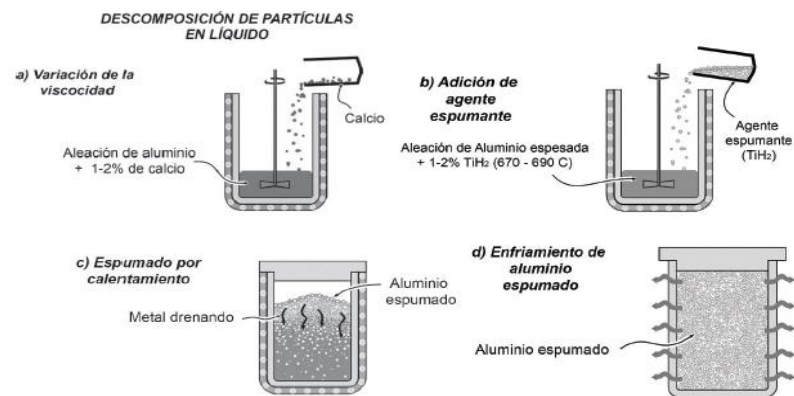


Figura 12-2: Etapas del procedimiento realizadas en la fabricación De espuma de aluminio por descomposición Partículas que liberan gas en la masa fundida (proceso Alporas).

Realizado por: (Mentor Ashby & otros, 2012)

❖ Descomposición de partículas que liberan gas en semisólidos.

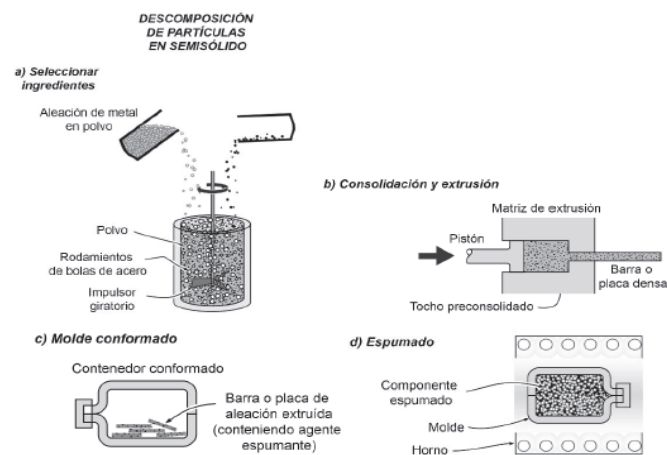


Figura 13-2: Etapas del procedimiento de metalurgia de polvos utilizados en la fabricación de espumas metálicas.

Fuente: (Mentor Ashby & otros, 2012)

De acuerdo a lo que establece, el nombre comercial del proceso para la fabricación de espumas metálicas mediante partículas que liberan gas en semisólidos se denomina Alulight como se muestra en la figura 13-2. Particularmente, dicho proceso empieza por medio de la combinación

de partículas de un agente espumante, usualmente el hidruro de titanio (TiH_2) con polvos de una aleación de aluminio.

Por tanto, el hidruro de titanio, es el agente espumante utilizado ampliamente, y posteriormente se va descomponiendo a aproximadamente $465\text{ }^\circ\text{C}$, que está muy por debajo del punto de fusión de aluminio puro ($660\text{ }^\circ\text{C}$) y de sus aleaciones. Consecuentemente, los componentes son completamente mezclados, compactados en frío y luego extruidos en forma de barra o placa, es decir, metalurgia de polvos. En este sentido, es necesario comprimir los polvos mezclados en un bloque relativamente sólido, con la finalidad de que cuando se tenga el lugar el espumado, el gas no escape del material (Pedro Cruz, Luis Fernandez & javier Coletto, 2008).

Se menciona que dicho material precursor es cortado en pequeñas piezas, ubicándolas dentro de un molde sellado, y calentado ligeramente por encima de la temperatura de sólidos de la aleación. Sin embargo, el hidruro de titanio se descompone, creando vacíos con una elevada presión interna. Posteriormente, estos se expanden por el flujo semisólido y de esta manera el aluminio se expande, creando una espuma que termina de ocupar el molde. Consecuentemente, el proceso da como resultado componentes con la misma forma que el recipiente y densidades relativas tan bajas como 0,08. Es decir, la espuma tiene celdas cerradas con diámetro que varían de 1 a 5 mm (Mentor Ashby & otros, 2012).

❖ **Fundición utilizando un polímero o precursor de cera como molde.**

De acuerdo a lo que establece que el nombre comercial del proceso de Fundición utilizando un polímero o precursor de cera como molde se denomina Duocel como se observa en la figura 14-2. Dicho proceso, comienza seleccionando primeramente una plantilla hecha de espuma de polímero de celda abierta con el tamaño de poro y densidad relativa requeridos. Esta plantilla de espuma es infiltrada por una suspensión de polvo de cerámico (yeso), consecuentemente, es calentada a $700\text{ }^\circ\text{C}$ para secar y endurecer el material, y sobre todo para descomponer (y evaporar) la plantilla de polímero, dejando detrás una imagen negativa de la espuma. Considerando, que el molde se rellena posteriormente con una aleación metálica, usualmente en vacío y con alta presión para superar la resistencia al flujo de algunas aleaciones líquidas, posteriormente se deja enfriar hasta que solidifique el metal (Jose Gutierrez & Juan Oñoro, 2015).

En este contexto, se menciona que luego el polvo cerámico es removido del molde mediante chorro de agua o golpes, dejando atrás el equivalente metálico de la espuma polimérica original. En lugar de metales líquidos puede también utilizarse mezclas de polvo metálico, estos posteriormente son sinterizados.

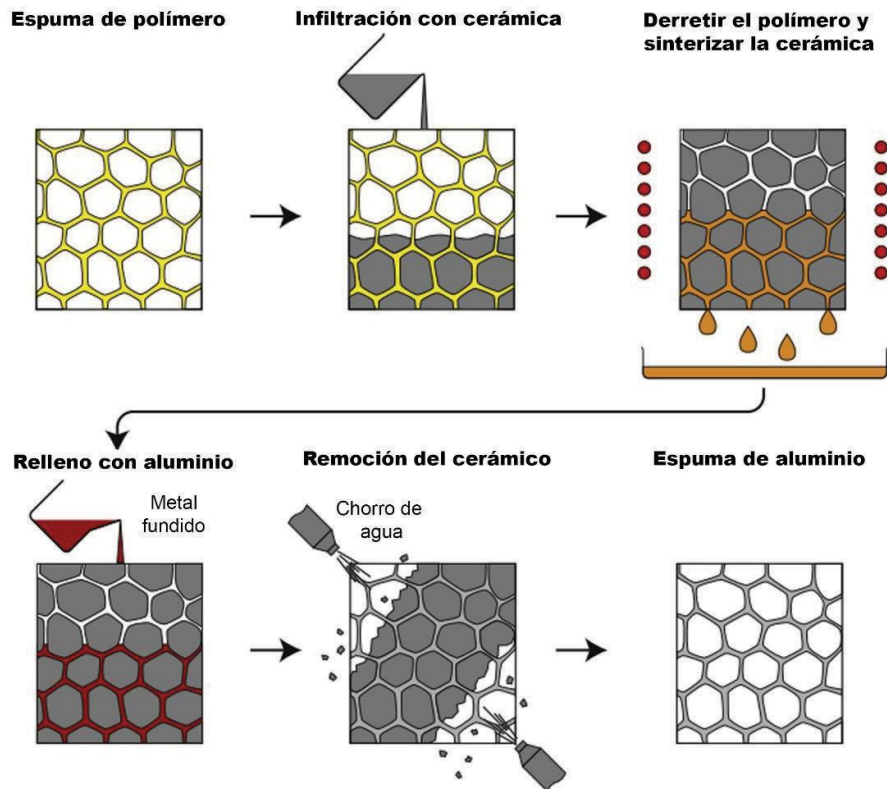


Figura 14-2: Etapas del procedimiento utilizando un polímero o precursor De cera como molde para fabricar espumas metálicas.

Realizado por: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

❖ Deposición de metales en preformas celulares.

De acuerdo a lo que establece que el nombre comercial del proceso de deposición de metales en preformas celulares se denomina INCO como se observa en la figura 14-2. Básicamente, el proceso consiste en que espumas poliméricas de celda abierta que sirven como plantillas, son recubiertas por metales mediante descomposición química de vapor (CVD), por evaporación o por electrodeposición. En este sentido, el CVD,

El níquel recubre la espuma mediante un gas denominado carbonilo de níquel ($\text{Ni}(\text{CO})_4$), dicho gas se descompone en níquel y monóxido de carbono a una temperatura aproximadamente de 100°C y recubre todas las superficies calentadas expuestas dentro del reactor. Posteriormente se deposita determinadas decenas de micrómetros del metal, la espuma polimérica revestida se separa del reactor CVD, es decir, el polímero es removido por calentamiento en aire. Consecuentemente esto da como resultado una espuma metálica de celda abierta con ligamentos huecos. Consecutivamente, se utiliza una fase de sinterización para densificar los ligamentos (Mentor Ashby & otros, 2012).

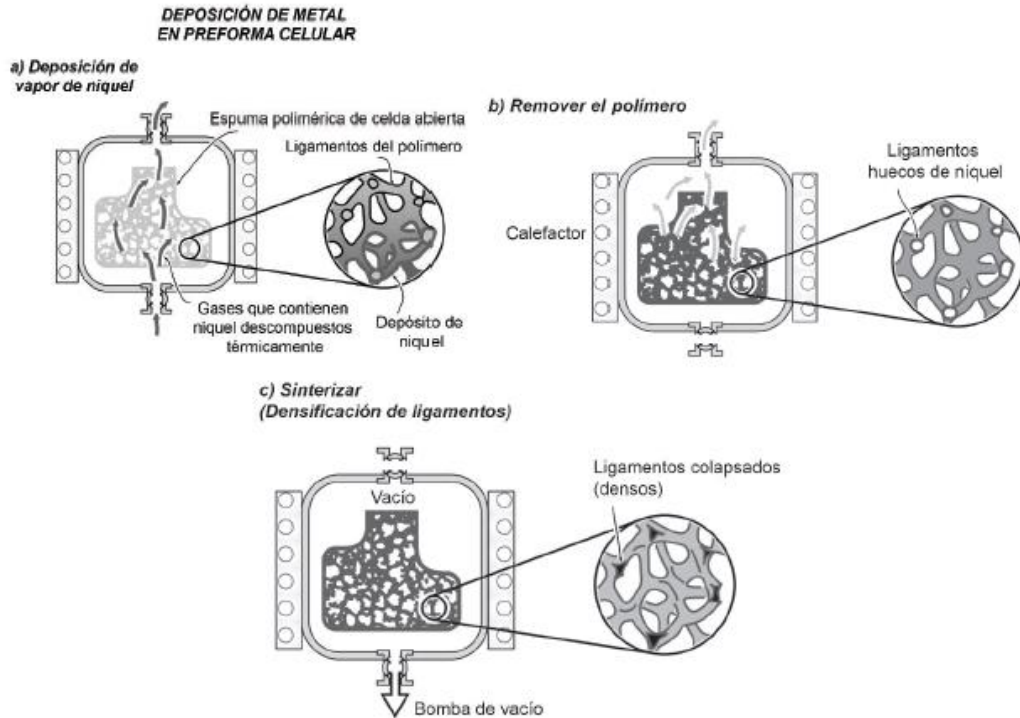


Figura 15-2: Etapas del procedimiento utilizando para crear espumas de níquel de celda abierta (proceso INCO).

Realizado por: (Mentor Ashby & otros, 2012)

En este sentido, se menciona que el gas de carbonilo de níquel es altamente tóxico y se necesita costosos controles ambientales antes de que pueda usarse para la obtención de espumas de níquel.(Mentor Ashby & otros, 2012).

❖ **Proceso de infiltración del metal fundido en preformas solubles.**

El proceso de replicación para la fabricación de espumas de células abiertas también definido como proceso de replicación o retenedor de espacio, dicho proceso reside en la producción de metales micro celulares de poros abiertos, donde el metal líquido se infiltra o llena los espacios abiertos dejados por una preforma de material sólido, posteriormente, una vez que el metal solidifica, esta se disuelve (Banhart, 2014).

La preforma debe cumplir obligatoriamente dos condiciones principales (Yolanda Conde, Jardy Despois, Roman Goodall & Andrea Mortensen, 2006) :

- Ser químicamente estables en contacto con el material base que debe ser fabricado la espuma,
- Ser fáciles de remover una vez que este material se ha solidificado.

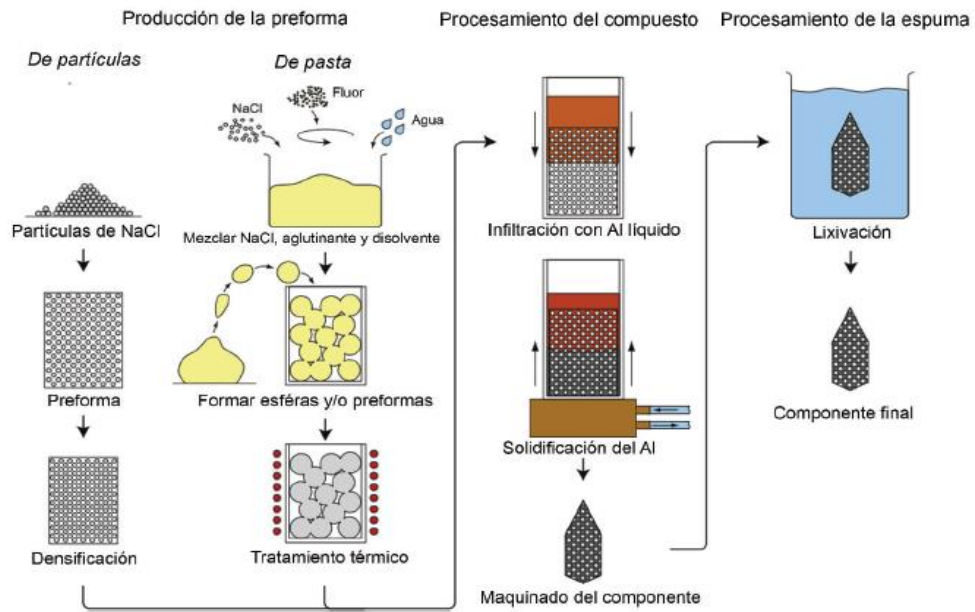


Figura 16-2: Etapas del procedimiento de replicación para la fabricación de espumas de células abiertas

Realizado por: (Mentor Ashby & otros, 2012)

Por esta razón, se estima que disolver o lixiviar una preforma en un disolvente como el agua, es una de las rutas más viables. Por tanto, los materiales para la producción de preformas lixiviables que serán infiltrados por el metal deben cumplir obligatoriamente dos requisitos fundamentales:

- Deben ser más refractarios que el fluido infiltrante.
Deben ser químicamente compatibles con el metal o material de espuma en todas las etapas del proceso, además que incluya la infiltración, considerando que las temperaturas son a menudo altas y lixiviación considerando que no deben causar corrosión del material de espuma.

La producción de espumas con metales o materiales que se procesan a temperaturas de hasta aproximadamente 750°C , el cloruro de sodio (NaCl), en otras palabras, la sal de mesa ordinaria, es un retenedor de espacio que se adapta bastante bien al proceso. Este resulta ser poco costoso, químicamente inerte en contacto con el aluminio fundido y muchos otros materiales, fácilmente se lixivía debido a que es muy soluble en agua, y no crea ningún peligro en el medio ambiente o en la salud, por tal razón, el cloruro de sodio es utilizado en la producción de diversas esponjas por el método de replicación (Diego Laughlin & Key Hono , 2014).

El cloruro de sodio proporciona dos inconvenientes. (Luna E. , Barari F., Woolle R., & Goodall R., 2014)

- ❖ Puede causar corrosión del metal en el agua durante la disolución. Por este motivo, se conoce que la técnica soporta problemas con el magnesio como material infiltrante, con aleaciones de aluminio, además pueden generar problemas, por consiguiente, si el metal es propenso a la corrosión en húmedo.
- ❖ Su punto de fusión, aunque relativamente alto (801 ° C), es menor que el de diferentes materiales de espuma importantes tales como el cobre, el mismo lo limita para su utilización sólo con metales que tengan un punto de fusión menor a este valor, en su mayoría comúnmente aluminio.

Del mismo modo, mencionan que la sustitución del NaCl con materiales de mayor punto de fusión, puede incluir otros materiales solubles en agua u otros insolubles, ya sea incluyendo diversos tipos de arena, promueven la producción de espumas metálicas de igual forma con mayor punto de fusión. Hasta la actualidad, se han producido espumas metálicas de casi todos los metales de fundición, incluyendo aleaciones basadas en aluminio, cobre de magnesio, zinc, hierro, níquel y cobalto (Luna E. , Barari F., Woolle R., & Goodall R., 2014).

2.3 Métodos de caracterización

En el interior de la estructura de los metales porosos es indispensable conocer el tamaño y la forma de poros. Además de las propiedades del metal denso, dicha forma o arquitectura de poros, son los influyentes principales sobre las propiedades mostradas por las espumas (Mentor Ashby & otros, 2012).

En este sentido, para una correcta caracterización sea esta estructural o mecánica, los especímenes de espuma metálica deben ser seccionados, y de esta manera se podrá minimizar el daño de las celdas o poros, no obstante, puede utilizarse una sierra de diamante, una máquina de descarga eléctrica o por molienda química.

