



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS DE ALUMINIO FUNCIONALMENTE GRADUADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE INFILTRACIÓN EN PREFORMAS SOLUBLES Y SU APLICACIÓN EN ELEMENTOS DE DEFORMACIÓN PROGRAMADA

JOSÉ ISRAEL RODRÍGUEZ GUAMBO

Trabajo de Titulación modalidad; Proyecto 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

JUNIO 2021

©2020, José Israel Rodríguez Guambo

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 DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyecto de Investigación y Desarrollo, denominado: Obtención y caracterización de espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas mediante el método de infiltración en preformas solubles y su aplicación en elementos de deformación programada”, de responsabilidad del señor José Israel Rodríguez Guambo, ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes; Mag.

PRESIDENTE



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

Ing. Edison Patricio Abarca Pérez, Mag.

DIRECTOR



Firmado electrónicamente por:
**EDISON
PATRICIO
ABARCA PEREZ**

Ing. Santiago Alejandro López Ortiz, Mag.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**SANTIAGO
ALEJANDRO LOPEZ
ORTIZ**

Ing. Edgar Fabián Sánchez Carrión, Mag.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

**EDGAR FABIAN
SANCHEZ CARRION**

Firmado digitalmente por EDGAR
FABIAN SANCHEZ CARRION
Fecha: 2021.06.08 15:51:22 -05'00'

Riobamba, junio 2021

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, José Israel Rodríguez Guambo soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyecto de Investigación y Desarrollo**, y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



JOSÉ ISRAEL RODRÍGUEZ GUAMBO

No. Cédula: 180446774-2

Yo, José Israel Rodríguez Guambo, declaro que el presente proyecto de investigación, 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 están debidamente citados y referenciados.

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



JOSÉ ISRAEL RODRÍGUEZ GUAMBO

No. Cédula: 180446774-2

DEDICATORIA

A mis padres Mario y Margarita que me enseñaron que por más difícil que sea el camino hay que seguir de pie y con la frente en alto.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme un espacio para poder formarme como profesional, motivo que me llena de alegría al poder contribuir todo lo aprendido a la sociedad.

Agradecer a mi familia y a mis maestros que siempre han estado ahí para guiarme y comprenderme en los momentos buenos y malos.

CONTENIDO

RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.1.1. Situación problemática.....	2
1.1.2. Formulación del problema	2
1.1.3. Justificación de la investigación	2
1.1.4. Objetivos de la investigación	3
1.1.5. Hipótesis	3
CAPÍTULO II	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Antecedentes del problema	4
2.2. Bases Teóricas	5
2.2.1. Preforma soluble en agua.....	5
2.2.2. Sólido celular	6
2.2.3. Espumas metálicas	6
2.2.4. Principales métodos de obtención de metales celulares.....	7
2.2.5. Caracterización estructural.....	10
2.2.6. Aplicaciones.....	12
CAPÍTULO III.....	14
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	14
3.1. Análisis de viabilidad del método de infiltración para el proceso de fabricación.....	14
3.2. Diagrama de flujo de la metodología experimental	14
3.3. Materiales y equipos empleados	15
3.3.1. Preforma soluble	15
3.3.2. Metal base para la infiltración.....	16
3.3.3. Horno para fundir el aluminio.....	16
3.3.4. Molde cilíndrico para la fundición.....	16
3.3.5. Horno eléctrico para la fabricación de espumas	17
3.3.6. Bomba de vacío.....	18
3.3.7. Tanque de argón.....	19
3.3.8. Grafito	19

3.3.9.	Tamices	20
3.3.10.	Agitador mecánico de tamices	20
3.3.11.	Pirómetro	21
3.4.	Esquema del equipo para el proceso de infiltración.....	21
3.5.	Experimentación	22
3.5.1.	Fabricación del molde cilíndrico.....	22
3.5.2.	Preparación del tocho de aluminio.....	22
3.5.3.	Preparación del horno	23
3.5.4.	Preparación de la preforma	23
3.5.5.	Preparación del molde.....	24
3.5.6.	Infiltración.....	26
3.5.7.	Extracción de la muestra.....	26
CAPÍTULO IV		27
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1.	Resultados.....	27
4.1.1.	Caracterización estructural.....	27
4.1.2.	Capacidad de absorción de energía.....	35
4.2.	Discusión de resultados.....	52
4.2.1.	Caracterización estructural.....	52
4.2.2.	Caracterización mecánica	53
CAPÍTULO V		58
5.	PROPUESTA.....	58
5.1.	Aplicación de espumas de aluminio funcionalmente graduadas en absorbedores de impacto.....	58
5.2.	Costos de fabricación.....	59
CONCLUSIONES		60
RECOMENDACIONES		61
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Preforma soluble en agua.....	5
Figura 2-2: Criterio de densidad para sólidos celulares y porosos.	6
Figura 3-2: Estructura de poro abierto.....	6
Figura 4-2: Estructura de poro cerrado.....	7
Figura 5-2: Procesos de fabricación de metales celulares	7
Figura 6-2: Proceso ALPORAS para generar espumas de aluminio	8
Figura 7-2: Infiltración de metal fundido en moldes solubles	9
Figura 8-2: Proceso DUOCEL para la fabricación de espumas metálicas	10
Figura 9-2: Energía absorbida en el ensayo de compresión mediante el área bajo la curva esfuerzo-deformación	11
Figura 10-2: Principio de la funcionalidad de las zonas de deformación programada	13
Figura 11-2: Elementos de deformación programada en parachoques	13
Figura. 1-3: Diagrama de flujo para la metodología experimental.....	15
Figura. 2-3: Preforma de óxido sodio	16
Figura. 3-3: Molde para la fundición de espumas de aluminio.....	17
Figura. 4-3: Horno mufla eléctrico	18
Figura. 5-3: Bomba de vacío.....	18
Figura. 6-3: Tanque de argón	19
Figura. 7-3: Lámina y grafito en polvo.....	19
Figura. 8-3: Tamices ordenados según diámetro de poro	20
Figura. 9-3: Agitador mecánico de tamices	20
Figura. 10-3: Esquema del equipo para el proceso de infiltración.....	21
Figura. 11-3: Molde cilíndrico.....	22
Figura. 12-3: Tocho de aluminio mecanizado	23
Figura. 13-3: Tamizado y envasado del óxido de sodio	23
Figura. 14-3: Limpieza y aislamiento del cilindro mediante grafito.....	24
Figura. 15-3: Ensamble del cilindro y colocación de la preforma	24
Figura. 16-3: Molde totalmente hermetizado.....	25
Figura. 17-3: Sujeción del sistema de válvulas al molde.....	25
Figura. 1-4: Probetas fabricadas por el método de infiltración.....	27
Figura. 2-4: Microscopio metalográfico OLYMPUS	28
Figura. 3-4: Microestructura magnificada a 100X, Ácido fluorhídrico, 15 seg.....	28
Figura. 4-4: Microestructura magnificada a 200X, Ácido fluorhídrico, 15 seg.....	28
Figura. 5-4: Microestructura magnificada a 500X, Ácido fluorhídrico, 15 seg.....	29
Figura. 6-4: Microestructura magnificada a 1000X, Ácido fluorhídrico, 15 seg.....	29
Figura. 7-4: Mircro-durómetro Future-Tech.....	30
Figura. 8-4: Espuma de celda abierta a) Seccionada b) Pulida.....	31
Figura. 9-4: Probeta a) y b) para medición de tamaño de poro.....	31
Figura. 10-4: Probetas subdivididas en seis regiones	32
Figura. 11-4: Conversión de pixeles a milímetros de una imagen en ImageJ	32
Figura. 12-4: Medida del diámetro de poro graduado según regiones mediante ImageJ	33
Figura. 13-4: Medición del espesor del ligamento mediante ImageJ	34
Figura. 14-4: Maquina Universal Metrotest	35
Figura. 15-4: Probetas previas al ensayo de compresión.....	37
Figura. 16-4: Deformación de las probetas a una velocidad de 10 mm/min	37

Figura. 17-4: Fuerza vs desplazamiento de la probeta ECM 01-1	38
Figura. 18-4: Parámetros estadísticos de la probeta ECM-01-1 sujeta a compresión.....	38
Figura. 19-4: Gráfica de la Carga vs % de desplazamiento de la probeta ECM 01-1	39
Figura. 20-4: Fuerza vs desplazamiento de la probeta ECM 01-2.....	39
Figura. 21-4: Parámetros estadísticos de la probeta ECM-01-2 sujeta a compresión.....	40
Figura. 22-4: Gráfica de la Carga vs % de desplazamiento de la probeta ECM 01-2	40
Figura. 23-4: Fuerza vs desplazamiento de la probeta ECM 01-3.....	41
Figura. 24-4: Parámetros estadísticos de la probeta ECM-01-3 sujeta a compresión.....	41
Figura. 25-4: Gráfica de la Carga vs % de desplazamiento de la probeta ECM 01-3	41
Figura. 26-4: Gráfico esfuerzo-deformación de la probeta ECM-01-1 sujeta a compresión.....	42
Figura. 27-4: Gráfico esfuerzo-deformación de la probeta EC-01-2 sujeta a compresión	43
Figura. 28-4: Gráfico esfuerzo-deformación de la probeta EC-01-3 sujeta a compresión	44
Figura. 29-4: Máquina de ensayos de Impacto Charpy	45
Figura. 30-4: Gráfico de barras de la energía de impacto.....	47
Figura. 31-4: Máquina de ensayo dinámico de impacto	47
Figura. 32-4: Construcción de acople para sujetar la probeta.....	48
Figura. 33-4: ensamble del acople a la máquina de impacto dinámico	48
Figura. 34-4: Probetas antes del ensayo de impacto dinámico	49
Figura. 35-4: A) Sistema de adquisición B) Sujeción de la probeta C) Elevación del péndulo	49
Figura. 36-4: Diagrama para el ensayo de impacto dinámico.....	50
Figura. 37-4: Probetas posterior al ensayo de impacto dinámico	51
Figura. 38-4: Energía absorbida en función del tiempo.....	51
Figura. 39-4: Dureza del aluminio.....	52
Figura. 40-4: Esfuerzo de compresión vs Deformación unitaria (Probeta EMC-01-1 y EMC-01-2)	54
Figura. 41-4: Cálculo del módulo de young probeta EMC-01-1	54
Figura. 42-4: Cálculo del módulo de Young de la probeta EMC-01-2.....	55
Figura. 43-4: Cálculo del módulo de Young de la probeta EMC-01-2.....	55
Figura. 44-4: Curva Esfuerzo-deformación de espumas de aluminio con diferentes densidades relativas	56
Figura. 45-4: Espumas de aluminio posterior al ensayo de compresión e impacto	57

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-3: Viabilidad del proceso de infiltración con relación a otros	14
Tabla 2-3: Propiedades del óxido de sodio	15
Tabla 3-3: Características del horno mufla eléctrico	17
Tabla 4-3: Características técnicas de la bomba de vacío.....	18
Tabla. 1-4: Datos generales del ensayo metalográfico.....	28
Tabla. 2-4: Datos generales del ensayo de dureza vickers en espuma de aluminio	29
Tabla. 3-4: Microdureza VICKERS en espuma de aluminio.....	30
Tabla. 4-4: Cálculo de la densidad relativa y porosidad	30
Tabla. 5-4: Diámetro promedio de poro en las regiones de la preforma graduada-.....	33
Tabla. 6-4: Espesor de ligamento de poro de la preforma graduada.....	34
Tabla. 7-4: Características técnicas de la máquina universal.....	35
Tabla. 8-4: Datos generales del ensayo de compresión	35
Tabla. 9-4: Datos previos y dimensiones de las probetas sujetas a compresión	36
Tabla. 10-4: Fuerza, Esfuerzo, Desplazamiento y deformación máxima de las probetas sujetas a compresión	36
Tabla. 11-4: Fuerza, Esfuerzo, Desplazamiento y deformación última de las probetas sujetas a compresión	37
Tabla. 12-4: Especificaciones técnicas de la máquina de Impacto.	45
Tabla. 13-4: Datos generales para el ensayo de compresión	45
Tabla. 14-4: Datos previos y dimensiones de las probetas sujetas a Impacto.....	46
Tabla. 15-4: Propiedades mecánicas de las espumas sujetas a compresión.....	46
Tabla. 16-4: Resultados del ensayo de impacto dinámico	51
Tabla. 17-4: Propiedades mecánicas de las espumas sujetas a compresión.....	55
Tabla. 18-4: Resultados del ensayo de compresión e impacto.....	57
Tabla . 1-5: Propiedades mecánicas de las espumas de aluminio funcionalmente graduadas vs alporas 10%	58
Tabla . 2-5: Costos de fabricación	59

RESUMEN

Este trabajo se efectuó bajo un protocolo experimental para la obtención de espumas metálicas de aluminio con una porosidad variada. El protocolo se basó en el método de infiltración en preformas solubles en agua; como material de preforma se empleó el óxido de sodio, con tamaños de 3, 5 y 7 mm respectivamente que fueron ubicados en forma de pirámide. Se realizó un análisis metalográfico para conocer las propiedades más relevantes de las espumas metálicas como son la densidad relativa, porosidad, espesor de ligamento. Resultado de este análisis se obtuvo en promedio una densidad relativa de las espumas de 0.49 y un porcentaje de porosidad en promedio del 51%, para conocer el espesor de ligamento se empleó el programa computacional Image J, y se obtuvo un espesor de 0.94, 1.5 y 1.8 mm aproximadamente para los diámetros de poro de 3, 5 y 7 mm respectivamente. Como parte de esta investigación, se realizó ensayo cuasiestático de compresión para obtener la energía absorbida mediante la integración del área bajo la curva esfuerzo-deformación. Para completar el ensayo mecánico, se llevó a cabo el ensayo dinámico de compresión mediante el impacto frontal de un péndulo diseñado para aplicaciones automotrices, con el objeto de medir la capacidad de absorción y porcentaje de deformación. Posteriormente se comparó dichos resultados con los del ensayo de compresión uniaxial. Finalmente, el resultado de la comparación muestra la gran capacidad de absorción de energía de deformación en este tipo de espumas y su funcionalidad en elementos de deformación programada.

