



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

“ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA POROSIDAD DE ESPUMAS METÁLICAS DE ALUMINIO DE CELDA ABIERTA Y SU INFLUENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS”

PABLO ERNESTO SARZOSA VIERA

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO

Riobamba – Ecuador

Mayo 2021

© 2021, Pablo Ernesto Sarzosa Viera.

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.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado “ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA POROSIDAD DE ESPUMAS METÁLICAS DE ALUMINIO DE CELDA ABIERTA Y SU INFLUENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS”, de responsabilidad del Ing. Pablo Ernesto Sarzosa Viera ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes, Mag.

PRESIDENTE

Ing. Edison Patricio Abarca Pérez, Mag.

DIRECTOR

Ing. Edison Marcelo Castillo Cárdenas, Mag.

MIEMBRO

Ing. Víctor David Bravo Morocho, Mag.

MIEMBRO



Firmado electrónicamente por:
**JORGE ISAIAS
CAICEDO REYES**

EDISON
PATRICIO
ABARCA
PEREZ

Firmado digitalmente por EDISON
PATRICIO ABARCA PEREZ
DN: cn=EDISON PATRICIO
ABARCA PEREZ, o=ED-
SECURITY DATA S.A. 1
ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION
Motivo: Soy el autor de este
documento
Ubicación:
Fecha: 2021-05-21 09:33:05:00



Firmado electrónicamente por:
**EDISON MARCELO
CASTILLO
CARDENAS**



Firmado electrónicamente por:
**VICTOR DAVID
BRAVO MOROCHO**

Riobamba, mayo de 2021.

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Pablo Ernesto Sarzosa Viera, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Firmado electrónicamente por:
**PABLO ERNESTO
SARZOSA VIERA**

PABLO ERNESTO SARZOSA VIERA

No. CÉDULA 0503259145

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Pablo Ernesto Sarzosa Viera, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes de consulta están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.



Firmado electrónicamente por:
**PABLO ERNESTO
SARZOSA VIERA**

PABLO ERNESTO SARZOSA VIERA

No. CÉDULA 0503259145

DEDICATORIA

A Dios por todas las bondades y experiencias recibidas en mi vida, a mis padres que han sabido apoyarme incondicionalmente en toda mi vida siendo un pilar fundamental en mi crecimiento personal, a mi hijo Pablito que es mi razón de vivir, mi felicidad completa y mi principal motivo de seguir avanzando por un futuro mejor, a mi esposa Eliza por ser mi compañera de vida, la persona que me apoya y ayuda en todo sentido con amor y mucha comprensión para ser una linda familia, y a todos mis familiares que de cualquier forma están conmigo en todo momento.

Pablo Ernesto Sarzosa Viera

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme educación superior de calidad, siendo un referente en el campo de la mecánica, permitiéndome crecer de manera personal y profesional.

Al Instituto de posgrado y Coordinación de maestría, por escuchar mis dudas, inquietudes y solicitudes que surgieron durante todo este proceso.

A mis docentes de maestría, que impartieron su cátedra con responsabilidad y mística, compartiendo sus conocimientos de manera abierta y siendo guía en mi crecimiento profesional.

A mi tutor y miembros del tribunal por darme el acompañamiento necesario, la guía adecuada y el apoyo en todo momento.

A todas las demás personas que brindaron su apoyo para poder salir adelante.

Pablo Ernesto Sarzosa Viera

CONTENIDO

RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Formulación del problema	1
1.3. Justificación de la investigación.....	2
1.4. Objetivo general	2
1.5. Objetivos específicos	2
1.6. Hipótesis.....	3
1.6.1. Hipótesis general.....	3
1.6.2. Hipótesis específicas	3
CAPÍTULO II	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes del problema	4
2.2. Bases teóricas	5
2.2.1. Materiales.....	5
2.2.2. Ciencia e ingeniería de los materiales	6
2.2.3. Tipos de materiales	6
2.2.3.1. Metales	6
2.2.3.2. Aluminio	7
2.2.4. Procesado de los materiales	7
2.2.5. Sólidos celulares.....	8
2.2.6. Espumas metálicas	9
2.2.7. Aplicaciones de las espumas metálicas.....	10
2.2.7.1. Industria automotriz	10
2.2.7.2. Equipo deportivo.....	10
2.2.7.3. Insertos biocompatibles.....	11

2.2.7.4.	Industria ferroviaria.....	11
2.2.7.5.	Construcción naval.....	11
2.2.7.6.	Estructuras livianas	12
2.2.8.	Propiedades mecánicas.....	12
2.2.9.	Conceptos de esfuerzo y deformación	12
2.2.9.1.	Ensayos de compresión	13
2.2.9.2.	Ensayo de compresión uniaxial.....	13
2.2.9.3.	Ensayo de impacto	14
2.2.9.4.	Ensayo de compresión dinámica.....	15
CAPÍTULO III.....		16
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
3.1.	Tipo y diseño de investigación.....	16
3.2.	Métodos de investigación.....	16
3.3.	Enfoque de la investigación	16
3.4.	Alcance de la investigación.....	17
3.5.	Identificación de variables	17
3.5.1.	Variable independiente.....	17
3.5.2.	Variable dependiente.....	17
3.6.	Operacionalización de variables.....	18
3.7.	Matriz de consistencia.....	19
3.8.	Método experimental	20
3.8.1.	Materiales y equipos utilizados	20
3.8.1.1.	Aluminio	21
3.8.1.2.	Preforma.....	22
3.8.1.3.	Horno eléctrico de mufla.....	23
3.8.1.4.	Bomba de vacío.....	24
3.8.1.5.	Tanque de gas argón.....	24
3.8.1.6.	Sistema de válvulas	25
3.8.1.7.	Láminas de grafito.....	25

3.8.1.8.	Molde de fundición	26
3.8.1.9.	Pirómetro.....	26
3.8.2.	Protocolo experimental	27
3.8.2.1.	Preparación de la preforma y molde	27
3.8.2.2.	Pre calentamiento del horno.....	30
3.8.2.3.	Infiltración.....	30
3.8.2.4.	Solidificación	30
3.8.2.5.	Maquinado	32
3.8.2.6.	Lixiviación y espuma metálica.....	32
CAPÍTULO IV.....		34
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1.	Densidad relativa.....	34
4.2.	Estructura y tamaño del poro	34
4.3.	Resultados del ensayo de compresión uniaxial	37
4.4.	Resultados del ensayo de impacto Charpy	39
4.5.	Ensayo de compresión dinámica.....	40
4.5.1.	Cantidad de energía absorbida en el ensayo de compresión dinámica.....	43
CAPÍTULO V.....		46
5.	PROPUESTA.....	46
5.1.	Introducción	46
5.2.	Parámetros del proceso experimental.....	46
5.3.	Dimensiones del molde	46
5.4.	Costo de fabricación de la espuma.....	47
5.5.	Aplicaciones de la espuma de aluminio de celda abierta	48
CONCLUSIONES		49
RECOMENDACIONES		50
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3. Metodología de la investigación	16
Tabla 2-3. Operacionalización de variables	18
Tabla 3-3. Matriz de consistencia	19
Tabla 4-3 Composición del aluminio.....	21
Tabla 5-3. Características de la preforma	22
Tabla 6-3. Características del horno.....	23
Tabla 1-4. Diámetro de las espumas de aluminio	36
Tabla 2-4. Espesor del ligamento de las espumas de aluminio.....	37
Tabla 3-4. Resistencia a la compresión de las probetas	38
Tabla 4-4. Morfología y resistencia de las espumas	39
Tabla 5-4. Energía absorbida mediante ensayo Charpy en probeta de 3mm de poro	39
Tabla 6-4. Energía absorbida mediante ensayo Charpy en probeta de 5mm de poro	40
Tabla 7-4. Ángulo de rebote mediante ensayo a compresión dinámica.....	42
Tabla 8-4. Energía absorbida a compresión dinámica	45
Tabla 1-5. Dimensiones del molde.....	47
Tabla 2-5. Costo de fabricación de la espuma	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Muestra de espuma en la cual se removió el compuesto de NaCl.....	5
Figura 2-2. La evolución de los materiales con el tiempo.	6
Figura 3-2. Colada de hierro fundido en moldes.....	7
Figura 4-2. Sólido celular y sólido poroso	8
Figura 5-2. Sólido celular y sólido poroso. Diferencias.....	8
Figura 6-2. Sólidos celulares tridimensionales	9
Figura 7-2. Uso de espumas metálicas en vehículos	10
Figura 8-2. Amortiguador de energía de impacto fabricado con espuma metálica.....	11
Figura 9-2. Trozo de espuma metálica de celda cerrada flotando en agua ($\rho = 0.2$).....	12
Figura 10-2. Placa sándwich de acero con núcleo de espuma metálica	12
Figura 11-2. Ensayo de impacto Charpy	14
Figura 12-2. Vista esquemática de la prueba de impacto tipo péndulo de doble brazo	15
Figura 1-3. Esquema del equipo para obtener espumas metálicas de celda abierta.	20
Figura 2-3. Aluminio 99%	21
Figura 3-3. Preforma de Óxido de Sodio de 3mm.	22
Figura 4-3. Preforma de Óxido de Sodio de 5mm.	22
Figura 5-3. Horno eléctrico de mufla modelo 4-9 Samothermal.	23
Figura 6-3. Bomba de vacío QUALITY Model QVP 800.....	24
Figura 7-3. Tanque de gas argón.....	24
Figura 8-3. Sistema de válvulas	25
Figura 9-3. Láminas de grafito como sellante del molde.	25
Figura 10-3. Molde de fundición de acero inoxidable.	26
Figura 11-3. Pirómetro para la medición de la temperatura del molde.....	27
Figura 12-3. Colocación de la lámina de grafito en la base del molde	28
Figura 13-3. Preparación de la preforma en el molde	28
Figura 14-3. Colocación del aluminio en el molde	29
Figura 15-3. Colocación de la lámina de grafito en la tapa del molde.....	29
Figura 16-3. Colocación del aluminio y sellado del molde.....	29

Figura 17-3. Pre calentamiento del horno	30
Figura 18-3. Extracción del molde.....	31
Figura 19-3. Enfriamiento del molde.....	31
Figura 20-3. Extracción de la espuma de aluminio.....	31
Figura 21-3. Probeta extraída y maquinada.	32
Figura 22-3. Espumas de aluminio de celda abierta de 3mm de tamaño de poro	32
Figura 23-3. Espumas de aluminio de celda abierta de 5mm de tamaño de poro	33
Figura 1-4. Probeta seccionada de 3mm de tamaño de poro.....	35
Figura 2-4. Probeta seccionada de 5mm de tamaño de poro.....	35
Figura 3-4. Macrografías de probeta de 3mm de tamaño de poro	36
Figura 4-4. Macrografías de probeta de 5mm de tamaño de poro	36
Figura 5-4. Curva de fuerza – deformación para la probeta de 3mm de tamaño de poro	38
Figura 6-4. Curva de fuerza – deformación para la probeta de 5mm de tamaño de poro	38
Figura 7-4. Probetas de 3mm y 5mm de tamaño de poro para ensayo Charpy.....	40
Figura 8-4. Péndulo de impacto para ensayo de compresión dinámica	41
Figura 9-4. Colocación del péndulo a 30°	41
Figura 10-4. Rebote del péndulo. a) 3mm de poro. b) 5mm de poro.....	42
Figura 11-4. Probeta ensayada de 3mm de tamaño de poro.....	42
Figura 12-4. Probeta ensayada de 5mm de tamaño de poro.....	43
Figura 13-4. Esquema del ensayo con el péndulo de impacto	43

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Informe técnico de los ensayos de compresión e impacto

ANEXO B. Planos constructivos del molde de fundición de espumas

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo el diseño y caracterización de dos tamaños de espumas metálicas de aluminio, con una porosidad de 3 milímetros y 5 milímetros de diámetro de porosidad, utilizando esferas de óxido de sodio como preforma soluble, con la finalidad de obtener un material novedoso con datos de la morfología y caracterización mecánica de las propiedades de compresión y absorción de energía de impacto. El método de obtención de estas espumas de aluminio fue por infiltración a través de preformas solubles de óxido de sodio, generando 3 probetas para cada ensayo de compresión cuasiestática, impacto y compresión dinámica, para los 2 diámetros de porosidad. Las probetas de forma cilíndrica, fueron fabricadas con aluminio de alta pureza y la preforma dentro de un molde de fundición de acero inoxidable, utilizando un horno eléctrico, un sistema de tuberías, gas argón y una bomba de vacío para complementar todo el proceso. De acuerdo al análisis morfológico y caracterización mecánica, la probeta de 3 milímetros de diámetro de porosidad soporto una carga de compresión estática de 3000Kg y la de 5 milímetros de diámetro de porosidad soportó una carga de 4000Kg. Se determinó una ecuación para cuantificar la energía absorbida por cada probeta en los ensayos de compresión dinámica, tomando en cuenta el ángulo inicial y de rebote del péndulo de impacto, siendo la probeta con menor diámetro de porosidad la que absorbe la mayor cantidad de energía. Se calculó el costo de fabricación de estas espumas metálicas, resultando un valor de 14 centavos por cada centímetro cúbico de este material.

PALABRAS CLAVE: <ALUMINIO>, <CARACTERIZACIÓN MECÁNICA>, <COMPRESIÓN DINÁMICA>, <ENERGÍA ABSORBIDA>, <ESPUMAS METÁLICAS>, <FUNDICIÓN>, <INFILTRACIÓN>, <MORFOLOGÍA>, <ÓXIDO DE SODIO>, <PÉNDULO DE IMPACTO>, <POROSIDAD>, <PREFORMA SOLUBLE>.

LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS

Firmado digitalmente por
LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Nombre de reconocimiento
(DN): c=EC, l=BIOBAMBA,
serialNumber=0602766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.05.06 12:11:16
-05'00'



0055-DBRAI-UPT-IPEC-2021

ABSTRACT

The objective of this research was the design and characterization of two sizes of aluminum metallic foams, with a porosity of 3 millimeters and 5 millimeters of porosity diameter, using sodium oxide spheres as a soluble preform, in order to obtain a material novel with morphology data and mechanical characterization of impact energy absorption and compression properties. The method of obtaining these aluminum foams was by infiltration through soluble sodium oxide preforms, generating 3 specimens for each quasi-static compression, impact and dynamic compression test, for the 2 porosity diameters. The test tubes, cylindrical in shape were manufactured with high purity aluminum and the preform inside a stainless steel casting mold, using an electric furnace, a pipe system, argon gas and a vacuum pump to complement the entire process. According to the morphological analysis and mechanical characterization, the 3-millimeter diameter porosity test piece supported a static compression load of 3000Kg and the 5-millimeter diameter porosity one supported a load of 4000Kg. An equation was determined to quantify the energy absorbed by each the test tube, in the dynamic compression tests, taking into account the initial and rebound angle of the impact pendulum, with the specimen with the smallest porosity diameter being the one that absorbs the greatest amount of energy. The manufacturing cost of these metallic foams was calculated, resulting in a value of 14 cents for each cubic centimeter of this material.

KEYWORDS: <ALUMINUM>, <MECHANICAL CHARACTERIZATION>, <DYNAMIC COMPRESSION>, <ABSORBED ENERGY>, <METAL FOAMS>, <CASTING>, <INFILTRATION>, <MORPHOLOGY>, <SODIUM OXIDE>, <PENDULUM> , <POROSITY>, <SOLUBLE PREFORM>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La importancia de los materiales en desarrollo de la humanidad ha sido resaltada de manera significativa, en donde el avance de las tecnologías para la obtención natural y fabricación de materiales ha determinado la evolución de las sociedades. De manera general, existen materiales para cada aplicación desde elementos utilizados en la vida cotidiana hasta aplicaciones más específicas.

A pesar de los espectaculares progresos en el conocimiento y en el desarrollo de los materiales en los últimos años, el permanente desafío tecnológico requiere materiales cada vez más sofisticados y especializados. Desde la perspectiva de los materiales se pueden comentar algunos extremos (Callister, 1995). Se pueden mencionar algunos campos como la generación de energía mediante fuentes nuevas y económicas. También la preservación de la calidad del medioambiente requiere la obtención y producción de materiales para el control de contaminación y una mínima degradación del entorno de donde se extraen. En el caso del transporte, los materiales cumplen un rol muy significativo, además del consumo de energía de cualquier tipo. Por eso se busca optimizar la construcción mediante la utilización de materiales que tengan buenas propiedades de resistencia con baja densidad, así como la disipación de calor, para que estos vehículos tengan un rendimiento adecuado.