2.3.1 Caracterización estructural

La estructura contiene todo lo relacionado a la distribución en tres dimensiones de la fase sólida dentro de la espuma, y que, al tratarse esta de un arreglo complejo, se puede utilizar habitualmente ciertos parámetros medibles para describirlos. (Banhart, 2014)

Básicamente, los parámetros a considerar pueden ser: la densidad, el diámetro medio de poro, sin embargo, dependiendo del tipo de porosidad ya sea celda abierta o cerrada. Para el caso de celda abierta, se considera al metal poroso como más similar a un arreglo de elementos tipo ligamentos delgados y regulares, en lugar de poros aislados o semi-aislados. En este sentido, los parámetros más fundamentales a considerarse no son los de los poros, al contrario, se consideran los relativos a los ligamentos, estos pueden ser: la longitud de ligamento, el diámetro del ligamento y la forma de la sección transversal (Banhart, 2014).

Diversos metales porosos tienen estructuras estocásticas o aleatorias, por ende, están sometidos a variaciones estadísticas relacionadas con su estructura. Consecuentemente, cuando las muestras son grandes lo suficientemente, es variaciones se suavizarán en las mediciones y cálculos para dar un valor promedio aproximado, y por ende la determinación del tamaño de poro permite extraer medidas estadísticas estándar de distribución y confianza para caracterizar el alcance de estas irregularidades.

Generalmente, las diferencias individuales, localizadas suelen tener un efecto significativo sobre algunas propiedades de la espuma, especialmente en el comportamiento mecánico, por tanto, en algunos casos es indispensable identificar los valores extremos. (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

2.3.2 *Determinación de la densidad*

Para la manera regular de la espuma, la determinación de su densidad es simple relativamente, básicamente, se mide la masa y posteriormente se calcula el volumen a partir de sus dimensiones y se aplica la relación: $\text{densidad} = \text{masa}/\text{volumen}$. Sin embargo, en diferentes circunstancias, las muestras de espuma tienen formas irregulares, de este modo, resulta complicado determinar las medidas necesarias que promuevan el cálculo de su volumen (Banhart, 2014).

En este sentido, se puede utilizar el principio de Arquímedes, que menciona que el volumen de fluido desplazado por un objeto es igual al volumen del mismo objeto. En otras palabras, el procedimiento es válido para espumas de celda cerrada, mientras que para las espumas de celda abierta lógicamente el resultado será la densidad del metal base más no la de la espuma.

2.3.3 *Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido*

Tabla 1-2. Microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido

Microscopía óptica	la microscopía electrónica de barrido (SEM)
La preparación de muestras de espuma para la obtención de imágenes sigue los mismos pasos usados para los materiales densos, tales como: el seccionamiento, el pulido y el montaje de la muestra en el equipo microscópico.	La preparación de la muestra es mucho más fácil, puesto que la espuma metálica ya es conductora y no hay necesidad de aplicarle algún recubrimiento de oro o carbono. Se puede analizar los topográficos, en otras palabras, analizar la estructura de la espuma, y además realizar un análisis espectro gráfico de la composición de la muestra.
Se ha utilizado para revelar muchos aspectos de la estructura de la espuma.	

Fuente: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

La microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido (SEM) son herramientas principales en muchos aspectos de la metalurgia. Para ello ha sido necesario generar una diferencia. (Mentor Ashby & otros, 2012)

2.3.4 *Tomografía computarizada de rayos X*

Se menciona que cuando se habla de imagen de rayos x, la aplicación más avanzada y actualizada es la tomografía computarizada de rayos x. considerando de esta manera, un proceso, donde una serie de imágenes en 2D por medio de rayos x, de alguna estructura, son captadas con una rotación de unos pocos grados entre cada una. Después, se aplica algoritmos informáticos que utilizan tales imágenes 2D, para reconstruir la forma 3D resultante. Esto produce un archivo 3D que muestra la posición en el espacio de una fase o fases particulares de interés (Banhart, 2014).

2.3.5 *Densidad relativa y tamaño del poro*

Los dos parámetros principales y medidos en la evaluación de la estructura de las espumas metálicas son la densidad relativa y el tamaño del poro. Para ello se explica en la figura .17-2 (Diego Laughlin & Key Hono , 2014).

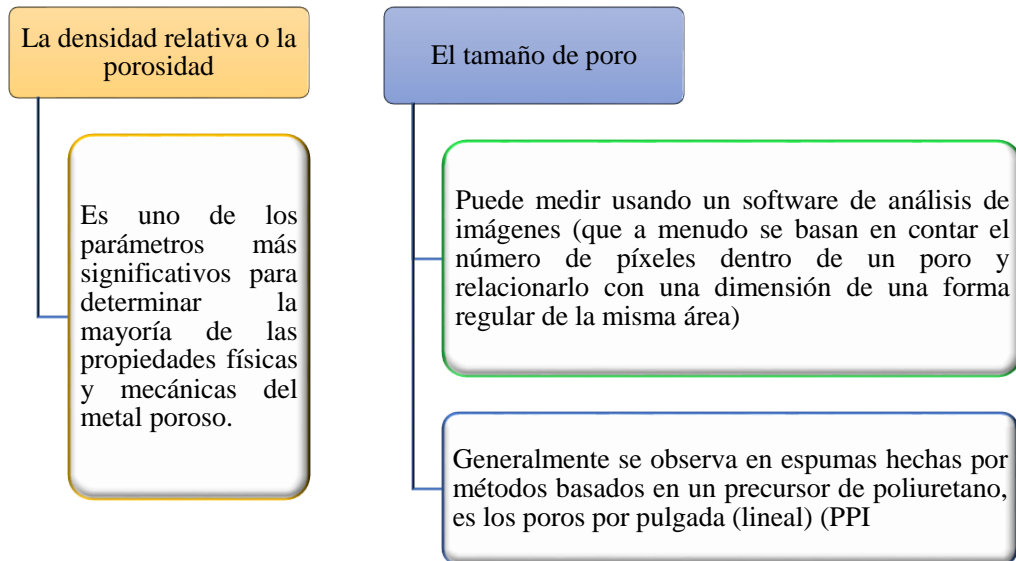


Figura 17-2: Parámetros a ser evaluados en la estructuras de espumas metálicas

Fuente: (Mentor Ashby & otros, 2012)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

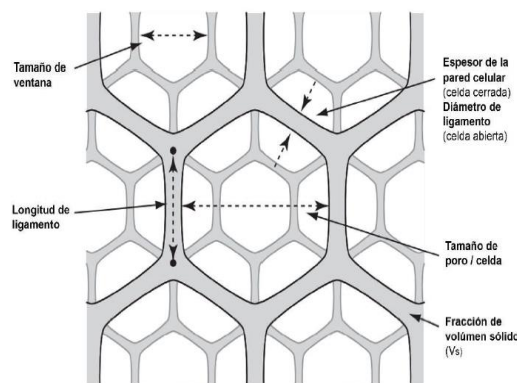


Figura 18-2: Parámetros a ser evaluados en la estructuras de espumas metálicas

Realizado por: (Mentor Ashby & otros, 2012)

En la figura 18-2, se presenta las dimensiones en un modelo genérico de meso-estructura de espuma. De este modo, las espumas son estructuras estocásticas, que manejan solamente valores promedios de la distribución del tamaño de poro y la distribución en cualquiera de las mediciones de tamaño, consecuentemente, este puede resultar erróneo. (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

- **Forma de poro**

Al evaluar y cuantificar la forma real de los poros a menudo es fundamental, adicionalmente, la técnica empleada frecuentemente para simplificar la descripción de la forma es comparar un poro con un círculo o una elipse. En este sentido, para la realización de esta evaluación, primero se

mide el diámetro más grande que puede ser registrado en cualquier ángulo, junto con el diámetro en una dirección ortogonal, y si la relación encontrada entre estos es cercana a 1, se puede suponer que los poros son equiaxiales (Banhart, 2014).

- **Anisotropía**

De acuerdo a lo que establece una característica principal que habitualmente presentan diversas espumas que están inmersas en alguna fase de su procesamiento, la utilización de gas para espumar el líquido, es que la estructura no será perfectamente isotrópica, esto suele darse por que los poros tienden a ser alargados a lo largo de la dirección de la gravedad (Mentor Ashby & otros, 2012).

En otras palabras, la anisotropía puede también presentarse en espumas metálicas de celda cerrada que han sido procesadas mediante el metal en estado líquido, y también las espumas hechas utilizando una plantilla de polímero reticulado. Particularmente, en lo que se refiere a la influencia sobre la respuesta mecánica, la anisotropía de la forma de poro puede conllevar a diferencias significativas (alrededor del 30%) entre los módulos, esto en función de la dirección en que sean medidos.

- **La microestructura**

La microestructura en una espuma metálica puede ser indagada de la misma manera en que se lleva a cabo para los metales densos, no obstante, mediante las técnicas de microscopía con un poco de cuidado cuando se preparan las muestras. Básicamente, todas las características microestructurales encontradas en metales densos pueden ser observadas en espumas, de igual forma las estructuras dendríticas, eutécticas y óxidos. En este sentido, las indagaciones de la microestructura dentro del propio metal de las espumas son pocas relativamente, ya que su mayoría de autores se concentran en la estructura de poros como una característica principal que define una espuma, y probablemente es el factor más significativo que determina sus propiedades. Consecuentemente, en los métodos de estado líquido donde la solidificación determina la microestructura, es posible que los poros proporcionen una restricción física y puedan influir en la formación de la microestructura (Banhart, 2014).

- **Prueba de compresión uniaxial**

Una prueba de compresión uniaxial típica, se considera cuando los dos extremos superior e inferior de la muestra, como se muestra en la figura 19-2, entran en contacto con las placas de

carga, y los lados en cambio están libres. En otras palabras, las paredes de poros ubicados en las caras laterales de la muestra, son lógicamente menos limitadas que las de la mayoría de la muestra y contribuyen menos a la rigidez y resistencia. Es así, que como resultado, el valor medido del módulo de Young y la resistencia a la compresión aumenta con la relación creciente del tamaño de la muestra al tamaño de la celda (Diego Laughlin & Key Hono , 2014).

Adicionalmente, como regla general, los efectos de frontera pueden hacerse insignificantes, si la relación del tamaño de la muestra con el tamaño de la celda, es mayor que siete aproximadamente, es decir, las pruebas de compresión uniaxial en espumas se realizan mejor en muestras prismáticas o cilíndricas con una relación de altura a espesor superior a 1,5.

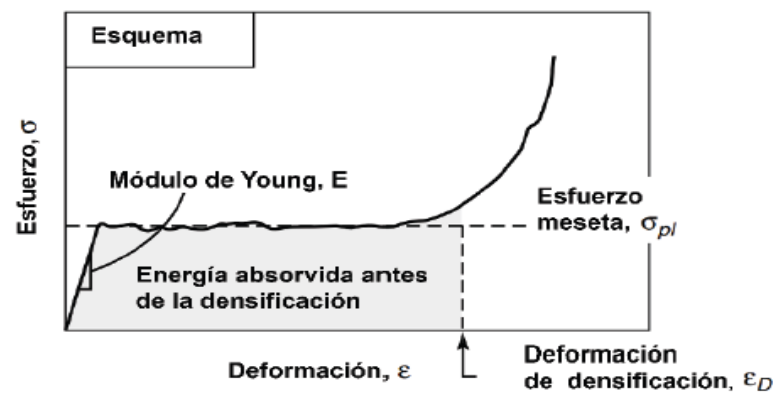


Figura 19-2: Esquema de las tres zonas (región lineal elástica, región de meseta extendida y región de densificación)

Realizado por: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

Considerando la figura 20-2, la curva esfuerzo – deformación de un ensayo a compresión de una espuma metálica generalmente puede presentar tres regiones respectivamente: región lineal elástica (o zona elástica), región de meseta extendida con un esfuerzo casi constante y región de densificación cuando los poros colapsados se compactan, del mismo modo se observa la figura 20-2 considerando la espuma CYMAT y Alporas (Xialoqing, Zihua, Hongwei, Longmao & Guitong , 2006).

Particularmente, la resistencia a la fluencia a compresión de la espuma se considera como la tensión del pico inicial del esfuerzo si es que lo hay, al contrario, se considera como el esfuerzo en la intersección de dos pendientes: por un lado, la de la carga inicial y la de la meseta de esfuerzo, en otras palabras, se desarrolla una extrapolación. Como se observa a continuación en la figura 2.21 (Nebreda, 2014).

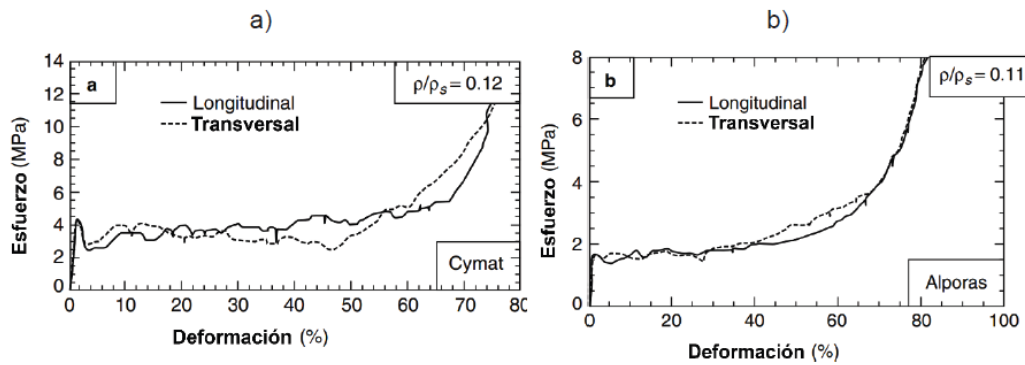


Figura 20-2: Diagramas esfuerzo-deformación a compresión uniaxial practicado a: a) una espuma CYMAT y b) espuma Alporas.

Realizado por: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

Si la zona elástica por algún motivo ha sido delimitada, se determina el módulo de elasticidad, mediante la aplicación de la ley de Hooke, (Beer, Johnson, Dewolf, & Mazurek, D, 2013), cuya fórmula es la siguiente (5):

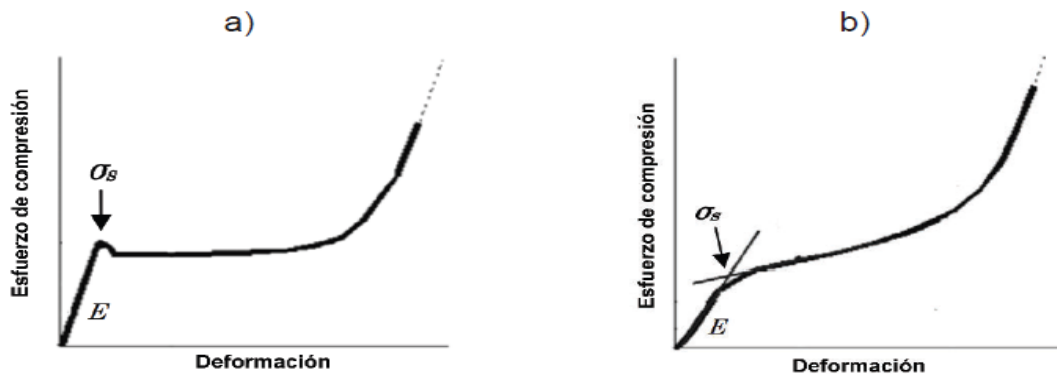


Figura 21-2: (a) Resistencia a la fluencia a compresión determinado por el pico inicial de la curva. (b) Resistencia a la fluencia a compresión determinada por la intersección de dos pendientes: la de la carga inicial y la de la meseta de esfuerzo.

Realizado por: (Diego Laughlin & Key Hono , 2014)

$$\sigma = E * \epsilon \quad (5)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo

E = Módulo de elasticidad

ϵ = Deformación unitaria

La cantidad de energía compresiva absorbida se define como área bajo la curva esfuerzo-deformación, para ello se utiliza la siguiente formula (6) (Xialoqing, Zhihua, Hongwei, Longmao & Guitong , 2006):

$$W = \int_{\sigma}^{\epsilon_m} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (6)$$

Dónde:

$\sigma(\epsilon)$ s): Ecuación de la curva en función de la deformación unitaria

W = Energía compresiva absorbida

ϵ_m = Deformación dada

El engrase de las caras de la muestra en contacto con los platos de carga minimiza los efectos de fricción y se puede obtener una resistencia aparente a la compresión que es hasta un 25% mayor que la de un espécimen seco. Además, las variaciones en la microestructura y las propiedades de la pared de celda de algunas espumas actualizadas dan lugar a variabilidad en las propiedades mecánicas medidas. Particularmente, la desviación estándar en el módulo de Young de las espumas de aluminio es típicamente entre 5% y 30% de la media, por otro lado, la resistencia a la compresión es típicamente entre 5% y 15% (Mentor Ashby & otros, 2012).

Aplicaciones de los materiales metálicos celulares

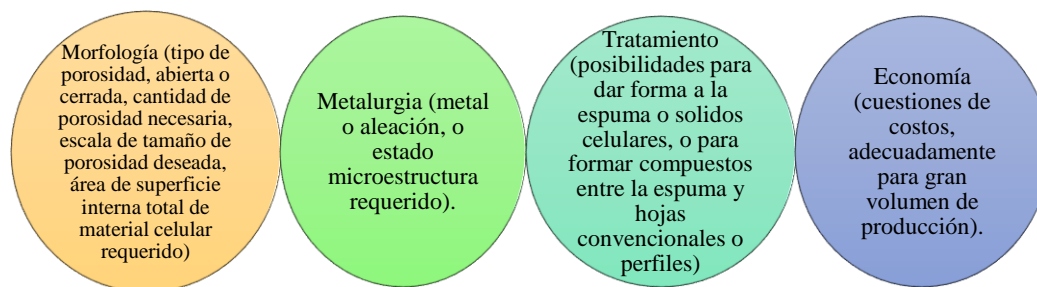


Figura 22-2: Características para la aplicación de materiales metálicos

Realizado por: (Irausquin, 2012)

Los materiales metálicos celulares se han determinado una variedad de aplicaciones, las mismas que depende de diversas características como pueden ser, se muestra en la figura 22-2 (Banhart, 2014):

Adicionalmente, La morfología es sumamente importante para cualquier evaluación de aplicaciones de espumas metálicas. Para ello, se muestra a continuación la figura 23.2:

El atributo fundamental de los materiales celulares en comparación a los sólidos

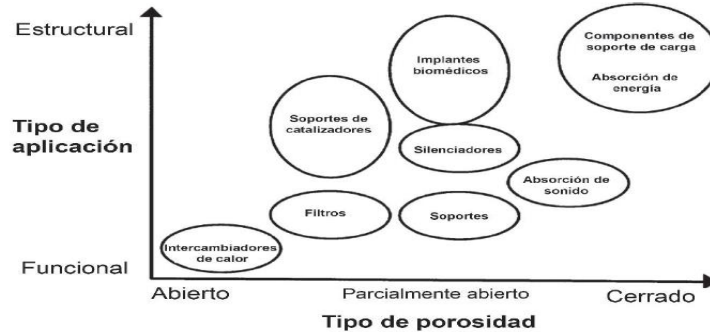


Figura 23-2: Aplicaciones de los metales celulares agrupadas según el tipo de celda abierta o cerrada, y si la aplicación, es más funcional o estructural.