Palabras clave: <METALOGRAFICO>, <ESPUMAS METÁLICAS>, <POROSIDAD>, <ABSORBEDORES DE IMPACTO>, <ENSAYO CUASIESTÁTICO>

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 09:03:38
-05'00'



0064-DBRAI-UPT-IPEC-2021

ABSTRACT

This work was carried out under an experimental protocol for obtaining aluminum metal foams with a varied porosity. The protocol was based on the method of infiltration into water soluble preforms; sodium oxide was used as preform material, with sizes of 3, 5 and 7 mm, respectively, which were placed in pyramid form. A metallographic analysis was performed to know the most relevant properties of metal foams such as relative density, porosity, ligament thickness. Result of this analysis was obtained on average a relative density of the foams of 0.49 and a percentage of porosity on average of 51%, to know the thickness of ligament was used the computer program Image J, and obtained a thickness of 0.94, 1.5 and 1.8 mm approximately for the pore diameters of 3, 5 and 7 mm respectively. As part of this research, quasi-static compression test was performed to obtain the absorbed energy by integrating the area under the stress-strain curve. To complete the mechanical test, the dynamic compression test was carried out by means of the frontal impact of a pendulum designed for automotive applications, in order to measure the absorption capacity and percentage of deformation. These results were then compared with those of the uniaxial compression trial. Finally, the result of the comparison shows the great absorption capacity of deformation energy in this type of foams and its functionality in programmed deformation elements.

KEYWORDS: <METALLOGRAPHIC>, <METALLIC FOAMS>, <POROSITY>, <IMPACT ABSORBERS>, <QUASI-STATIC TEST>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio de investigación se refiere a la fabricación de espumas metálicas de aluminio, para ello se ha considerado el método de infiltración en preformas solubles, el más idóneo y fácil de emplear en nuestro medio. Para la preforma se utilizó el óxido de sodio con diámetros de 3, 5 y 7 mm respectivamente y apilados en forma de pirámide dentro de un molde cilíndrico.

El objeto por el cual se realizó este trabajo de investigación es debido a que en nuestro país no se ha implementado procesos de fabricación de espumas y mucho menos su utilización. En la zona centro de nuestro país como es la ciudad de Riobamba y Ambato existen empresas carroceras, las cuales son mercado potencial para poder aplicar las espumas metálicas como absorbedores de impacto.

Cuando hablamos de seguridad al momento de subir a un vehículo, casi siempre nos viene a la mente airback y carrocería mas no los elementos de seguridad pasiva. Estos elementos están siempre en evolución y su función es minimizar el daño ocasionado ya sea por un choque o impacto al conductor y sus acompañantes.

Porque no emplear el aluminio para fabricar este tipo de espumas si es un material de fácil acceso y bajo costo. Posee excelentes características físicas y mecánicas, como es la relación de resistencia peso, baja densidad, bajo punto de fusión al que se puede llegar con el método de infiltración. Además, se puede emplear aluminio reciclado y así contribuir y fomentar un ambiente sano y libre de desechos que pueden afectar al medio. El proceso que se implemento fue de estudios realizados en el exterior y ajustados a nuestro medio. Las espumas fueron sujeta a un análisis metalográfico para conocer sus propiedades más destacadas como son la densidad relativa, porosidad, tamaño de poro y espesor de ligamento del poro. Posterior a esto, se realizó ensayos mecánicos de compresión e impacto.

Finalmente se hizo un estudio de los resultados arrojados tanto del ensayo de compresión como de impacto, comparándolos con espumas similares obtenidos en estudios previos.

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Situación problemática

La poca o casi nada de información e implementación de procesos de obtención de espumas en nuestro medio, nos hace pensar que simplemente estamos importando y mas no desarrollando materiales que aporten en este caso a la industria. Las empresas carroceras de nuestro país se han sometido a cumplir con estándares internacionales de fabricación, así como a satisfacer la comodidad de los usuarios en base nuevos modelos.

Según el reporte de la Agencia Nacional de Transito en el año 2020 señala que ha existido un total de 13099 siniestros de tránsito, datos que nos hacen pensar dos cosas. Una hay que crear conciencia en la población para evitar accidentes de tránsito, y otra hay que diseñar elementos basados en la seguridad pasiva de los vehículos para tratar de minimizar el daño causado por el choque al conductor y acompañantes.

El desconocimiento y el poco interés ha hecho que en nuestro país no exista industrias que se dediquen a comercializar espumas metálicas. Este vacío nos ha llevado a estudiar los diferentes métodos y alternativas que se puede implementar en nuestro medio con materiales de bajo costo.

1.1.2. Formulación del problema

¿Es factible obtener y caracterizar espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas mediante el método de infiltración en preformas solubles y su aplicación en elementos de deformación programada?

1.1.3. Justificación de la investigación

La presente investigación está destinada a generar espumas de aluminio con porosidad variada y aplicarlas en elementos de absorción de impacto.

Se desea generar espumas con la porosidad deseada al menor costo posible, con materiales que estén en nuestro alcance, y que tengan una buena capacidad de absorción de energía frente al impacto.

La población beneficiaria de esta investigación será el sector industrial carroceros y las diferentes industrias que necesiten materiales con buenas propiedades de absorción y al menor costo, así como a estudiantes e investigadores que deseen continuar este estudio, con el afán de cubrir todas las aplicaciones posibles que poseen este tipo de espumas de aluminio.

Como contribución teórica es la implementación del método de infiltración en preformas solubles basada en la investigación bibliográfica de trabajos realizados en el exterior, adaptándolos a nuestro medio.

La contribución práctica de la investigación es generar espumas metálicas de porosidad variada, con preformas de óxido de sodio. La potencial fuente de aplicación de nuestras espumas será el sector carrocerero al cual pretendemos llegar como elementos de seguridad pasiva, que integrados a la estructura de los vehículos minimicen el daño frente a un choque o impacto.

1.1.4. Objetivos de la investigación

1.1.4.1. Objetivo General

Obtener y caracterizar espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas mediante el método de infiltración en preformas solubles y su aplicación en zonas de deformación programada.

1.1.4.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar y ensamblar los elementos del equipo para obtener espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas de celda abierta.
- Obtener espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas de celda abierta por el método de infiltración de metal fundido en preformas solubles o removibles
- Caracterizar mecánica y morfológicamente las espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas de celda abierta obtenidas.

1.1.5. Hipótesis

¿El método de infiltración si permitirá obtener espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas en preformas solubles y su aplicación en absorbedores de impacto?

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

Las bases teóricas señalan investigaciones previas que han generado espumas metálicas de mediante diferentes métodos y técnicas. Existen espumas que han sido aplicadas para aislamiento acústico y térmico, así como para elementos anti vibratorios; pero que no han sido sometidas en elementos para absorción de impacto.

Como antecedentes más relevantes con respecto a la obtención de espumas metálicas, las nombramos a continuación:

El trabajo con título “Fabrication of Functionally Graded Open-cell Aluminium Foam Using Graded NaCl in Infiltration Casting”. Menciona espumas con porosidad de 2,3 y 4 mm respectivamente. Como resultado en este trabajo se evidencia que el tamaño de grano de la preforma afecta directamente en la porosidad. Es decir, al aumentar el tamaño de grano del cloruro de sodio se eleva en forma progresiva la porosidad de esta. De manera global, en dicho trabajo concluye que el grano de NaCl juega un papel fundamental para definir la estructura de clasificación funcional del producto. (Mohd, Noor, Muhammad, & Valliyappan, 2018).

En el trabajo denominado “Production of graded aluminum foams via powder space holder technique”. Emplearon la técnica de soporte de espacio en polvo para producir espumas de aluminio con gradiente de densidad. En este trabajo se seleccionaron carbamidas granuladas esféricas como materiales de soporte de espacio, así también se fabricaron espumas graduadas de tamaño de celda de 1 a 5 mm, y de densidad relativa de 0,16 a 0,47. (Amir, Ali, & Hassan, 2012)

En la investigación titulada “Caracterización de espumas metálicas y su aplicación en absorbentes de impacto”. Se emplea espumas ya generadas mediante el método ALPORAS de porosidad cerrada. El autor realizó la caracterización y analizó el comportamiento mecánico mediante el ensayo de compresión con distintas velocidades de deformación. Para cuantificar la energía, en dicho trabajo menciona el análisis de compresión dinámico mediante un equipo diseñado para dicho efecto. Finalmente, se estudia el comportamiento en estructuras sándwich mediante el impacto a baja velocidad mediante el ensayo en torre de caída de peso. (Irausquín, 2012)

En el trabajo titulado “Characterization of aluminium foam produced from aluminium acrap by using CaCO_3 as foaming agent” Se obtuvo espumas mediante un agente espumante el CaCO_3 , las espumas mostraron una densidad de 0.4 a 0.6 g/cm^3 y densidad relativa entre 0.14 a 0.25, con alta porosidad de 78% a 85%. Las pruebas de compresión e impacto fueron similares en la energía cuantificada. Además, los autores analizaron la resistencia eléctrica de las espumas de aluminio comparándolas con el material denso, dando como resultado que las espumas tienen mayor resistencia eléctrica. Por otro lado, al analizar conductividad térmica obtuvieron que, las espumas poseen menor conductividad que el material denso. (Hamza, Omran, Atlan, & Moatasem, 2017)

2.2. Bases Teóricas

En el siguiente apartado se presentan los conceptos contemplados en el desarrollo de la investigación.

2.2.1. Preforma soluble en agua

Material de porosidad variable empleado para generar las espumas de aluminio de poro abierto, usualmente de mayor punto de fundición del aluminio que posterior al ciclo de enfriado, es removido mediante la disolución en agua.

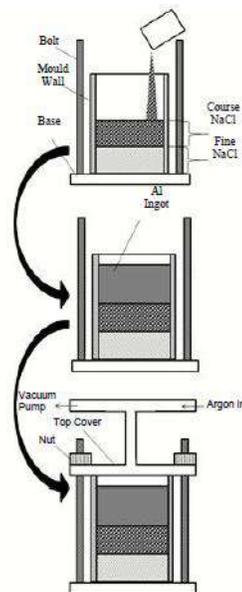


Figura 1-2: Preforma soluble en agua

Fuente: (Mohd, Noor, Muhammad, & Valliyappan, 2018)

2.2.2. Sólido celular

Los sólidos y materiales porosos los podemos diferenciar mediante la densidad relativa, que no es más que la relación entre la densidad del material celular y la densidad del material base. En la figura 2-1: podemos apreciar el criterio que distingue a los sólidos celulares de los porosos. (Irausquín, 2012)

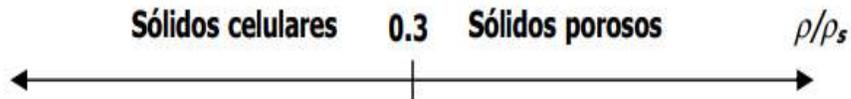


Figura 2-2: Criterio de densidad para sólidos celulares y porosos.
Fuente: (Irausquín, 2012)

2.2.3. Espumas metálicas

Son materiales que poseen características únicas que las diferencian de otros materiales, siendo estas consideradas derivadas de los sólidos celulares, cuya estructura porosa puede ser de poro cerrado y abierto.

2.2.3.1. Estructura de poro abierto

Si la estructura de poros se encuentra interconectada entre sí, se considera que la espuma es de poro abierto.

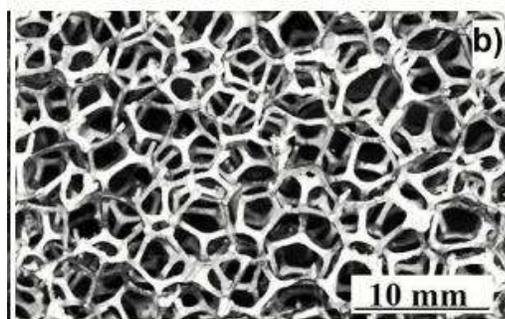


Figura 3-2: Estructura de poro abierto
Fuente: (Gutiérrez & Oñoro, 2008)

2.2.3.1. Estructura de poro cerrado

Si la estructura de poro no se encuentra interconectada entre sí, se considera espuma de poro cerrada.

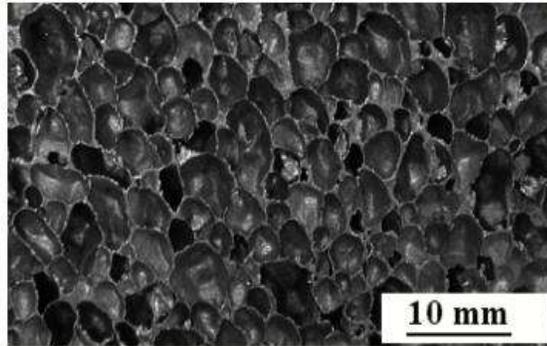


Figura 4-2: Estructura de poro cerrado.
Fuente: (Gutiérrez & Oñoro, 2008)

2.2.4. Principales métodos de obtención de metales celulares

En la figura 5-2 se muestra los procesos de fabricación de los metales celulares, los cuales podemos clasificarlos en tres categorías: 1) Procesos en estado líquido, 2) Procesos en estado sólido y 3) Procesos de Deposición

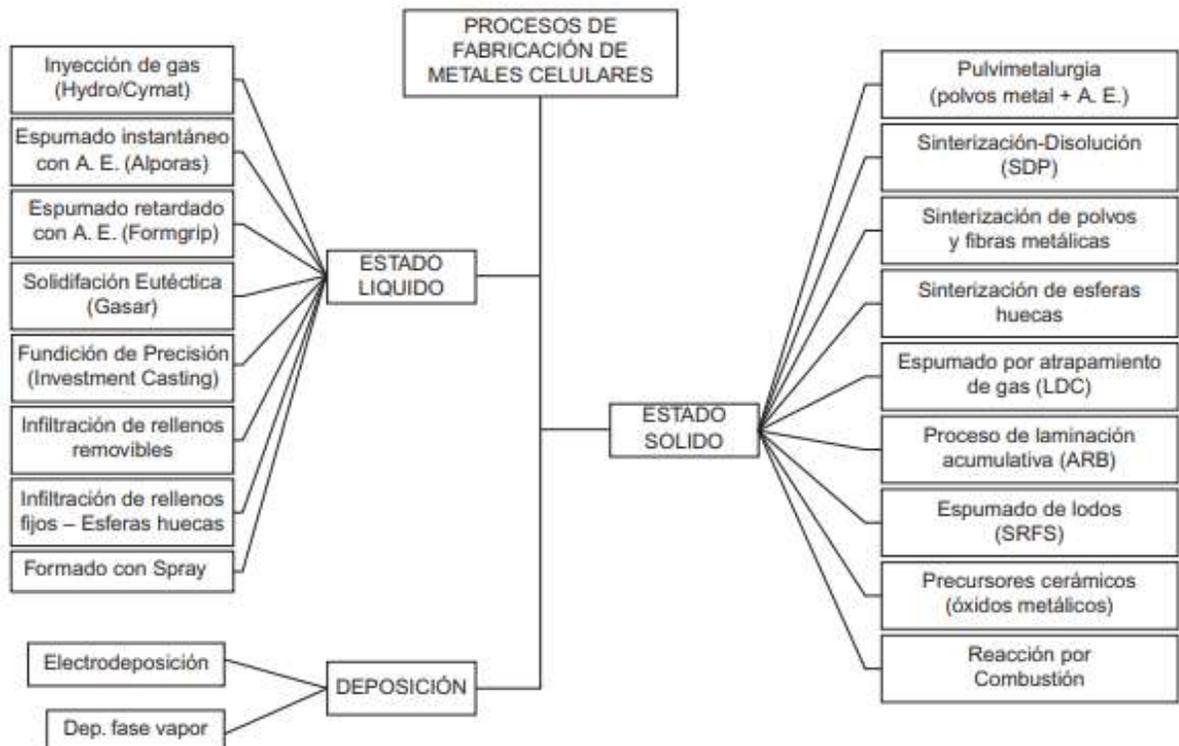


Figura 5-2: Procesos de fabricación de metales celulares
Fuente: (Fernandez, Cruz, & Coletto, 2008)

A continuación, se describe los métodos comercialmente empleados.