Las espumas metálicas son sólidos celulares artificiales que emulan microestructuras relativamente comunes en la naturaleza. Las espumas metálicas, especialmente las de célula abierta, son de amplia aplicación en la industria aeroespacial, naval, ferroviaria, deportiva y militar por su alta resistencia mecánica en relación al peso (Ashby, y otros, 2000). Los métodos de sintetización de estas espumas metálicas constituyen un reto para obtener procesos sistematizados para la obtención de este material. El objetivo de este proyecto es obtener espumas metálicas de aluminio, en donde se pueda controlar el tamaño de la porosidad, para que el material tenga una constitución mayormente homogénea. También se necesita establecer los elementos de control en todas las etapas del proceso, para realizar una sistematización y poder replicar a futuro con el objeto de realizar ensayos y pruebas que permitan determinar la influencia de la estructura en la porosidad sobre las propiedades mecánicas de compresión estática y dinámica.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la influencia de la estructura de la porosidad sobre las propiedades mecánicas de compresión estática y dinámica de espumas metálicas de aluminio de celda abierta?

1.3. Justificación de la investigación

La importancia de la generación de nuevos materiales aplicados a ámbitos industriales requiere de nuevos métodos de obtención y procesamiento de los mismos. Los ámbitos de aplicación de estos nuevos materiales vienen de requerimientos de desarrollo de la sociedad en el tiempo, por lo tanto, se debe buscar que estos métodos cumplan con estándares y protocolos para la producción y determinar las capacidades y comportamiento, así como la afectación del entorno y condiciones de servicio. Este proceso permitirá sintetizar un material ligero con buenas propiedades mecánicas.

El desarrollo de espuma de aluminio permitirá comprender las aplicaciones de interés, en donde se requiera una alta resistencia y baja densidad, considerando su desempeño en el campo de la construcción y producción a través de la absorción de energía de impacto, mediante la realización de ensayos y pruebas a probetas que permitan determinar sus propiedades mecánicas, su correlación entre las muestras y concluir con una sistematización del proceso para poder replicarlo a futuro. Además, estos procesos de obtención no se realizan fácilmente en el país, por lo que sería un gran aporte establecer parámetros de trabajo en este material.

Mediante la generación de un proceso sistematizado para la sintetización de esta espuma, se determina que las principales influencias en el ámbito industrial serán la creación de un nuevo material que permita optimizar costos de fabricación, así como disminuir el consumo de energía de los vehículos, máquinas y equipos que estén ensamblados y contruidos con esta espuma de aluminio, beneficiando el sector productivo de la industria. Asimismo, se establecerán tablas de las propiedades mecánicas del material para futuras referencias e investigaciones.

Es cierto que no existen varias investigaciones de la espuma metálica de aluminio, pero con las bases ya establecidas por otros investigadores del país, se tiene un punto de partida para poder establecer un proceso mejorado de obtención de este nuevo material, mediante la utilización de laboratorios y talleres existentes en la zona para la realización de ensayos y pruebas, así como de la construcción de elementos necesarios para la obtención de probetas de este material.

1.4. Objetivo general

- Analizar la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas de compresión estática y dinámica.

1.5. Objetivos específicos

- Establecer el método y proceso más viable para la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante investigación de varias fuentes bibliográficas.

- Determinar los elementos del equipo para la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante el método y proceso seleccionado.
- Obtener espumas metálicas de aluminio de celda abierta de 3mm y 5mm de tamaño de poro mediante el método seleccionado para su caracterización mecánica.
- Analizar los datos de caracterización mecánica y estructural mediante estudio estadístico para la determinación de la influencia sobre las propiedades mecánicas de compresión e impacto.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La estructura de la porosidad de espumas metálicas de celda abierta influye sobre sus propiedades mecánicas de compresión estática y dinámica.

1.6.2. Hipótesis específicas

La obtención de espumas metálicas de aluminio puede ser replicada mediante un proceso sistematizado.

La selección adecuada de los elementos del proceso permitirá la obtención de espuma de aluminio.

Se puede controlar adecuadamente la estructura de la porosidad en espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante un proceso sistematizado.

Existe una correlación entre la estructura de la porosidad y los ensayos realizados en las probetas de espuma metálica de aluminio.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

Las investigaciones actuales tratan de encontrar mejoras en los procesos de fabricación para obtener espumas de más alta calidad, con propiedades más homogéneas y reproducibles a un menor costo. En aplicaciones estructurales, la curvatura y geometría de los poros, la presencia de defectos como paredes colapsadas o inexistentes tratan de ser evitados, al influir más en las propiedades que una distribución homogénea de los poros. En cambio, en aplicaciones funcionales la uniformidad de los poros o las dimensiones de los canales de conexión entre los poros son más importantes. Para la mayoría de los procesos no existe un modelo teórico o numérico que permita predecir los efectos de posibles cambios, en algunos parámetros de fabricación, para la mejora de las características y propiedades de las espumas de aluminio obtenidas; siendo una línea abierta de investigación de prometedor futuro. La reducción de los costos de fabricación se está enfocando en la utilización de materias primas más económicas, la eliminación o simplificación del número de etapas de fabricación y la reducción de escorias o fracciones de material rechazado (Gutiérrez-Vázquez & Oñoro, 2008).

El método básico descrito aquí ha sido utilizado en diferentes formas por otros investigadores. Se discuten algunas de las variantes clave que permiten crear espumas de diferentes tipos. Al caracterizar estas espumas hemos medido la porosidad, ya que esta es una evaluación rápida y fácil de realizar, pero puede ser necesaria la caracterización de otras características estructurales, como el tamaño de poro, el área de superficie específica o el grosor del puntal para obtener una comprensión completa de las características de la espuma para diferentes aplicaciones. En la práctica, para la producción de espumas por replicación, el tamaño de poro está bien controlado por el tamaño de partícula de NaCl utilizado, y se pueden hacer relaciones entre esto, la densidad y las otras características estructurales (Elizondo Luna, Barari, Woolley, & Goodall, 2014). En este artículo científico se detalla el protocolo de obtención de espumas metálicas, considerando el tamaño del poro y otras características determinadas para relacionarlas unas con otras.

Las espumas metálicas de celda abierta que fueron obtenidas por el método de infiltración, poseen un valor medio de densidad relativa de 0,145, lo cual conlleva a un alto grado de porosidad cuyo valor medio es del 85,5% (Abarca Pérez, 2017). En este proyecto de investigación se logró obtener espumas metálicas de celda abierta por el método de infiltración en preformas solubles (granos de sal), en donde se puede visualizar la interconectividad de los poros, característica necesaria para que los granos de NaCl sean disueltos posteriormente, caso contrario serían atrapados dentro del metal.



Figura 1-2. Muestra de espuma en la cual se removió el compuesto de NaCl

Fuente: (Abarca Pérez, 2017)

El método viable y factible para la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta es el de infiltración con granos de sal o alguna preforma similar, ya que este permite generar poros en toda la constitución del material, ya que, al momento de trabajar en la generación de la probeta, se debe calentar el metal hasta la temperatura de fusión, siendo esta temperatura más baja que la temperatura de fusión de la preforma, y después del enfriamiento se procederá a disolver la misma con agua para poder dejar el material con los poros abiertos sin ningún material adicional al aluminio.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Materiales

En el mundo existen materiales utilizados en la sociedad y que definen la calidad de vida de las personas. Al principio las herramientas eran utilizadas por nuestros ancestros y que también servían como armas utilizando desde piedras hasta metales como materiales base.

Las presiones del ahorro de costos de fabricación y aligeramiento de los materiales han generado la necesidad de materiales nuevos y sofisticados. En la siguiente figura se muestra un resumen de la aplicación y la importancia de los materiales utilizados en la ingeniería, en donde se muestra la evolución y desarrollo acelerado de la tecnología en tiempos actuales.

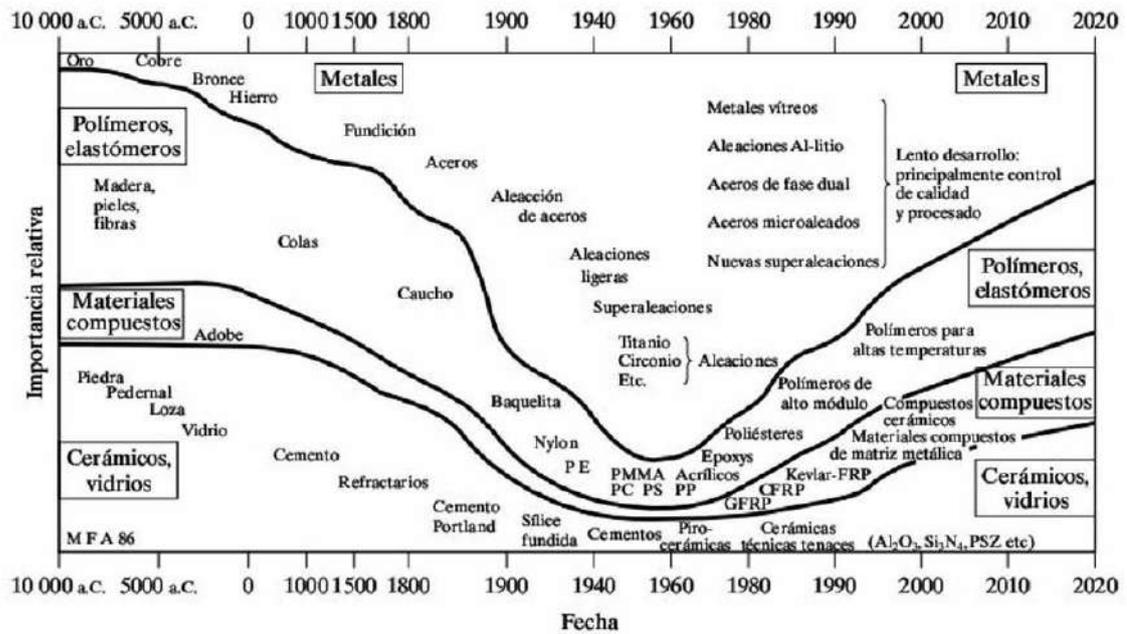


Figura 2-2. La evolución de los materiales con el tiempo.
Fuente: (Shakelford, 2005)

2.2.2. Ciencia e ingeniería de los materiales

Desde 1960 la rama de la ingeniería correspondiente a los materiales se establece como ciencia e ingeniería de materiales, debido a que el campo es concerniente a una gran cantidad de estudios científicos teóricos y prácticos en el ámbito ingenieril que ha ido combinando técnicas tradicionales con avances tecnológicos de la actualidad.

2.2.3. Tipos de materiales

Se pueden clasificar los materiales de distintas maneras, pero se puede establecer cinco categorías fundamentales a nivel de ingeniería:

- Metales
- Cerámicos y vidrios
- Polímeros
- Materiales compuestos
- Semiconductores

2.2.3.1. Metales

Los metales y sus aleaciones, incluyendo acero, aluminio, magnesio zinc, hierro fundido, titanio, cobre y níquel, generalmente tienen como característica una buena conductividad eléctrica y térmica, una resistencia relativamente alta, una alta rigidez, ductilidad o conformabilidad y

resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga (Askelnad, 1998).

En este caso se hablará principalmente sobre los metales, con énfasis en el aluminio. Todos los materiales provienen de materia prima que necesita ser transformada mediante diversos procesos de obtención y procesamiento.

2.2.3.2. Aluminio

El aluminio y sus aleaciones se caracterizan por la relativamente baja densidad (2,7 g/cm³ comparada con 7,9 g/cm³ del acero), elevadas conductividades eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión en algunos medios, incluyendo el atmosférico. Muchas de estas aleaciones se hechuran con facilidad debido a la elevada ductilidad; esto es evidente en el aluminio puro, que se puede convertir en papel y enrollar. El aluminio tiene estructura cúbica centrada en las caras y es dúctil incluso a temperatura ambiente. La principal limitación del aluminio es la baja temperatura de fusión a 660°C que restringe su campo de aplicación (Callister, 1995).

2.2.4. Procesado de los materiales

El estudio del procesamiento de materiales realiza dos funciones. En primer lugar proporciona un conocimiento completo de la naturaleza de cada tipo de material. En segundo lugar, y aún más importante, permite apreciar los efectos de la historia de procesamiento sobre las propiedades. La tecnología de procesamiento varía desde métodos tradicionales como el moldeo, hasta técnicas más actuales como fabricación de microcircuitos electrónicos (Shakelford, 2005).



Figura 3-2. Colada de hierro fundido en moldes.
Fuente: (Shakelford, 2005)

2.2.5. Sólidos celulares

La palabra célula proviene del latín cella que significa “pequeño compartimiento, espacio cerrado”. De aquí se puede deducir que la denominación sólido celular hace referencia a un material compuesto por un conjunto de pequeños compartimientos (Irausquín Castro, 2012).

Puede definirse a un sólido celular como aquel formado por una red de celdas poliédricas o poligonales unidas entre sí formando mallas bidimensionales o tridimensionales (Ashby, y otros, 2000).

Estos materiales son porosos y como consecuencia se puede identificar su densidad relativa, determinada por la relación entre la densidad del material celular ρ y la densidad del material en sólido macizo ρ_s :

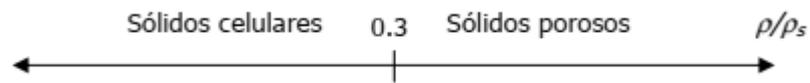


Figura 4-2. Sólido celular y sólido poroso
Fuente: (Irausquín Castro, 2012)

A continuación, se muestra la diferencia entre un sólido celular y un sólido poroso de manera esquemática:

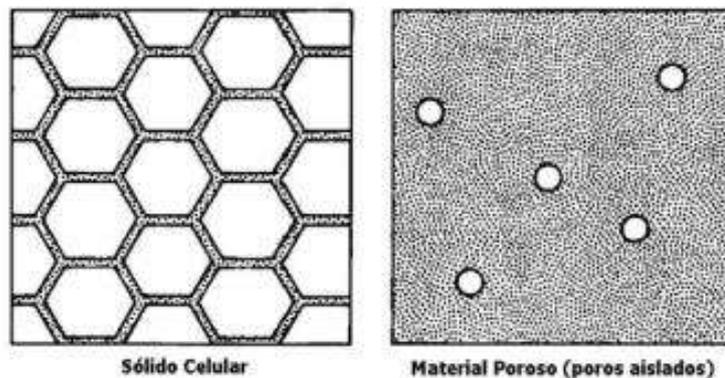


Figura 5-2. Sólido celular y sólido poroso. Diferencias.
Fuente: (Irausquín Castro, 2012)

Según su origen los sólidos celulares se pueden clasificar en: naturales como madera, corcho, esponja, coral, hueso, y artificiales como espumas, poliuretano, polietileno paneles de abeja, pan y otros comestibles.

Los sólidos celulares pueden clasificarse según su estructura como: bidimensionales (paneles de abeja) son de celda cerrada, tridimensionales (espumas) de celda abierta y celda cerrada, y mixtas.

La estructura del sólido es de celda abierta cuando el material se encuentra contenido únicamente en los bordes de las celdas. El sólido entonces consiste en una red de pequeñas barras similares a

vigas formando una celosía. La estructura es de celda cerrada cuando el material está contenido en tanto en los bordes como en las caras laterales de las celdas, aislando cada una de éstas de las demás adyacentes (Irausquín Castro, 2012).