Realizado por: (Nebreda, 2014)



Figura 24-2: Principales campos de aplicación automotriz de espumas metálicas estructurales.

Realizado por: (Nebreda, 2014)

2.3.6 Aligeramiento de estructuras

Generalmente, lo que respecta a la aplicación con función estructural, la principal restricción a la hora de elegir un material, es el peso específico o densidad. En este contexto, los materiales celulares comprenden una opción con respecto a cualquiera de los materiales convencionales.

En este sentido, los sectores principales donde se puede explotar esta ventaja son el de la construcción y el del transporte. La manera de utilizar los materiales celulares metálicos en los sectores, básicamente es por medio de su incorporación dentro de otras piezas o a manera de paneles compuestos como se observa en la figura 25-2.

Cuando hablamos de aligeramiento estructural, principalmente tiene como ventaja la flotabilidad, la misma que conjuntamente con su rigidez las convierte en candidatas para obtener mayor espacio en el sector los próximos años.

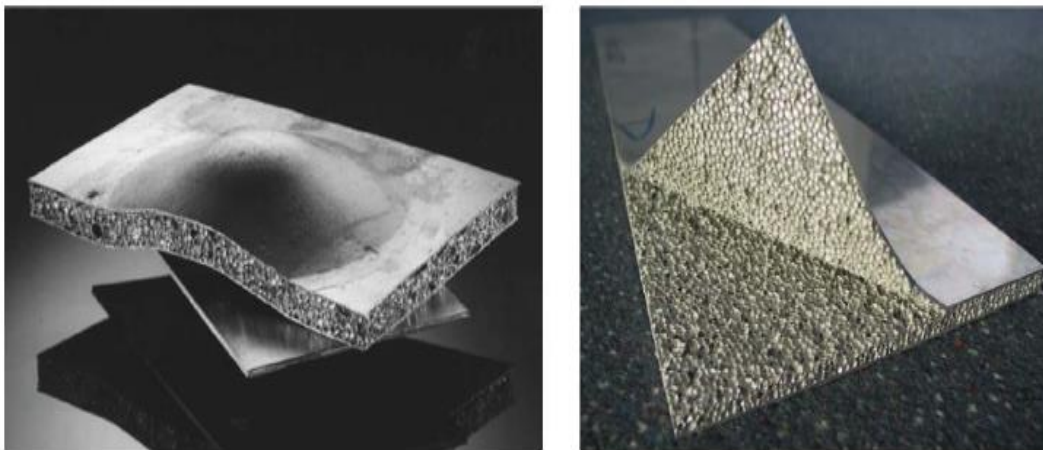


Figura 25-2: Paneles sándwich -AFS- basados en espuma de aluminio

Realizado por: (Nebreda, 2014)

2.3.7 Absorción de impactos

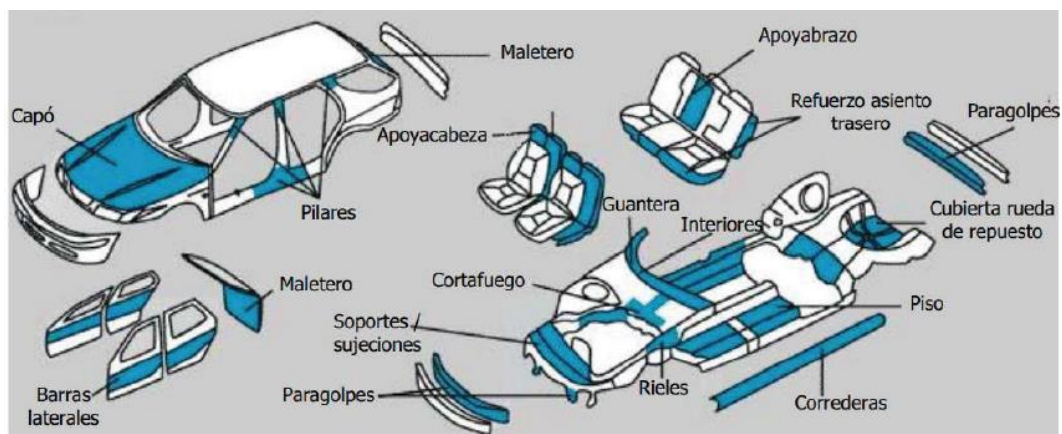


Figura 26-2: Uso de espumas metálicas en vehículos

Realizado por: (Nebreda, 2014)

Dentro de las propiedades más relevantes de las espumas metálicas es la capacidad de absorción de impactos de alta energía, debido a que se acopla tanto la rigidez propia del metal con la deformabilidad de las estructuras celulares (Banhart, 2014).

Dicha propiedad, hace que las espumas metálicas sean útilmente fabricadas en vehículos, usualmente para manufacturar paragolpes, soportes para barras anticolidión, rieles, protección interna de ocupantes, capó, paneles laterales y otros como se observa en el gráfico 26-2.

2.3.8 *Absorción acústica y de vibraciones*

Básicamente, de acuerdo a lo que establece, uno de los usos adicionales de las espumas metálicas es el de absorción de vibraciones mecánicas, ya que tienen elevadas frecuencias naturales de resonancia, para de esta manera minimizar el intervalo de vibraciones. No obstante, se resalta la capacidad de absorción de ruido, ya que los poros en las espumas de celda abierta reflejan el sonido dentro de la misma, y convierten parte de este en calor (Jose Gutierrez & Juan Oñoro, 2015).

2.3.9 *Intercambio de calor, filtrado y catálisis*

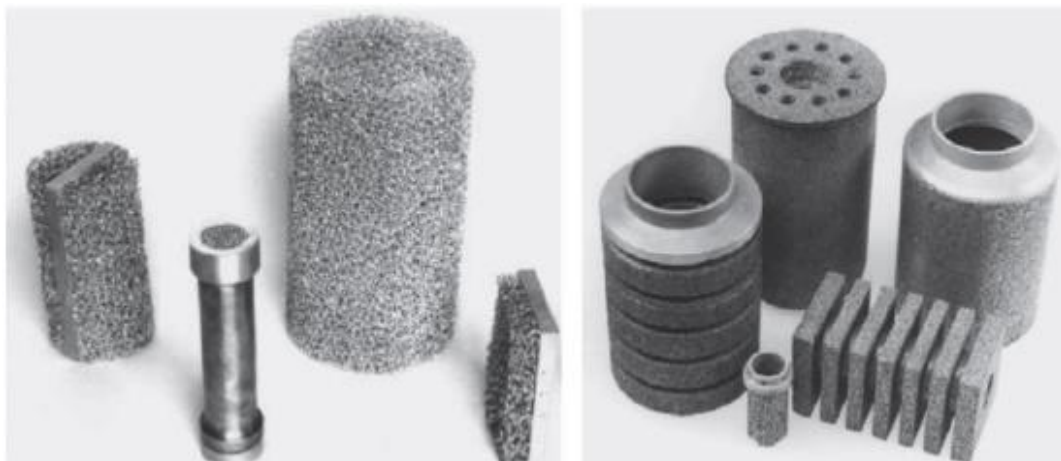


Figura 27-2: Uso de espuma metálica como filtros o intercambiadores de calor

Realizado por: (Nebreda, 2014)

Las espumas de celda cerrada son diferentes con relación a las de celda abierta las mismas que exponen una elevada superficie específica. En este contexto, las estructuras de celda abierta pueden ser usadas como filtros si mediante ellas se hace pasar un fluido conteniendo partículas en suspensión. Finalmente, la elevada superficie específica admite que estos materiales sean

utilizados a como potenciales catalizadores de reacciones químicas como se muestran en el gráfico 2.27.

CAPÍTULO III

3 METOLOGÍA

3.1 Esquema investigativo

La metodología que se implementa en el desarrollo del proyecto investigativo es netamente tecnológica y se determina por cuatro aspectos:

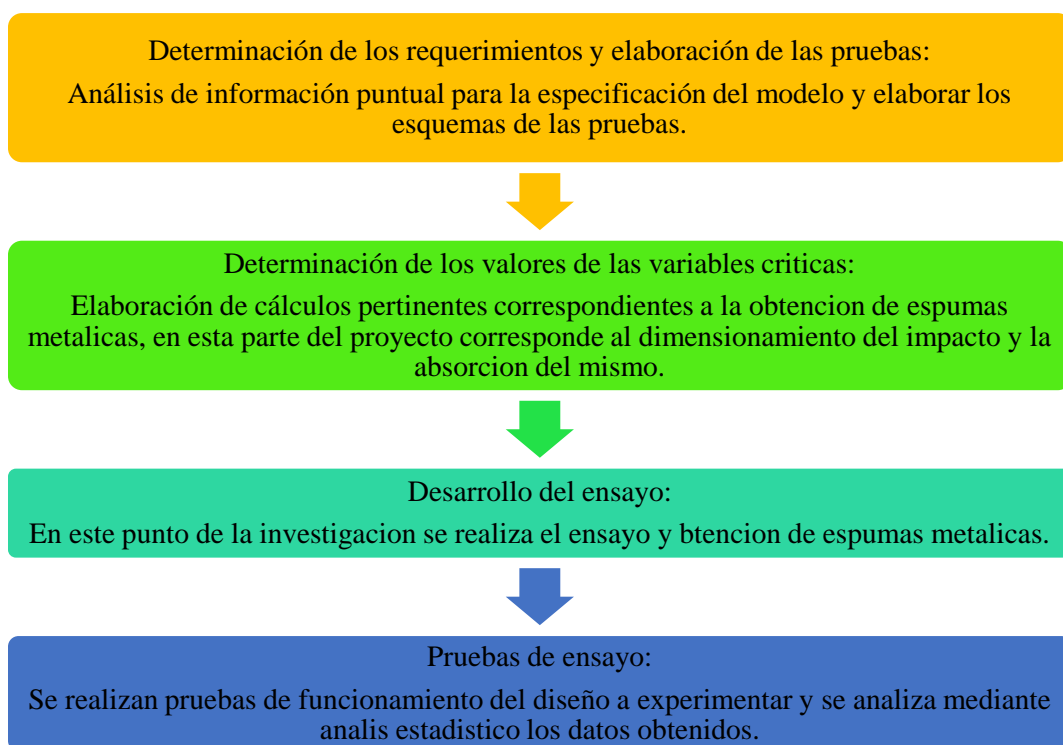


Figura 1-3 Metodología de la investigación

Realizado por: (HERNÁNDEZ, 2010)

3.2 Enfoque de la investigación

El enfoque investigativo de este estudio es cuantitativo debido a que se basará en métodos relativos para el cálculo de parámetros requeridos y posteriormente realizar las pruebas y el desarrollo experimental para el análisis de los datos de las muestras de los datos obtenidos, realizando una interpretación deductiva se identifica si resultado de interrelación atrae una consecuencia en los aspectos tecnológicos los mismos que orientan a la verificación del nivel de validez y confiabilidad del presente estudio.

3.3 Alcance de la investigación

El desarrollo se inicia con el dimensionamiento y determinación de los parámetros técnicos de los elementos que conformaran el equipo, y con la selección y adquisición del equipamiento y materiales. Una vez conformado el equipo de obtención de espumas, se realizará las respectivas pruebas de funcionamiento. Para la obtención de las espumas metálicas de celda abierta por el método de infiltración, se utiliza granos de NaCl como preforma removible y el aluminio como metal base y un tamaño de grano comprendido en el rango de 1.5 a 2.4 mm. Se obtendrán muestras de espuma en las cuales se realizará la caracterización mecánica, es decir, ensayos de compresión que permitan obtener las curvas esfuerzo – deformación, además se realizará una caracterización morfológica que incluye el análisis de: forma de ligamentos, densidad relativa, isotropía observada, tamaño de poro y porcentaje de celdas.

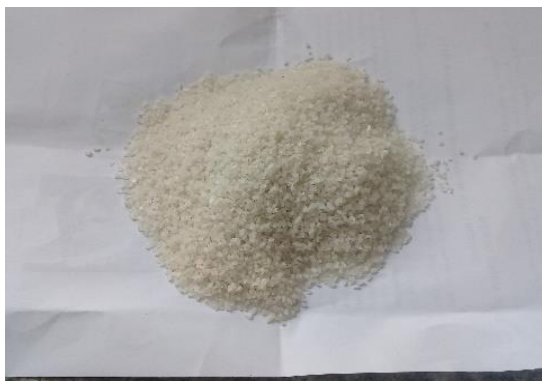
3.4 Procesamiento y análisis de información

3.4.1 Plan de recolección de información

La presente investigación ha empleado la técnica de recolección de información para la caracterización de los parámetros, y para el procesamiento de los datos de las pruebas realizadas o los experimentos.

3.5 Materiales y equipos

3.5.1 Material para la preforma



2-3. Granos de sal tamizadas para usarse en la infiltración.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

El material más utilizado como preforma es el cloruro de sodio (NaCl), el mismo que puede ser removido por disolución en agua, una vez que se complete el proceso de obtención de las espumas.

Se debe tamizar el cloruro de sodio con la finalidad de clasificar su tamaño, para este caso se utilizará un tamaño de grano comprendido en el rango de 1.5 a 2.4 mm. El material mencionado puede contener aditivos como yodo y agentes anti aglomerantes, los valores de este caso no influyen en la realización del ensayo significativamente (Luna, Barari, Woolle, & Goodall, 2014). En la Figura 2-3 se muestran tamices de granos de sal en condiciones de usarse.

3.5.2 *Metal para la infiltración*

Considerando que la temperatura de la sal para la fusión es de 801 °C, para elegir el metal de infiltración, se considera el factor más importante que es la temperatura de fusión, es decir, la temperatura de fusión del metal tiene que estar por debajo a la de la sal, caso contrario la sal se fundiría primero antes que el metal. Por consiguiente, es necesario utilizar el aluminio puro como metal base, por los factores anteriormente mencionados que su temperatura de fusión no supera los 660 °C. (Luna, Barari, Woolle, & Goodall, 2014). Los cables de transmisión eléctrica de alta tensión presentan el aluminio de alta pureza de allí se lo puede conseguir, estos son fabricados generalmente de aleación de aluminio 1350 (INEN, 2010), menciona (INCABLE, 2013) que estos tienen alrededor del 99,5% mínimo de aluminio necesarios.

3.5.3 *Horno de Crisol*



Figura 3-3. Horno de crisol utilizado para fundir el aluminio puro.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

En primer lugar, con el aluminio se genera una barra cilíndrica para posteriormente ser seccionada en pequeños tochos que serán utilizados en los ensayos. Para ello se funde el aluminio en un horno de crisol para posteriormente ser moldeado. El horno de crisol funciona con gas como combustible, el mismo que tiene una capacidad para fundir aproximadamente nueve kilos de aluminio. Para grandes cantidades de materiales este tipo de horno es el adecuado, y con este

beneficio generar varias barras de aluminio las cuales se tendrá un utilizable número de barras los ensayos a realizar. En la Figura 3-3 se muestra un respectivo horno de crisol destinado para fundir el aluminio puro.

3.5.4 Molde cilíndrico

Se fabrica un molde compuesto por un tubo cilíndrico como se muestra (Figura 5-3a) y dos placas ranuradas como se evidencia (Figura 5-3b), las mismas son usadas como tapas con el objetivo de hermetizar todo el conjunto cilíndrico. Las dos tapas se acoplan al cilindro mediante cuatro varillas roscadas (Figura 5-3d). Las ranuras de las tapas son circulares y sirven para alojar el grafito que actuará como sellante durante el experimento (Luna, Barari, Woolle, & Goodall, 2014).