2.2.4.1. Adición de un agente espumante al fundido metálico

A este proceso se le conoce como ALPORAS, que consiste en añadir un agente espumante típicamente el hidróxido de titanio, el cual libera gas al ser añadido al metal fundido. Este proceso se lleva a cabo a una temperatura de 680° C. Para estabilizar el espumado del metal líquido primeramente se adiciona 1.5% en peso de calcio. (Fernandez, Cruz, & Coletto, 2008)

Con este proceso se logra un tamaño de poro más pequeño y uniforme, pero el costo es alto por los aditivos que se emplean.

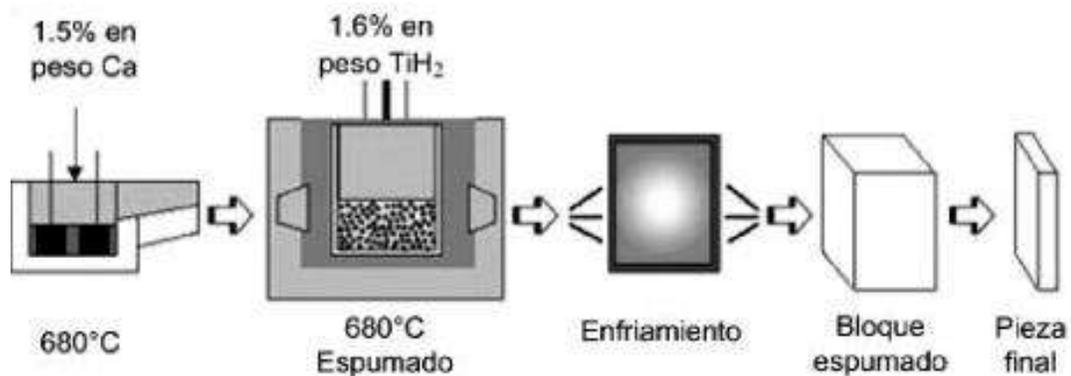


Figura 6-2: Proceso ALPORAS para generar espumas de aluminio
Fuente: (Abarca, 2017)

2.2.4.2. Infiltración en moldes con rellenos removibles

Este proceso consiste de un molde con material para la preforma que puede ser orgánico o inorgánico, que una vez apilado se sinteriza y enfría, finalmente se obtiene un molde con poros interconectados.

Luego de conseguir la preforma deseada, el metal fundido ya sea de aluminio o algún otro con similares características se infiltra en la preforma, que luego se infiltra y solidifica. Una vez removido del molde, la espuma se sujeta a un proceso de remoción o disolución de la preforma.

Las ventajas que presenta este método se menciona a continuación.

- Espuma de buena calidad
- Método relativamente económico
- Espumas de diferente tamaño de poro y forma controlada es posible con este método

La figura 7-2: muestra el proceso en detalle para la obtención de espumas metálicas de aluminio.

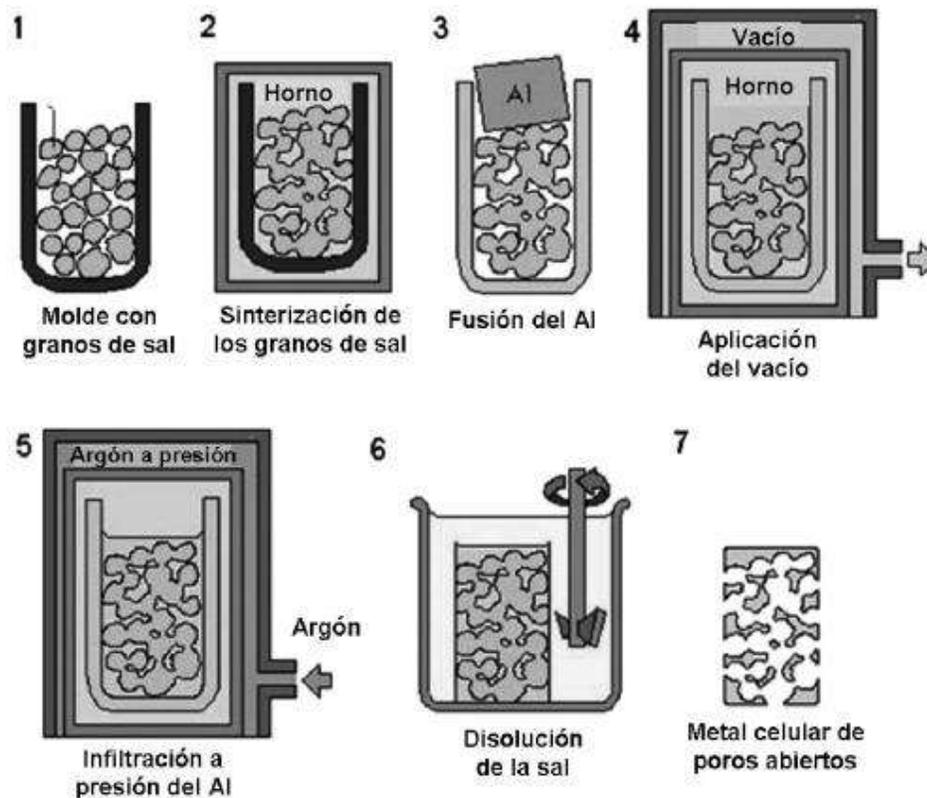


Figura 7-2: Infiltración de metal fundido en moldes solubles
Fuente: (Fernandez, Cruz, & Coletto, 2008)

2.2.4.3. Fundición utilizando como molde un polímero o precursor de cera

Proceso conocido como DUOCEL, mediante el cual se genera espuma de poro abierto. Como primer paso, una espuma de poliuretano es llenada con yeso, la que posteriormente se calienta a 700°C para fundirla obteniendo así una cadena de canales en el bloque de yeso. El metal fundido se vierte en el molde, regularmente en vacío y alta presión para conseguir total infiltración. Finalmente, el yeso se disuelve con el fin de obtener una espuma metálica con estructura similar a la espuma del polímero original. (Gutiérrez & Oñoro, 2008)

Este método proporciona espumas de celda abierta con tamaños de poro de 1-5 mm y densidades relativas tan bajas como 0.05. (Ashby, y otros, 2002)

En la figura 8-2: se muestra el proceso en detalle para la obtención de espumas metálicas, basadas en un molde o precursor de cera.

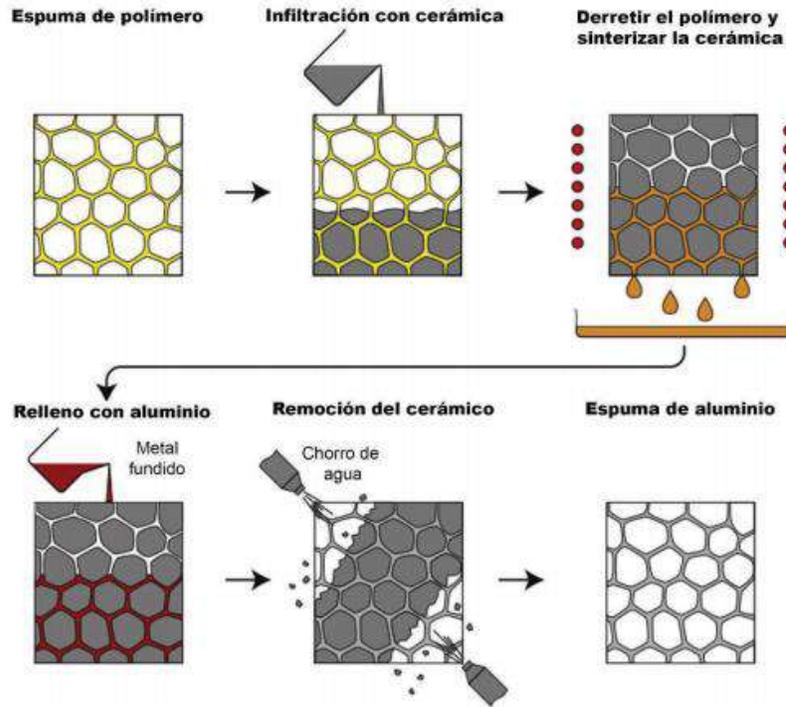


Figura 8-2: Proceso DUOCEL para la fabricación de espumas metálicas
Fuente: (Abarca, 2017)

2.2.5. Caracterización estructural

Una espuma metálica se caracteriza por su topología celular (celdas abiertas o cerradas), densidad relativa, tamaño y forma celular, y anisotropía. La densidad se mide mejor pesando una muestra de volumen conocido; el resto requiere microscopía (Irausquín, 2012)

2.2.5.1. Energía absorbida por el ensayo de compresión

La propiedad más relevante del comportamiento de las espumas sujetas a compresión es su elevada capacidad de absorción de energía por unidad de volumen (E_v), la cual se determina directamente a partir del área bajo la curva tensión- deformación. (Hamza, Omran, Atlan, & Moatasem, 2017). El área crece en función de la deformación(ϵ). Para su aplicación en absorción de energía, y con el objetivo de evitar daños a la estructura u objetos a proteger, los valores de tensión transmitida deben limitarse, con el fin de entrar en la zona de densificación. La capacidad de absorción de energía útil se calcula mediante el área bajo la curva hasta el valor de la deformación de densificación (ϵ_D). (Cárcel, 2015). La energía, también se puede calcular por integración de la curva generada con los datos de ensayos tensión-deformación mediante la siguiente ecuación. (Hamza, Omran, Atlan, & Moatasem, 2017)

$$E_v = \int_0^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) * d\epsilon \quad (\text{Ec. 1-2})$$

Dónde:

$E_v = \text{Energía por unidad de volumen}$

$\epsilon_D = \text{deformación de densificación}$

Teniendo en cuenta la región plástica de plateau presenta una evolución casi lineal en los valores de tensión, los valores de (E_v), pueden estimarse de manera aproximada con fines de diseño por el producto de la tensión de plateau para una deformación del 25%, denominada $\sigma_{0.25}$ y la deformación de densificación ϵ_D . (Ashby, y otros, 2002)

$$E_v \approx \sigma_{0.25} * \epsilon_D \quad (\text{Ec. 2-2})$$

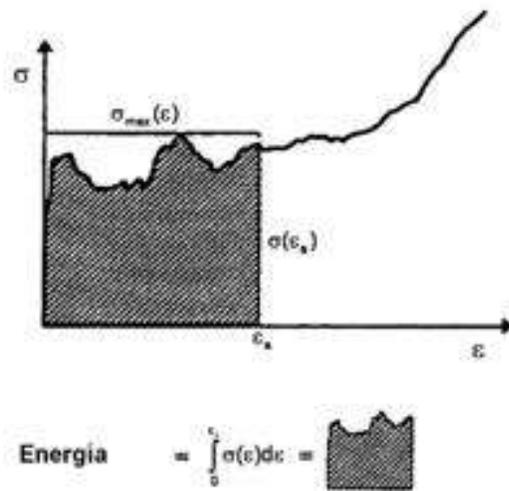


Figura 9-2: Área bajo la curva esfuerzo-deformación para cálculo de energía
Fuente: (Irausquín, 2012)

2.2.5.2. Energía absorbida por ensayo de impacto

La prueba de impacto se puede llevar a cabo mediante la prueba de impacto Charpy, el aparato consiste en un péndulo de masa conocida (m) y longitud que se deja caer desde una altura conocida (h_1) para impactar una muestra de espuma de aluminio con tamaño estándar. La absorción de energía por prueba de impacto (U) se puede calcular a partir de la ecuación. (Hamza, Omran, Atlan, & Moatasem, 2017)

$$U = m * g * (h_1 - h_2) \quad (\text{Ec. 3-2})$$

Dónde:

U = Energía absorbida por ensayo Charpy

m = masa del péndulo

g = aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

h_1 = altura del péndulo antes de la caída.

h_2 = altura del péndulo después de la caída.

2.2.6. Aplicaciones

Las espumas metálicas tienen una combinación de propiedades que las hacen sobresalir de otros materiales y su aplicación en el campo de la ingeniería, como, por ejemplo: uso como materiales livianos para la construcción, para absorber energía por deformación, para el control térmico y acústico, entre tantas más.

2.2.6.1. Zonas de deformación programada.

Años atrás se pensó que un coche cuanto más “duro” fuera en el exterior, mejor para la seguridad de los ocupantes. Pero el tiempo y, sobre todo, los test de choque y los diferentes estudios mostraron como la alta rigidez de la estructura mataba en caso de accidente y los beneficios de la deformación programada. Un coche indeformable como los de antes suponía que, en caso de choque, la deceleración que sufría el organismo de los ocupantes fuera mayor. Podía ser un accidente a una velocidad moderada, pero los órganos no soportaban pasar, por ejemplo, de 50 a 0 km/h en unas centésimas de segundo.