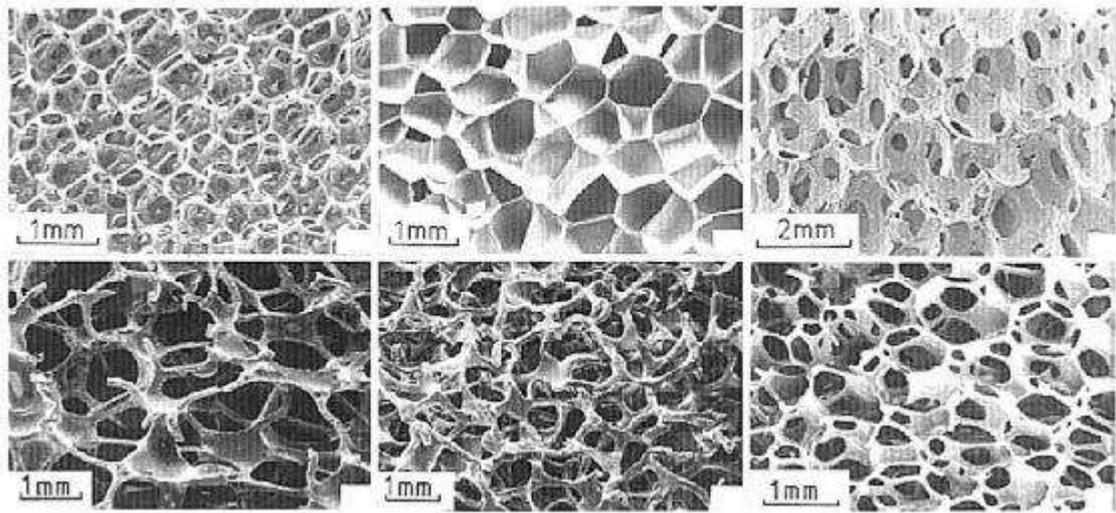


Figura 6-2. Sólidos celulares tridimensionales
Fuente: (Ashby, y otros, 2000)

2.2.6. *Espumas metálicas*

Comúnmente suelen denominarse espumas de metal o espumas metálicas a aquellos materiales metálicos que contienen vacíos. En un sentido más estricto, es conveniente mencionar que las espumas metálicas son un caso particular de sólidos celulares y que, como tales, poseen características específicas que los distinguen de otros (Irausquín Castro, 2012).

Entre los principales tenemos:

- Materiales celulares
- Materiales porosos
- Espumas metálicas
- Esponjas metálicas

Los dos primeros se han descrito anteriormente, mientras que las espumas metálicas son una clase especial de materiales celulares que se originan fundamentalmente por la adición de gas a un metal o aleación metálica en estado líquido y, por ende, tienen una morfología restringida. Las esponjas metálicas se refieren a una morfología especial con vacíos interconectados.

Las espumas metálicas son similares a cualquier otra espuma (en relación a las que se forman en bebidas y alimentos y a las fabricadas de polímeros), ya que la mayor parte de su estructura, típicamente entre el 70 y 95% de la misma, está formada por poros que pueden estar conectados

entre sí o separados. A diferencia de las espumas poliméricas, son rígidas y en ocasiones tienen la apariencia de un metal macizo si no han sido cortadas. Son conocidas por su interesante combinación de propiedades físicas y mecánicas tales como su elevada rigidez junto a un muy bajo peso específico, o alta resistencia a compresión combinada con apropiadas características de absorción de energía (Irausquín Castro, 2012).

2.2.7. Aplicaciones de las espumas metálicas

Las espumas metálicas tienen una combinación de propiedades que las hacen atractivas para numerosas aplicaciones ingenieriles. Entre sus aplicaciones se tienen el uso como materiales livianos de construcción, para absorber energía por deformación, para el control térmico y acústico y otras tantas más. A continuación, se describen las aplicaciones actuales y potenciales que poseen las espumas metálicas, de acuerdo al sector productivo correspondiente:

2.2.7.1. Industria automotriz

Las características y propiedades de las espumas metálicas las hacen de utilidad en la fabricación de vehículos. Así, su alta capacidad para absorber energía mecánica por deformación (especialmente de impacto), carácter reciclable, insensibilidad a entallas, protección contra fuego, aislamiento térmico y acústico y resistencia al calor, apropiada relación resistencia/peso y rigidez/peso, hacen que tengan aplicación en paragolpes, soportes para barras anticolidión, rieles, protección interna de ocupantes, capó, paneles laterales y otros.

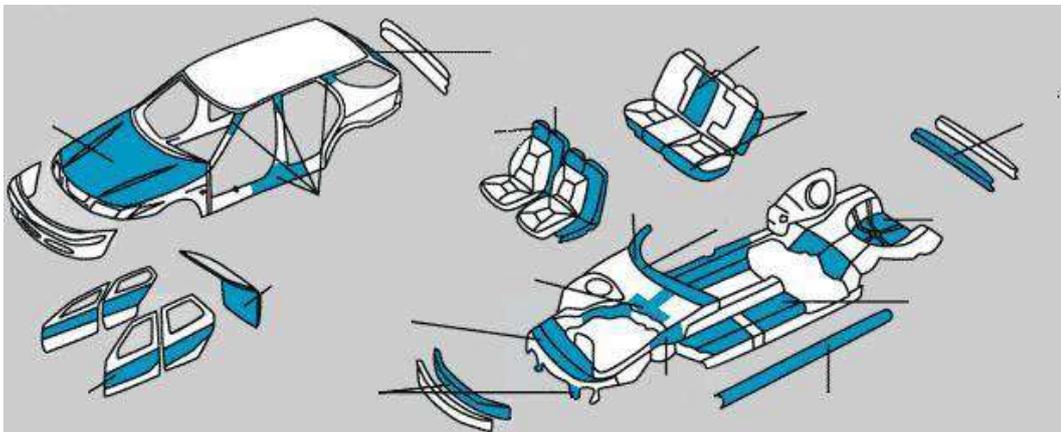


Figura 7-2. Uso de espumas metálicas en vehículos
Fuente: (Irausquín Castro, 2012)

2.2.7.2. Equipo deportivo

Aunque no se ha reportado uso de espumas metálicas en este sector, su baja densidad y elevada capacidad de absorción de energía las hacen apropiadas para aplicaciones de relleno, por ejemplo, en raquetas de tenis, bates de béisbol, cuadros de bicicletas y otros.

2.2.7.3. *Insertos biocompatibles*

La estructura de celda abierta de espumas metálicas biocompatibles, tales como las de titanio, estimulan el crecimiento celular, de modo que pueden favorecer el crecimiento de hueso dentro de los poros de la espuma en prótesis ortopédicas.

2.2.7.4. *Industria ferroviaria*

Las ventajas que tienen las espumas metálicas en el sector automotriz se extienden a la construcción ferroviaria. En este sector se ha hecho hincapié en el aprovechamiento de la alta absorción de energía de impacto, para trenes urbanos que presentan el riesgo de colisión con vehículos. Se han fabricado elementos anticolidión de espuma metálica para trenes de alta velocidad.

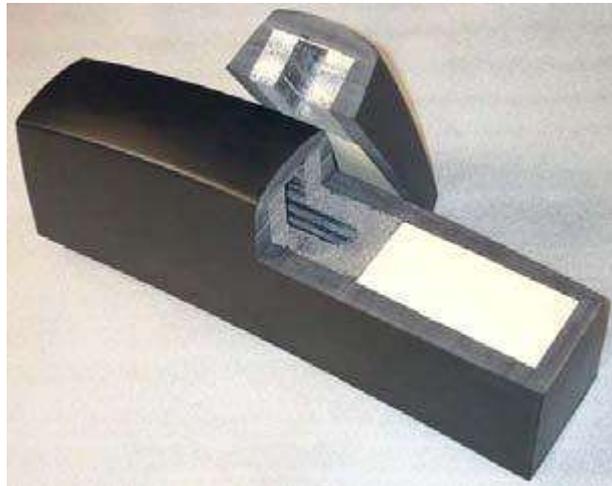


Figura 8-2. Amortiguador de energía de impacto fabricado con espuma metálica
Fuente: (Irausquín Castro, 2012)

2.2.7.5. *Construcción naval*

Las espumas de aluminio de celda cerrada son más ligeras que el agua, debido a que las burbujas de aire que contienen reducen su densidad y, por ende, les permiten flotar, lo que es muy ventajoso para la fabricación de barcos. Más ventajosas aún se hacen al tener en cuenta que no se corroen, no se ven afectadas por inmersiones prolongadas y mantienen la flotabilidad incluso después de haberse dañado. Algunas aplicaciones incluyen elevadores, plataformas, mamparos estructurales, plataformas para antenas y casilleros.

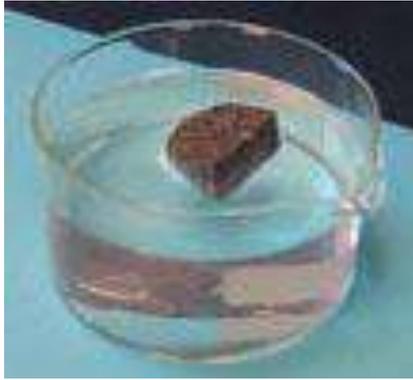


Figura 9-2. Trozo de espuma metálica de celda cerrada flotando en agua ($\rho = 0.2$)
Fuente: (Irausquín Castro, 2012)

2.2.7.6. Estructuras livianas

Sus excelentes relaciones resistencia/ peso y rigidez/ peso las hacen atractivas para la construcción de cualquier estructura liviana. Particularmente los paneles sándwich con núcleo de espuma metálica tienen potencial para ser usados en fuselajes de aviones, vehículos espaciales y embarcaciones.

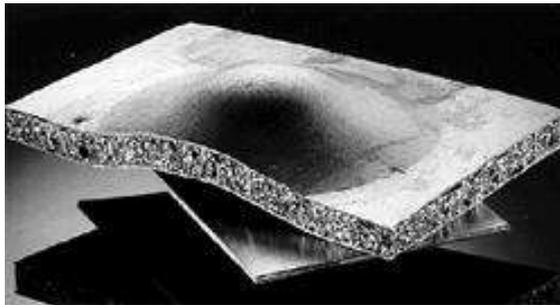


Figura 10-2. Placa sándwich de acero con núcleo de espuma metálica
Fuente: (Irausquín Castro, 2012)

Existen varias aplicaciones como protección acústica y de ruido, protección contra fuego, amortiguamiento mecánico y control de vibraciones, industria aeroespacial, intercambiadores de calor, etc.

2.2.8. *Propiedades mecánicas*

2.2.9. *Conceptos de esfuerzo y deformación*

Si una carga es estática o bien cambia de forma relativamente lenta con el tiempo y es aplicada uniformemente sobre una sección o superficie de una pieza, el comportamiento mecánico puede ser estimado mediante un simple ensayo esfuerzo-deformación. Con metales, este ensayo se realiza normalmente a temperatura ambiente. Existen tres principales maneras de aplicar la carga, a saber: tracción, compresión y cizalladura (Callister, 1995).

2.2.9.1. Ensayos de compresión

Los ensayos de compresión-deformación se realizan si las fuerzas que operan en servicio son de este tipo. Un ensayo de compresión se realiza de forma similar a un ensayo de tracción, excepto que la fuerza es compresiva y la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza (Callister, 1995). Las siguientes ecuaciones se utilizan para calcular el esfuerzo de compresión y la deformación:

Compresión nominal:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ecuación 1-2})$$

Donde F es la carga aplicada de manera perpendicular instantáneamente y A_0 es el área de la sección original antes de aplicar la carga.

Deformación nominal:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Ecuación 2-2})$$

En donde l_0 es la longitud original antes de aplicar la carga y l_i es la longitud instantánea. La deformación es adimensional.

De las ecuaciones anteriores, la compresión y la deformación se consideran negativas.

2.2.9.2. Ensayo de compresión uniaxial

Para la mayoría de los metales, la relación entre la compresión y la deformación se define por:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Ecuación 3-2})$$

Esta relación se denomina Ley de Hooke, y la constante de proporcionalidad es E, conocido como módulo de elasticidad (Callister, 1995).

En una prueba de compresión uniaxial típica, los dos extremos superior e inferior de la muestra, están en contacto con las placas de carga, y los lados en cambio están libres. Las paredes de poros ubicados en las caras laterales de la muestra, son obviamente menos limitadas que las de la mayoría de la muestra y contribuyen menos a la rigidez y resistencia. 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 (Abarca Pérez, 2017).

Para el ensayo cuasiestático de compresión uniaxial de espumas metálicas es recomendable emplear probetas cilíndricas o prismáticas, con una relación longitud-anchura superior a 1.5 y un tamaño relativo (L/d) mayor o igual a 7 (Irausquín Castro, 2012).

2.2.9.3. Ensayo de impacto

Cuando se somete al material a un golpe súbito e intenso, en el cual la velocidad de aplicación del esfuerzo es extremadamente grande, el material tiene un comportamiento más frágil comparado con el que se observa en el ensayo de tensión. El ensayo de impacto a menudo se utiliza para evaluar la fragilidad del material bajo estas condiciones. Se han diseñado muchos procedimientos, incluyendo en el ensayo Charpy y el ensayo Izod. Este último generalmente se utiliza para materiales no metálicos. La probeta puede o no tener muesca: la que tiene muesca en V mide mejor la resistencia del material a la propagación de grietas.

Durante un ensayo, un péndulo pesado, que inicia su movimiento desde una altura h_0 , describe un arco y posteriormente golpea y rompe la probeta; llega a una altura final h_1 menor. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo, se pueden calcular la diferencia en su energía potencial. Esta diferencia es la energía de impacto absorbida durante la falla o ruptura de la probeta. En el caso del ensayo Charpy, la energía por lo general se expresa en libra-pie (lb.pie) o en Joules donde $1 \text{ lb.pie} = 1.356 \text{ J}$. los resultados del ensayo Izod se expresan en lb.pie/plg o J/m. la capacidad de un material para resistir cargas de impacto, a menudo se conoce como tenacidad (Askelnad, 1998).

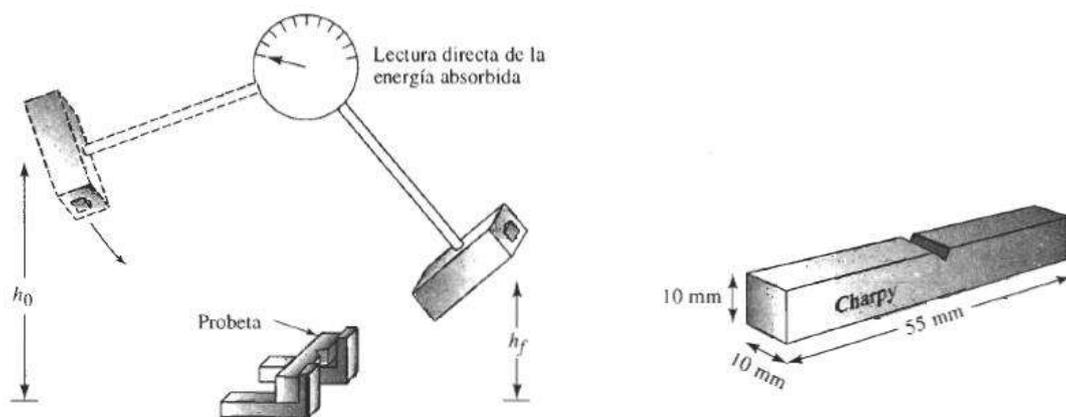


Figura 11-2. Ensayo de impacto Charpy
Fuente: (Askelnad, 1998)

Adicionalmente, en el ensayo de impacto se pueden obtener características como la relación que existe con el diagrama de esfuerzo deformación, en donde la energía necesaria para romper un material está directamente relacionada con el área bajo la curva esfuerzo real-deformación. Entonces, los materiales que tienen alta resistencia y ductilidad tienen buena tenacidad. En contraste a eso, los cerámicos y otros materiales compuestos poseen una tenacidad baja, aun teniendo una alta resistencia, pero sin ductilidad.

2.2.9.4. Ensayo de compresión dinámica

Los ensayos conducentes a la determinación de las propiedades dinámicas de los materiales son generalmente complejos debido a la aparición de fuerzas de inercia y a la propagación de las ondas de impacto que indudablemente afectan la respuesta mecánica.

Pequeñas variaciones en la velocidad de ejecución de los ensayos, implican cambios importantes en la tecnología de los equipos necesarios para llevarlos a cabo, no existiendo una única técnica que permita abarcar todo el rango de velocidades de deformación posibles (Irausquín Castro, 2012)

La determinación de las características de absorción de energía de una pieza/sistema que se somete a una fuerza de aplastamiento es muy crucial para la disipación de la energía de los choques, como los estudios de diseño de vehículos resistentes a choques. Por esta razón, se desarrollaron varias técnicas de prueba con diferentes principios. En la literatura, la prueba del péndulo de choque se utiliza principalmente para medir la respuesta de los elementos laminados. Las instalaciones de torre de caída son adecuadas para pruebas de choque axiales y fuera del eje para geometrías tubulares (Ucar & Cengiz, 2010).