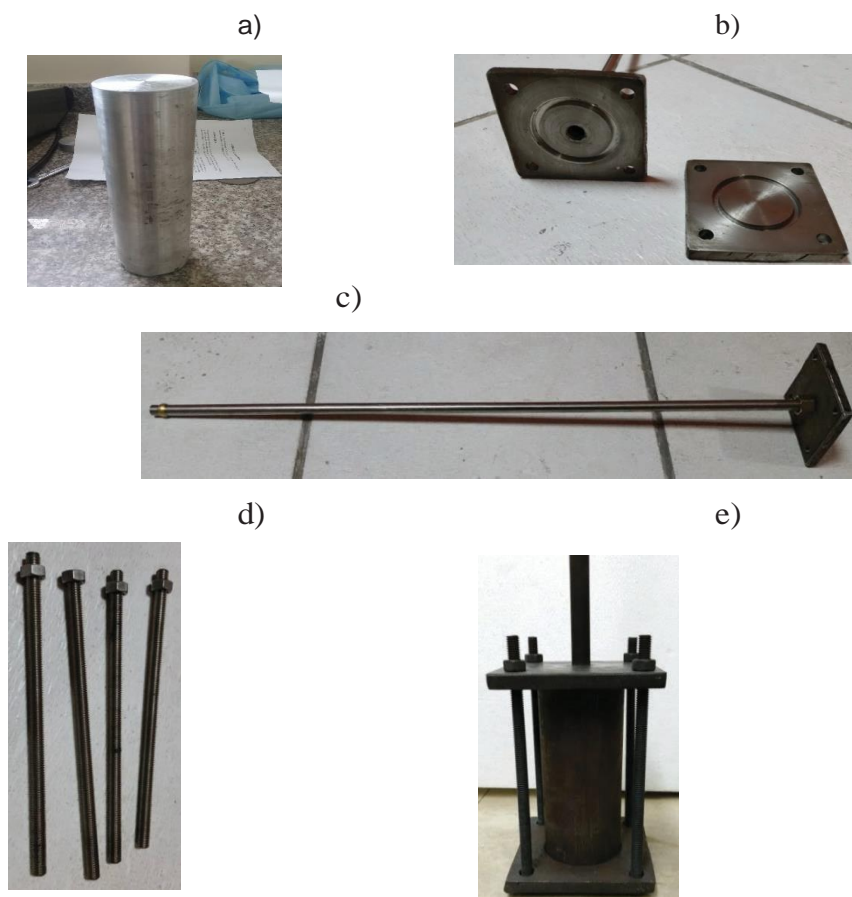


Figura 4-3. Molde cilíndrico. (a) Cámara cilíndrica. (b) Tapas ranuradas superior e inferior (c) conducto adaptado a la tapa superior de la cámara cilíndrica y que se conecta al sistema de válvulas. (d) Varillas roscadas que permiten acoplar rígidamente las tapas superior e inferior a la cámara cilíndrica. (e) Molde cilíndrico ensamblado completamente.

Realizado por: Abarca, (2017)

La tapa superior tiene adaptada un conducto que se conecta al sistema de válvulas (Figura 5-3c), y sirve para transmitir al cilindro la presión negativa y positiva respectivamente. La presión negativa es requerida para verificar el sello entre las tapas y el cilindro del molde, además al sacar el aire de la cámara se tratará de evitar la oxidación del aluminio, caso contrario aumentaría la viscosidad de la colada y por ende mayor dificultad para la infiltración. La presión positiva sirve para ayudar al aluminio a que se infiltre por todos los espacios intersticiales que existen entre los granos de sal. (Luna, Barari, Woolle, & Goodall, 2014)

El material de todos estos elementos es de acero inoxidable, en tal virtud se ha utilizado el AISI 304, debido a que este es el comercialmente más accesible en el medio ecuatoriano. Se utiliza el acero inoxidable porque es un metal con un punto de fusión de 1454 °C, que es más que suficiente para soportar la temperatura del proceso, además tiene una buena resistencia a la corrosión. (Luna, Barari, Woolle, & Goodall, 2014)

3.5.5 *Horno mufla eléctrico para fundición de metales*

Tabla 1-3. Características técnicas del horno modelo 4-9 de la empresa Samothermal.

Descripción	Detalle
Medidas internas de cámara del Horno	Alto 23 cm; Ancho 18 cm; Profundidad 18 cm.
Medidas externas del horno	Alto 35 cm; Ancho 30 cm; Profundidad 30 cm.
Material de cámara interna	Ladrillos refractarios de alta alúmina (soporta temperaturas hasta 1400 °C)
Temperatura máxima de trabajo	1200 °C
Temperatura continua de trabajo	1100 °C
Voltaje	220 V (bifásico)
Amperaje	15 A
Potencia	3300 W
Número de fases	1
Tipo de termocupla	Tipo K con revestimiento cerámico
Controlador de temperatura	Model K

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Un tocho extraído de la barra cilíndrica de aluminio de alta pureza (previamente generada por moldeo), se funde dentro del molde cilíndrico, para lo cual se utiliza un horno mufla eléctrico con control digital especialmente fabricado para este proyecto. Se elige este tipo de horno debido a que permite tener un alto grado de control de la temperatura en el proceso. En la Tabla 3-1 se muestra sus características técnicas.



Figura 5-3. Horno modelo 4-9 (Empresa Samothermal).

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.5.6 Bomba de vacío

Como parte del protocolo experimental se requiere crear un vacío en la cámara cilíndrica, en consecuencia, se utiliza una bomba de alto nivel de vacío (Figura 2.6). Además, se hará uso de un vacuómetro que permitirá conocer el valor de la presión negativa dentro del molde cilíndrico creada por la bomba de vacío.



Figura 6-3. Bomba de vacío QUALITY Model QVP 800, utilizada en el experimento.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.5.7 Tanque de gas argón

Además de la presión de vacío, el protocolo experimental requiere generar una presión positiva dentro de la cámara cilíndrica, para lo cual se utiliza gas argón a presión. Además, es necesario contar con una válvula reguladora de presión que permitirá ajustar la presión dentro del molde cilíndrico a un valor determinado. El argón al pertenecer al grupo de los gases nobles, es adecuado para el proceso porque no reacciona con ningún otro elemento. En la Figura 7-3 se muestra el

tanque de gas argón presurizado junto con su respectiva válvula reguladora de presión. Dicho tanque tiene la siguiente capacidad: volumen=6m³ y presión inicial=2000 psi.



Figura 7-3. Tanque de gas argón presurizado.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.5.8 Sistema de válvulas

Se hará uso de un sistema compuesto por tres válvulas, mediante la cual se permitirá conectar y transmitir alternadamente hacia el molde cilíndrico, la presión negativa y positiva por parte de la bomba de vacío y el tanque de gas argón presurizado respectivamente (Figura 9-3). La válvula 1 conecta o desconecta la bomba de vacío con el molde, la válvula 2 conecta o desconecta el tanque de gas argón con el molde, y la válvula 3 conecta o desconecta el molde del resto del sistema.



Figura 8-3. Sistema de válvulas utilizado en el experimento.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.5.9 Lámina de grafito

Es importante que el molde cilíndrico permanezca hermético durante el experimento, por lo tanto, se requiere un material sellante entre el cilindro y las placas superior e inferior respectivamente. En el sector industrial los elementos de sellado suelen fabricarse de grafito (Flexitallic group, 2007), por tanto, como material sellante se utiliza lámina de grafito de 2 mm de espesor, debido a que es adecuado para aplicaciones a elevadas temperatura, ambientes corrosivos y presiones relativamente bajas. En el medio ecuatoriano, las láminas de grafito fueron adquiridas a través de la empresa Disprotec. En la Figura 10-3 se muestra la lámina de grafito utilizada como material sellante.



Figura 9-3. Lámina de grafito utilizada como material sellante.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.5.10 Grafito en polvo

El grafito en polvo, debido a sus características, es empleado como lubricante en seco en el ámbito industrial (Prospray, 2011). En este caso, antes de verter las partículas de NaCl y colocar el tocho de aluminio dentro del molde cilíndrico respectivamente, se aplica una pequeña capa de grafito en la superficie interna de dicho molde, para que cuando haya finalizado el experimento, facilite la extracción de la muestra de espuma que se ha producido dentro del molde cilíndrico. En la Figura 10-3 se muestra el grafito en polvo utilizado.

El grafito en polvo sólo es uno de los medios para facilitar la extracción de la muestra de espuma dentro del molde cilíndrico. Otra opción sería, rociar la superficie interna del molde con spray de aerosol de nitruro de boro, esto debido a que es un separador que crea una película antiadherente a altas temperaturas (hasta 2000 °C) (Italtec, 2015). Adicionalmente fabricar un molde con un pequeño grado de conicidad en la superficie interna de este, facilitando de igual manera la extracción de la muestra. Una combinación de estas técnicas sería lo ideal (Luna, Barari, Woolle, & Goodall, 2014).



Figura 10-3. Grafito en polvo.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.5.11 Pirómetro

Considerando que la temperatura de fusión del aluminio es de 660 °C, y la del NaCl es de 801 °C, por ende, es necesario que la temperatura en la parte interior del molde cuya forma es cilíndrica tiene que ser aproximadamente sea aproximadamente 740 °C.



Figura 11-3. Pirómetro utilizado en la medición de la temperatura del molde cilíndrico.

Realizado por: (Abarca, 2017)

Temperatura que permite una apropiada infiltración del aluminio a través de los espacios intersticiales de los granos de NaCl, sin que estos se fundan (Luna, Barari, Woolle, & Goodall, 2014).

Es necesario aclarar que la termocupla del horno mufla, mide la temperatura ambiente dentro del mismo, y este valor no la temperatura a la que se encuentra el interior del molde, por lo tanto, para lograr que dicho molde, llegue a la temperatura deseada durante el experimento, se programa paulatinamente varios valores de temperatura en el horno mufla, y con cada uno de ellos, mediante

el uso de un pirómetro, se verifica la temperatura que alcanza la pared externa de un cilindro réplica del mismo material del molde cilíndrico. Este proceso se realiza hasta que el pirómetro muestre una temperatura aproximada a la requerida, posteriormente el cilindro es retirado del horno mufla. La emisividad empleada en el pirómetro para el acero inoxidable AISI 304, es de 0,59. En la Figura 11-3 se muestra el pirómetro utilizado en el experimento.

3.5.12 Tamices de laboratorio

Es importante clasificar el tamaño de grano de sal antes de ser usada en el experimento, para lo cual se utilizan tamices con apertura de malla adecuada, estos deben ser apilados de mayor a menor para una clasificación gradual en función del tamaño de grano requerido. En la Figura 12-3 se muestra tamices estándares de laboratorio.



Figura 12-3. Tamices estándares de laboratorio.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.5.13 Agitador mecánico de tamices



Figura 13-3. Agitador mecánico empleado para tamizar del NaCl.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

El tamizado del NaCl es importante para separar el tamaño de partículas requerido para el experimento, puede hacerse tanto manual como mecánico, pero por facilidad se hará uso de un agitador mecánico (Figura 13-3) debido a que permite acortar el tiempo de tamizado.

3.5.14 Procedimiento para la obtención de espumas metálicas

3.5.14.1 Procedimiento

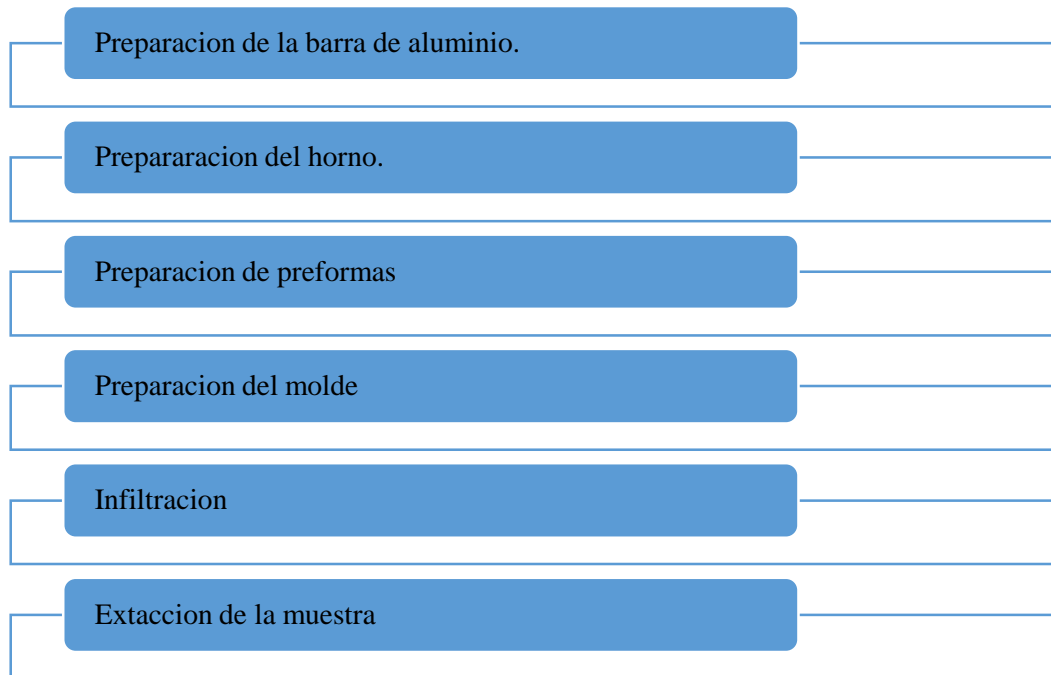


Figura 14-3. Procedimiento de obtención de espumas metálicas de aluminio

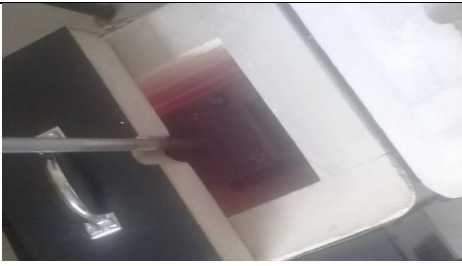

Fuente: (Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity, 2014)

Tabla 2-3. Procedimiento para la obtención de espumas metálicas de aluminio.

N	Descripción	Ilustración
1	Preparación de tamices de sal en grano	

2	Colocación en máquina tamizadora.	
3	Realizar la tamización	
4	Sal tamizada medición 1.4 mm	
5	Pesar 200 gramos de sal en grano	
6	Empaques de grafito para el molde de acero inoxidable	

7	Cortar el tocho de aluminio de 3cm	
8	Colocación de empaque en el molde de acero inoxidable	
9	Colocación de polvo de grafito para cubrir las paredes internas del mole de acero	
10	Colocación del tocho de aluminio de 3cm dentro del molde de Acero inoxidable	
11	Ajuste de los cuatro pernos del molde para evitar fugas	

12	Precalentamiento del horno a 150 grados	
13	Preparación de molde de acero inoxidable dentro del horno a 300 grados	
14	Resultados primeras pruebas a 300 grados con 3.5 bar de argón para elevar la temperatura dentro del molde de acero	
15	Se realizó 3 pruebas por día durante casi dos semanas con diferentes temperaturas obteniendo diferentes resultados	
16	Sellado completamente del molde de acero inoxidable	
17	Infiltración completa del tocho en la sal en grano	

18	Resultados de la obtención de espumas metálicas	
----	---	--

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

3.6 Esquema del equipo para obtener espuma metálica de celda abierta por el método de infiltración

En la Figura 15-3 se muestra un esquema de todos los elementos que conforman el equipo ensamblado.

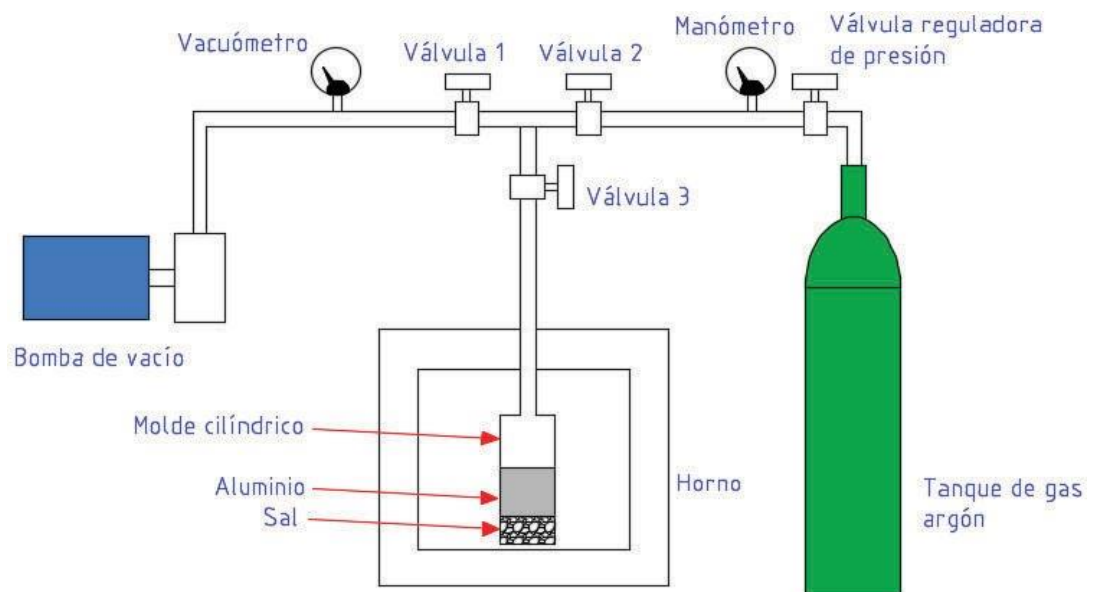


Figura 15-3. Esquema del equipo para obtener espumas metálicas de celda abierta.

Realizado por: (Abarca, 2017)

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la investigación como es el ensayo de compresión uniaxial y caracterización estructural.

4.1 Caracterización estructural

Una vez obtenidas las muestras de espuma, se procede a determinar su masa, tal como se muestra en la figura 1-4.



Figura 1-4. Muestra 1 estimación de masa = 132 gr

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Sabiendo que la densidad del aluminio es de $2,7 \text{ g/cm}^3$. A continuación, se presenta la densidad relativa calculada de cada una de las muestras obtenidas:

Tabla 1-4. Cálculos de densidad relativa de las muestras obtenidas.

Muestra	Altura cm	Diámetro cm	radio cm	Masa (g)	área cm^2	Volumen cm^3	Densidad de la espuma (g/cm^3)	Densidad relativa
1	3,676	6,262	3,131	132	30,7976106	113,21202	1,165954	0,431835
2	4,1913	6,267	3,1335	154	30,84681198	129,28824	1,191137	0,441162
3	4,3383	6,2577	3,12885	169	30,75532882	133,42584	1,266621	0,469119
4	3,0866	6,2633	3,13165	129	30,81039918	95,099378	1,356476	0,502398
							Media	0,461129
							Desviación Estándar	0,0317481

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Se puede determinar la porosidad (cantidad de sal que fue removido) mediante la ecuación 2, con los respectivos datos de la densidad relativa Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Calculo y datos de porosidad de las cuatro muestras de espumas metálicas.