Con el propósito de aumentar ese tiempo de deceleración y disminuir las fuerzas que tenían que soportar los ocupantes nació las zonas de deformación programadas. La figura muestra la funcionalidad de un parachoques y su importancia en un choque frontal al momento de absorber energía de impacto.

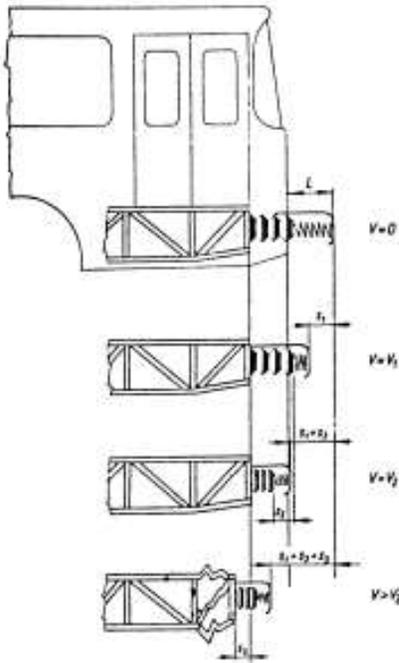


Figura 10-2: Principio de la funcionalidad de las zonas de deformación programada
Fuente: (Matolcsy, 1996)

Los elementos de deformación programada para que en caso de un accidente no sean totalmente rígidas, sino que se deformen progresivamente. A la deformación que se produce en estos elementos se conoce como “puntos fusibles”, que aumenta el tiempo de desaceleración minimizando el daño a los pasajeros. (Avila & Murias, 2016)

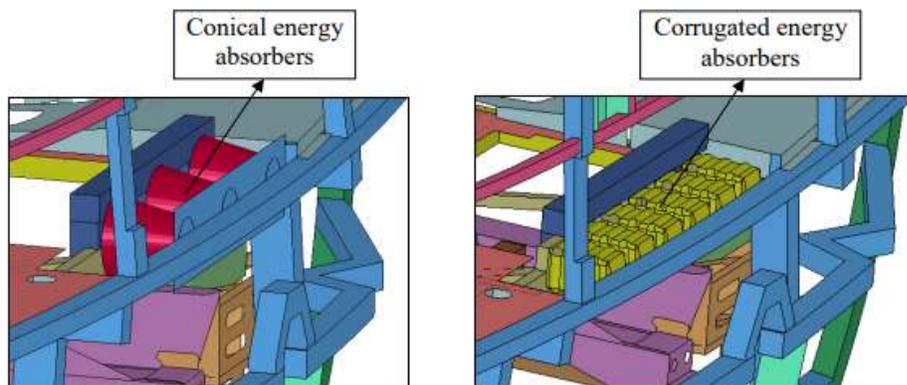


Figura 11-2: Elementos de deformación programada en parachoques
Fuente: (Cerit & Guler, 2010)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El objetivo principal de nuestra investigación es la fabricación y caracterización de espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas con poro abierto mediante el método de infiltración en preformas solubles. Para ello se ha analizado la viabilidad del método comparándolo con otros.

3.1. Análisis de viabilidad del método de infiltración para el proceso de fabricación

Para el análisis de viabilidad de nuestro estudio, se analizó los costos, la accesibilidad a la tecnología para la fabricación de espumas, y con el menor costo de inversión, la cual se muestra a continuación en la tabla 1-3.

Tabla 1-3: Viabilidad del proceso de infiltración con relación a otros

PROCESO	TECNOLOGÍA		COSTO DE PROCESO		CALIDAD DE LA ESPUMA		
	FACTIBLE	NO FACTIBLE	ALTO	BAJO	ALTA	MEDIA	BAJA
Inyección de gas en metal fundido (HYDRO/CYMAT)		x	x			x	
Adición de agente espumante al metal fundido (Alporas)	x		x		X		
Infiltración de metal fundido en preformas solubles	x			x		x	
Fundición utilizando como molde un polímero o precursor de cera	x		x		X		
Metalurgia de polvos	x		x			x	

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Como se observa en la tabla anterior el proceso mediante la infiltración en preformas solubles es el más factible por la accesibilidad de los materiales y con un costo aceptable.

3.2. Diagrama de flujo de la metodología experimental

La metodología experimental para la fabricación se basó en el trabajo de (Elizondo Luna, Barari, Woolley, & Russell, 2014), para la preparación de la muestra y equipos necesarios. Para ellos se ha

considerado el diagrama de flujo de todo el proceso de la investigación como lo podemos observar a continuación en la figura.

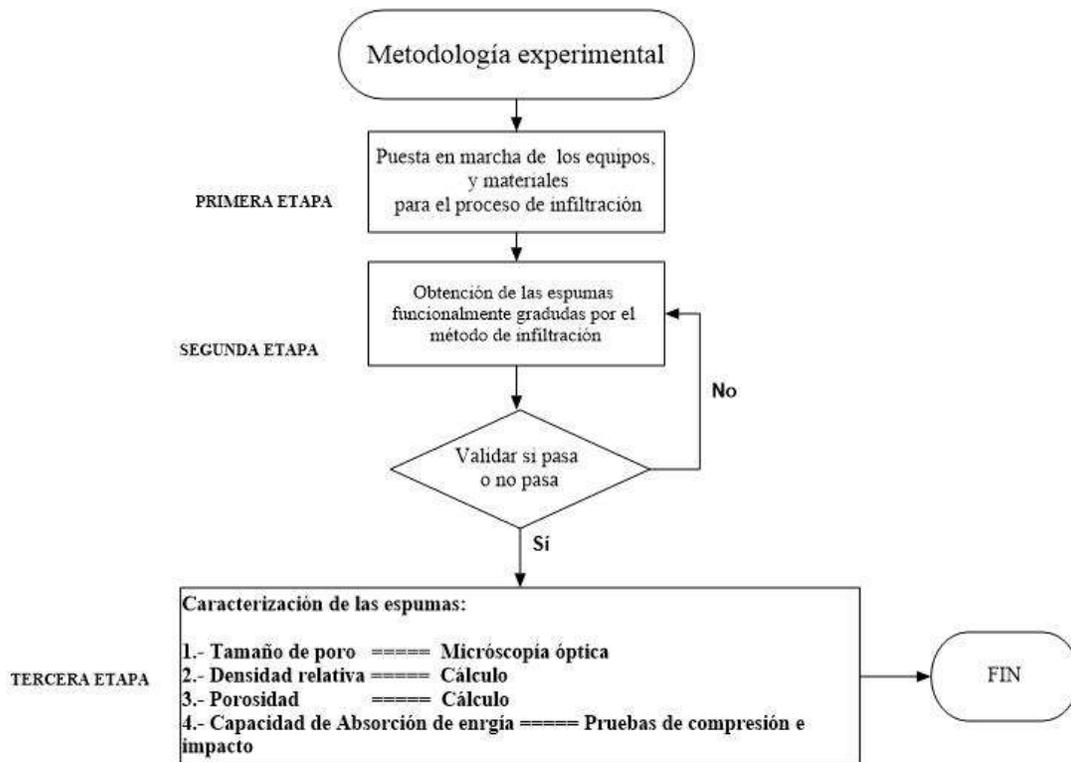


Figura. 1-3: Diagrama de flujo para la metodología experimental
Realizado por: José Rodríguez, 2021

3.3. Materiales y equipos empleados

3.3.1. Preforma soluble

Como material para la preforma soluble en agua, a utilizar es el óxido de sodio (Na_2O), mismo que será tamizado de acuerdo al tamaño de poro que se desee obtener. Para nuestra investigación utilizaremos tamaños (3, 5 y 7 mm). A continuación, presentamos las características del óxido de sodio.

Tabla 2-3: Propiedades del óxido de sodio

Fórmula	Na_2O
Peso molecular	61.97 gr/mol
Apariencia	Yellow crystalline solid
Punto de fusión	1 132°C
Punto de ebullición	1950 °C

Densidad	2.27 gr/cm ³
Solubilidad en H ₂ O	SI

Fuente: (Diaz, 2020)



Figura. 2-3: Preforma de óxido sodio
Realizado por: José Rodríguez, 2021

3.3.2. *Metal base para la infiltración*

El aluminio es un material excelente para la infiltración mediante este método, tanto por sus características físicas y mecánicas. Con un punto de fusión aproximado de 660°C que es relativamente menor al del óxido de sodio con 1132°C, lo que permite su infiltración a través de la preforma para posteriormente ser disuelto.

3.3.3. *Horno para fundir el aluminio*

El horno empleado es de tipo crisol el cual permitirá obtener el tocho de aluminio o barra cilíndrica, que posteriormente será mecanizado en un torno para poder introducir en el molde cilíndrico El horno se encuentra en el laboratorio de fundición de la facultad de mecánica.

3.3.4. *Molde cilíndrico para la fundición*

En la figura 3-3, se puede observar el esquema del molde de fundición, el cual consta de un cilindro, una tapa superior (que conecta al sistema de válvulas) y una inferior, cada una con una ranura para acoplarse al cilindro; mismas que serán fijadas mediante pernos para evitar la convección de la temperatura al momento de fundir. (Elizondo Luna, Barari, Woolley, & Russell, 2014)

El molde se fabricará en acero inoxidable, a fin de evitar la corrosión al trabajar a altas temperaturas.

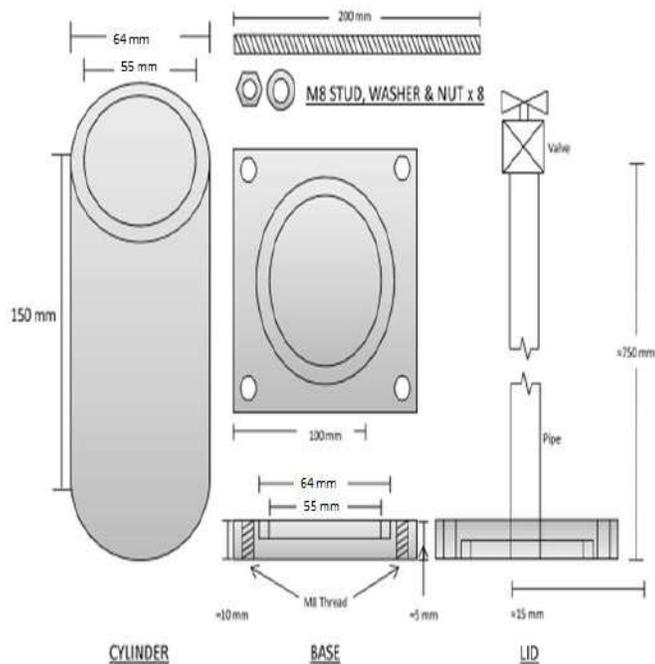


Figura. 3-3: Molde para la fundición de espumas de aluminio
Fuente: (Elizondo Luna, Barari, Woolley, & Russell, 2014)

3.3.5. Horno eléctrico para la fabricación de espumas

Las variables más importantes del proceso son la temperatura y el tiempo de fundición, esto se debe a que el tocho de aluminio debe alcanzar la temperatura adecuada para infiltrar toda la preforma dentro del cilindro de acero inoxidable. Se empleará un horno mufla que posee un control digital de la temperatura.

Tabla 3-3: Características del horno mufla eléctrico

<i>Descripción</i>	<i>Detalle</i>
Dimensiones internas	23x18x18 cm
Dimensiones externas	35x30x30 cm
Material cámara interna	Ladrillos refractarios de alta alúmina (soporta hasta 1400°C)
Temperatura máxima de trabajo	1200°C
Temperatura continua de trabajo	1100°C
Voltaje	220 V
Amperaje	15 A
Potencia	3300 W
Numero de fases	1
Termocupla	Tipo K con revestimiento cerámico
Controlador de temperatura	Model K

Realizado por: José Rodríguez, 2021



Figura. 4-3: Horno mufla eléctrico
Realizado por: José Rodríguez,2021

3.3.6. Bomba de vacío

Para evitar que el aluminio reaccione con el oxígeno, se crea un vacío dentro del molde cilíndrico mediante una bomba, que además está adaptado un vacuómetro para medir el nivel de vacío creado. A continuación, se muestra la tabla xx. con las características de la bomba de vacío



Figura. 5-3: Bomba de vacío
Realizado por: José Rodríguez,2021

Tabla 4-3: Características técnicas de la bomba de vacío

Modelo	QVP-800
Voltaje	110 V/ 60 Hz
Potencia	$\frac{3}{4}$ HP
Vacío ultimo	3×10^{-1} Pa
Capacidad de aceite	600 ml
Desplazamiento de aire libre	8.0 CFM

Realizado por: José Rodríguez,2021

3.3.7. *Tanque de argón*

El argón es un gas noble que no reacciona con otros elementos, por ello se empleará para generar una presión positiva dentro del molde cilíndrico. La capacidad del tanque es de 6 m³.



Figura. 6-3. Tanque de argón
Realizado por: José Rodríguez, 2021

3.3.8. *Grafito*

El grafito como lámina se empleará como aislante térmico y como partículas de polvo para evitar la corrosión del aluminio con las paredes del molde cilíndrico.



Figura. 7-3: Lámina y grafito en polvo
Realizado por: José Rodríguez, 2021

3.3.9. *Tamices*

Para generar preformas de diámetro de 3, 5 y 7 mm, el óxido de sodio será tamizado colocando tamices del rango deseado uno bajo de otro en forma descendente.



Figura. 8-3: Tamices ordenados según diámetro de poro
Realizador por: José Rodríguez, 2021

3.3.10. *Agitador mecánico de tamices*

El agitador mecánico servirá para mover los tamices ordenados, durante cierto periodo para conseguir la cantidad de óxido de sodio necesario para generas las muestras de espuma de aluminio.



Figura. 9-3: Agitador mecánico de tamices
Realizador por: José Rodríguez, 2021

3.3.11. Pirómetro

Para el control de temperatura dentro del molde cilíndrico, se usa el pirómetro, ya que la temperatura no es la misma en el horno que dentro del cilindro, por lo cual se itera programando varios ciclos de temperatura en el horno eléctrico. El pirómetro verificara la temperatura de un molde replica con el fin de conseguir la temperatura adecuada de infiltración.