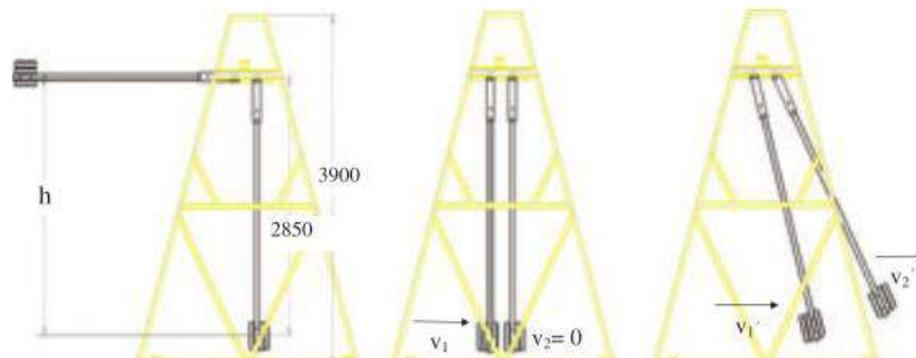


Figura 12-2. Vista esquemática de la prueba de impacto tipo péndulo de doble brazo
Fuente: (Ucar & Cengiz, 2010)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación será experimental y bibliográfica, ya que se pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula a través de la experimentación con la ayuda de bibliografía de referencia como punto de partida para la aplicación de conceptos en la práctica. Los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

3.2. Métodos de investigación

A continuación, se establece la modalidad de investigación que va a ser utilizada en el desarrollo del presente proyecto:

Tabla 1-3. Metodología de la investigación

MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN	DE	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN
Investigación bibliográfica		Estudio del método y proceso de obtención de espumas metálicas de aluminio.	Bibliografía, manual y protocolos de procedimientos
		Selección del método y proceso más viable para la obtención de probetas de espumas metálicas de aluminio.	Bibliografía, manual y protocolos de procedimientos
		Selección los elementos del equipo para la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante el método y proceso seleccionado.	Bibliografía, manual y protocolos de procedimientos
Investigación experimental		Obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta con dos rangos diferentes de tamaño de poro mediante el método seleccionado para su caracterización mecánica.	Experimentación con equipos, moldes y material
		Análisis de los datos de caracterización mecánica y estructural mediante estudio estadístico para la determinación de la influencia sobre las propiedades mecánicas.	Estudio estadístico de datos obtenidos en equipos de ensayos destructivos
		Generación de instrucciones y procedimientos.	Protocolo de obtención generado

Fuente: (Sarzoza Pablo 2021)

3.3. Enfoque de la investigación

El enfoque de investigación será cuantitativo, ya que se realizará la experimentación de un determinado tamaño de grano de la preforma por el método de infiltración para controlar su porosidad y posteriormente medir sus propiedades mecánicas de resistencia. Se tendrán dos grupos de estudio, el primero de 3mm y el segundo de 5mm de diámetro. Para la determinación del procedimiento adecuado de obtención, se buscará la manera óptima de ejecución del proceso

para obtener probetas de buena calidad, tomando en cuenta el enfoque cualitativo para este apartado.

3.4. Alcance de la investigación

El presente proyecto tiene un alcance desde la investigación bibliográfica de estudios anteriores, hasta la determinación de un protocolo para la sintetización de espumas metálicas de aluminio mediante la experimentación. Esta investigación pretende ampliar el conocimiento de estos materiales, debido a que en el país no existe mucha bibliografía al respecto.

A continuación, se enlista los principales propósitos a cumplir:

- Estudio del método y proceso de obtención de espumas metálicas de aluminio.
- Selección del método y proceso viable para la obtención de probetas de espumas metálicas de aluminio.
- Selección los elementos del equipo para la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante el método y proceso seleccionado.
- Obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta con dos diferentes tamaños de poro mediante el método seleccionado para su caracterización mecánica de compresión estática y absorción de impacto.
- Análisis de los datos de caracterización mecánica y estructural (forma de poro) mediante estudio estadístico para la determinación de la influencia sobre las propiedades mecánicas de compresión estática y absorción de impacto.
- Generación de instrucciones y procedimientos.

3.5. Identificación de variables

3.5.1. *Variable independiente*

La variable independiente es:

- Diámetro de la porosidad de espumas metálicas de celda abierta.

3.5.2. *Variable dependiente*

La variable dependiente es:

- Influencia de la estructura de la porosidad sobre las propiedades mecánicas.

3.6. Operacionalización de variables

Tabla 2-3. Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Definición	Indicador	Técnica	Instrumentos
Diámetro de la porosidad	Independiente	Obtención de la porosidad por un proceso sistematizado	Dimensiones de la porosidad	Protocolo de operación	Manual de procedimiento
Propiedades mecánicas	Dependiente	Caracterización de las propiedades de la espuma metálica	Curva	Ensayos destructivos	Equipos de ensayos
Relación del tamaño de poro	Dependiente	Correspondencia entre el tamaño de poro y los ensayos	Relación entre tamaño y resistencia	Estudio estadístico	Datos obtenidos en los ensayos
Generación de probetas	Dependiente	Probetas para ensayos destructivos	Protocolo del proceso	Fundición de aluminio e infiltración de preformas solubles	Horno, molde y material

Fuente: (Sarzosa Pablo 2021)

3.7. Matriz de consistencia

Tabla 3-3. Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	VARIABLES	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente Estructura de la porosidad	Dimensiones de la porosidad	Protocolo de operación	Manual de procedimiento
Investigación limitada sobre la influencia de la estructura de la porosidad sobre las propiedades mecánicas de espumas metálicas de aluminio de celda abierta	Analizar la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas.	¿La estructura de la porosidad de espumas metálicas de celda abierta influye sobre sus propiedades mecánicas?				
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente Generación de probetas	Informe de procesos y producto	Fundición de aluminio e infiltración de preformas solubles	Horno, molde y material
Procesos no sistematizados de obtención de espumas metálicas de aluminio	Seleccionar el método y proceso más viable para la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante investigación de varias fuentes bibliográficas.	¿La obtención de espumas metálicas de aluminio pueden ser replicadas mediante un proceso sistematizado?				
	Seleccionar los elementos del equipo para la obtención de espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante el método y proceso seleccionado.	¿La selección adecuada de los elementos del proceso permitirá la obtención de espuma de aluminio?				
Escasa información e investigaciones de espumas metálicas de aluminio en el país.	Obtener espumas metálicas de aluminio de celda abierta con dos rangos diferentes de tamaño de poro mediante el método seleccionado para su caracterización mecánica.	¿Se puede controlar adecuadamente la estructura de la porosidad en espumas metálicas de aluminio de celda abierta mediante un proceso sistematizado?	Variable dependiente Propiedades mecánicas	Datos y Curvas de representación	Ensayos destructivos	Equipos de ensayos
	Analizar los datos de caracterización mecánica y estructural mediante estudio estadístico para la determinación de la influencia sobre las propiedades mecánicas.	¿Existe una correlación entre la estructura de la porosidad y los ensayos realizados en las probetas de espuma metálica de aluminio?	Variable dependiente relación del tamaño de poro y la resistencia	Relación entre tamaño y resistencia	Estudio estadístico	Datos obtenidos en los ensayos

Fuente: (Sarzosa Pablo 2021)

3.8. Método experimental

En el presente proyecto se sintetizan espumas de aluminio de celda abierta mediante el método de infiltración utilizando preformas solubles (óxido de sodio). Esta variante se basa en el método en donde se utilizaba cloruro de sodio como preforma, la cual tiene un punto de fusión de 801°C, en donde se prefirió utilizar la preforma de óxido de sodio con un punto de fusión más elevado, siendo un factor muy importante en la generación de estas espumas. En este método el metal fundido se infiltra entre las preformas solubles, siendo el proceso simple en el cual se puede controlar de manera regular la estructura final de la porosidad. Todo esto se coloca en un molde de fundición que será llevado a un horno de mufla, necesario para poder elevar la temperatura hasta el punto de fusión del aluminio (660°C), empezando la infiltración alrededor de los granos de óxido de sodio. Estos granos al tener un punto de fusión más elevado, no tendrán ningún problema al poder resistir hasta que el aluminio fundido infiltre alrededor de la preforma. Al final, la preforma se disuelve mediante agua, obteniendo una probeta solamente de aluminio con una estructura porosa. Para realizar todo el proceso, adicionalmente al molde de fundición, la preforma y el horno de mufla, se necesitan otros materiales y equipos como un tanque de argón, una bomba de vacío, tuberías de acero inoxidable, válvulas y manómetros, como se muestra esquemáticamente a continuación (Abarca Pérez, 2017).

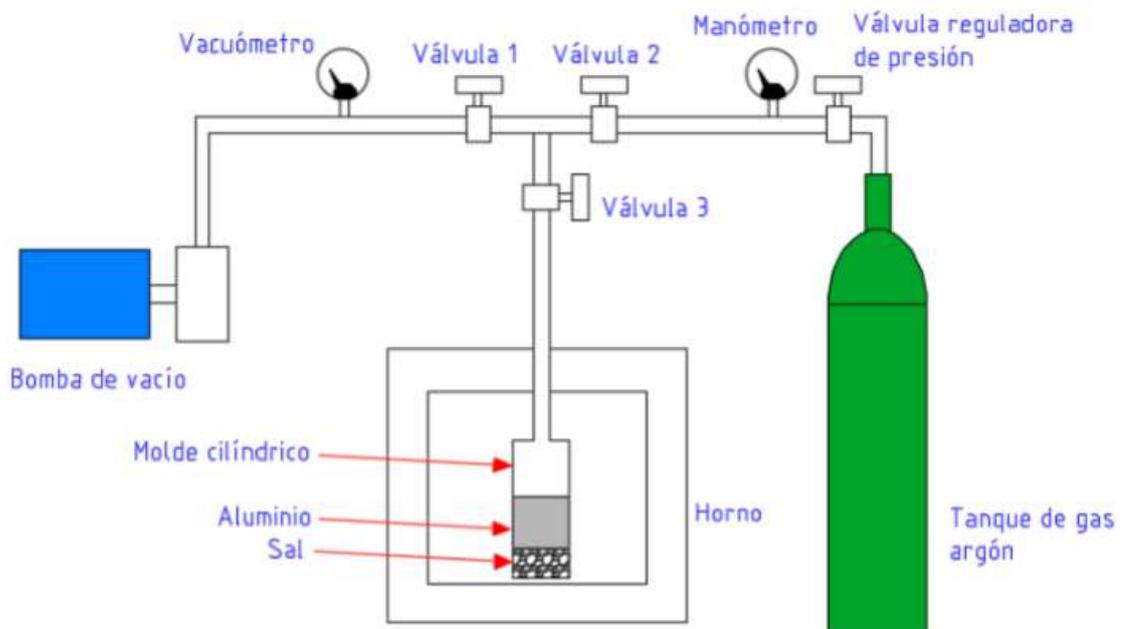


Figura 1-3. Esquema del equipo para obtener espumas metálicas de celda abierta.
Fuente: (Abarca Pérez, 2017)

3.8.1. Materiales y equipos utilizados

Los materiales y equipos utilizados para la obtención de las espumas de aluminio por el método de infiltración a base de preformas de óxido de sodio se detallan a continuación.

3.8.1.1. Aluminio

El metal utilizado para la infiltración es aluminio al 99% de pureza, de 50mm de diámetro y 30mm de longitud, verificando su composición en el espectrómetro con los siguientes resultados:



Figura 2-3. Aluminio 99%
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

Tabla 4-3 Composición del aluminio

Elemento	Porcentaje	Promedio
Si	%	0.218
Fe	%	0.225
Cu	%	0.238
Mn	%	0.0095
Mg	%	0.048
Cr	%	0.0032
Ni	%	0.013
Zn	%	0.024
Ti	%	0.0057
Pb	%	<0,050
Sn	%	0.007
V	%	< 0,0030
Sr	%	0.003
Zr	%	< 0,0020
Cd	%	< 0,0050
Co	%	< 0,0030
B	%	< 0,0010
Ag	%	< 0,0010
Bi	%	< 0,0060
Ca	%	0.030
Al	%	99.14

Fuente: (Sarzoza Pablo,2021)

3.8.1.2. Preforma

La preforma a utilizar es óxido de sodio (Na_2O), en forma de granos esféricos con dimensiones de 3mm y 5mm. Los datos de la preforma y el fabricante son:



Figura 3-3. Preforma de Óxido de Sodio de 3mm.
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)



Figura 4-3. Preforma de Óxido de Sodio de 5mm.
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

Tabla 5-3. Características de la preforma

Fórmula	Na_2O
Peso molecular	61.97
Apariencia	Yellow Crystalline Solid
Punto de fusión	1,132° C (2,070° F)
Punto de ebullición	1,950° C (3,542° F)
Densidad	2.27 g/cm ³
Solubilidad in H ₂ O	N/A
Masa molar	61.974453 g/mol

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

3.8.1.3. Horno eléctrico de mufla

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 (Abarca Pérez, 2017).



Figura 5-3. Horno eléctrico de mufla modelo 4-9 Samothermal.
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

Tabla 6-3. Características del horno

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
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

Fuente: (Abarca Pérez, 2017)

3.8.1.4. Bomba de vacío

Dentro del método experimental se requiere que dentro del molde se genere un vacío, para permitir la infiltración adecuada del metal fundido entre los granos de óxido de sodio. Para el efecto se usa una bomba de alto vacío, que también se utiliza para verificar el sellado del molde de fundición (Abarca Pérez, 2017).

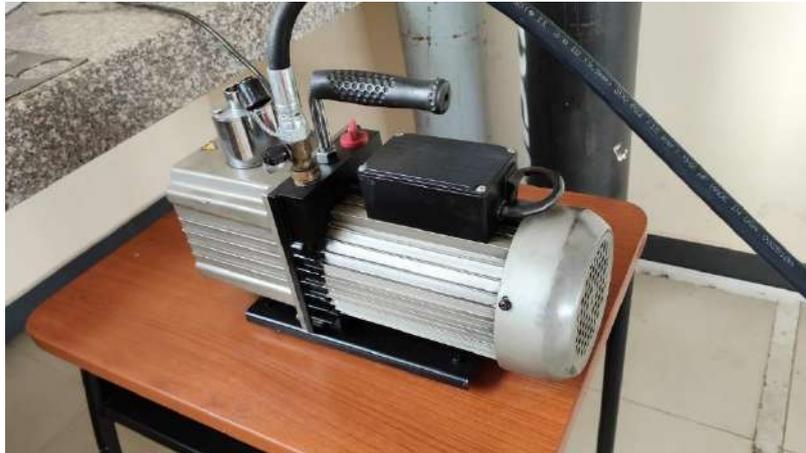


Figura 6-3. Bomba de vacío QUALITY Model QVP 800.
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

3.8.1.5. Tanque de gas argón

Para que la infiltración dentro del método experimental funcione, se debe agregar gas argón para generar una presión positiva dentro del molde de fundición y de este modo el metal fundido pase a ocupar el espacio entre los granos de óxido de sodio. Por experimentación, se utilizó una presión de 4 bares para que el aluminio fundido infiltre dentro de la preforma.



Figura 7-3. Tanque de gas argón
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

3.8.1.6. Sistema de válvulas

Para generar el vacío mediante la bomba y también para introducir el gas argón dentro del molde de fundición se necesita un sistema de válvulas para la apertura y cierre del paso de cada proceso. La válvula 1 va conectada a la bomba de vacío, la válvula 2 va conectada directamente a la entrada del molde entre la válvula 1 y válvula 3, y la válvula 3 va conectada al tanque de gas argón.