Muestra	Tamaño de partícula (mm) de sal usado como performa	Densidad relativa	Porosidad	% Porosidad
1	1.5 - 2.4	1.165	0.569	56.887
2	1.5 - 2.4	1.191	0.559	55.923
3	1.5 - 2.4	1.266	0.531	53.144
4	1.5 - 2.4	1.356	0.498	49.808
	Media	1.229	Media	54.534
	Desviación Estándar	0.08578	Desviación Estándar	3.179

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

4.1.1 Caracterización muestra 2, Número de poros por milímetro lineal

Para la determinación del número de poros por milímetro lineal, se estableció aleatoriamente cinco líneas horizontales de 55 mm sobre la fotografía, de forma que se contabiliza el número de poros que son atravesados por la línea, según se muestra en la figura 2-4.

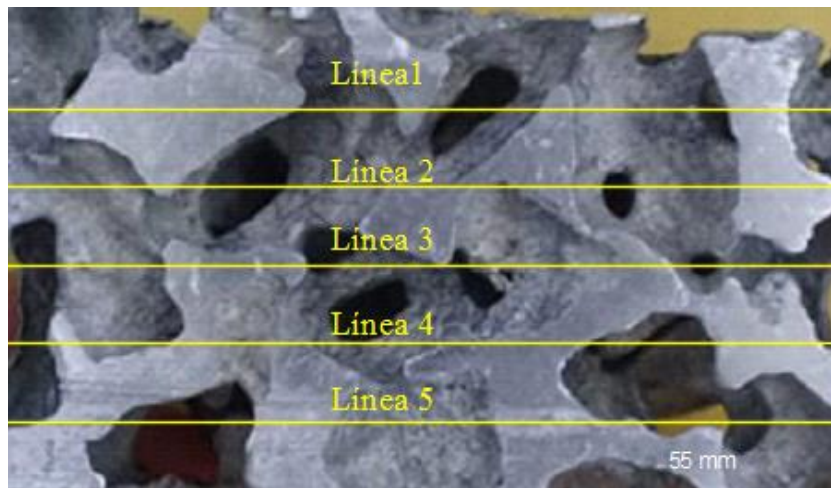


Figura 2-4. Muestra 2 de espuma seccionada en donde se observan Los poros atravesados parcialmente o totalmente por cinco líneas aleatorias.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 3-4. Número de poros por milímetro lineal muestra 2 (25.4mm), (espuma metálica de celda abierta)

Línea	Poros / 55 mm	Poros / 25.4 mm
1	5	2
2	4	2
3	3	1
4	5	2
5	5	2
Media	4.4	1.8
Desviación Estándar	0,89	0,45

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

4.1.2 Caracterización muestra 2, Número de poros por superficie cuadrada

Para determinar el número de poros por superficie, se trazaron 6 recuadros sobre la fotografía de la muestra 2 seccionada. Cada uno de los respectivos recuadros cuentan con una superficie de 228.75 mm^2 , de forma que se contabilizo el número de poros existentes dentro de cada recuadro como se muestra en la figura 3-4.

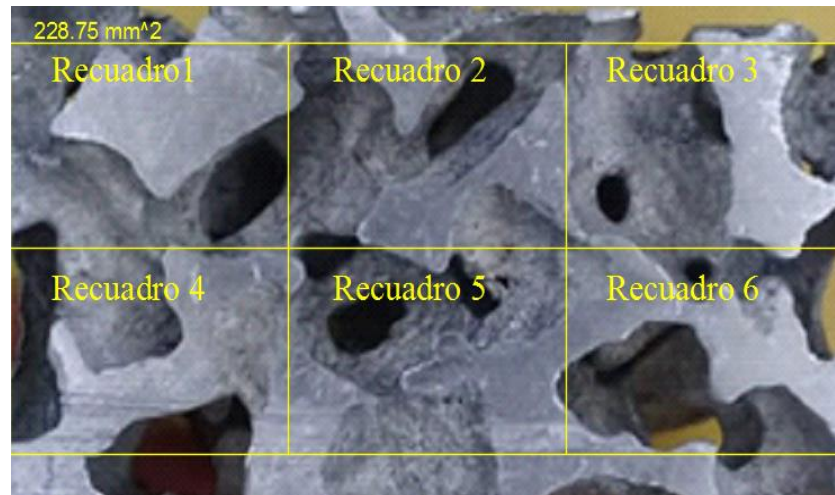


Figura 3-4. (Espuma metálica de celda abierta), números de poros atravesados parcialmente, en los distintos 6 recuadros con una superficie de 228.75 mm^2 por cada recuadro muestra 2.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 4-4. Número de poros muestra 2 (espuma metálica de celda abierta)

Recuadro	Poros / $228.75mm^2$	Poros / mm^2
1	2	0.00874317
2	2	0.00874317
3	3	0.01311475
4	5	0.02185792
5	3	0.01311475
6	2	0.00874317
Media	2,83	0.01092896
Desviación Estándar	1,17	0.00511058

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

4.1.3 Caracterización muestra 2, espesor de ligamentos

Para definir el espesor de ligamentos, se realizó un total de dieciocho mediciones aleatoriamente de ligamentos mejor configurados, tal como se muestra en la figura 4-4.

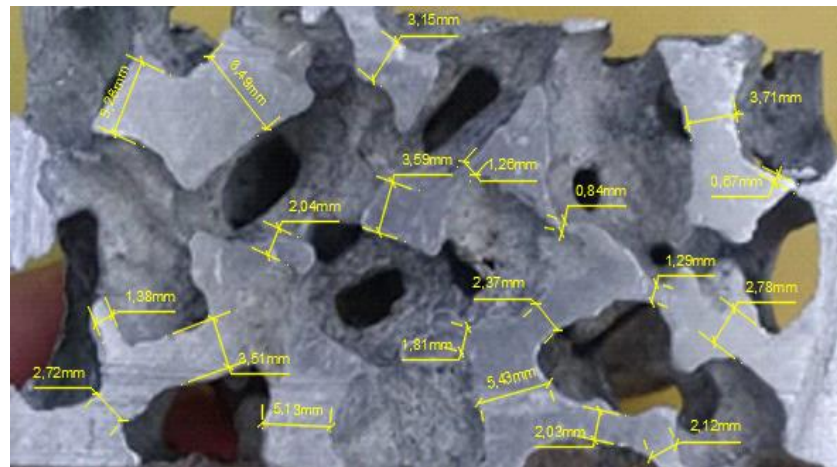


Figura 4-4. Espesor de ligamentos (espuma de celda abierta), basado en el espesor del ligamento entre poro.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Se debe aclarar que las mediciones realizadas permiten estimar de forma aproximada el espesor de ligamento, esto debido a que se trata de un análisis en 2D (trazas). Para obtener resultados lo más aproximados posibles, el análisis se lo debería realizar en 3D.

Tabla 5-4. Resultado de medidas de los espesores mejor configurados muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).

Medida	Espesor (mm)
1	3,15
2	1,38
3	2,72
4	6,49
5	2,04
6	3,51
7	5,13
8	3,15
9	3,59
10	1,81
11	1,20
12	2,37
13	5,43
14	2,03
15	0,84
16	1,29
17	2,12
18	0,67
Media	2,71
Desviación Estándar	2,95

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 6-4. Medidas de los espesores de ligamento mejor configurados entre poros de la muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).

Rango (mm)	Frecuencia	Porcentaje
0,00<0,75	1	5,56
0,75<2,25	8	44,44
2,25<3,75	6	33,33
3,75<5,25	1	5,56
5,25<6,75	2	11,11
Total	18	100,0

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Fuente: Software SPSS

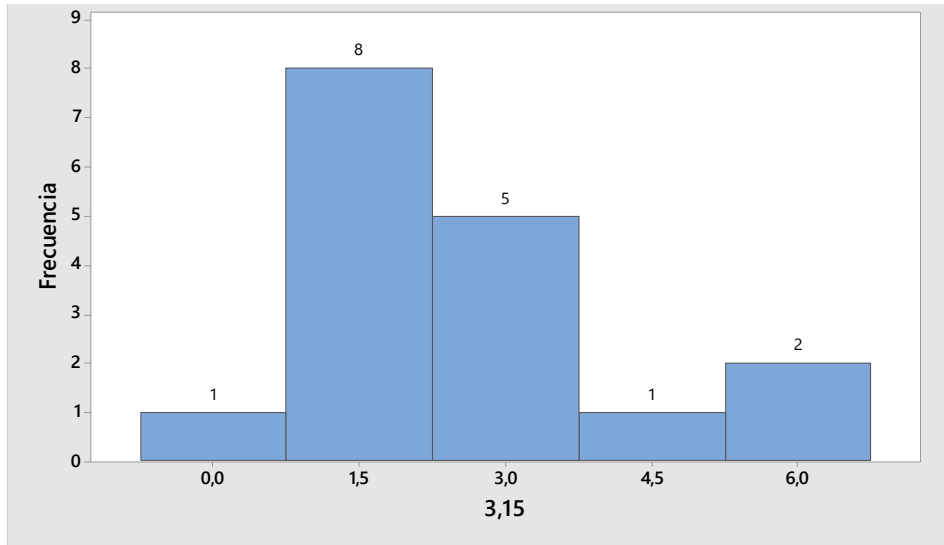


Figura 5-4. Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 6-4

Realizado: Pacha & Chango, 2019

4.1.4 Caracterización muestra 2, tamaño superficial de poros

Para determinar el tamaño superficial de poros, se basó en 9 mediciones de aquellos que contengan la mejor configuración de forma aleatoria. Cabe recalcar que como es un análisis en dos dimensiones (trazas), las medidas efectuadas son realizadas de forma aproximada. Los poros analizados se presentan en la figura 6-4. Conjuntamente en la tabla 7-4 se puede apreciar el resultado de las medidas obtenidas mediante software CAD.

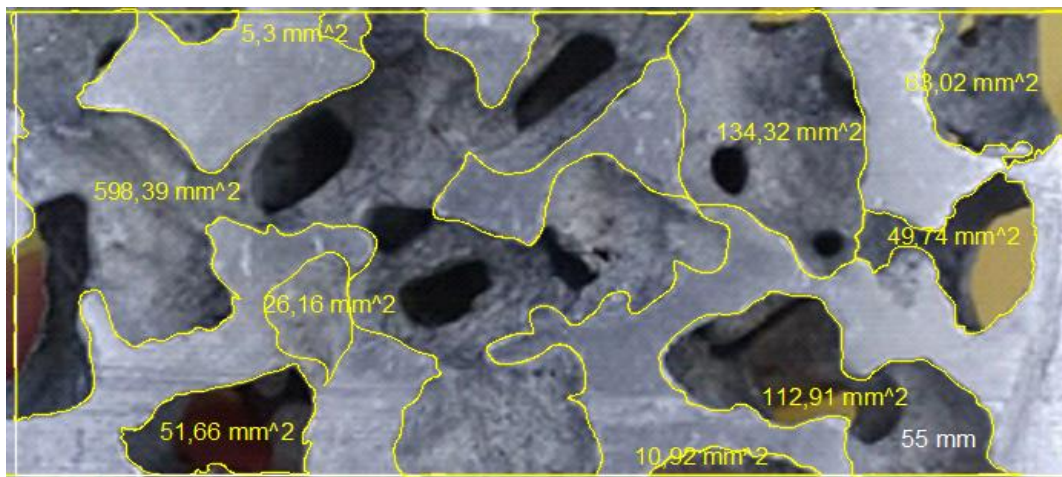


Figura 6-4. Tamaño de poros mejor configurados muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 7-4. Área superficial del tamaño de poros mejor configurados muestra 2 (espuma metálica de celda abierta)

Medida	Área (mm ²)
1	5,30
2	596,39
3	51,66
4	26,16
5	10,92
6	112,91
7	134,32
8	63,02
9	49,74
Media	116,71
Desviación Estándar	185,01

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 8-4. Medidas de área superficial del tamaño de poros mejor configurados muestra 2. (espuma metálica de celda abierta)

Rango	Frecuencia	Porcentaje
0,0<100,0	6	66,67
100,0<300,0	2	22,22
300,0<500,0	0	0,0
500,07500,0	1	11,11
Total	9	100,0

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Fuente: Software SPSS

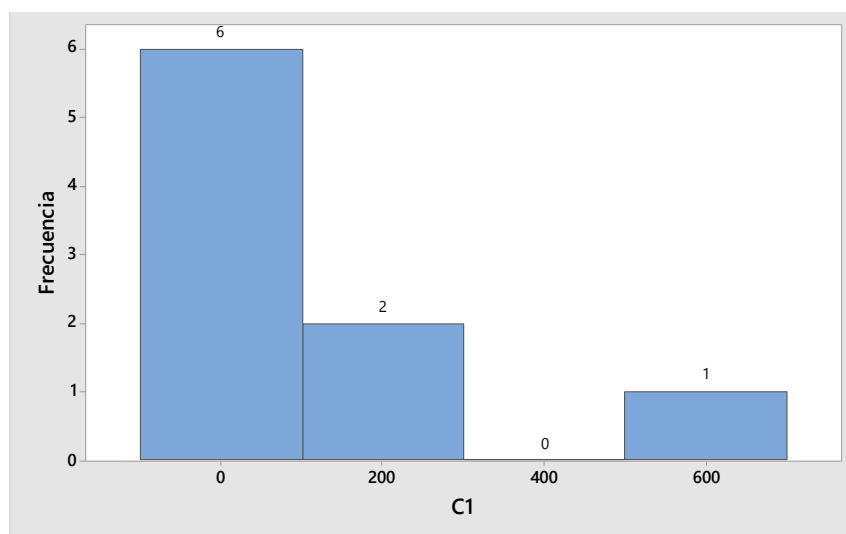


Figura 7-4. Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 8-4

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

4.1.5 Caracterización muestra 2, tamaño de largo y ancho de poros

Para la determinación del largo y ancho de poros, se realizó medidas de forma aleatoriamente, tomando a consideración los poros de mejor geometría. De igual forma estas medidas son sólo aproximadas puesto que es un análisis en 2D (trazas). En la gráfica 9-4 se observa las medidas del largo y ancho de cada uno de los poros, estos resultados se presentan en la tabla 8-4.

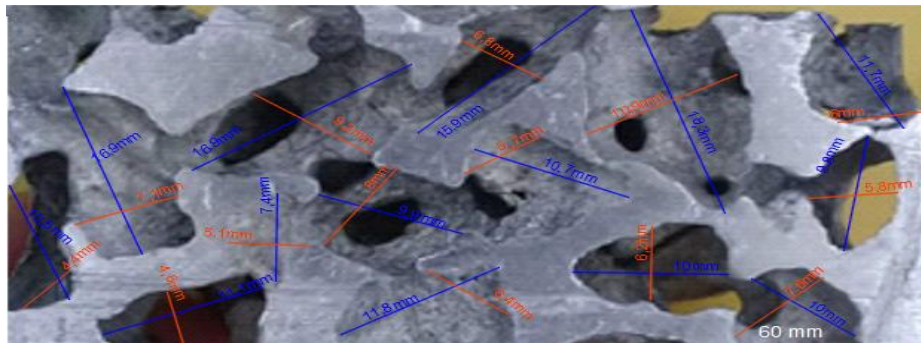


Figura 8-4. Medición del tamaño longitudinal y ancho de poros muestra 2 (espuma metálica de celda abierta)

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 9-4. Resultados de la medición de largo y ancho de poros de mejor geometría.

Medida	Largo (mm)	Ancho (mm)
1	10,5	4,4
2	19,9	7,1
3	11,1	4,6
4	16,9	9,2
5	7,4	5,1
6	11,8	6,4
7	9,9	8,0
8	15,9	6,8
9	10,7	6,7
10	10,0	6,2
11	18,3	10,9
12	10,0	7,6
13	9,8	5,8
14	11,7	6,0
Media	12,42	6,77
Desviación Estándar	3,74	1,76

Fuente: Pacha & Chango, 2019

4.1.5.1 Caracterización muestra 2, tamaño de largo de poros

Tabla 10-4. Distribución de frecuencia del largo de poros mejor configurados de la muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).

Rango	Frecuencia	Porcentaje
6,5<9,5	1	7,14
9,5<12,5	9	64,29
12,5<15,5	0	0,0
15,5<18,5	3	21,43
18,5<21,5	1	7,14
Total	14	100,0

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Fuente: Software SPSS

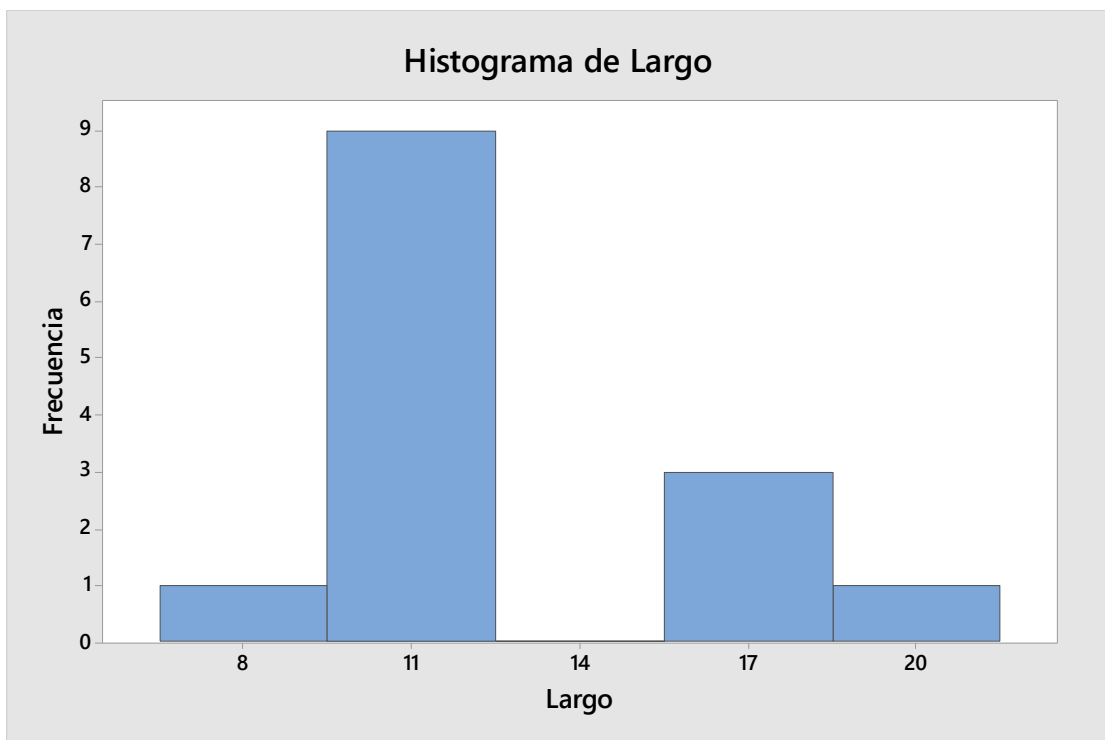


Figura 9-4. Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 10-4

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

4.1.5.2 Caracterización muestra 2, tamaño de ancho de poros

Tabla 11-4. Distribución de frecuencia de ancho de poros mejor configurados de la muestra 2 (espuma metálica de celda abierta).