3.4. Esquema del equipo para el proceso de infiltración

Como observamos en la figura 10-3, el esquema consta de: bomba de vacío, tanque de argón, horno eléctrico, y el sistema de valvulas que permiten el flujo de argón hacia el interior; y de la misma forma extraer el oxígeno dentro de la cámara del cilindro al exterior, con el objeto de crear un ambiente casi ideal para la fundición.

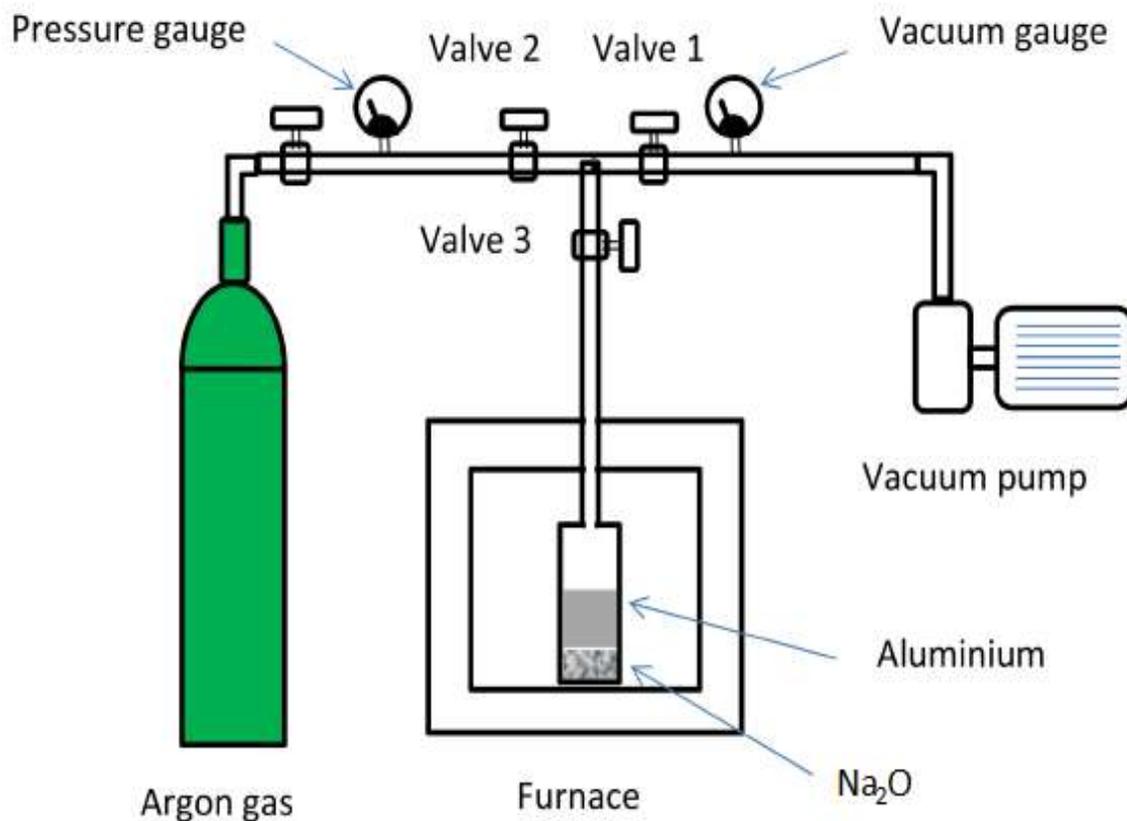


Figura. 10-3: Esquema del equipo para el proceso de infiltración
Fuente: (Elizondo Luna, Barari, Woolley, & Russell, 2014)

3.5. Experimentación

3.5.1. Fabricación del molde cilíndrico

El molde cilíndrico se mecanizó conforme a las dimensiones establecido en el apartado 3.3.4. A continuación presentamos el molde una vez mecanizado.

El molde consta de:

- Cuatro pernos pasantes (a)
- Cilindro (b)
- Cuatro tuercas (c)
- Tapa superior e inferior (d)



Figura. 11-3: Molde cilíndrico
Realizado por: José Rodríguez, 2021

3.5.2. Preparación del tocho de aluminio

Para obtener los tochos de aluminio se siguió los siguientes pasos:

- a. Preparar el molde de arena
- b. Encender el horno crisol y colocar el aluminio hasta que se funda totalmente (Aproximadamente 1h).
- c. Verter el aluminio fundido dentro del molde de arena.
- d. Esperar hasta que se enfríe totalmente y retirar el tocho de aluminio.
- e. Mecanizar el tocho de aluminio a un diámetro de 55 mm.



Figura. 12-3: Tocho de aluminio mecanizado
Realizado por: José Rodríguez, 2021

3.5.3. Preparación del horno

Establecer una temperatura de 340°C en el horno durante aproximadamente 2 horas, tiempo suficiente para precalentarlo de manera adecuada. Además, se debe programar la velocidad del horno a 20°/min, para alcanzar la temperatura óptima para que se pueda infiltrar el aluminio fundido dentro de la preforma. (Abarca, 2017)

3.5.4. Preparación de la preforma

A continuación, detallamos la preparación del óxido de sodio como material para la preforma:

- a. Seleccionar el tamaño de óxido de sodio (3,5 y 7 mm) y la cantidad necesaria para generar las muestras.
- b. Mediante al agitador mecánico se tamiza la cantidad necesaria de acuerdo al tamaño de poro.
- c. Colocar la preforma según el tamaño, en envases de plástico.



Figura. 13-3: Tamizado y envasado del óxido de sodio
Realizado por: José Rodríguez, 2021

3.5.5. Preparación del molde

- Limpiar el molde de cualquier impureza
- Colocar una fina capa de grafito en polvo dentro del cilindro a fin de evitar la adherencia del aluminio fundido.
- Colocar una lámina de grafito en las tapas inferior y superior para generar el aislamiento necesario.

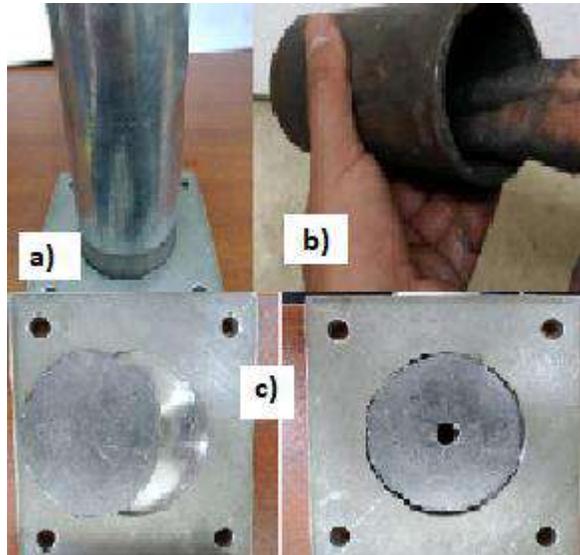


Figura. 14-3: Limpieza y aislamiento del cilindro mediante grafito
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Ensamblar el cilindro mediante los espárragos y la tapa inferior
- Apilar las esferas de óxidos de sodio en forma de pirámide para conseguir la preforma graduada.



Figura. 15-3: Ensamble del cilindro y colocación de la preforma
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- f. Colocar el tocho de aluminio sobre la preforma dentro del molde cilíndrico, y aislar mediante la tapa superior de manera que quede totalmente hermetizado.



Figura. 16-3: Molde totalmente hermetizado
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- g. Precalear el horno mufla. Colocar el molde replica dentro del horno y con ayuda del pirómetro se controla la temperatura hasta que se estabilice. Para conseguir buenos resultados en la infiltración, el cilindro replica debe estabilizarse a una temperatura de 800°C.
- h. Sujetar la parte superior de la tapa con el sistema de válvulas, mediante una tuerca racor.

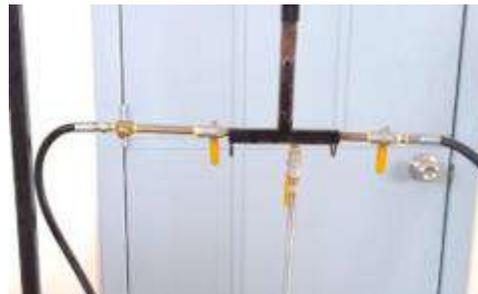


Figura. 17-3: Sujeción del sistema de válvulas al molde.
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- i. Cerrar todas las válvulas del sistema
- j. Abrir la válvula que conduce a la bomba de vacío y al molde (válvula 3).
- k. Encender la bomba de vacío hasta que el indicador del sistema de válvulas marque la presión más baja posible.
- l. Apagar la bomba de vacío.
- m. Si la pérdida de vacío en el sistema es menor que un rango de 50 torr/s durante los primeros 10 segundos luego de apagar la bomba de vacío, el sello es suficientemente bueno para que se produzca la infiltración.
- n. Dejar la válvula de la tapa abierta (válvula 3) para mantener el sistema a presión ambiente y cerrar la válvula de la bomba de vacío (válvula 1).

- o. Sin desmontar el sistema de válvulas, coloque el molde en el horno precalentado y esperar 1

3.5.6. Infiltración

- a. Cerrar las válvulas del sistema.
- b. Abrir la válvula conductora al cilindro de gas argón
- c. Abrir la válvula principal del tanque de gas de argón con una presión de aproximadamente de 3.5 bar. (Elizondo Luna, Barari, Woolley, & Russell, 2014)
- d. De manera rápida, abrir la válvula 3.
- e. Esperar 1 hora, extraer el molde del horno y colocarlo en una superficie metálica (recomendación cobre) con el fin de permitir el flujo de calor se disipe al exterior. En este proceso la presión de enfriamiento la presión variara un poco, por lo que se debe regular a la presión inicial si es necesario.

3.5.7. Extracción de la muestra

- a. Una vez transcurrido unos 30 min aproximadamente, el molde es suficientemente manipulable como para desacoplar la válvula 3 del sistema y destornillar la tapa superior del molde.
- b. Remover el cilindro totalmente y colocarlo en una entenalla de mano.
- c. Mediante un martillo de goma golpear la parte posterior de la espuma para remover la espuma del cilindro.
- d. Mediante una sierra de banda cortar el exceso de aluminio de la parte inferior de la espuma.
- e. Dependiendo de la altura de la espuma requerida, cortar la parte superior de la muestra.
- f. Colocar la muestra en un recipiente con agua con el fin de remover el óxido de sodio. Realizar un cambio periódico de agua cuando su temperatura oscile los 60°C, cada diez minutos.
- g. Una vez removido el óxido de sodio en su totalidad, se procede a secar la muestra con aire del compresor.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

En este apartado se muestra la caracterización estructural y mecánica de las espumas, objetivos de nuestra investigación. En la figura 1-4, se muestra las espumas generadas por el método de infiltración.



Figura. 1-4: Probetas fabricadas por el método de infiltración
Realizado por: José Rodríguez, 2021

4.1.1. Caracterización estructural

Como se mencionó en el capítulo II la caracterización de las espumas se basa en conocer su topología celular, así como su densidad relativa, forma y tamaño de poro.

4.1.1.1. Microestructura y dureza de la espuma de aluminio

- *Microestructura.*

Una vez generada cinco probetas de aluminio, estas fueron sujetas al corte del exceso de material producido por la fundición. Para ello, se recomienda hacerlo con mucho cuidado mediante el uso de una sierra cinta o corte por chorro, y así evitar el daño a la porosidad de las espumas.

Para conocer la microestructura de las espumas de aluminio se ha tomado una muestra y con base en la norma ASTM E3 (Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas) y la ASTM E407 (Ataque químico. Práctica estándar para metales y aleaciones), se preparó la muestra y posteriormente fue llevada al microscopio óptico. Este análisis se realizó en el Laboratorio de Análisis Metalográfico del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero (CFPMC) del H. Gobierno provincial de Tungurahua.

La microestructura fue analizada, ya que la temperatura de fundición es un factor crítico al momento de la fabricación, pudiéndose dar tratamiento térmico durante el ciclo de enfriamiento.



Figura. 2-4: Microscopio metalográfico OLYMPUS
Realizado por: José Rodríguez, 2021

Tabla. 1-4: Datos generales del ensayo metalográfico

Equipo utilizado	Microscopio metalográfico OLYMPUS
Modelo	BX41M-LED
Serie	4A42787
Tiempo de ataque	15 segundos

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Las imágenes tomadas fueron las siguientes:



Figura. 3-4: Microestructura magnificada 100X, Ácido fluorhídrico, 15 seg
Realizado por: José Rodríguez, 2021



Figura. 4-4: Microestructura magnificada a 200X, Ácido fluorhídrico, 15 seg
Realizado por: José Rodríguez, 2021



Figura. 5-4: Microestructura magnificada a 500X, Ácido fluorhídrico, 15 seg
Realizado por: José Rodríguez, 2021



Figura. 6-4: Microestructura magnificada a 1000X, Ácido fluorhídrico, 15 seg
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Dureza Vickers

Para conocer la dureza de las espumas de aluminio, se ha considerado el ensayo de micro dureza Vickers. Para ello hemos seleccionado una probeta, a continuación, se muestra los datos generales del ensayo.

Tabla. 2-4: Datos generales del ensayo de dureza vickers en espuma de aluminio

Método de ensayo	NTE INEN-ISO 6507-1 Materiales metálicos
Tipo de ensayo	Ensayo de dureza vickers
Tipo de ensayo	Cuantitativo
Equipo utilizado	Micro-durómetro FUTURE TECH
Modelo	FM 800
Serie	FMX 8340
Tiempo de aplicación de la fuerza	15 segundos
Fuerza aplicada	9.807 N
Ultima verificación de la máquina	2020/10/28
Patrón Utilizado	FT13159609
Valor	699.3 HV1
Verificación de la Maq. Por medio de patrón	699.1 HV1

Realizado por: José Rodríguez, 2021



Figura. 7-4: Micro-durómetro Future-Tech
Realizado por: José Rodríguez, 2021

El resultado obtenido del ensayo de micro dureza se muestra a continuación en la Tabla 3-4.