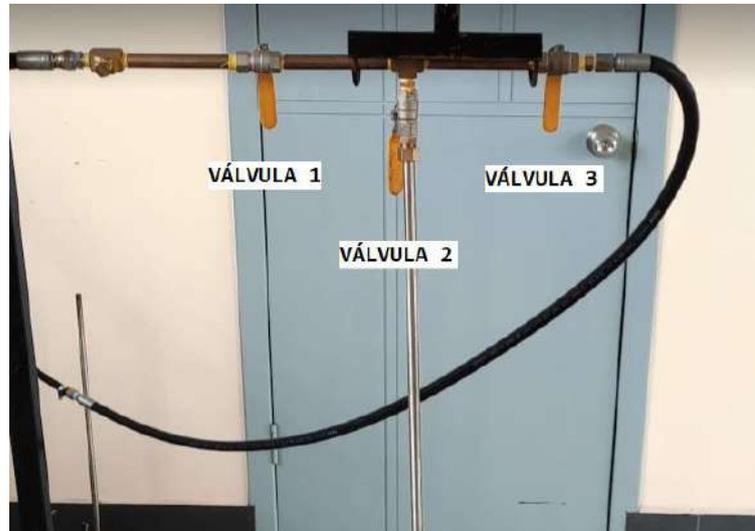


Figura 8-3. Sistema de válvulas
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

3.8.1.7. Láminas de grafito

Las láminas de grafito mantienen el molde de fundición sellado y hermético, siendo su característica principal conjuntamente con su capacidad de soportar elevadas temperaturas, resistente a la corrosión y apto para presiones de vacío.



Figura 9-3. Láminas de grafito como sellante del molde.
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

3.8.1.8. Molde de fundición

Para la generación de la espuma de aluminio de celda abierta se necesita un molde que contenga la preforma y el aluminio, con la principal característica de poder contener de manera hermética los elementos durante la fundición e infiltración del metal. Para este efecto se establece un molde fabricado en acero inoxidable AISI 304, cuyas propiedades cumplen con la misión para este proceso.



Figura 10-3. Molde de fundición de acero inoxidable.
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

3.8.1.9. Pirómetro

En este método experimental utiliza un horno de mufla a temperaturas de hasta 700°C, considerando que la termocupla del horno mide la temperatura dentro del mismo, sin embargo, esa temperatura no es igual a la del molde de fundición. Para poder controlar la temperatura interna del molde, se utilizará el pirómetro para medir esa temperatura, tratando de iterar la temperatura alcanzada por el horno y el molde para lograr una infiltración adecuada del metal entre los espacios de los granos del óxido de sodio.



Figura 11-3. Pirómetro para la medición de la temperatura del molde.
Fuente: (Sarzosa Pablo, 2021)

3.8.2. *Protocolo experimental*

En este método experimental se deben considerar las siguientes etapas:

- Preparación de la preforma y molde
- Pre calentamiento del horno
- Infiltración
- Solidificación
- Maquinado
- Lixiviación
- Espuma metálica

3.8.2.1. *Preparación de la preforma y molde*

Para la preparación de la preforma dentro del molde se coloca una lámina de grafito en la base del molde, con el objetivo de sellar la parte inferior. Posteriormente, se colocan los granos de óxido de sodio dentro del molde de fundición a una altura de 3 a 4 centímetros, verificando que la preforma quede uniformemente distribuida.



Figura 12-3. Colocación de la lámina de grafito en la base del molde
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

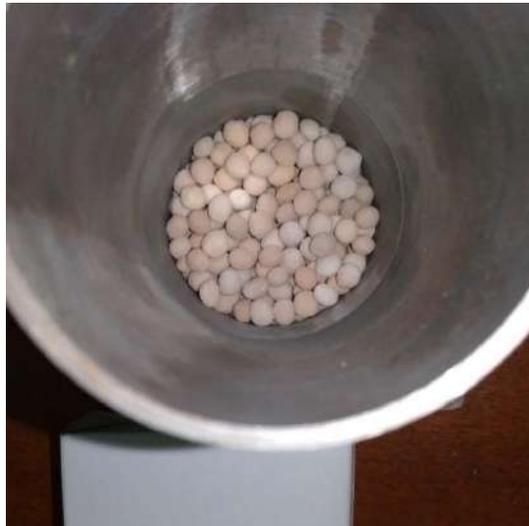


Figura 13-3. Preparación de la preforma en el molde
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

Luego se coloca el cilindro de aluminio encima de la preforma, de manera que quede nivelado en la parte superior. En la tapa del molde, se coloca una lámina de grafito con el objetivo de obtener un sellado completo. La tapa se coloca en la parte superior del molde, ajustando los 4 pernos para el efecto lo suficientemente apretado para que no existan fugas durante la infiltración. Se utiliza la bomba de vacío para verificar que exista un sellado adecuado en el sistema.



Figura 14-3. Colocación del aluminio en el molde
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)



Figura 15-3. Colocación de la lámina de grafito en la tapa del molde
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)



Figura 16-3. Colocación del aluminio y sellado del molde.
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

3.8.2.2. Pre calentamiento del horno

Se coloca el molde dentro del horno de mufla con el sistema de válvulas conectada, manteniendo abiertas la válvula 1 y válvula 3 para que mientras el horno se precalienta hasta los 400°C, el óxido de sodio pueda perder humedad.

Posterior a alcanzar esa temperatura, se realiza el cierre de las válvulas anteriormente abiertas para continuar con el proceso.



Figura 17-3. Pre calentamiento del horno
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

3.8.2.3. Infiltración

Para esta etapa, después del pre calentamiento del horno se calibra la velocidad de calentamiento a 10°C/min, colocando también una temperatura constante cuando alcance los 780°C durante 1 hora. Posterior a eso, se realiza la infiltración abriendo la válvula 3 que está conectada al tanque de gas argón, e inmediatamente se abre la válvula 2 que va directamente al molde de fundición durante unos 30 segundos.

3.8.2.4. Solidificación

Se debe extraer el molde del horno de mufla desconectando el sistema de válvulas, para realizar un enfriamiento del sistema. Generalmente ese enfriamiento tarda unos 30 minutos a temperatura ambiente para que el molde pueda ser manipulado y la probeta pueda ser extraída del molde.



Figura 18-3. Extracción del molde
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)



Figura 19-3. Enfriamiento del molde
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)



Figura 20-3. Extracción de la espuma de aluminio
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

3.8.2.5. Maquinado

Para esta etapa, la probeta extraída del molde debe cortarse para poder obtener un cilindro uniforme de un diámetro de 55mm de diámetro y 35mm de longitud.



Figura 21-3. Probeta extraída y maquinada.
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

3.8.2.6. Lixiviación y espuma metálica

La probeta extraída en la etapa anterior aun contiene la preforma soluble, por lo tanto, deberá colocarse en un recipiente de agua y calentarlo para que el óxido de sodio pueda disolverse y obtener la probeta de espuma de aluminio de celda abierta.



Figura 22-3. Espumas de aluminio de celda abierta de 3mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)



Figura 23-3. Espumas de aluminio de celda abierta de 5mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de obtener las probetas de espumas de aluminio de celda abierta, se procede a realizar el análisis de la forma estructural del poro, el ensayo de compresión y el ensayo dinámico de compresión para determinar las características del material. Las espumas de aluminio obtenidas fueron de 3mm y 5mm de diámetro, en un total de 4 probetas de cada medida. Posteriormente se determina el módulo de elasticidad del material, así como la energía absorbida mediante ensayos de compresión dinámica.

4.1. Densidad relativa

La densidad relativa es una propiedad que permite establecer el tipo de material, siendo un sólido poroso cuando esta cantidad es mayor a 0.3, mientras que si el valor es menor a 0.3 se consideran como sólidos celulares.

La ecuación que permite calcular la densidad relativa es:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (\text{Ecuación 1-4})$$

Donde ρ es la densidad del material celular, y ρ_s es la densidad del material base.

Considerando que la densidad de la espuma obtenida es 1.78g/cm^3 y la densidad del aluminio es 2.7g/cm^3 , reemplazando en la ecuación 1-4 se obtiene:

$$\rho_r = \frac{1.78\text{g} / \text{cm}^3}{2.7\text{g} / \text{cm}^3}$$

$$\rho_r = 0.66$$

Esto quiere decir que el material es un sólido poroso.

4.2. Estructura y tamaño del poro

Para realizar el análisis de la estructura y tamaño del poro se realizó un seccionamiento de manera longitudinal en una probeta de cada tamaño de poro. Para este seccionamiento se debe tener mucho cuidado, ya que, al utilizar herramientas de corte, se debe precautelar que la estructura de la espuma metálica de celda abierta no sufra daños significativos.



Figura 1-4. Probeta seccionada de 3mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)



Figura 2-4. Probeta seccionada de 5mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

Para el análisis morfológico se toma en cuenta las macrografías obtenidas de las probetas de 3mm y 5mm seccionadas con anterioridad, considerando el perímetro medio y su diámetro medio, determinando un promedio de sus mediciones y considerando la desviación estándar de las cantidades.

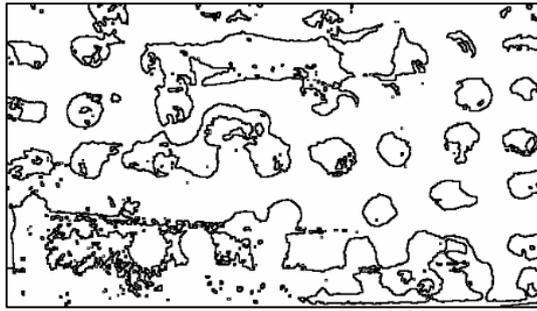


Figura 3-4. Macrografías de probeta de 3mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

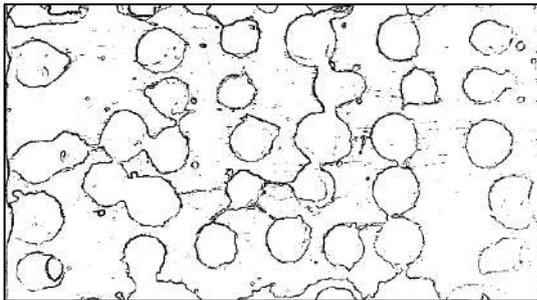


Figura 4-4. Macrografías de probeta de 5mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

Tabla 1-4. Diámetro de las espumas de aluminio

Tamaño	3mm de tamaño de poro		5mm de tamaño de poro	
	Perímetro (mm)	Diámetro (mm)	Perímetro (mm)	Diámetro (mm)
1	9.32	2.93	16.45	5.24
2	10.79	3.39	14.57	4.64
3	10.22	3.21	17.04	5.42
4	8.94	2.81	14.80	4.71
5	9.76	3.07	14.23	4.53
6	9.19	2.89	15.86	5.05
7	10.06	3.16	16.75	5.33
8	8.76	2.75	15.48	4.93
9	9.35	2.94	15.10	4.81
10	10.34	3.25	15.27	4.86
11	9.91	3.11	14.81	4.71
12	10.78	3.39	14.47	4.61
13	9.44	2.96	15.48	4.93
14	9.03	2.84	17.04	5.42
15	9.33	2.93	14.68	4.67
16	10.34	3.25	16.53	5.26
Media	9.723	3.055	15.535	4.945
Desviación estándar	0.646	0.203	0.958	0.304
CV	6.642	6.648	6.168	6.148

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

También se determinó el espesor del ligamento mediante la medición al azar de los poros que están mejor configurados, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2-4. Espesor del ligamento de las espumas de aluminio

Tamaño	3mm de tamaño de poro		5mm de tamaño de poro	
	Esesor axial (mm)	Esesor radial (mm)	Esesor axial (mm)	Esesor radial (mm)
1	3.38	2.49	1.22	4.79
2	2.75	2.06	1.17	3.28
3	2.06	1.42	0.55	2.82
4	1.72	1.42	0.94	4.18
5	2.75	3.12	1.77	4.8
6	1.78	2.13	0.78	3.84
7	3.29	1.96	0.94	3.51
8	2.94	3.64	1.55	4.14
9	2.74	3.29	0.93	5.69
10	3.87	2.94	1.11	4.96
11	2.98	1.78	0.77	6.96
12	2.67	2.48	1.32	5.72
13	2.88	3.02	1.61	5.53
14	1.9	3.46	1.41	6.4
15	2.59	2.58	0.81	3.55
16	3.38	2.96	0.96	4.94
Media	2.73	2.547	1.115	4.694
Desviación estándar	0.615	0.7	0.343	1.168
CV	22.524	27.485	30.803	24.88

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

4.3. Resultados del ensayo de compresión uniaxial

De la realización de los ensayos de compresión uniaxial en la máquina universal se obtuvieron las gráficas de fuerza – deformación, identificando una curva con 3 zonas principales: la zona 1 identifica la región lineal del material con comportamiento elástico, la zona 2 corresponde al límite de cedencia del material en donde comienza el comportamiento plástico, y llegando a la zona 3 se produce un endurecimiento por deformación del material, debido a que esa deformación genera el acomodamiento y densificación de la espuma de aluminio, aumentando su resistencia.

Estas 3 zonas están presentes en ambas probetas, de 3mm y 5mm de diámetro de poro, como se muestra en las gráficas y tablas a continuación:



Figura 5-4. Curva de fuerza – deformación para la probeta de 3mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)



Figura 6-4. Curva de fuerza – deformación para la probeta de 5mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

Tabla 3-4. Resistencia a la compresión de las probetas

Número de ensayo	Fuerza soportada Probeta de 3mm de porosidad	Fuerza soportada Probeta de 5mm de porosidad
1	3063.023	4250.237
2	3175.435	4002.519
3	2920.124	3990.124
Promedio	3052.861	4080.96
Desviación estándar	127.959	146.729
CV	4.191	3.595

Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

En las gráficas anteriores, después de realizar los ensayos se llegó a determinar que la probeta de 3mm de tamaño de poro llegó a soportar hasta 3 toneladas antes de iniciar una falla. Luego en la probeta de 5mm de tamaño de poro, se llegó a determinar una resistencia de 4 toneladas, antes de iniciar una falla debido a su rigidez.

Tomando en cuenta el análisis de la morfología de las espumas de aluminio y los datos del ensayo de compresión en las probetas de espuma de aluminio de celda abierta, considerando que los poros se generan aleatoriamente, se identifica el comportamiento de la resistencia del nuevo material generado con los datos de la siguiente tabla:

Tabla 4-4. Morfología y resistencia de las espumas

Probeta	Poro		Ligamento		Resistencia
	Perímetro promedio (mm)	Diámetro promedio (mm)	Espesor axial promedio (mm)	Espesor radial promedio (mm)	Límite proporcional (kg)
Probeta de 3mm	9.72	3.06	2.73	2.55	3052.861
Probeta de 5mm	15.54	4.94	1.12	4.69	4080.96

Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

De acuerdo a estos resultados se puede identificar que la espuma de aluminio de 3mm de diámetro de poro tiene una morfología uniforme en el espesor del ligamento tanto axial como radial, en comparación de la espuma de aluminio de 5mm de diámetro en donde el espesor del ligamento es menor en sentido axial. La uniformidad de los ligamentos es favorable para poder Por este motivo, aunque esta última espuma tuvo mayor resistencia, se produjo una falla catastrófica por falta de uniformidad.

4.4. Resultados del ensayo de impacto Charpy

Para complementar los resultados de las propiedades mecánicas de las probetas, se realizaron ensayos de impacto Charpy para determinar la cantidad de energía absorbida durante la flexión por impacto de la espuma de aluminio, realizados en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero, con los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 5-4. Energía absorbida mediante ensayo Charpy en probeta de 3mm de poro

Número de ensayo	Energía absorbida
1	1.33
2	1.33
3	1.33
Promedio	1.330
Desviación estándar	0.000
CV	0.000

Fuente: Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero

Tabla 6-4. Energía absorbida mediante ensayo Charpy en probeta de 5mm de poro

Número de ensayo	Energía absorbida
1	4.69
2	4.14
3	4.91
Promedio	4.580
Desviación estándar	0.397
CV	8.660

Fuente: Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero



Figura 7-4. Probetas de 3mm y 5mm de tamaño de poro para ensayo Charpy
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

4.5. Ensayo de compresión dinámica

En el ensayo de compresión dinámica se establece un péndulo de impacto para determinar la cantidad de energía absorbida por las probetas de espumas de aluminio de celda abierta. Se deben considerar los datos como la masa en el extremo del péndulo, la altura inicial y el radio en donde se ubica la masa del péndulo, el ángulo inicial y final del mismo.

Posterior a eso se determinan las ecuaciones necesarias para el cálculo numérico en función de los ángulos iniciales y finales, con la cantidad de masa y la longitud del radio del péndulo de impacto.



Figura 8-4. Péndulo de impacto para ensayo de compresión dinámica
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

El proceso realizado fue mediante el péndulo, soltado a una altura de 30° con respecto a la vertical, para poder determinar el ángulo de rebote del mismo.