Rango	Frecuencia	Porcentaje
3,75<5,25	3	21,43
5,25<6,75	5	35,71
6,75<8,25	4	28,57
8,25<9,75	1	7,14
9,75<11,25	1	7,14
Total	14	100,0

Elaborado: Pacha & Chango, 2019

Fuente: Software SPSS

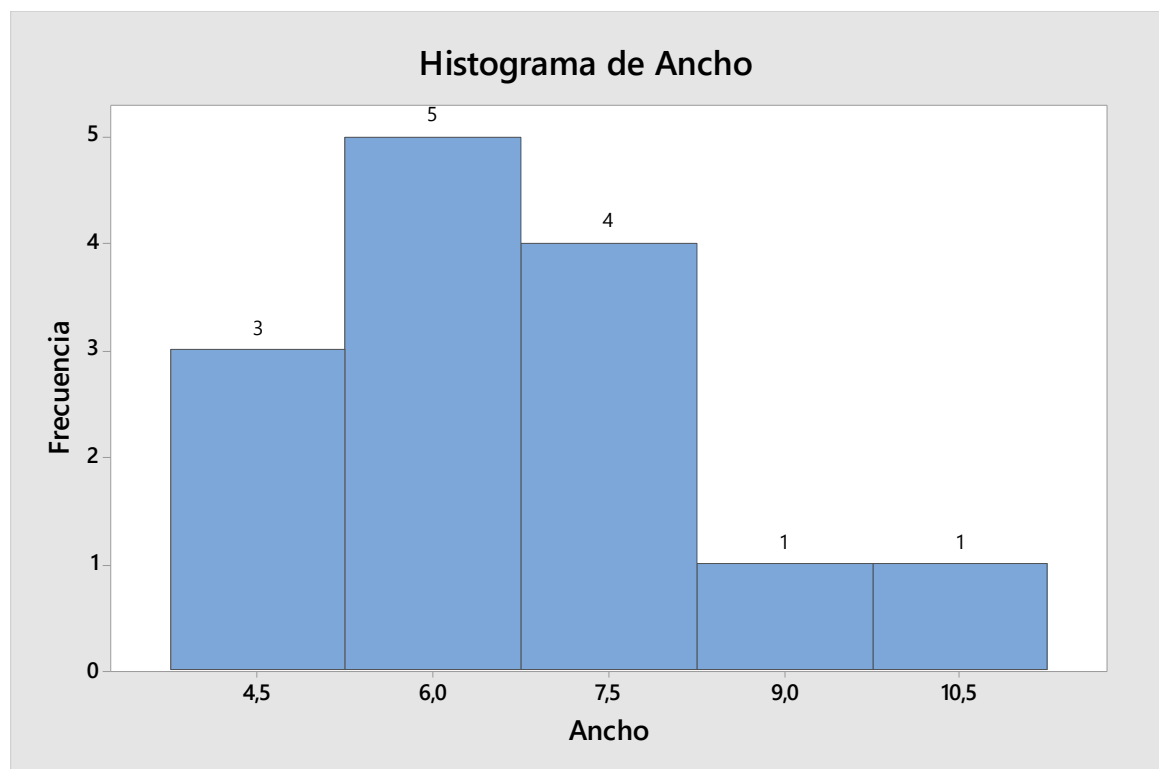


Figura 10-4. Histograma de la distribución de frecuencia de la Tabla 11-4

Elaborado: Pacha & Chango, 2019

4.1.6 Caracterización muestra 2, porcentaje de porosidad

El porcentaje de porosidad se analizó en base a una superficie de 1100 mm^2 , donde se obtuvo un total de 66.35% como se muestra en la figura 11-4.



Figura 11-4. Porcentaje de porosidad (espuma metálica de celda abierta) determinada en una área de 1100 mm^2 .

Fuente: Pacha & Chango, 2019

Tabla 12-4. Información de resultados del análisis estructural de la muestra 1.

Muestra 2	Número de medidas	Media	Desviación estándar	Rango	Frecuencia	Porcentaje
Números de poros por milímetro lineal	Contabilización de poros a través de 5 líneas de 55 mm de longitud de forma aleatoria	Se tiene 1.8 poros en 25.4 mm	0.45 poros			
Número de poros por superficie	Contabilización de poros dentro de 6 recuadros de 228.75 mm^2	Se tiene 2.6 poros en 200 mm^2	0.82 poros	3,00 4,00 6,00	3 2 1	50,0 33,3 16,7
Espesor de ligamentos	18	2.71 mm	2.99 mm	0,00<0,75 0,75<2,25 2,25<3,75 3,75<5,25 5,25<6,75	1 8 6 1 2	5,56 44,44 33,33 5,56 11,11
Tamaño superficial de poros	9	116.71 mm^2	185.01 mm^2	0,0<100,0 100,0<300,0 300,0<500,0 500,0<700,0	6 2 0 1	66,67 22,22 0,0 11,11
Tamaño del largo de los poros	14	12.42 mm	3.74 mm	6,5<9,5 9,5<12,5 12,5<15,5 15,5<18,5 18,5<21,5	1 9 0 3 1	7,14 64,29 0,0 21,43 7,14
Tamaño del ancho de poros	14	6.77 mm	1.76 mm	3,75<5,25 5,25<6,75 6,75<8,25 8,25<9,75 9,75<11,25	3 5 4 1 1	21,43 35,71 28,57 7,14 7,14
Porosidad	Se determinó en una superficie de 1100 mm^2	66.35 %	0 %			

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 13-4. Información de resultados del análisis estructural de la muestra 2.

Muestra 4	Número de medidas	Media	Desviación estándar	Rango	Frecuencia	Porcentaje
Números de poros por milímetro lineal	Contabilización de poros a travesados a lo largo de cinco líneas de 55 mm de longitud de forma aleatoria	Se tiene 2,6 poros en 25,4 mm	0,55 poros			
Número de poros por superficie	Contabilización de poros dentro de 6 recuadros de 228.75 mm ²	Se tiene 4,16 poros en 200 mm ²	1,94 poros	3,00 4,00 6,00	3 2 1	50,0 33,3 16,7
Espesor de ligamentos	18	2,65 mm	1,31 mm	0,00<0,75 0,75<2,25 2,25<3,75 3,75<5,25 5,25<6,75	1 6 8 2 1	5,56 33,33 44,44 11,11 5,56
Tamaño superficial de poros	9	86,67 mm ²	185,01 mm ²	0,0<100,0 100,0<300,0 300,0<500,0 500,07500,0	4 2 2 1	44,44 22,22 22,22 11,11
Tamaño del largo de los poros	14	8,37 mm	79,03 mm	4,0<6,0 6,0<8,0 8,0<10,0 10,0<12,0 12,0<14,0	4 4 1 2 3	28,57 28,57 7,14 14,29 21,43
Tamaño del ancho de poros	14	4,84 mm	2,01 mm	1,0<3,0 3,0<5,0 5,0<7,0 7,0<9,0 9,0<11,0	3 5 5 0 1	21,43 35,71 35,71 0,0 7,14
Porosidad	Se determinó en una superficie de 1100 mm ²	53.8 %	0%			

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

4.2 Ensayo de compresión uniaxial

A continuación, se presentan los datos iniciales de la geometría del espécimen de espuma metálica de celda abierta.

Tabla 14-4. Geometría antes y después de los ensayos de compresión de las espumas metálicas.

		medida inicial	medida final	Porcentaje %	
Muestra 1	diámetro mm	62,93	72,45	13,1400966	Se incrementa un 13 %
	longitud mm	37,08	24,31	52,5298231	Se reduce un 52 %
	Área	3110,32922	4122,56656		
	carga registrada	0	8283,21		
Muestra 3	diámetro mm	62,86	71,28	11,8125701	Se incrementa un 11 %
	longitud mm	43,38	34,21	26,8050278	Se reduce un 26 %
	Área	3103,413538	3990,49048		
	carga registrada	0	8089,92		

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Tabla 15-4. Geometría de los ensayos de compresión uniaxial en dos muestras de espuma obtenidas.

Muestra	Longitud(mm)	Diámetro(mm)	Volumen(mm ³)
Muestra 1 sometida a ensayo de compresión	24.8	64.16	80180.96676
	24.48	68.33	89768.74463
	24.31	74.4	105687.0381
	24.99	72.45	103022.9384
Media	24.645	69.835	94664.92198
Muestra 3 sometida a ensayo de compresión	34.21	62.46	104820.9113
	33.78	66.09	115883.618
	34.34	71.28	137033.4431
	Media	34.11	66.61

Realizado por: Pacha & Chango, 2019



Figura 12-4. Máquina universal de ensayo de compresión uniaxial del laboratorio de resistencia de materiales de la facultad de mecánica de la ESPOCH

Fuente: Pacha & Chango, 2019

El ensayo se llevó a cabo en una máquina universal como se observa la siguiente figura 12-4.

Para el ensayo de compresión uniaxial se utiliza una de las probetas obtenidas cuya forma es cilíndrica. En estas se tiene las siguientes medidas para la muestra 1 y 3.

Muestra 3

Tabla 16-4. Valores esfuerzos deformación y esfuerzo muestra 2.

DEFORMACIÓN (mm) - Plot 0	FUERZA (KG) - Plot 0	transformación a N(fuerza)	esfuerzo (N/m)	deformación (m)	deformación unitaria
0,000918282	1,69704	16,630992	5358,93518	9,18282E-07	2,11683E-05
0,000957041	1,27278	12,473244	4019,20139	9,57041E-07	2,20618E-05
0,00116768	1,27278	12,473244	4019,20139	1,16768E-06	2,69175E-05
0,00116768	0,42426	4,157748	1339,7338	1,16768E-06	2,69175E-05
0,00116768	0,84852	8,315496	2679,46759	1,16768E-06	2,69175E-05
0,00116768	0,42426	4,157748	1339,7338	1,16768E-06	2,69175E-05
0,00116768	0,42426	4,157748	1339,7338	1,16768E-06	2,69175E-05
0,000805152	0,42426	4,157748	1339,7338	8,05152E-07	1,85604E-05
0,000805152	0,84852	8,315496	2679,46759	8,05152E-07	1,85604E-05
0,000805152	0,84852	8,315496	2679,46759	8,05152E-07	1,85604E-05
0,000805152	2,1213	20,78874	6698,66898	8,05152E-07	1,85604E-05
0,000805152	1,27278	12,473244	4019,20139	8,05152E-07	1,85604E-05
0,00128803	1,69704	16,630992	5358,93518	1,28803E-06	2,96918E-05
0,00128803	0	0	0	1,28803E-06	2,96918E-05
0,00128803	0,42426	4,157748	1339,7338	1,28803E-06	2,96918E-05
0,00128803	0,84852	8,315496	2679,46759	1,28803E-06	2,96918E-05
0,00128803	2,1213	20,78874	6698,66898	1,28803E-06	2,96918E-05
4,54E-05	1,27278	12,473244	4019,20139	4,54E-08	1,04657E-06
0,000752384	2,1213	20,78874	6698,66898	7,52384E-07	1,7344E-05
0,000752384	1,27278	12,473244	4019,20139	7,52384E-07	1,7344E-05
0,000911563	1,27278	12,473244	4019,20139	9,11563E-07	2,10134E-05
0,000911563	0,42426	4,157748	1339,7338	9,11563E-07	2,10134E-05
0,000983766	2,1213	20,78874	6698,66898	9,83766E-07	2,26779E-05
0,000983766	2,54556	24,946488	8038,40278	9,83766E-07	2,26779E-05
0,000983766	5,09112	49,892976	16076,8056	9,83766E-07	2,26779E-05

Elaborado por: Pacha & Chango, 2019

Sabiendo que el área transversal inicial del espécimen es de $0,0031034 \text{ m}^2$, y la longitud inicial es de $0,04338 \text{ mm}$, a continuación, se exponen los valores de esfuerzo y deformación unitaria

obtenidos a partir de las medidas de deformación y carga aplicada que fueron registrados en el ensayo de compresión para la muestra 2. (Tabla 18-4).

Al realizar el ensayo de compresión uniaxial del espécimen y con los datos disponibles se realiza la gráfica esfuerzo - deformación

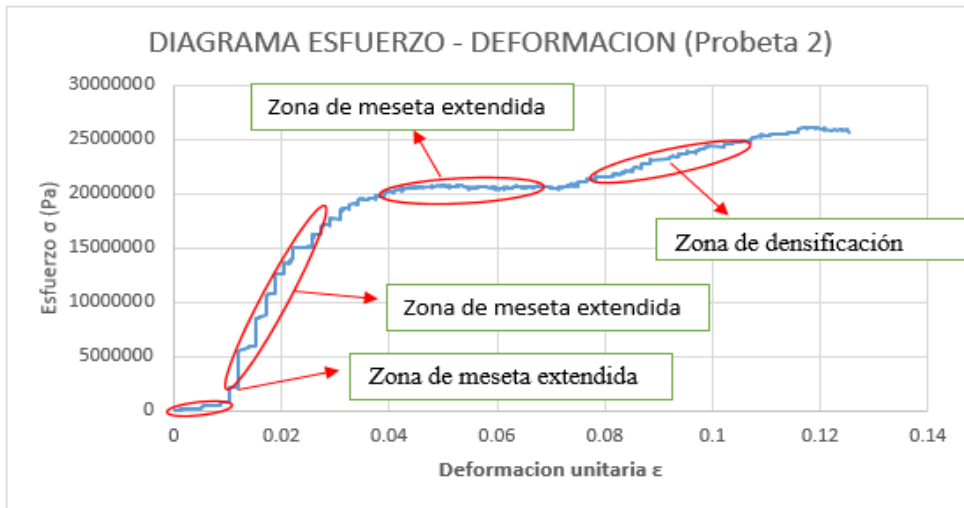


Figura 13-4. Diagrama Esfuerzo - Deformación (Probeta 2) a partir del ensayo de compresión uniaxial.

Fuente: Pacha & Chango, 2019

4.3 Discusión

4.3.1 *Análisis de resultados de la caracterización estructural de las espumas.*

- **Número de poros por milímetro lineal**

Tabla 17-4. Número de poro por mm lineal muestra 2 y muestra 4

Muestra	Media (Poros / 55 mm)
1	4.4
2	5.8
Media	5.1
Desviación Estándar	0.989949494

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

En las dos muestras se tiene una media de 5.1 poros en 55 mm con una desviación estándar de 0.99. Esta desviación indica que el número de poros por cada 55 mm no se diferencia mayormente en cada muestra, por lo tanto, se aprecia que este valor se mantiene cercanamente uniforme.

- **Número de poros por superficie**

En las dos muestras se obtiene una media de 3.995 poros por 228.75 mm², con una desviación estándar de 1.6475588 (Tabla 3.22), Esta desviación estándar permite observar el número de poros por 228.75 mm², esto indica que la distribución de poros es cercanamente uniforme.

Tabla 18-4. Número de poros por cada 228.75 mm² en la muestra 2 y muestra 4

Muestra	Media (Poros / 228.75 mm ²)
1	2.83
2	5.16
Media	3.995
Desviación Estándar	1.6475588

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

- **Espesor de ligamentos**

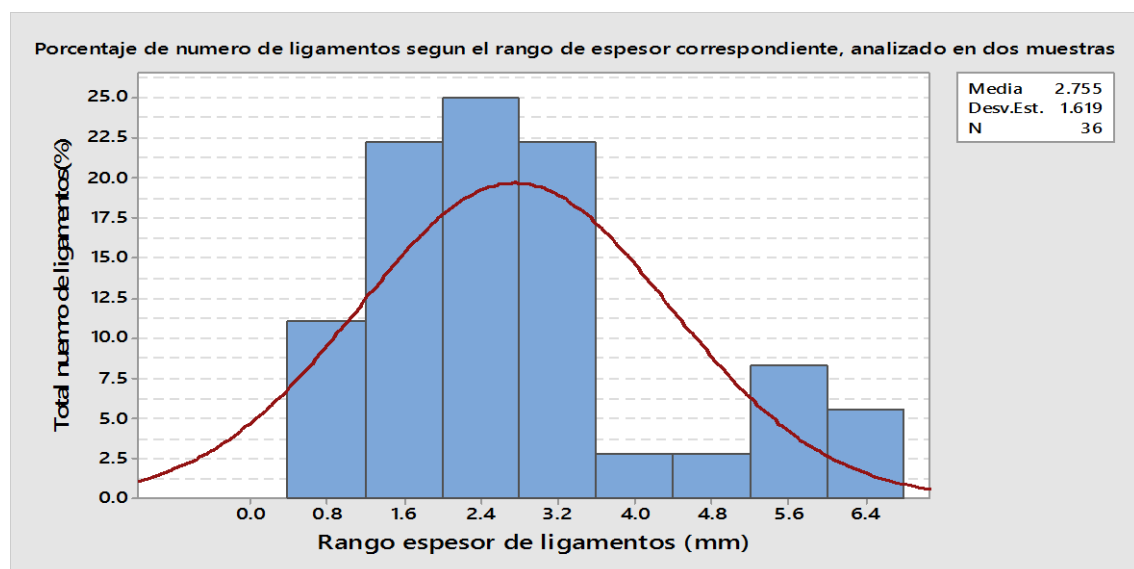


Figura 14-4. Porcentaje del número de ligamentos según el rango de espesor correspondiente, analizado en 2 muestras

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

El total de medidas realizadas en las dos muestras, registran tres porcentajes mayoritarios: (a) aproximadamente el 22% de ligamentos, se encuentran en un espesor medio de 1.6 mm, (b) aproximadamente el 25% de ligamentos, se encuentran en un espesor medio de 2.4 mm, y (c) aproximadamente el 22% de ligamentos, se encuentran en un en un espesor medio de 3.2 mm. El resto de poros se encuentran dispersos en distintos valores (Figura 17-4). El resto de ligamentos (41%) se encuentran en valores de espesor diferentes, por tanto, se puede apreciar que el espesor de ligamentos entre poros de las muestras es irregular.