Tabla. 3-4: Microdureza VICKERS en espuma de aluminio

Probeta	Identificación	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dureza VICKERS (HV1)		
				Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Dureza
1	EDV-01	23.2	51.7	160.01	159.69	72.6

Realizado por: José Rodríguez

4.1.1.2. Densidad relativa y porosidad

La densidad relativa es uno de los parámetros más importantes para caracterizar una espuma metálica, esta es adimensional y es una comparación de la densidad del metal base con el de la espuma generada. Se midió el diámetro (d), altura (h) con calibrador y el valor de su masa (m) por medio de la balanza digital, como se muestra en la Tabla 4-4; con los datos de la altura y el diámetro se calcula el volumen, a través de la ecuación 2.1 se determina la densidad relativa y con la ecuación 2.2. la porosidad respectivamente. La densidad del aluminio es aproximadamente de 2.7 g/cm³.

Tabla. 4-4: Cálculo de la densidad relativa y porosidad

N° Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm)	Masa (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Densidad Relativa	Porosidad	% Porosidad
1	5.45	6.15	143.47	183.67	1.28	0.47	0.53	52.58
2	5.39	5.40	123.05	129.13	1.05	0.39	0.61	61.13
3	5.06	4.52	90.89	130.59	1.44	0.53	0.47	46.79
4	5.09	5.23	106.42	164.23	1.54	0.57	0.43	42.84
5	5.10	4.32	88.25	132.15	1.50	0.55	0.45	44.54
6	5.45	4.64	107.93	120.21	1.11	0.41	0.59	58.75
7	5.41	5.50	126.43	165.42	1.31	0.48	0.52	51.54
8	5.40	4.80	109.93	150.23	1.37	0.51	0.49	49.39
Promedio						0.49	0.51	50.95
Desv. Estándar						0.06	0.06	6.48

Realizado por: José Rodríguez, 2021

4.1.1.3. Tamaño superficial de poros

Para medir el tamaño de poro, primeramente, se ha seccionado una probeta cilíndrica a la mitad, siendo el corte paralelo al eje longitudinal, a fin de observar el gradiente de la porosidad. El corte se lo realiza teniendo mucho cuidado de dañar la estructura porosa de la muestra. Posteriormente, las regiones seccionadas son llevadas al papel lija (#400, 600 y 1000), hasta obtener un buen acabado para el análisis (ver figura 8-4).



Figura. 8-4: Espuma de celda abierta a) Seccionada b) Pulida
Realizado por: José Rodríguez, 2021

Para el análisis estructural, no es necesario la utilización de un microscopio óptico ya que el tamaño de poro considerado para la preforma fue de 3, 5 y 7 mm, por lo que a escala normal se puede analizar el tamaño de poro, porosidad (2D), poros por pulgada lineal, y espesor de ligamentos. Gracias a la tecnología el proceso se lo hace con ayuda de un software CAD (ImageJ), pero cabe recalcar que este tipo de mediciones son aproximaciones puesto que se las hace en dos dimensiones. A continuación de detalla el proceso para la medición con el programa.

- Tomar la fotografía de las muestras con una regla graduada en milímetros.



Figura. 9-4: Probeta a) y b) para medición de tamaño de poro
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- El gradiente del tamaño de poro se observa notablemente, para lo cual las probetas se subdividieron en tres regiones cada una, para verificar el tamaño de poro, de la siguiente manera.

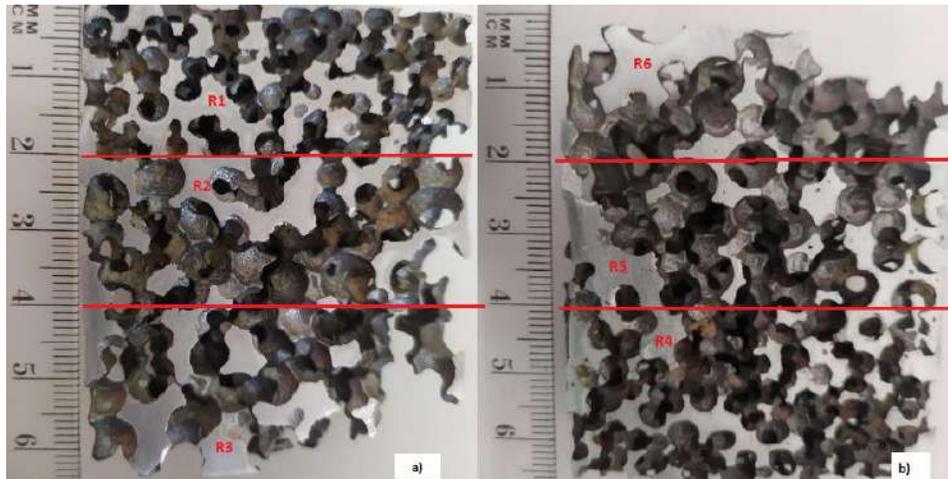


Figura. 10-4: Probetas subdivididas en seis regiones
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Insertar las fotos en el programa ImageJ y establecer la escala según el tamaño en pixeles con la regla graduada. Primeramente, a) insertamos la imagen que deseamos medir el tamaño de poro y trazamos una línea vertical coincidente con la regla graduada, b) ir a la barra de herramientas analyze y dar click en set scale, finalmente c) la media en pixeles corresponderá a la medida de la línea vertical en milímetros de la regla graduada. Así, cualquier medida que hagamos nos dará el resultado en milímetros.

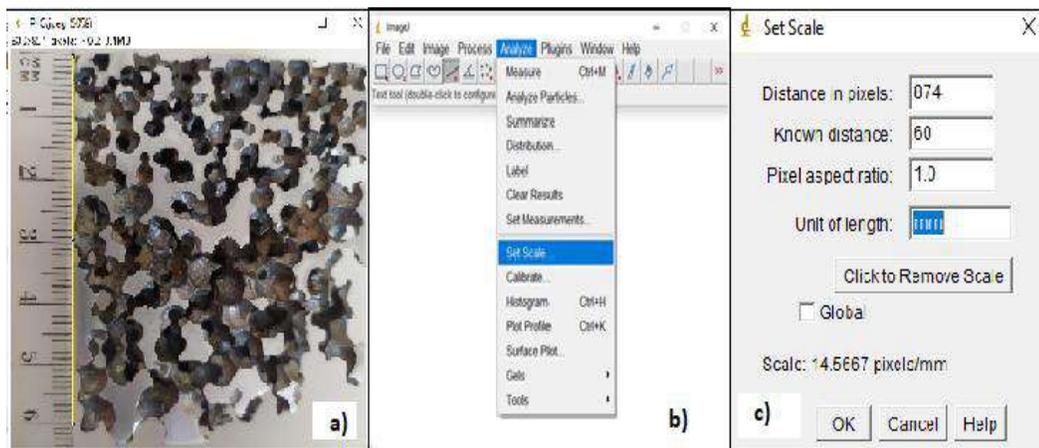


Figura. 11-4: Conversión de pixeles a milímetros de una imagen en ImageJ
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Medir el diámetro de poro de cada región, para ello realizamos 10 mediciones y se tabulan para sacar un promedio.

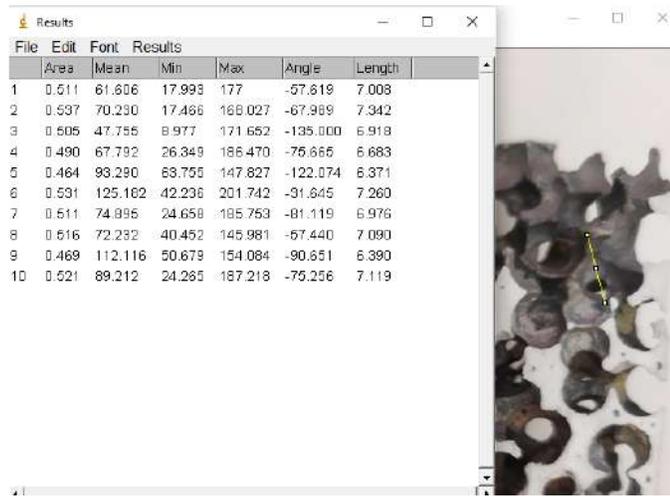


Figura. 12-4: Medida del diámetro de poro graduado según regiones mediante ImageJ
Realizado por: José Rodríguez, 2021

En la tabla 5-4, se muestra el resultado promedio de las mediciones efectuadas en cada región.

Tabla. 5-4: Diámetro promedio de poro en las regiones de la preforma graduada-

N° Medición	Diámetro de poro en milímetros					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
1	3.94	4.76	6.41	3.14	4.69	7.01
2	3.79	5.42	6.59	2.96	5.38	7.34
3	2.39	4.51	5.96	3.08	5.06	6.92
4	3.40	4.25	7.95	3.33	4.80	6.68
5	2.88	5.23	6.74	3.20	5.51	6.37
6	2.54	4.71	7.41	2.86	4.80	7.26
7	3.42	5.37	5.90	2.91	4.99	6.98
8	3.52	6.25	6.38	3.71	4.67	7.09
9	2.49	5.60	6.82	3.10	5.38	6.39
10	2.57	5.25	7.04	3.19	5.17	7.12
Promedio	3.09	5.14	6.72	3.15	5.05	6.92
Desv. Estándar	0.58	0.59	0.63	0.24	0.31	0.34

Realizado por: José Rodríguez, 2021

4.1.1.4. Espesor de ligamento

Para medir el espesor de ligamento, se procese de la misma manera como lo hicimos para el diámetro de poro, con ayuda del programa ImageJ, se mide el espesor de ligamento de los poros correspondientes a cada región ya que la preforma es graduada. Posteriormente, tabulamos los resultados y calculamos el promedio. Cabe recalcar que esta medición es aproximada, pero es de gran ayuda para predecir el colapso de los ligamentos dependiendo el diámetro de poro, y por lo tanto se evidenciara en el ensayo posterior de compresión uniaxial.

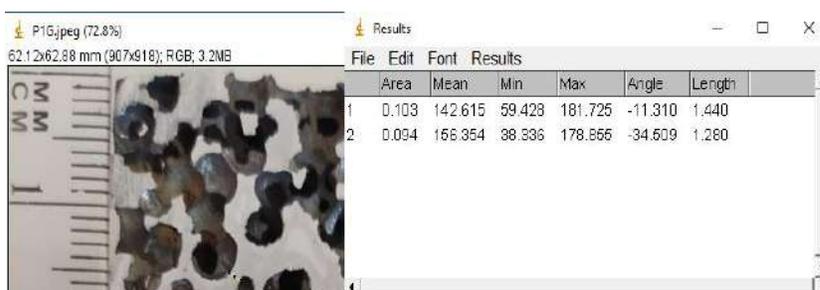


Figura. 13-4: Medición del espesor del ligamento mediante ImageJ
Realizado por: José Rodríguez, 2021

Tabla. 6-4: Espesor de ligamento de poro de la preforma graduada

N° Medición	Espesor de poro en milímetros					
	Sección N° 1			Sección N° 2		
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
1	1.44	1.26	1.84	1.12	1.69	2.59
2	1.28	2.19	1.57	0.84	1.77	2.16
3	1.10	1.61	1.40	0.83	1.29	1.69
4	1.41	1.54	2.00	0.81	1.77	2.31
5	0.57	1.41	1.99	1.06	1.28	1.97
6	0.85	1.42	1.99	0.89	0.98	1.95
7	0.95	1.33	1.55	0.83	1.54	2.37
8	0.38	1.41	1.64	1.08	1.67	2.08
9	0.89	1.23	1.63	0.79	1.67	1.96
10	0.57	1.47	1.31	1.06	1.43	2.29
Promedio	0.94	1.49	1.69	0.93	1.51	2.14
Desv. Estándar	0.37	0.27	0.25	0.13	0.26	0.26

Realizado por: José Rodríguez, 2021

4.1.2. Capacidad de absorción de energía

Los ensayos de compresión e impacto, se realizó en las instalaciones del CENTRO DE FOMENTO PRODUCTIVO METALMECANICO CARROCERO (CFPMC) del H. Gobierno Provincial de Tungurahua ubicado en la ciudad de Ambato.

4.1.2.1. Ensayo de compresión uniaxial

Para el ensayo de compresión uniaxial se consideró dos probetas, mismas que fueron codificadas de acuerdo al laboratorio. El ensayo se efectuó en una maquina universal. A continuación, se presenta las características de la maquina universal.

Tabla. 7-4: Características técnicas de la máquina universal

Equipo	Máquina Universal Metrotest
Modelo	STH-1500 S/C
Serie	8802M001

Realizado por: José Rodríguez, 2021



Figura. 14-4: Maquina Universal Metrotest

Realizado por: José Rodríguez, 2021

En la tabla 8-4, se muestra los datos generales con los que se realizó los ensayos.

Tabla. 8-4: Datos generales del ensayo de compresión

Lugar de ejecución del ensayo	Laboratorio de Resistencia de Materiales
Dirección	Ambato / Catigлата. Av. Toronto y Río de Janeiro
Método de ensayo	No Normalizado

Tipo de ensayo	Cuantitativo
Tipo de Probeta	Cilíndrica
Material	Espuma graduada de aluminio
Numero de probetas	2
Identificación de Grupo	ECM 01
Velocidad de ensayo	10 mm/min
Precarga	1000 N
Fecha de inicio de ensayo	2020/04/22
Fecha de finalización de ensayo	2020/04/22

Realizado por: José Rodríguez, 2021

En las tablas 9-4, 10-4 y 11-4. Se muestra las dimensiones y resultados de fuerzas, esfuerzos y deformación de las probetas sujetas al ensayo de compresión uniaxial.