Figura 9-4. Colocación del péndulo a 30°
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

Se puede medir la cantidad de energía absorbida por cada probeta, visualizando el ángulo de rebote del péndulo.

Tabla 7-4. Ángulo de rebote mediante ensayo a compresión dinámica

Número de ensayo	Ángulo de rebote β Probeta de 3mm de porosidad	Ángulo de rebote β Probeta de 5mm de porosidad
1	17.745	19.144
2	17.701	19.236
3	17.612	18.891
Promedio	17.686	19.090
Desviación estándar	0.068	0.179
CV	0.383	0.936

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

Posterior a todos los ensayos en las probetas de las espumas de aluminio, se determinó que la probeta de 3mm de tamaño de poro generó un rebote de 17.686 grados, mientras que en la probeta de 5mm de tamaño de poro generó un rebote de 19.090 grados.

Se puede verificar en las probetas ensayadas que la de 3mm de tamaño de poro absorbió más energía que la de 5mm de tamaño de poro por el ángulo de rebote.



a)

b)

Figura 10-4. Rebote del péndulo. a) 3mm de poro. b) 5mm de poro.

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)



Figura 11-4. Probeta ensayada de 3mm de tamaño de poro

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)



Figura 12-4. Probeta ensayada de 5mm de tamaño de poro
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

4.5.1. Cantidad de energía absorbida en el ensayo de compresión dinámica

El péndulo de impacto se utilizó para cuantificar la energía absorbida por las probetas, en el ensayo de compresión dinámica. Aquí se utiliza la ley de la conservación de la energía mecánica, y las consideraciones del péndulo simple, en donde se van a tener 3 escenarios o etapas en el ensayo. El primer escenario es en donde se mide el ángulo inicial del péndulo, para calcular la energía potencial inicial. En el siguiente escenario, antes de que el péndulo impacte a la probeta, se calcula la velocidad antes del choque. Y en el último escenario, después del impacto se puede identificar que el péndulo regresa a una cierta inclinación, indicando cuánta energía absorbió la probeta como la diferencia de la energía inicial y la energía utilizada en el rebote.

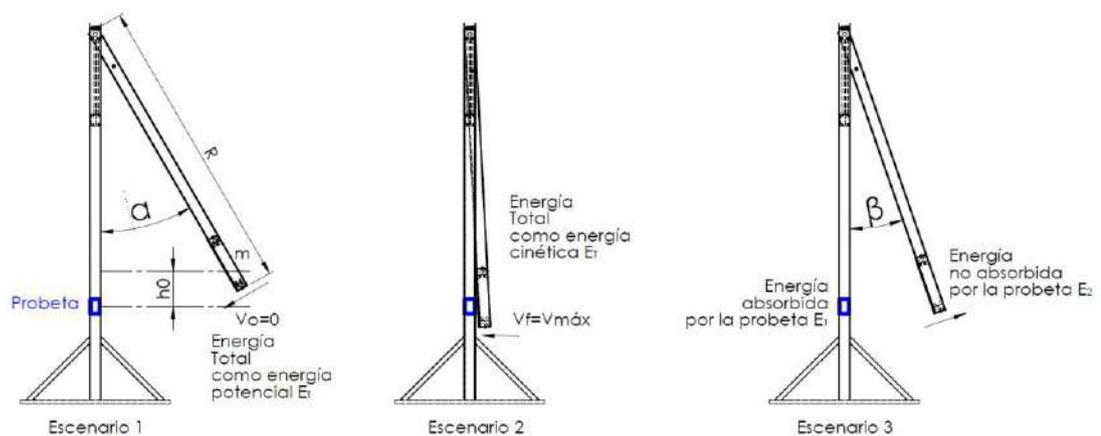


Figura 13-4. Esquema del ensayo con el péndulo de impacto
Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

El cálculo inicia con la ley de la conservación de la energía mecánica:

$$E_{mecánica} = E_{cinética} + E_{potencial}$$

En este caso, en el escenario 1 se identifica que la energía total está solamente representada con la energía potencial, ya que la velocidad inicial es igual a cero:

$$E_T = m g h_0 \quad (\text{Ecuación 2-4})$$

En donde la altura inicial h_0 es la altura de elevación medida desde el centro de la masa m del péndulo con un valor calculado de 375kg.

Mediante identidades trigonométricas se obtiene la ecuación de la energía, en función del ángulo inicial α del ensayo y el radio R del péndulo con un valor de 3.5m, en el escenario 1:

$$E_T = m g R(1 - \cos \alpha) \quad (\text{Ecuación 3-4})$$

Para el cálculo de la energía inicial, que pasa a ser la energía total del ensayo, se puede reemplazar todos los parámetros en la ecuación 3-4:

$$E_T = m g R(1 - \cos \alpha)$$

$$E_T = (375Kg)(9.81m/s^2)(3.5m)(1 - \cos 30^\circ)$$

$$E_T = 1725J \quad (\text{Energía total del péndulo})$$

En el escenario 2, se puede obtener la ecuación de la velocidad justo antes del impacto, para futuras referencias, considerando que la energía potencial del escenario 1, ahora es igual a la energía cinética del péndulo y que al mismo tiempo es la energía total:

$$E_{potencial} = E_{cinética}$$

$$m g R(1 - \cos \alpha) = \frac{1}{2} m v_f^2$$

$$v_f = \sqrt{2 g R(1 - \cos \alpha)} \quad (\text{Velocidad antes del impacto})$$

En el escenario 3, después de haber ocurrido el impacto se puede determinar la cantidad de energía absorbida por la probeta, midiendo el ángulo de inclinación β que el péndulo muestra cuando rebota hasta su altura máxima, iniciando el análisis con la ley de la conservación de la energía:

$$E_T = E_1 + E_2 \quad (\text{Ecuación 4-4})$$

$$E_T = m g R(1 - \cos \alpha) \quad (\text{Ecuación 3-4})$$

$$E_2 = m g R(1 - \cos \beta) \quad (\text{Ecuación 5-4})$$

En la ecuación 4-4 la energía total se separa en la energía E_1 , que es absorbida por la probeta, más la energía potencial E_2 , que es la energía utilizada para que el péndulo rebote hasta la parte superior y también es la energía no absorbida por la probeta. Reemplazando las ecuaciones de la

energía potencial total y no absorbida en función del radio, se despeja la energía absorbida de la probeta y se obtiene su ecuación:

$$E_T = E_1 + E_2$$

$$m g R(1 - \cos \alpha) = E_1 + m g R(1 - \cos \beta)$$

$$E_1 = m g R(1 - \cos \alpha) - m g R(1 - \cos \beta)$$

$$E_1 = m g R(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (\text{Ecuación 6-4})$$

Con la ecuación 6-4 se puede obtener la cantidad de energía absorbida por la probeta, ingresando los ángulos de inclinación inicial y final, α y β , respectivamente. Es así que mediante la aplicación de la ecuación para la energía absorbida se determinaron los siguientes resultados:

Tabla 8-4. Energía absorbida a compresión dinámica

Tamaño	Probeta de 3mm de porosidad		Probeta de 5mm de porosidad	
	Ángulo de rebote β (grados)	Energía absorbida E_1 (J)	Ángulo de rebote β (grados)	Energía absorbida E_1 (J)
1	17.745	1112.415	19.144	1012.950
2	17.701	1115.425	19.236	1006.155
3	17.612	1121.492	18.891	1031.477
Promedio	17.686	1116.444	19.09	1016.861
Desviación estándar	0.068	4.623	0.179	13.106
CV	0.383	0.414	0.936	1.289

Fuente: (Sarzoza Pablo, 2021)

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de compresión dinámica, se puede identificar que mientras más amplitud tenga el rebote luego del impacto, menos cantidad de energía es absorbida por la probeta. Esto se puede comprobar en la tabla 7-4, utilizando la ecuación 6-4 para calcular la cantidad de energía absorbida por cada probeta, en donde la probeta de 3mm de diámetro de poro, absorbe más cantidad de energía que la probeta de 5mm de diámetro de poro.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Introducción

Con los resultados obtenidos en la presente investigación, se establecen las características de las espumas de aluminio, empezando desde la obtención mediante materiales y equipos utilizados, así como los parámetros del proceso experimental y las propiedades mecánicas de compresión cuasiestática, y compresión dinámica. Adicionalmente, las dimensiones de los elementos del molde cilíndrico de fundición donde se colocará la preforma y el aluminio, para obtener el material requerido.

5.2. Parámetros del proceso experimental

Tomando como referencia otros proyectos similares se realizaron varios intentos al tratar de obtener las espumas metálicas, pero los parámetros óptimos de cada proceso se detallan a continuación:

- Preparación de la preforma y molde: Se debe adquirir y seleccionar la preforma con los granos más uniformemente posibles.
- Precalentamiento del horno: a 400°C conjuntamente con el molde para que la preforma pierda la humedad.
- Infiltración: Después de llegar a la temperatura de 780°C se debe mantener esa temperatura constante durante 1 hora. Luego, se debe inyectar gas argón a una presión de 4 bar al sistema durante 30 segundos.
- Solidificación: Después de sacar el molde del horno de mufla, se debe esperar al menos 30 minutos para que pueda ser manipulado.
- Maquinado: Dar una forma homogénea en todas las caras de la probeta obtenida.
- Espuma metálica: la preforma soluble se disuelve con agua caliente, para dejar los espacios vacíos y generar los poros.

5.3. Dimensiones del molde

El molde cilíndrico de fundición, donde se colocará la preforma y el aluminio tendrá las siguientes dimensiones:

Tabla 1-5. Dimensiones del molde

Característica	Dimensión
Diámetro interior del cilindro	55mm
Diámetro exterior del cilindro	61mm
Longitud del cilindro	150mm
Espesor de las tapas del cilindro	12mm
Tornillos de sujeción	M8
Placas de grafito	3mm
Diámetro de tubería de conexión	13mm

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

5.4. Costo de fabricación de la espuma

Se deben considerar varios elementos para la fabricación de espumas metálicas de aluminio de celda abierta, desde el costo de la energía eléctrica hasta el costo de los materiales e insumos utilizados dentro del proceso, detallado a continuación:

El costo del molde de fundición fue de 120 dólares, con una utilización óptima para la fabricación de 50 espumas.

La energía consumida por todos los equipos eléctricos, como el horno y la bomba de vacío suman 4000 vatios, y el tiempo de utilización es de 4 horas, dando un total de 16 kilovatios hora para la fabricación de 1 espuma. Se debe tomar en cuenta también el costo del kilovatio hora con un valor de 10 centavos.

La preforma para la generación de los poros en la espuma tiene un costo de 20 dólares, con una utilización óptima para la fabricación de 5 espumas.

La recarga del gas argón tiene un costo de 79 dólares, para la fabricación de 50 espumas.

El material de aluminio de alta pureza tiene un costo de 10 dólares, con material suficiente para la realización de 5 espumas.

Considerando los datos anteriores, se puede elaborar una tabla en donde se especifican todos los costos de fabricación y se obtiene al final el costo por centímetro cúbico de las espumas de aluminio:

Tabla 2-5. Costo de fabricación de la espuma

Cantidad	Denominación	Costo Total	Costo Unitario
1	Molde de fundición para 50 espumas	\$120.00	\$2.40
16	Kilovatios hora	\$0.10	\$1.60
5	Preformas	\$20.00	\$4.00
1	Recarga de gas argón para 50 espumas	\$79.00	\$1.58
1	Kilogramo de aluminio de alta pureza	\$10.00	\$1.25
		TOTAL	\$10.83

Fuente: (Sarzos Pablo, 2021)

El costo unitario para fabricar una espuma de aluminio que tiene un volumen de 75 centímetros cúbicos es de 10.83 dólares, obteniendo un costo de fabricación por unidad de volumen de 0.14 dólares por cada centímetro cúbico.

5.5. Aplicaciones de la espuma de aluminio de celda abierta

Considerando sus características principales, tienen una elevada resistencia con menor peso, debido a los espacios vacíos en el material, se establecen sus principales usos o aplicaciones:

- Absorción de impacto.
- Absorción acústica y de vibraciones.
- Aislamiento térmico.
- Piezas y partes ligeras.

Actualmente también se utilizan cauchos o plásticos para las aplicaciones anteriormente mencionadas, pero no tienen la característica de poder soportar una carga de compresión estática o impacto dinámico como las espumas de aluminio, por lo que sigue siendo una propuesta innovadora y eficiente al poder reciclar el aluminio de las espumas.

CONCLUSIONES

Las espumas metálicas de aluminio de celda abierta pueden ser obtenidas mediante el proceso descrito en el presente proyecto de investigación, teniendo como referencia tamaños de porosidad de 3mm y 5mm de diámetro, considerando que se debe utilizar aluminio de alta pureza (99% de aluminio) y la preforma soluble de óxido de sodio, sustituyendo así la preforma soluble de sal que tenía la limitante de un menor punto de fusión y la sinterización producida por la humedad, especificada en algunas investigaciones aquí mencionadas.

Se establecieron todos los elementos necesarios para la ejecución del proceso experimental como la preforma soluble, el metal no ferroso (aluminio de alta pureza), el molde de fundición para colocar la preforma y el aluminio, los elementos adicionales como las láminas de grafito que sirven para sellar herméticamente el molde, la bomba de vacío para verificar el sellado del molde, el tanque de gas argón para inducir la infiltración del metal en la preforma soluble y el horno eléctrico de mufla que es el más adecuado para un control más preciso de temperatura.

Un factor muy importante fue el control de la temperatura durante el proceso de precalentamiento e infiltración, esto debido a que el horno eléctrico de mufla tenía la posibilidad de programar una temperatura de precalentamiento y de fundición que se mantenía constante durante el tiempo que se requería. En otros tipos de hornos tendrían las limitaciones de no poder mantener la temperatura constante o de no ser tan eficientes como uno eléctrico.

La estructura de la porosidad es homogénea en la espuma de aluminio de 3mm de diámetro de porosidad, pero en el de 5mm de diámetro de porosidad la estructura no fue homogénea, generando ligamentos delgados en dirección radial de acuerdo al análisis de morfología. En los ensayos de compresión, debido al espesor de los ligamentos, la probeta de 3mm de porosidad con ligamentos homogéneos obtuvo una resistencia de 3 toneladas hasta antes de la falla, mientras que la probeta de 5mm de porosidad con ligamentos no homogéneos obtuvo una resistencia de 4 toneladas. Debido a que el proceso es experimental y se puede mejorar a futuro, ubicando elementos de control más precisos, teniendo en cuenta también la forma del molde, ya que, si tuviera un desahogo de metal en la parte inferior, la infiltración sería mucho más homogénea. También la variación se debe a la densidad y temperatura del proceso, los granos de óxido de sodio tienden a tratar de reubicarse o flotar, lo que hizo que se separaran un poco los poros.

La relación existente entre el tamaño de poro y las propiedades mecánicas de compresión y absorción de impactos se establece mediante la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos, donde la probeta con un tamaño de poro menor tiene una mejor absorción de energía, mientras que la de tamaño mayor, tiende a ser más rígida, por lo que la falla en este último llega a ser similar a la de un material frágil.

RECOMENDACIONES

Dentro del proceso de obtención de espumas metálicas de aluminio se encontraron limitaciones al momento de disolver la preforma, quedando un poco de ese compuesto en las paredes de los poros. Este sería un factor a mejoraren futuras investigaciones.

El proceso de infiltración podría mejorar si se le agrega un rebosadero al molde de fundición, ubicado en la parte inferior, para que el metal fundido pueda desplazarse con facilidad. Se realizó una prueba con un pequeño rebosadero y el resultado fue favorable, aunque no se pudo controlar bien la estructura del poro.

Para la generación de una preforma de óxido de sodio de tamaño uniforme se debería establecer un proceso de encapsulado y compactación de la misma, añadiendo algún aditivo que permita aumentar la densidad y así evitar el problema de flotabilidad al momento de infiltrar el aluminio para obtener poros y ligamentos homogéneos.

La preforma soluble debe guardarse en un recipiente hermético para evitar que absorba humedad y también evitar que genere problemas de sinterización entre los granos del mismo.