- **Tamaño superficial de poros**

De las medidas tomadas en las dos muestras, se obtienen dos porcentajes de mayor relevancia: (a) aproximadamente el 66 % de poros, están en un rango superficial medio de 40 mm^2 , (b) aproximadamente el 16 % de poros, están en un rango superficial medio de 120 mm^2 , Los demás poros se encuentran en diferentes rangos (Figura 18-4). Estas medidas dan como indicativo que el mayor porcentaje del tamaño superficial de poros (82%) lo cual están en un rango de 40 - 120 mm^2 , se puede considerar como un rango amplio y con un tamaño superficial de poros muy irregular.

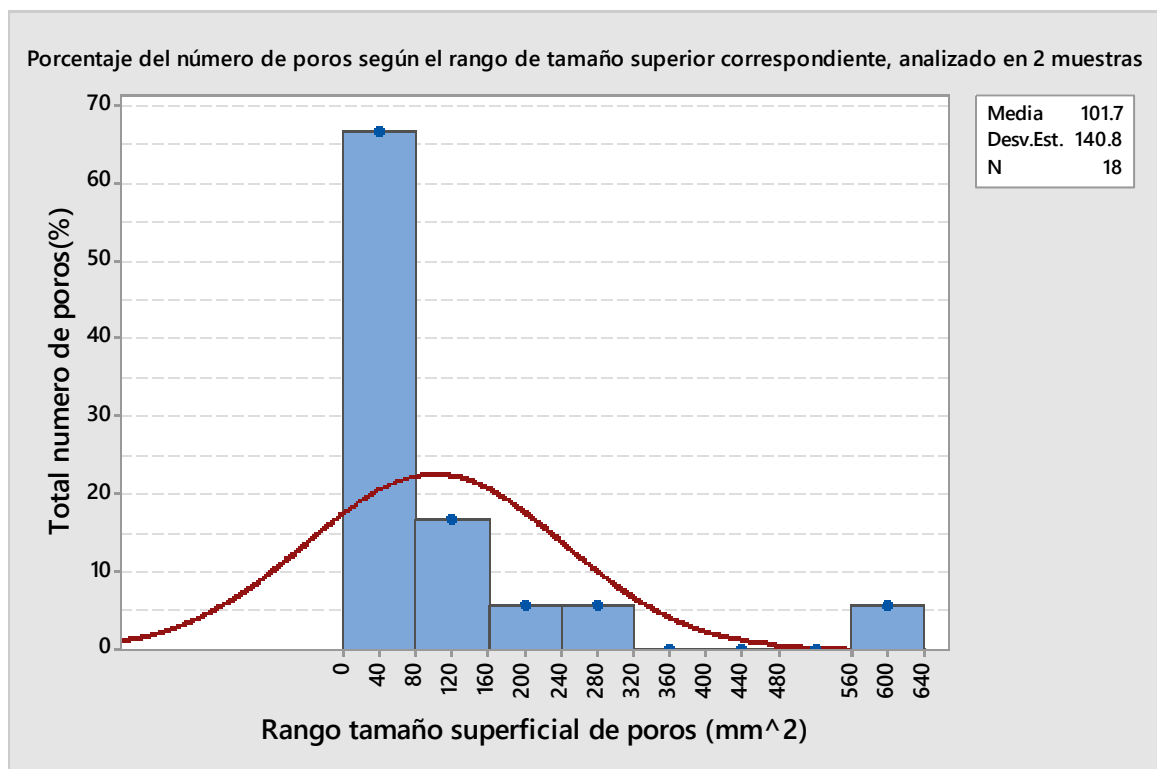


Figura 15-4. Porcentaje del número de poros según el rango de tamaño superior correspondiente, analizado en 2 muestras

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

- **Largo de poros**

De las medidas tomadas en las dos muestras, se obtienen dos porcentajes de relevancia: (a) aproximadamente el 28.5 % de poros, están un rango longitudinal medio de 10 mm y (b) aproximadamente el 18 % de poros, están un rango longitudinal medio 12mm, el resto de poros se encuentran en diferentes rangos (Figura 19-4). Estas medidas dan como indicativo que el mayor porcentaje del tamaño longitudinal de poros (53.5 %) están en un rango variado, por lo que, puede considerarse una longitud de poros muy irregular.

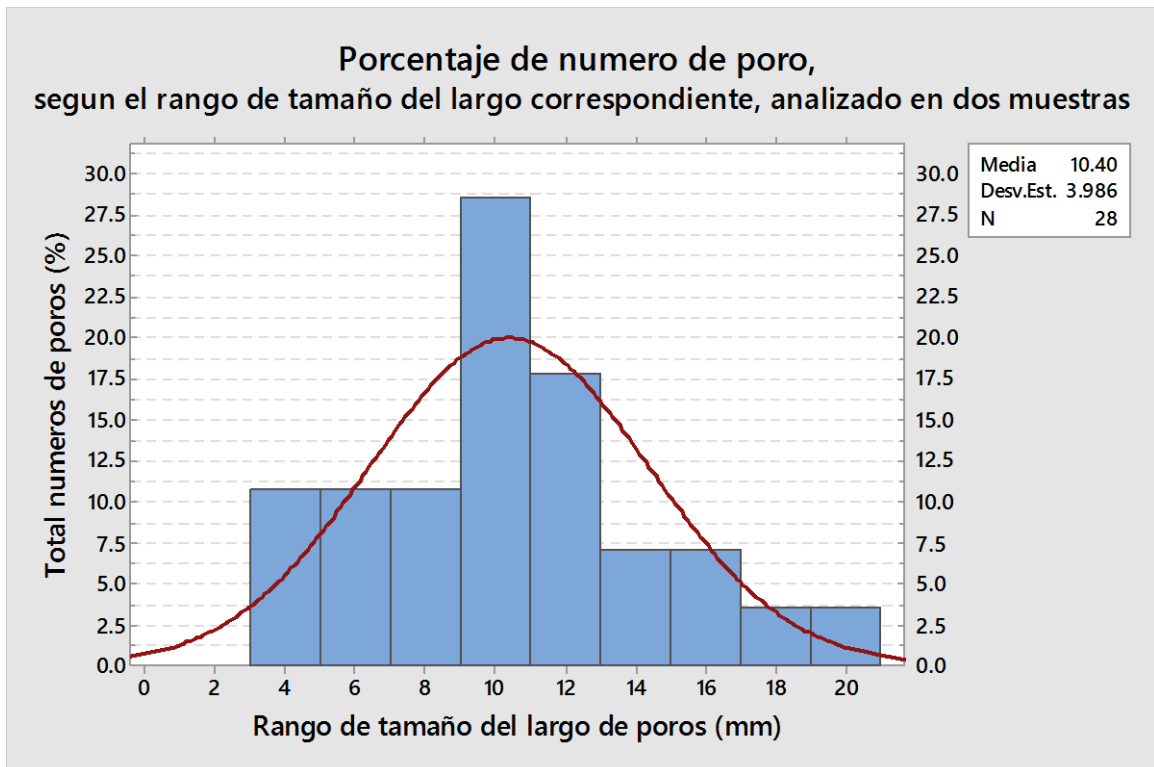


Figura 16-4. Porcentaje del número de poros según el rango del tamaño del largo correspondiente, analizado en 2 muestras

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

- **Ancho de poros**

Según las medidas tomadas en las dos muestras, se obtienen un porcentaje de mayor relevancia, aproximadamente el 72 % de poros, están un rango de ancho medio de 5 mm. Los demás poros se encuentran en diferentes rangos, por lo cual se podría considerar un ancho de poros cercanamente uniforme.

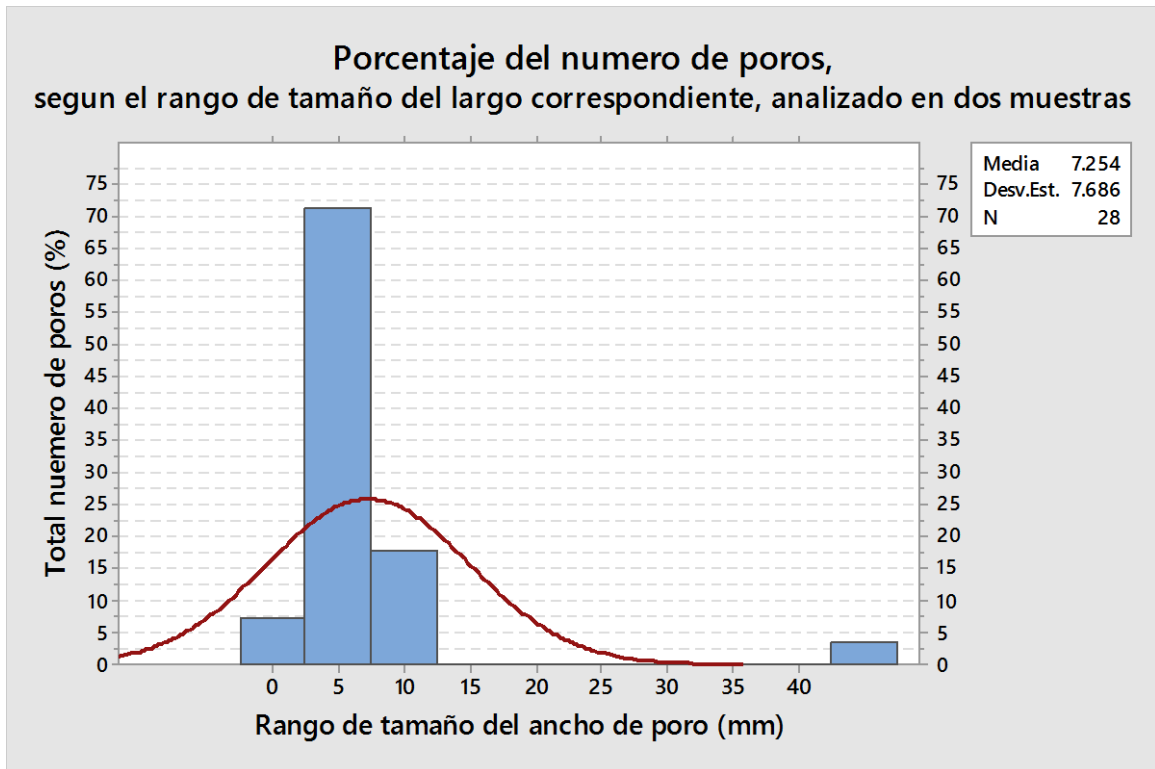


Figura 17-4. Porcentaje del número de poros según el rango de tamaño de ancho correspondiente analizado en 2 muestras

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

- **Porosidad**

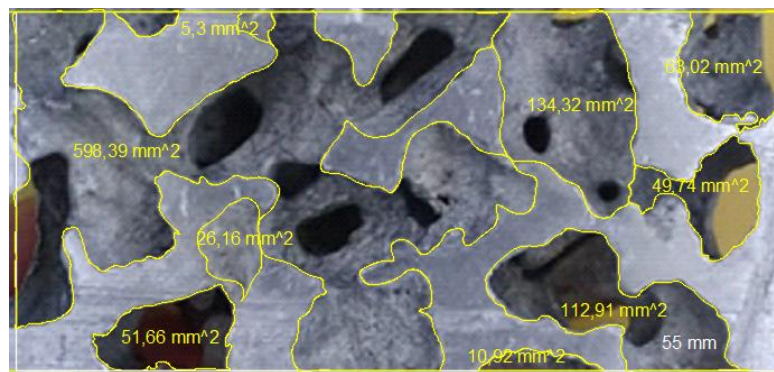


Figura 18-4. Caracterización de porosidad de la espuma metálica

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Al realizar el respectivo análisis de imagen mediante software CAD en las dos muestras, se obtiene un promedio aproximado 60.08 % de porosidad (espacios vacíos) con una desviación estándar del 0.088 %. El valor resultante no difiere en gran medida con el valor medio del 54.534% de porosidad que se obtuvo a través de la densidad relativa (Tabla 18-4). Esta pequeña

diferencia de valores, es debido a que el análisis de imagen fue realizado en dos dimensiones (es decir en una traza).

Tabla 19-4. Porcentaje de porosidad, analizado en 2 muestras

Muestra	Porosidad(%)
2	66.35%
4	53.80%
Media	60.08%
Desviación Estándar	0.088741901

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

Para la obtención de las espumas metálicas de aluminio por el método de infiltración, se utilizó un tamaño de grano (NaCl), comprendido entre 1.5 - 2.4 mm, con un valor medio resultante del 54.534%, el cual se obtuvo a partir de la densidad relativa (Tabla 1-4). Es decir, que las espumas metálicas poseen un alto grado de porosidad.

4.3.2 Interpretación de los resultados obtenidos de las caracterizaciones mecánicas.

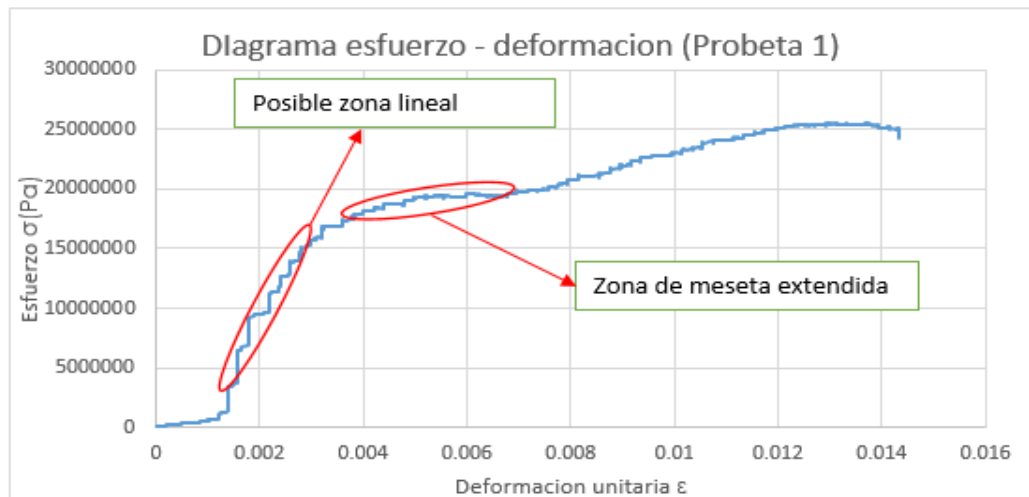


Figura 16-4. Diagrama Esfuerzo - Deformación (Probeta 1) a partir ensayo de compresión uniaxial.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

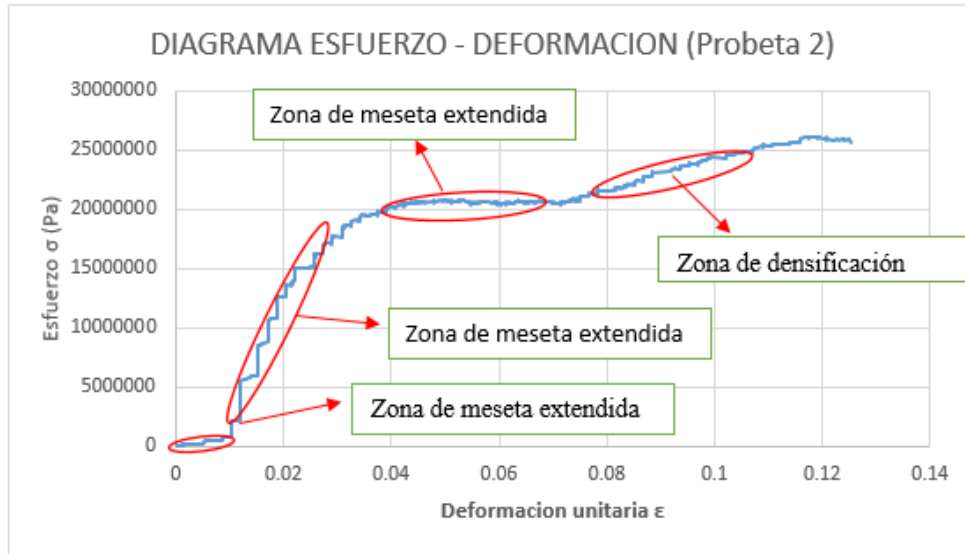


Figura 17-4. Diagrama Esfuerzo - Deformación (Probeta 2) a partir del ensayo de compresión uniaxial

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

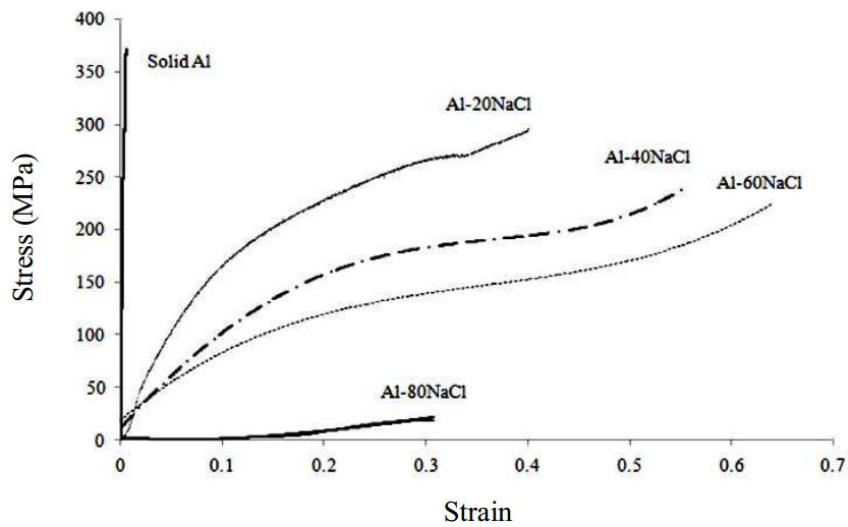


Figura 18-4. Curvas de esfuerzo-deformación a compresión de espuma de aluminio con 60% de NaCl

Fuente: (Hussain & Suffin, 2011).