Tabla. 9-4: Datos previos y dimensiones de las probetas sujetas a compresión

Probeta	Identificación	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones (mm)		Volumen(m ³)
				Diámetro	Longitud	
1	ECM 01-1	19.3	58.3	54.54	61.59	1.439x10 ⁻⁴
2	ECM 01-2	19.4	57.1	53.86	54.01	1.231x10 ⁻⁴
3	ECM-01-3	21.1	61.7	54.45	46.35	1.08x10 ⁻⁴

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Tabla. 10-4: Fuerza, Esfuerzo, Desplazamiento y deformación máxima de las probetas sujetas a compresión

Nº Probeta	Identificación	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo Máximo de Compresión (MPa)	Desplazamiento (mm)	% Deformación máxima
1	ECM 01-1	98 100.01	41.99	7.804	12.67
2	ECM 01-2	40 000.00	17.56	3.776	6.99
3	ECM-01-3	41150.00	17.67	15.173	32.74

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Tabla. 11-4: Fuerza, Esfuerzo, Desplazamiento y deformación última de las probetas sujetas a compresión

N° Probeta	Identificación	Fuerza última (N)	Esfuerzo último de Compresión (MPa)	Desplazamiento último (mm)	% Deformación última
1	ECM 01-1	75 700.01	32.40	20.512	33.30
2	ECM 01-2	37 800.00	16.59	5.712	10.58
3	ECM 01-3	41150.00	17.67	15.173	32.74

Realizado por: José Rodríguez, 2021

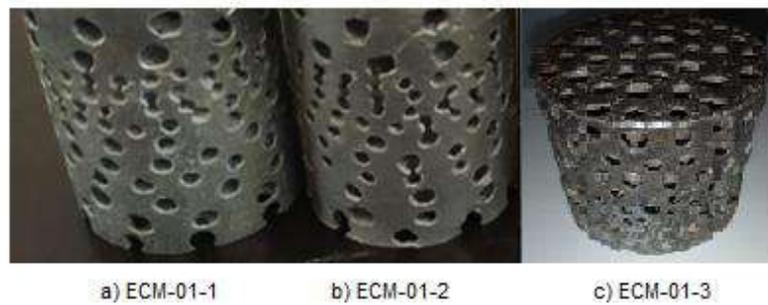


Figura. 15-4: Probetas previas al ensayo de compresión

Realizador por: José Rodríguez, 2021

La velocidad para el ensayo fue de 10 mm/min y una precarga de 1000 N, deformándose de la siguiente manera:

- a. Aplicación de la precarga
- b. Deformación a una velocidad de 10 mm/min
- c. Colapso de los poros

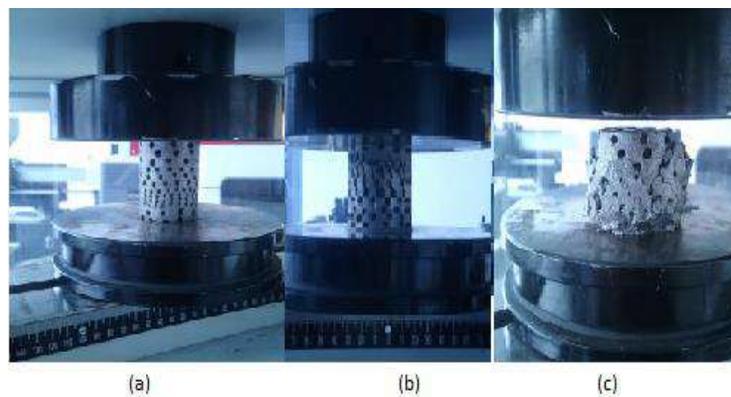


Figura. 16-4: Deformación de las probetas a una velocidad de 10 mm/min

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Mediante sistema de adquisición de datos de la máquina universal se extraen los resultados del ensayo de compresión con objeto de tabular, ya sea en Excel o cualquier otro programa de cálculo. Además, nos proporciona las gráficas de fuerza y esfuerzo aplicado, con el fin de poder apreciar las zonas de compresión presente en las espumas.

- Probeta ECM-01-1

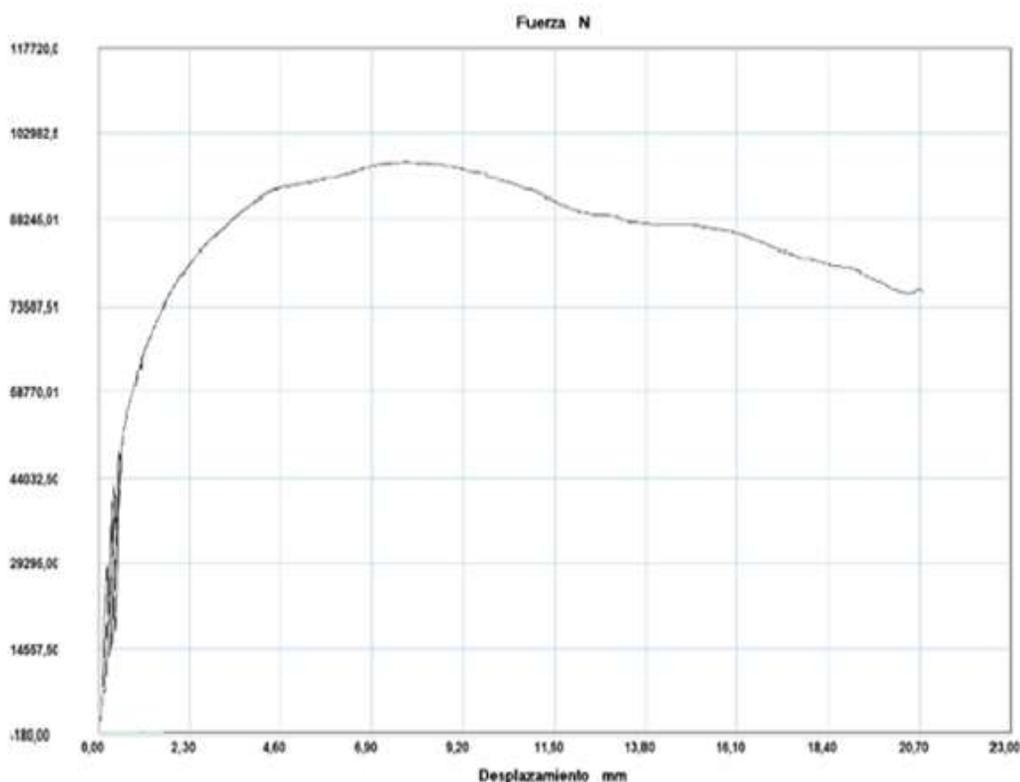


Figura. 17-4: Fuerza vs desplazamiento de la probeta ECM 01-1
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

En la figura 18-4, se presenta los parámetros estadísticos de la probeta ECM-01-1 sujeta a compresión

Probeta	FMax N	CMax MPa	Parámetros		
■ 1	98100,01	41,99	Precarga	=	1000,00 N
Media	98100,010	41,990	Caída %	=	100,00
Mediana	98100,010	41,990	Retorno Automático	=	0,00
Desv. Std	0,000	0,000	Límite Fuerza	=	1500000,00 N
Coef. V.	0,000	0,000	Límite Desplazamiento	=	50,00 mm
Máximo	98100,010	41,990	Stop Ext	=	50,00 mm
Mínimo	98100,010	41,990	Velocidades		
Rango	0,000	0,000	Precarga	=	10,00 mm/min
CPK	0,000	0,000	Ensayo	=	10,00 mm/min
+3 Sigma	98100,010	41,990	Retorno	=	50,00 mm/min
-3 Sigma	98100,010	41,990	Posicionamiento	=	50,00 mm/min

Figura. 18-4: Parámetros estadísticos de la probeta ECM-01-1 sujeta a compresión
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

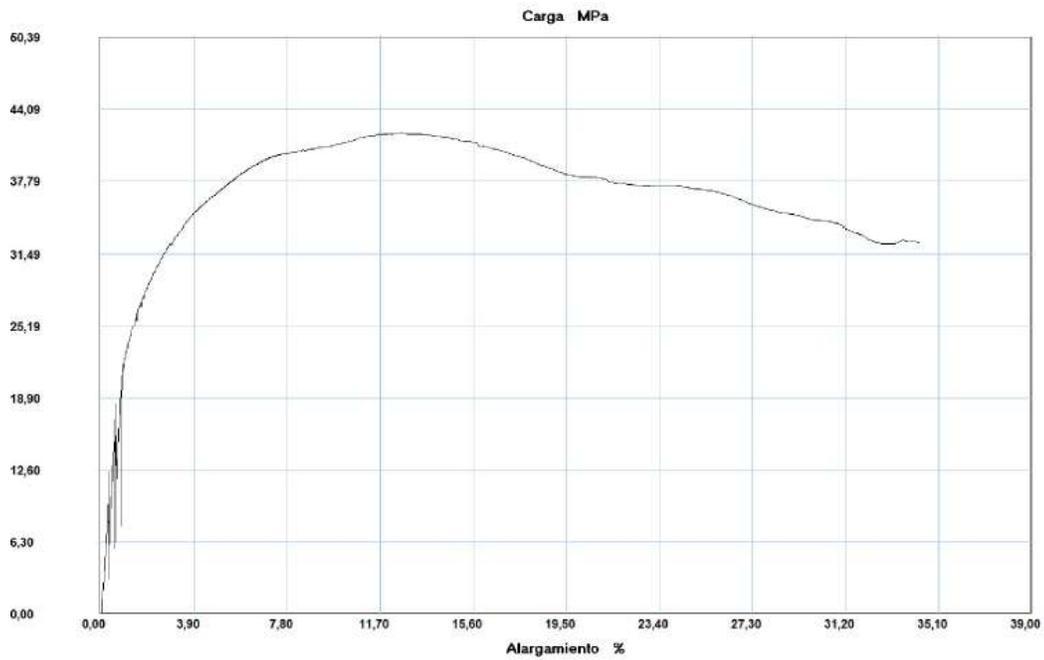


Figura. 19-4: Gráfica de la Carga vs % de desplazamiento de la probeta ECM 01-1
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Probeta ECM-01-2

En las **figuras 20-4, 21-4 y 22-4**, se muestra las gráficas y datos estadísticos para la probeta ECM 01-2 sujeta a compresión

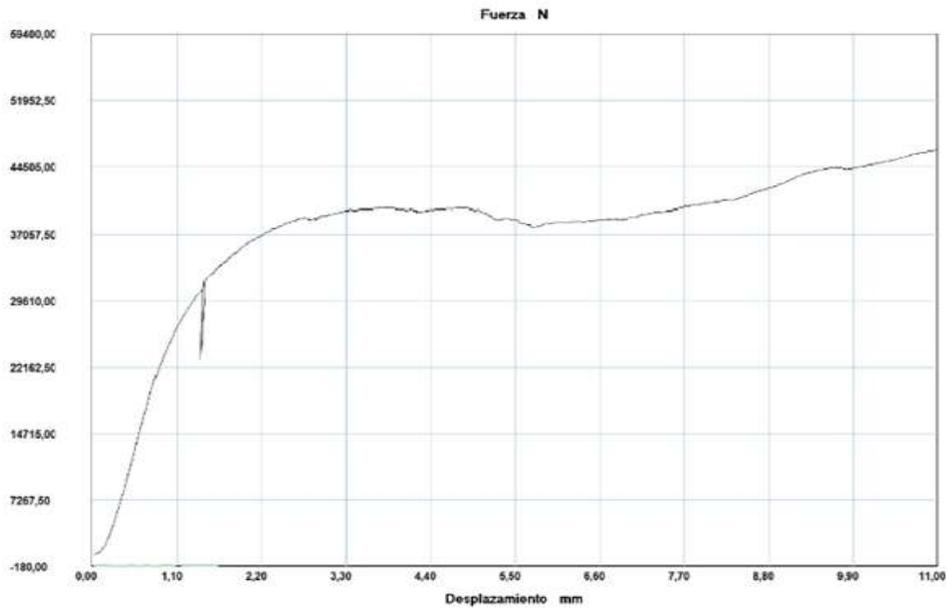


Figura. 20-4: Fuerza vs desplazamiento de la probeta ECM 01-2
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

Probeta	FMáx N	CMáx MPa	Parámetros			
■ 2	40000,00	17,56	Precarga	=	1000,00	N
			Caida %	=	100,00	
			Retorno Automatico	=	0,00	
Media	40000,000	17,556	Limite Fuerza	=	150000,00	N
Mediana	40000,000	17,556	Limite Desplazamiento	=	50,00	mm
Desv. Std	0,000	0,000	Stop Ext	=	50,00	mm
Coef. V.	0,000	0,000	Velocidades			
Máximo	40000,000	17,556	Precarga	=	10,00	mm/min
Mínimo	40000,000	17,556	Ensayo	=	10,00	mm/min
Rango	0,000	0,000	Retorno	=	50,00	mm/min
CPK	0,000	0,000	Posicionamiento	=	50,00	mm/min
+3 Sigma	40000,000	17,556				
-3 Sigma	40000,000	17,556				

Figura. 21-4: Parámetros estadísticos de la probeta ECM-01-2 sujeta a compresión
Realizado por: José Rodríguez, 2021

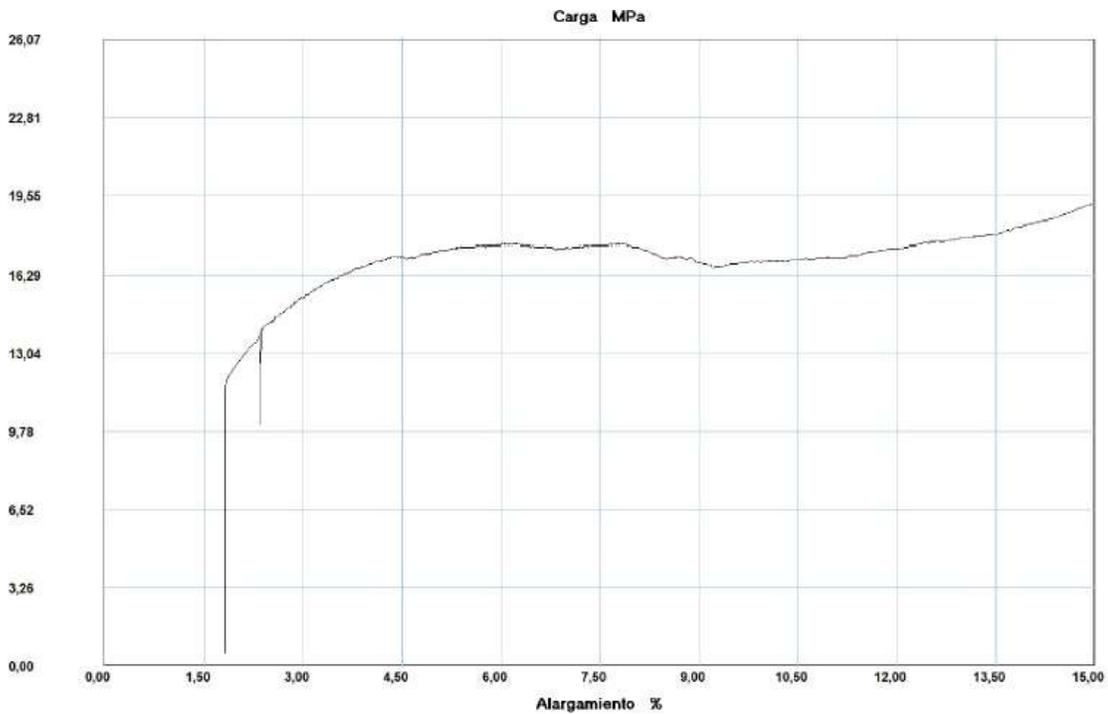


Figura. 22-4: Gráfica de la Carga vs % de desplazamiento de la probeta ECM 01-2
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Probeta ECM-01-3