En el molde de fundición se recomienda que la pared interna del cilindro tenga una pequeña inclinación con el objetivo de que la espuma tenga una mayor facilidad para salir del molde sin realizar esfuerzo al material que puede generar daños no deseados.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca Pérez, E. P. (2017). *Síntesis de espumas metálicas de aluminio de celda abierta*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Ashby, M., Evans, T., Fleck, N., Hutchinson, J., Wadey, H., & Gibson, L. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*.
- Askelnad, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. México: Thomson Editores.
- Callister, W. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Elizondo Luna, E. M., Barari, F., Woolley, R., & Goodall, R. (2014). Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity. *Journal of Visualized Experiments*.
- Gutiérrez-Vázquez, J. A., & Oñoro, J. (2008). Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. *Revista de metalurgia*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- Irausquín Castro, I. A. (2012). *Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Shakelford, J. (2005). *Introducción a la ingeniería de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Ucar, M., & Cengiz, A. (2010). "Crash Pendulum" Energy Absorption Test System. Kocaeli.
- Vallejo, C., Chicaiza, D., & Sotomayor, O. (2017). Un Nuevo Método para la Fabricación de Espumas Metálicas Aleatorias de Célula Abierta con Regularidad Controlada. *Revista Politécnica*.

ANEXOS

ANEXO A. Informe técnico de los ensayos de compresión e impacto



Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Carrocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
ENSAYO DE IMPACTO CHARPY MATERIALES METÁLICOS
INFORME DE RESULTADOS N°: 050325914520201215-EIM.

DATOS GENERALES

N° de proforma: RM_2020_027.
Empresa/Cliente: Pablo Ernesto Sarzosa Viera.
RUC/C.I.: 0503259145.
Dirección: Latacunga. **Teléfono:** +593995796739.
Correo: spablo8802@gmail.com
Datos del ensayo
Lugar de Ejecución del Ensayo: Laboratorio de Resistencia de Materiales.
Dirección: Ambato/Catiglata. Toronto y Río de Janeiro.
Método de ensayo: No Normalizado.
Tipo de ensayo: Cuantitativo. **Tipo de probeta:** Rectangular.
Energía utilizada (J): 450.
Tipo de muesca: Sin muesca.
Equipo utilizado: Máquina de ensayos Charpy. PIC 450 J.
Modelo: PIC 450/C **Serie:** M152552AR14.
Fecha Inicio de Ensayo: 2020/12/16. **Fecha Finalización de Ensayo:** 2020/12/16.

Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en *probetas de material metálico: Espuma metálica de Aluminio por método de infiltración*. Las probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H. Gobierno Provincial de Tungurahua.

OBJETOS DE ENSAYO

Número de Probetas cuantificadas:

N°	Identificación del grupo	Material	Diámetro de poro	Probetas a Ensayar
1	050325914520201215-EIM 01	Espuma metálica de Aluminio	5 mm.	3
2	050325914520201215-EIM 02	Espuma metálica de Aluminio	3 mm.	3
Total				6

Observaciones: La fabricación de la probeta para la ejecución del ensayo es responsabilidad del cliente.

Nota: Este informe no significa certificación de calidad, no debe ser reproducido total ni parcialmente.

Elaborado por: Ing. Fernando Tibán R. Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Aprobado por: Ing. Jorge Rodas B. MEng. Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

Lugar y fecha de emisión de Informe: Ambato, 17 de diciembre de 2020.

N°. Factura: 001-002-000010006.

Código: RG-RM-041
 Fecha de Elaboración: 28-04-2018
 Fecha de última aprobación: 19-11-2018
 Revisión: 1

INFORME DE ENSAYO DE IMPACTO
CHARPY DE MATERIALES METÁLICOS.

Página 1 de 2



Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Carrocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

Resultados:

N°.	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Sección Transversal de la Probeta			Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/cm ²)	Fractura de probeta	
				Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)			SI	NO
1	050325914520201215-EIM 01-1	21,1	54,9	1,127	0,951	1,072	1,33	1,24	X	
2	050325914520201215-EIM 01-2	21,1	54,9	1,091	0,943	1,029	1,33	1,29	X	
3	050325914520201215-EIM 01-3	21,1	54,9	1,112	1,052	1,170	1,33	1,14	X	
Promedio \bar{x}							1,330	1,224		
Desviación estándar S_{n-1}							0,000	0,079		
Coeficiente de variación CV							0,000	6,486		

N°.	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Sección Transversal de la Probeta			Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/cm ²)	Fractura de probeta	
				Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)			SI	NO
4	050325914520201215-EIM 02-1	22,8	52,1	1,038	1,049	1,089	4,69	4,31	X	
5	050325914520201215-EIM 02-2	22,8	52,1	1,107	0,985	1,090	4,14	3,80	X	
6	050325914520201215-EIM 02-3	22,8	52,1	1,221	0,964	1,177	4,91	4,17	X	
Promedio \bar{x}							4,580	4,092		
Desviación estándar S_{n-1}							0,397	0,264		
Coeficiente de variación CV							8,660	6,461		

Observaciones: Ninguna



RECEPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Informe N°: 050325914520201215-EIM.	
DATOS DEL CLIENTE	
Empresa/Cliente: Pablo Ernesto Sarzosa Viera.	
Dirección: Latacunga.	
Núm. de cédula/RUC: 0503259145.	Teléfono: +593995796739.
E-mail: spablo8802@gmail.com	

DATOS INFORMATIVOS
Laboratorio: Resistencia de Materiales.
Designación del material: Material metálico: Espuma metálica de Aluminio por método de infiltración.
Método de ensayo: No Normalizado.

Número de Probetas cuantificadas

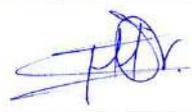
N°	Identificación del grupo	Material	Diámetro de poro	Probetas a Ensayar
1	050325914520201215-EIM 01	Espuma metálica de Aluminio	5 mm.	3
2	050325914520201215-EIM 02	Espuma metálica de Aluminio	3 mm.	3
Total				6

Nota: La fabricación de las probetas en tipo, cantidad y configuración es declarada por el cliente.

ENSAYO SOLICITADO			
No.	No. DE PROBETA	DESCRIPCIÓN	FECHAS RECEPCIÓN
1	050325914520201215-EIM 01-1	Cumple criterios dimensionales	2020/12/15
2	050325914520201215-EIM 01-2	Cumple criterios dimensionales	2020/12/15
3	050325914520201215-EIM 01-3	Cumple criterios dimensionales	2020/12/15
4	050325914520201215-EIM 02-1	Cumple criterios dimensionales	2020/12/15
5	050325914520201215-EIM 02-2	Cumple criterios dimensionales	2020/12/15
6	050325914520201215-EIM 02-3	Cumple criterios dimensionales	2020/12/15

NOTA: LA INFORMACIÓN CONSIGNADA EN ESTE FORMULARIO ES DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL CLIENTE. POSTERIORMENTE A LA EJECUCIÓN DEL(LOS) ENSAYO(S) NO SE ADMITIRÁ ARREGLOS DE ESTA INFORMACIÓN NI DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. FAVOR REVISAR ANTES DE SU FIRMA.

DATOS INFORMATIVOS: De acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo las probetas cumplen con el número mínimo de muestras para el ensayo y en las dimensiones.

	
Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Fernando Tibán R. Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Ing. Jorge Rodas B. MEng. Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC
	
Cliente	



Centro de Fomento Productivo
Metalmecánico Carrasco



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

HOJA DE ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

Informe N°: 050325914520201215-EIM.

DATOS DEL CLIENTE

Empresa / Cliente: Pablo Ernesto Sarzosa Viera.

Dirección: Latacunga.

Núm. de cédula / RUC: 0503259145.

E-mail: spablo8802@gmail.com **Teléfono:** +593995796739.

DATOS INFORMATIVOS

Laboratorio: Resistencia de Materiales.

Designación del material:

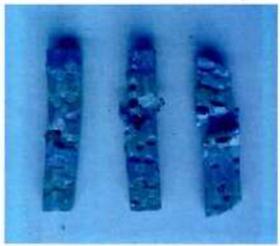
Material metálico: Espuma metálica de Aluminio por método de infiltración.

Método de ensayo: No Normalizado.

N°	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	FECHA INGRESO	FECHA ELIMINACIÓN	RESPONSABLE	OBSERVACIONES	EVIDENCIAS
1	050325914520201215-EIM 01-1	2020/12/15	2020/12/17	Cliente	Se entrega al cliente	
2	050325914520201215-EIM 01-2	2020/12/15	2020/12/17	Cliente	Se entrega al cliente	
3	050325914520201215-EIM 01-3	2020/12/15	2020/12/17	Cliente	Se entrega al cliente	

Código: RG-RM-003
Fecha de Elaboración: 06-07-2016
Fecha de última aprobación: 17-01-2017
Revisión: 3

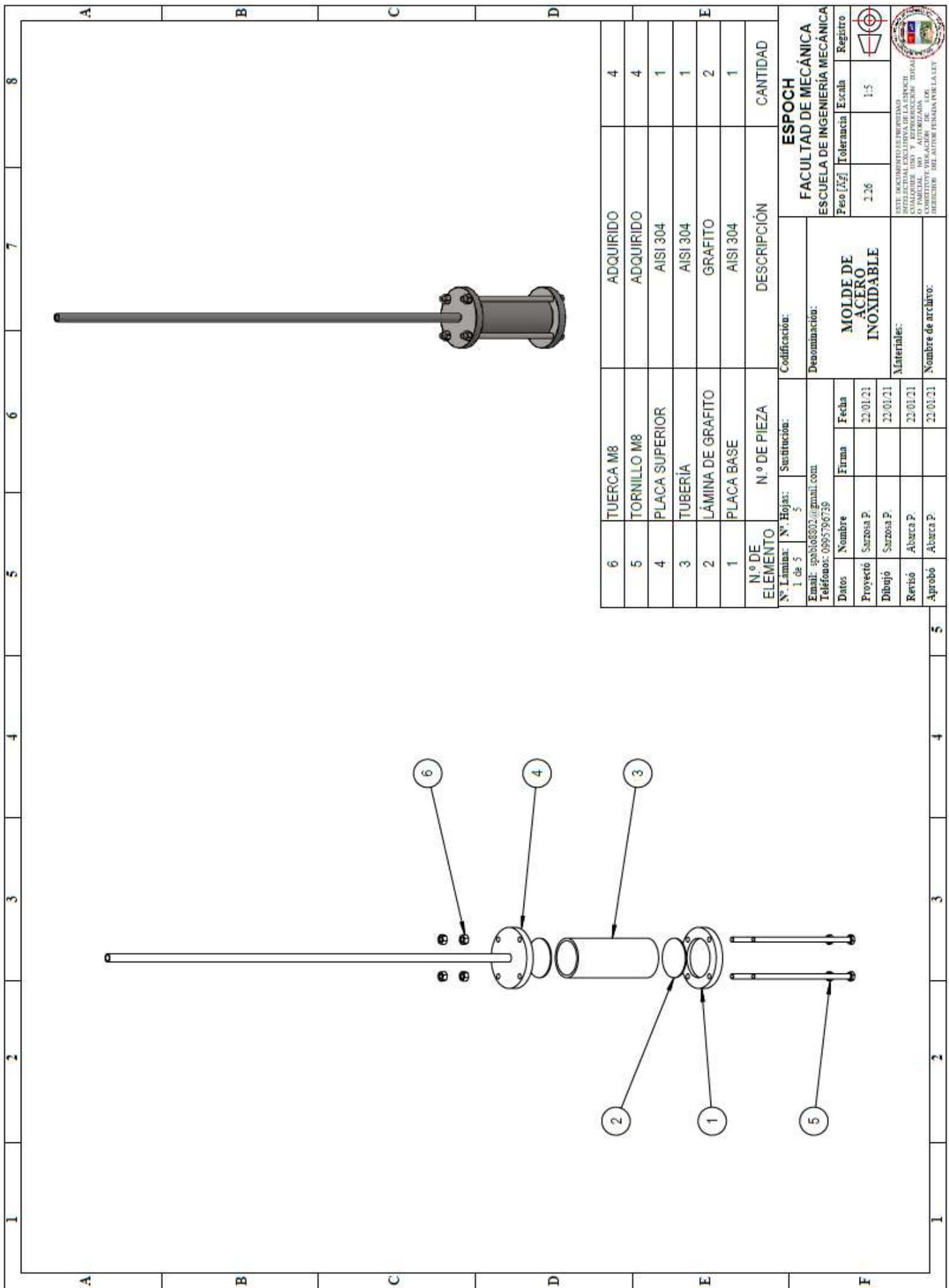
HOJA DE ALMACENAMIENTO
DE MUESTRAS

N°	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	FECHA INGRESO	FECHA ELIMINACIÓN	RESPONSABLE	OBSERVACIONES	EVIDENCIAS
4	050325914520201215-EIM 02-1	2020/12/15	2020/12/17	Cliente	Se entrega al cliente	
5	050325914520201215-EIM 02-2	2020/12/15	2020/12/17	Cliente	Se entrega al cliente	
6	050325914520201215-EIM 02-3	2020/12/15	2020/12/17	Cliente	Se entrega al cliente	

Todas las muestras de los grupos ensayados por acuerdo se entregan al cliente, el CFPMC no se responsabiliza por el mantenimiento y almacenamiento de las mismas, quedando a responsabilidad del cliente su resguardo.

	
Elaborado por: Ing. Fernando Tibán R. Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Aprobado por: Ing. Jorge Rodas B. MEng. Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC
Cliente	

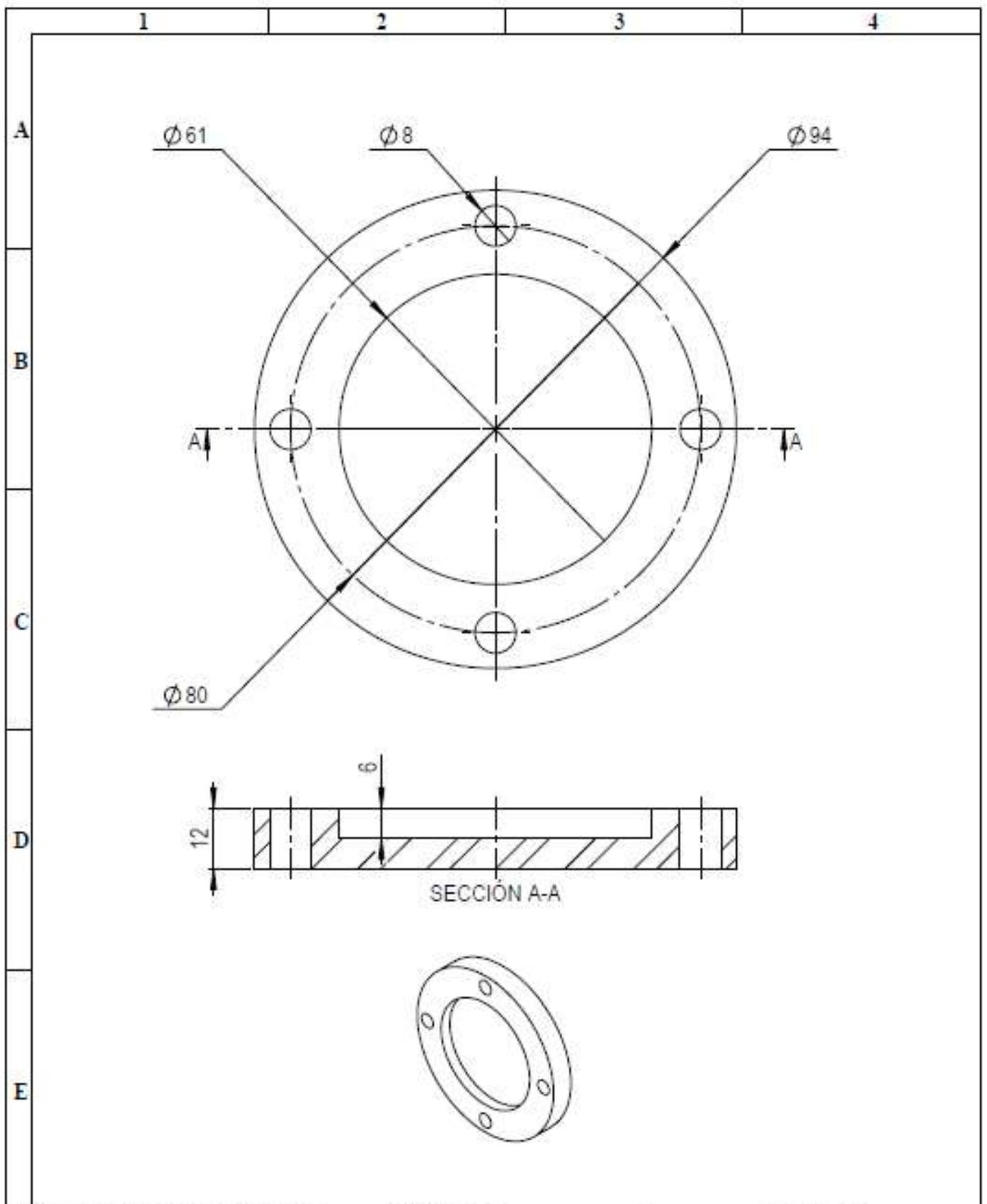
ANEXO B. Planos constructivos del molde de fundición de espumas