Las curvas de esfuerzo vs deformación obtenidas de las dos muestras analizadas, no indican acertadamente el inicio y fin de la zona de meseta extendida, una causa podría ser el endurecimiento continuo que sufren las espumas producto del re-acomodamiento a nivel estructural mientras dura el proceso de deformación

Se puede apreciar aparentemente una zona lineal, lo cual se podría considerar como la zona elástica del material, desde esta perspectiva, se estima que el límite de fluencia, analizando las dos probetas, podría ubicarse aproximadamente entre 17 y 18 Mpa.

Se debe tomar en cuenta, que el comportamiento de la curva esfuerzo – deformación obtenida en el presente ensayo, en el cual la muestra de espuma ensayada tenía una porosidad de 54.53 %, presenta un comportamiento similar obtenida en otra investigación, en la cual el espécimen ensayado tenía una porosidad aproximada del 60% (Hussain & Suffin, 2011) (Figura 18-4), es decir, los dos especímenes relacionados tienen una porosidad muy cercana. En ambas curvas se puede estimar aproximadamente que el límite de fluencia se encuentra alrededor de 20 Mpa

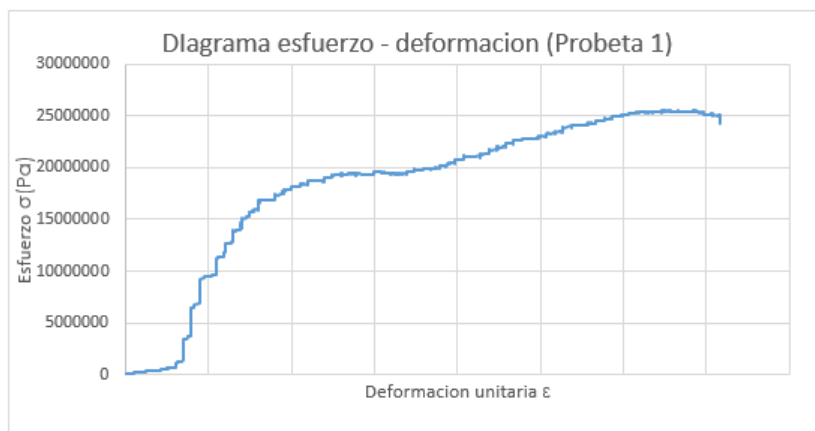


Figura 19-4. Diagrama Esfuerzo - Deformación (Probeta 1), zona de absorción de energía compresiva antes de la densificación.

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

El cálculo de la absorción de energía compresiva se manifiesta mediante el área bajo la curva esfuerzo – deformación, la cual se calcula de la siguiente manera:

$$w = \int_0^{0.125} (4E + 20x6 - 2E + 19x5 + 3E + 17x4 - 2E + 15x3 + 7E + 12x2 - 4E + 9x) dx$$

$$w = 1.10621 * 10^3 \frac{J}{m^3}$$

CAPÍTULO V

5 ESTUDIO DE COSTOS

Considerándose el estudio de costos uno de los más importantes para la determinación de la rentabilidad del proyecto puede establecerse cuan rentable puede llegar a ser, una vez determinado los costos directos e indirectos incurridos en la ejecución del mismo.

5.1 Costos directos

- Los costos directos son aquellos que interfieren directamente en el proceso de llevarse a cabo la ejecución del proyecto: y se consideran los siguientes:

Tabla 1-5. Costos directos del proyecto.

costos directos	Horno mufla para fundición de metales	1225	1950
	Bomba de vacío	275	
	Cilindro de gas argón	100	
	Molde cilíndrico	90	
	Sistema de válvulas	90	
	Láminas de grafito	25	
	Grafito en polvo	20	
	Aluminio y Nacl	80	
	Accesorios	45	

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

5.2 Costos Indirectos

Por otro lado, los costos indirectos generan más valor a un proyecto, interviniendo indirectamente, se consideran los siguientes:

Tabla 2-5. Costos indirectos

costos indirectos	Transporte	110	220
	Alimentación	70	
	Impresiones	15	
	Técnico	25	
	Demás gastos varios		400
costo total	CD + CI		2570

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

5.3 Tasa mínima del proyecto

Se determina la tasa mínima que debe ganar el proyecto para considerarse rentable.

Tabla 3-5. Tasa mínima del proyecto.

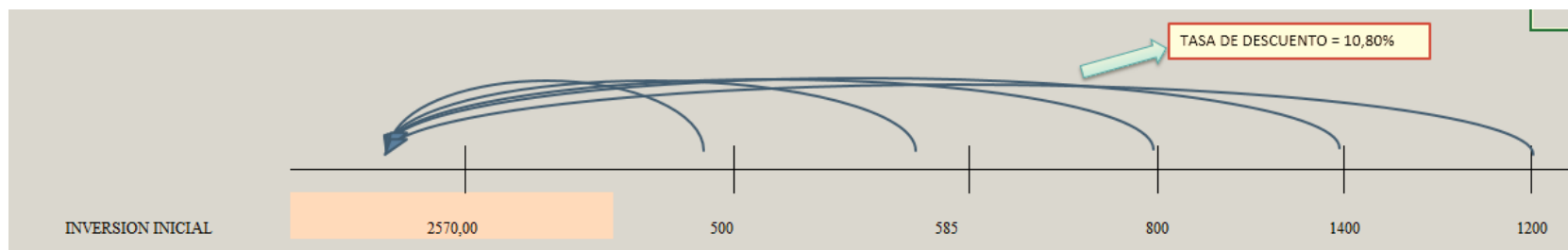
FINANCIAMIENTO	DÓLARES	%	TASA DE INTERÉS	TASA DE PONDERACIÓN
CAPITAL PROPIO	\$ 500,00	19,46%	4,99%	0,97%
CFN	\$ 1.400,00	54,47%	11,83%	6,44%
BAN ECUADOR	\$ 670,00	26,07%	13,00%	3,39%
	\$ 2.570,00	100,00%		10,80%
INTERPRETACIÓN	La tasa mínima requerida que debería ganar el proyecto es de 10,80%. Lo que se considera que no pierde e valor en el mercado, considerando las fuentes de financiamiento utilizadas.			

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

5.4 VAN (Valor Actual Neto)

Este método nos permite evaluar las inversiones en el tiempo, de esta manera requiere traer al presente los valores del futuro para considerar la rentabilidad del proyecto. Para ello se ha empleado una tasa del 10,80%.

Tabla 4-5. Valor actual Neto



		FACTOR DE ACTUALIZAR	FLUJOS NETOS DE CAJA ACTUALIZADOS	FLUJOS NETOS DE CAJA ACUMULADOS
INVERSIÓN INICIAL	-2570			
AÑO 1	500	0,869565217	\$ 434,78	434,78
AÑO 2	585	0,756143667	\$ 442,34	877,13
AÑO 3	800	0,657516232	\$ 526,01	1403,14
AÑO 4	1400	0,571753246	\$ 800,45	2203,59
AÑO 5	1200	0,497176735	\$ 596,61	2800,21
			\$ 2.800,21	
		INVERSIÓN INICIAL	\$ 2.570,00	
		VAN	\$ 230,21	
INTERPRETACIÓN	<p>El VAN es mayor que 0, por lo tanto, se acepta el proyecto. Es decir, que la empresa obtendrá un rendimiento mayor que el costo de oportunidad del capital, por ende, es conveniente ejecutar el proyecto. Así también se obtiene como rendimiento un valor mayor que el monto que invierte aumentado en su valor en el mercado.</p>			

Realizado por: Pacha & Chango, 2019

5.5 Relación Beneficio Costo

Muestra el rendimiento en términos de valor presente, considerando los flujos de caja utilizados por el VAN, descontando las entradas y salidas.

	DINERO	RELACIÓN BENEFICIO /COSTO	INTERPRETACIÓN
Flujos de caja en 5 años	2800,21	\$ 1,09	Por cada dólar de inversión el proyecto genera 1,09 dólares adicionales
Inversión inicial	2570		

5.6 Periodo Real de Recuperación

Se determina para establecer exactamente el periodo de recuperación

INVERSIÓN INICIAL	\$	2.570,00		
FNCA AÑO 4		2203,59		
TOTAL		366,41		
FCA AÑO 5		596,61	4,6141	
TIEMPO ESTIMADO				
			0,369729719	11,0918916
4 años	INTERPRETACIÓN	El tiempo de recuperación de la inversión inicial es 4 años, 7 meses, 11 días; en base a los flujos de caja que se genere en cada periodo de su vida útil.		
7 meses				
15 días				

5.7 TIR

Permite conocer la tasa de recuperación de capital en el tiempo

INVERSIÓN INICIAL	-2570
AÑO 1	500
AÑO 2	585
AÑO 3	800
AÑO 4	1400
AÑO 5	1200
TIR=	18,11%

Tasa de descuento 10,53%
COSTO DE OPORTUNIDAD 8% **INVERSIÓN PLAZO FIJO**

INTERPRETACIÓN	La TIR es de 18,11%, siendo MAYOR que el costo promedio ponderado de capital, por lo tanto, el proyecto se acepta. Además La TIR es mayor que el costo de oportunidad lo que garantiza que este proyecto rinde más que la inversión alternativa
-----------------------	---

CONCLUSIONES

- En las dos muestras en total se tiene una media de 5.1 poros en 55 mm con una desviación estándar de 0.99. Esta desviación indica que el número de poros por cada 55 mm no se diferencia mayormente en cada muestra, por lo tanto, se considera que las espumas poseen un número de poros por milímetro lineal cercanamente uniforme.
- En las dos muestras se obtiene una media de 3.995 poros por cada 228.75 mm², con una desviación estándar de 1.648, por lo tanto se estima que las espumas tienen un número de poros por superficie irregular.
- El total de medidas realizadas en las dos muestras, se registran tres porcentajes mayoritarios: (a) aproximadamente el 22% de ligamentos, se encuentran en un espesor medio de 1.6 mm, (b) aproximadamente el 25% de ligamentos, se encuentran en un espesor medio de 2.4 mm, y (c) aproximadamente el 22% de ligamentos, se encuentran en un espesor medio de 3.2mm. El resto de ligamentos (41%) se encuentran en valores de espesor diferentes, por tanto, se considera que las espumas poseen un espesor de ligamentos entre poros irregular.
- De las medidas tomadas en las dos muestras, se obtienen dos porcentajes de mayor relevancia: (a) aproximadamente el 66 % de poros, están en un rango superficial medio de 40 mm², (b) aproximadamente el 16 % de poros, están en un rango superficial medio de 120 mm², Los demás poros se encuentran en diferentes rangos (Figura 18-4). Estas medidas dan como indicativo que el mayor porcentaje del tamaño superficial de poros (82%) lo cual están en un rango de 40 - 120 mm², se puede considerar como un rango amplio y con un tamaño superficial de poros muy irregular.
- De las medidas tomadas en las dos muestras, se obtienen dos porcentajes de relevancia: (a) aproximadamente el 28.5 % de poros, están un rango longitudinal medio de 10 mm y (b) aproximadamente el 18 % de poros, están un rango longitudinal medio 12mm, el resto de poros se encuentran en diferentes rangos. Estas medidas dan como indicativo que el mayor porcentaje del tamaño longitudinal de poros (53.5 %) están en un rango variado, por lo que, puede considerarse que las espumas tienen una longitud de poros muy irregular.
- Según las medidas tomadas en las dos muestras, se obtienen un porcentaje de mayor relevancia, aproximadamente el 72 % de poros, están un rango de ancho medio de 5 mm.

Los demás poros se encuentran en diferentes rangos, por lo cual se podría considerar que las espumas poseen un ancho de poros cercanamente uniforme.

- Al realizar el respectivo análisis de imagen mediante software CAD en las dos muestras, se obtiene un promedio aproximado 60.08 % de porosidad (espacios vacíos) con una desviación estándar del 0.088 %. El valor resultante no difiere en gran medida con el valor medio del 54.534% de porosidad que se obtuvo a través de la densidad relativa. Esta pequeña diferencia de valores, es debido a que el análisis de imagen fue realizado en dos dimensiones (es decir en una traza).
- Para la obtención de las espumas metálicas de aluminio por el método de infiltración, se utilizó un tamaño de grano (NaCl), comprendido entre 1.5 - 2.4 mm, con un valor medio resultante del 54.534% de porosidad, el cual se obtuvo a partir de la densidad relativa. Por lo tanto, se aprecia que las espumas metálicas poseen un grado de porosidad medio.
- Las curvas de esfuerzo vs deformación obtenidas de las dos muestras analizadas, no indican acertadamente el inicio y fin de la zona de meseta extendida, una causa podría ser el endurecimiento continuo que sufren las espumas producto del re-acomodamiento a nivel estructural mientras dura el proceso de deformación.
- Se puede apreciar aparentemente una zona lineal en el diagrama esfuerzo - deformación, en donde el límite de fluencia podría ubicarse aproximadamente entre 17 y 18 Mpa para las dos probetas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios del comportamiento de la espuma metálica de aluminio, a distintos rangos de porosidad, para obtener datos y parámetros comparativos como: resistencia – peso y capacidad de absorción de energía.

Se recomienda realizar ensayos dinámicos de compresión, de tal forma que se asemeje a una colisión real a la cual está expuesto un vehículo, a diferentes rangos de velocidad y analizar su comportamiento mecánico.

Se recomienda la implementación del proyecto en industrias automotrices puesto que al realizar un estudio de costos considerando tanto los directos como los indirectos, se ha determinado que el proyecto es rentable, y viable al mismo tiempo una vez llevada su ejecución, y el aporte a la absorción de impactos en vehículos es de gran aporte, y para ello se debe realizar un estudio específico para la ubicación de las espumas metálicas.

BIBLIOGRAFÍA

Abarca, Edison Patricio. Síntesis de espumas metálicas de celda abierta. [aut. libro] Edison Patricio Abarca Pérez. *Síntesis de espumas metálicas de celda abierta*. Quito : Escuela Politécnica Nacional, 2017.

ÁLVAREZ, R. *Metodología de la investigación: Operacionalización de Variables*. Medellín : McGraw-Hill., 2012.

Arbaiza, Pedro Nicolas Molina. *Estudio de factibilidad de una empresa de metalurgia en el Ecuador . Tesis (Pregrado)*. Guayaquil : Universidad Ecotec, 2010.

Banhart, Juan. 2014. *Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams*. Alemania : Pergamon, 2014.

Beer, Johnson, Dewolf, & Mazurek, D. *Mecánica de Materiales* . México : TWNNet., 2013.

Luna, Erardo Elizondo, *Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity*. Madrid : Journal of Visualized Experiments, 2014, Vol. 1. 10.3791/52268.

Contandriopoulos, A.P. *Preparar un proyecto de investigación*. Barcelona, España : SG Editores, 1991.

Diego Laughlin & Key Hono. *Physical Metallurgy* . Suiza : Elsevier, 2014.

González, Bernabe *Efectos de la estructura celular sobre el componente mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado* . Valencia , 2015.

Hernández, Juan Camilo Quintero. *Diseño de un sistema de ordeño mecánico portátil*. Medellín : UNIVERSIDAD EAFIT, 2010.

Irausquin, Irene. *Tesis Doctoral: Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía*. Madrid : Universidad Carlos III de Madrid , 2012.

Jose Gutierrez & Juan Oñoro. *Espumas de aluminio, fabricación, propiedades y aplicaciones*. Madrid : WSelf., 2015.

Luna E. , Barari F., Woolle R., & Goodall R. *Artículo científico: casting Protocols for the production of open cell aluminium foams of the replication Technique and the effect of porosity*. Inglaterra : LDeave., 2014.

- Menéndez, Miguel Ángel.** *Metalurgia: Un poco de historia.* España : EA1BCU, 2015.
- Mentor Ashby & otros.** *Metal foams a design guide.* Heinemann : Butterworth, 2012.
- Montgomery, Douglas.** *Diseño y analisis de Experimentos.* México : Limusa S.A., 2004.
- Nebreda, Jorge.** *Tesis Doctoral: Optimizacion de la estructura celular en espumas de aluminio.* Villadoild : UEValadolid., 2014.
- Pedro Cruz, Luis Fernandez & javier Coletto.** *Proceso de fabricacion de metales celulares Parte I: Procesos por via liquida.* Medellin Colombia : LQliquid., 2008.
- Xialoqing, Zhihua, Hongwei, Longmao & Guitong** *Effets off cell size on compressive properties of aluminium foam.* China : Mechaniced., 2006.
- Yolanda Conde, Jardy Despois, Rooman Goodall & Andrea Mortensen.** *Replication Processing of Highly Porous Materials.* Alemania : Regional editions.

ANEXOS