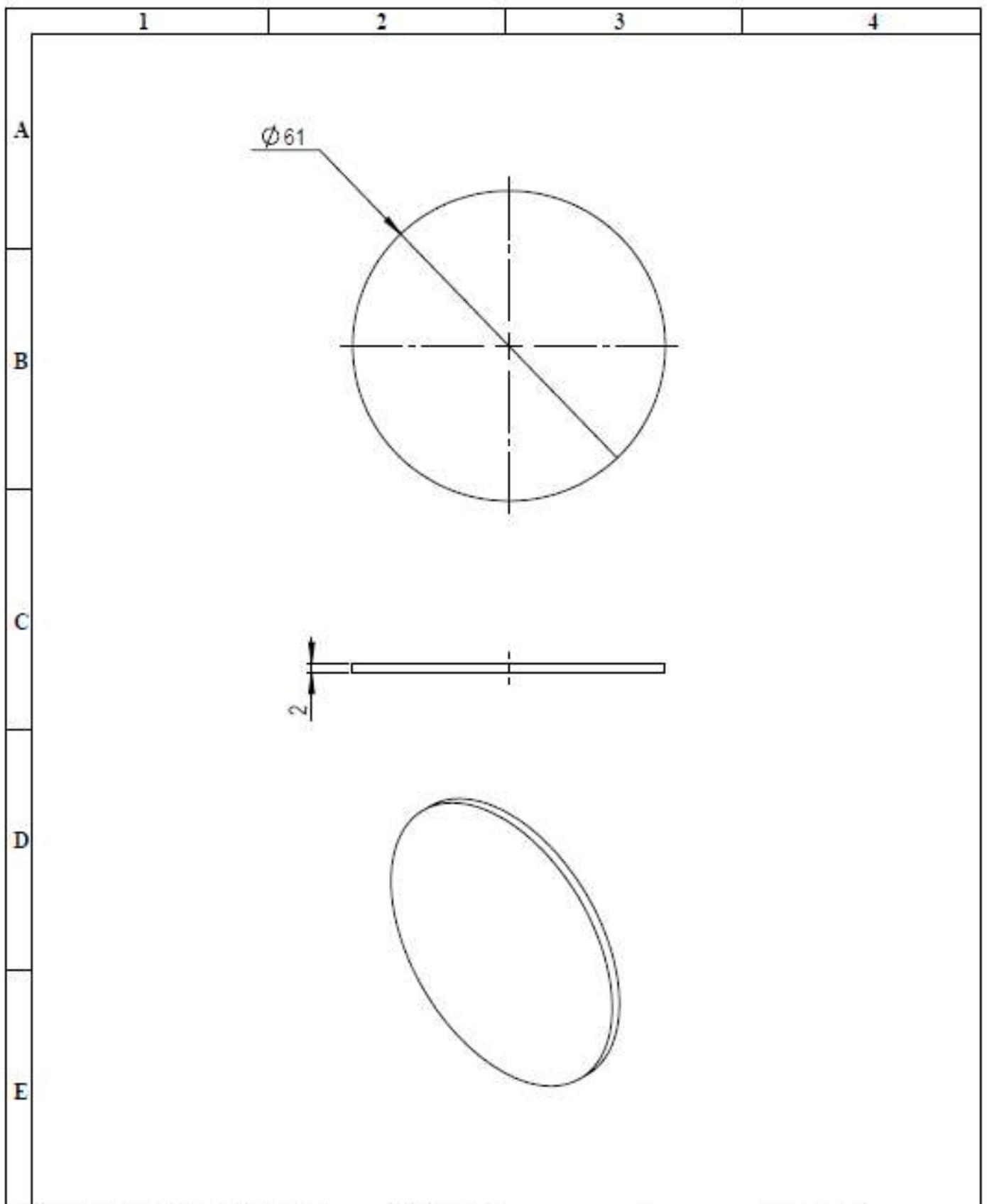
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
6	TUERCA M8	ADQUIRIDO	4
5	TORNILLO M8	ADQUIRIDO	4
4	PLACA SUPERIOR	AISI 304	1
3	TUBERÍA	AISI 304	1
2	LÁMINA DE GRAFITO	GRAFITO	2
1	PLACA BASE	AISI 304	1

N.º de Lámina: 1 de 5		N.º de Hojas: 5		Sustitución:	
Email: spablo6802@gmail.com					
Teléfonos: 0995796739					
Codificación:		Denominación:			
Materiales:		MOLDE DE ACERO INOXIDABLE			
Nombre:		Firma:			
Proyecto:		Sarzoza P.		Fecha: 22/01/21	
Dibujo:		Sarzoza P.		Fecha: 22/01/21	
Revisó:		Abarca P.		Fecha: 22/01/21	
Aprobó:		Abarca P.		Fecha: 22/01/21	

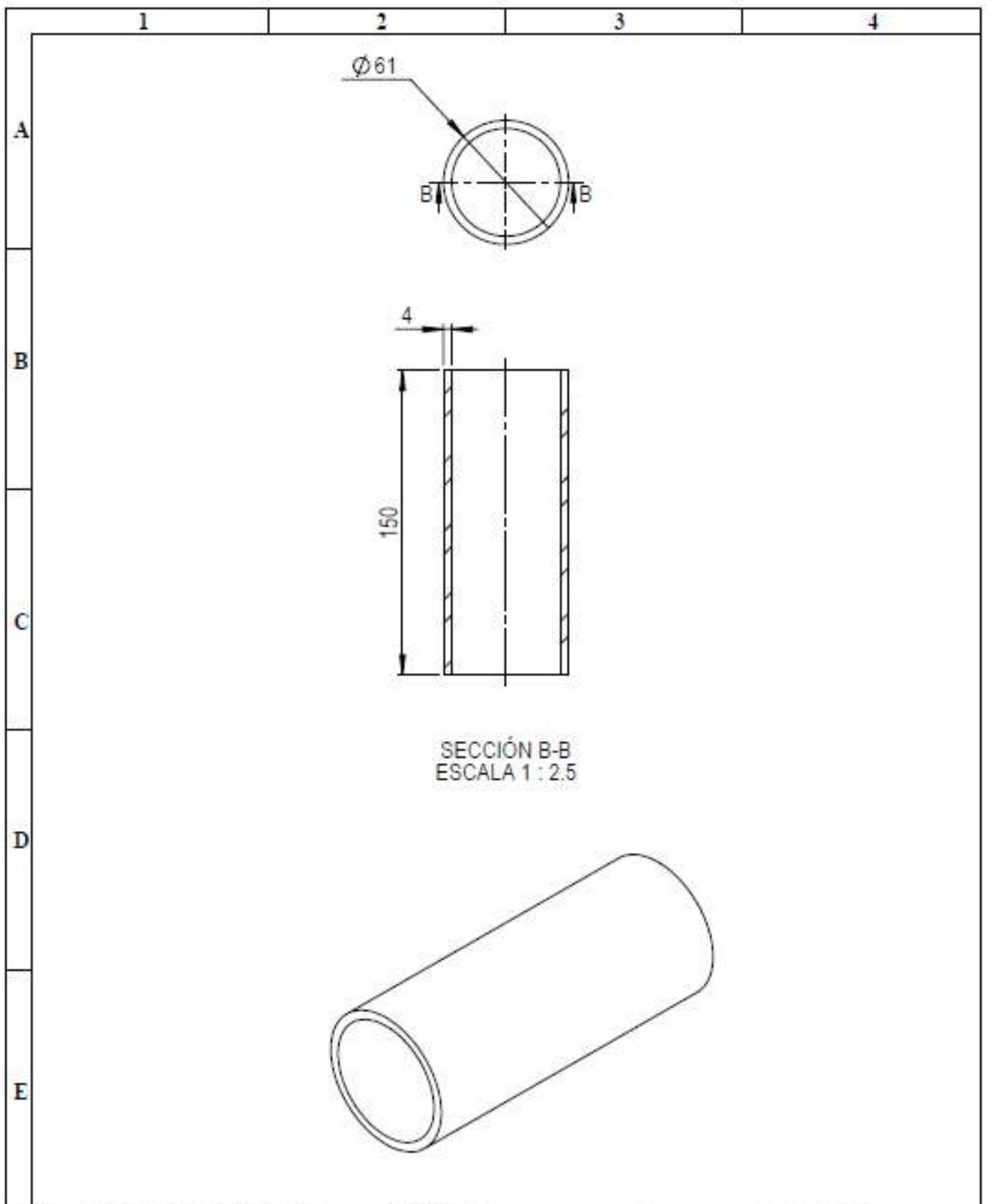
ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Peso [kg] 1.26 Escala 1:5 Registro	
<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD EXCLUSIVA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA O PARCIALMENTE AUTORIZADA. COMITÉ DE VIGILACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PROGRAMAR Y ALEJY</small>			

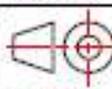


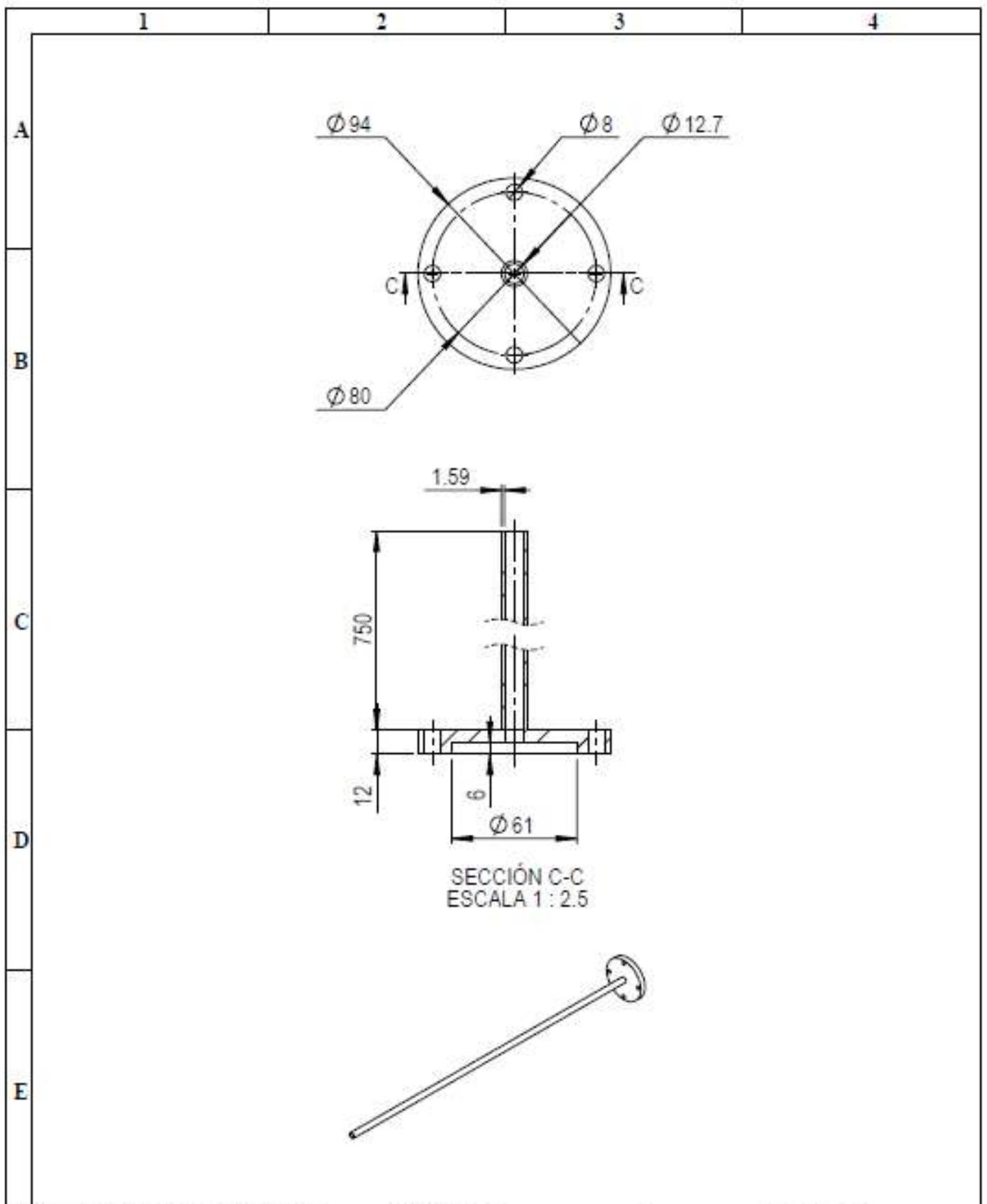
N° Lámina: 2 de 5		N° Hojas: 5		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Email: spablo8802@gmail.com Teléfonos: 0995796739						Denominación: PLACA BASE					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: AIISI 304				0.51		1:1	
Proyectó	Sarzosa P.		22/01/21								
Dibujó	Sarzosa P.		22/01/21								
Revisó	Abarca P.		22/01/21								
Aprobó	Abarca P.		22/01/21								
Nombre de archivo:						ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PROTEGIDA POR LA LEY. 					



Nº. Lámina: 3 de 5		Nº. Hojas: 5		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA									
Email: spablo8802@gmail.com Teléfonos: 0995796739						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		LÁMINA DE GRAFITO				0.1		1:1			
Proyectó		Sarzosa P.				22/01/21											
Dibujó		Sarzosa P.				22/01/21											
Revisó		Abarca P.				22/01/21											
Aprobó		Abarca P.				22/01/21		Materiales:		GRAFITO		Nombre de archivo:		<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR DETERMINADA POR LA LEY.</small> 			



Nº. Lámina: 4 de 5		Nº. Hojas: 5		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH			
Email: spablo8802@gmail.com						FACULTAD DE MECÁNICA					
Teléfonos: 0995796739											
Denominación:		Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro			
TUBERÍA		0.86				1:2.5					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales:		<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR DISEÑADA POR LA LEY.</small>					
Proyectó	Sarzosa P.		22/01/21	AISI 304							
Dibujó	Sarzosa P.		22/01/21	Nombre de archivo:							
Revisó	Abarca P.		22/01/21								
Aprobó	Abarca P.		22/01/21								



Nº. Lámina: 5 de 5		Nº. Hojas: 5		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH			
Email: spablo8802@gmail.com		Teléfonos: 0995796739		Denominación:		PLACA SUPERIOR		FACULTAD DE MECÁNICA			
Escuela de Ingeniería Mecánica								ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales:		Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro		
Proyectó	Sarzosa P.		22/01/21	AISI 304		0.84		1:2.5			
Dibujó	Sarzosa P.		22/01/21	Nombre de archivo:							
Revisó	Abarca P.		22/01/21							<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR DISEÑADA POR LA LEY.</small>	
Aprobó	Abarca P.		22/01/21								



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 25 / 05 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Pablo Ernesto Sarzosa Viera</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
<i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>
Título a optar: <i>Magíster en Diseño Mecánico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.

**LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS**

Firmado digitalmente por
LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Nombre de reconocimiento
(DN): c=EC, l=RIOBAMBA,
serialNumber=0602766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.05.25 09:12:24
-05'00'



0055-DBRAI-UPT-IPEC-2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 25 / 05 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Pablo Ernesto Sarzosa Viera</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
<i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>
Título a optar: <i>Magíster en Diseño Mecánico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.

**LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS**

Firmado digitalmente por
LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Nombre de reconocimiento
(DN): c=EC, l=ROGASAMBA,
serialNumber=0802766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.05.25 09:12:24
-05'00'



0055-DBRAI-UPT-IPEC-2021