En las **figuras 19-4, 20-4 y 21-4**, se muestra las gráficas y datos estadísticos para la probeta ECM 01-2 sujeta a compresión

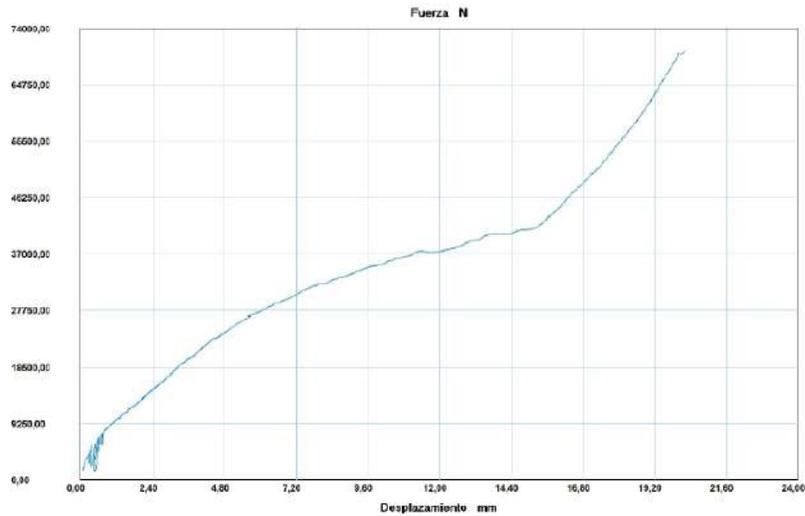


Figura. 23-4: Fuerza vs desplazamiento de la probeta ECM 01-3
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

Probeta	FRot N	CRot MPa
■ 2	41150,00	17,67
Media	41150,000	17,672
Mediana	41150,000	17,672
Desv. Std	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000
Máximo	41150,000	17,672
Mínimo	41150,000	17,672
Rango	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000
+3 Sigma	41150,000	17,672
-3 Sigma	41150,000	17,672

Figura. 24-4: Parámetros estadísticos de la probeta ECM-01-3 sujeta a compresión
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

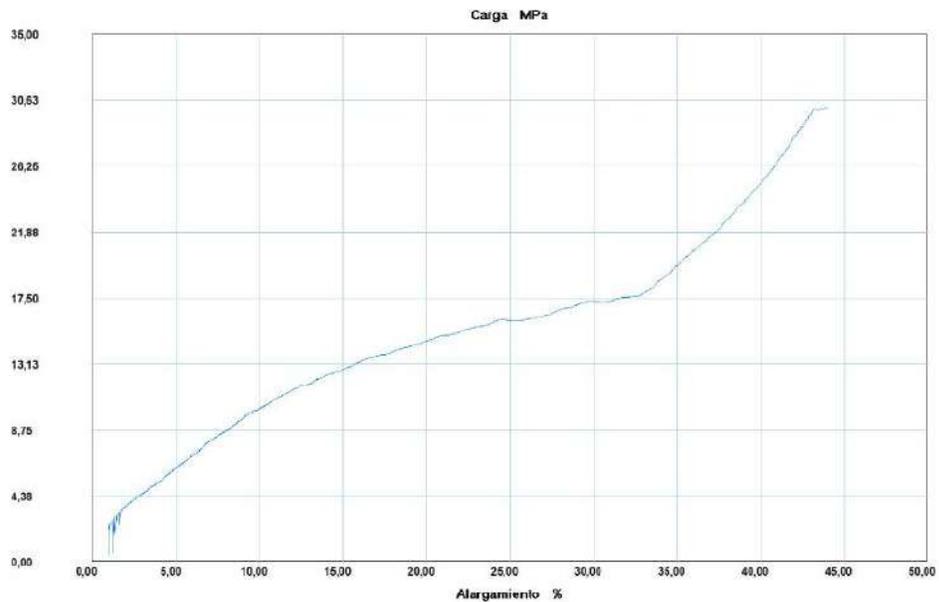


Figura. 25-4: Gráfica de la Carga vs % de desplazamiento de la probeta ECM 01-3
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

4.1.2.2. Cálculo teórico de la capacidad de absorción mediante el ensayo de compresión

Para el cálculo teórico, primeramente, trazamos una nube de puntos en Excel de las **Figura 19-4, 22-4 y 25-4** (Esfuerzo-deformación) del ensayo de compresión tanto de las probetas ECM-01-1 y ECM-01-2 y EMC-01-3, gracias a los datos proporcionados por la máquina universal.

La máquina nos proporciona datos de fuerza, desplazamiento, porcentaje de deformación y tiempo. Por lo que es necesario calcular el esfuerzo simplemente con la ecuación $\sigma = F/A$. y representar gráficamente en Excel como se muestra en la figura 26-4, de la misma manera para poder calcular la energía absorbida por unidad de volumen (E_v), se necesita obtener la curva característica, con el fin de integrar dicha ecuación.

- **Probeta ECM-01-1**

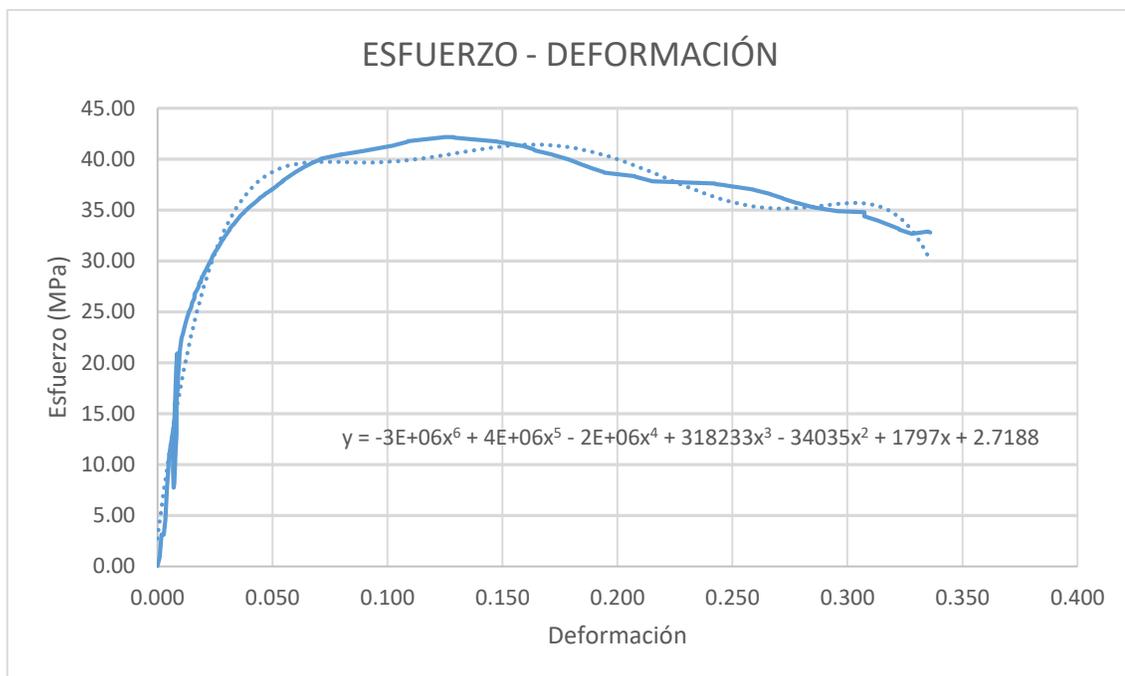


Figura. 26-4: Gráfico esfuerzo-deformación de la probeta ECM-01-1 sujeta a compresión
Realizado por: José Rodríguez, 2021

Mediante la gráfica anterior podemos asumir los límites de integración ($\epsilon_o = 0$ y $\epsilon = 0.34$). de la deformación e integrar la ecuación, de la siguiente manera.

$$E_v = \int_{\epsilon_o}^{\epsilon} \sigma * d\epsilon$$

$$E_v = \int_0^{0.34} (-3 * 10^{12} \epsilon^6 + 4 * 10^{12} \epsilon^5 - 2 * 10^{12} \epsilon^4 + 3 * 10^{11} \epsilon^3 - 3 * 10^{10} \epsilon^2 + 2 * 10^9 \epsilon + 3 * 10^6) d\epsilon$$

$$E_v = 28.677 \times 10^7 \frac{J}{m^3} * 1.439 * 10^{-4} m^3$$

$$E = 41\,266.2 \text{ J}$$

- **Probeta ECM-01-2**



Figura. 27-4: Gráfico esfuerzo-deformación de la probeta EC-01-2 sujeta a compresión
Realizado por: José Rodríguez, 2021

De la misma manera mediante la gráfica anterior podemos asumir los límites de integración ($\epsilon_o = 0.005$ y $\epsilon = 0.28$). de la deformación e integrar la ecuación, de la siguiente manera.

$$E_v = \int_{\epsilon_o}^{\epsilon} \sigma * d\epsilon$$

$$E_v = \int_{0.005}^{0.28} (-5 * 10^{11} \epsilon^6 + 8 * 10^{11} \epsilon^5 - 4 * 10^{11} \epsilon^4 + 1 * 10^{11} \epsilon^3 - 1 * 10^{10} \epsilon^2 + 8 * 10^8 \epsilon - 1 * 10^6) d\epsilon$$

$$E_v = 2.7835 \times 10^7 \frac{J}{m^3} 1.231 * 10^{-4} m^3$$

$$E = 3\,426.49\text{ J}$$

- **Probeta ECM-01-3**

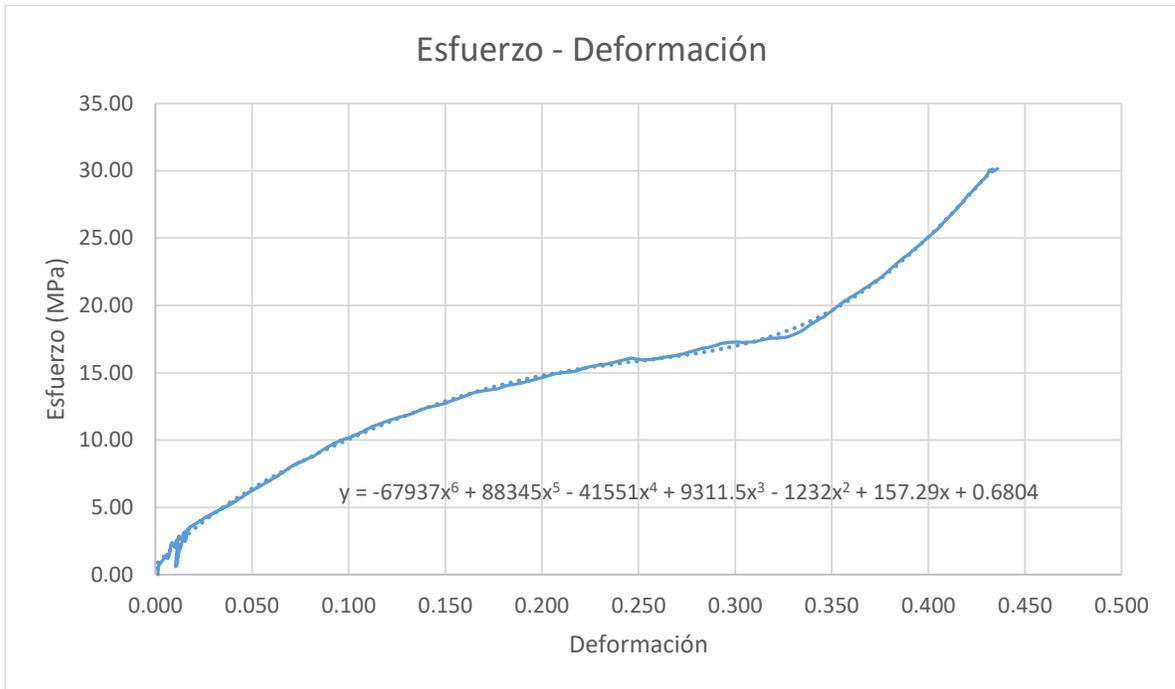


Figura. 28-4: Gráfico esfuerzo-deformación de la probeta EC-01-3 sujeta a compresión
 Realizado por: José Rodríguez, 2021

La gráfica anterior muestra que los límites de la zona de absorción de energía está entre ($\epsilon_0 = 0$ y $\epsilon = 0.32$). de la deformación. Se procede de a integrar mediante la ecuación de energía como se muestra a continuación.

$$E_v = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \sigma * d\epsilon$$

$$E_v = \int_0^{0.32} (-6.79 * 10^{10} \epsilon^6 + 8.83 * 10^{10} \epsilon^5 - 4.15 * 10^{10} \epsilon^4 + 9.31 * 10^9 \epsilon^3 - 1.23 * 10^9 \epsilon^2 + 1.57 * 10^8 \epsilon + 0.68 * 10^6) d\epsilon$$

$$E_v = 4.22 * 10^6 \frac{J}{m^3} 1.08 * 10^{-4} m^3$$

$$E = 519.48\text{ J}$$

4.1.2.3. Ensayo de impacto Charpy

El ensayo de Impacto se lo realizó en el mismo laboratorio del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero (CFPMC), se tomaron cuatro probetas las cuales fueron seccionadas para poder acoplarlas a la máquina de Impacto, y a razón de que no hay una norma que presente en detalle las dimensiones específicas que deben tener las probetas de espumas metálicas para este ensayo. A continuación, en la Tabla 12-4. se detalla las características de la máquina de impacto.

Tabla. 12-4: Especificaciones técnicas de la máquina de Impacto.

Equipo	Máquina de ensayos Charpy PIC 450J
Modelo	PIC 450/C
Serie	M152552AR14

Realizado por: José Rodríguez, 2021



Figura. 29-4: Máquina de ensayos de Impacto Charpy

Realizado por: José Rodríguez, 2021

En la tabla 13-4, se muestra los datos generales con los que se realizó los ensayos de impacto.

Tabla. 13-4: Datos generales para el ensayo de compresión

Lugar de ejecución del ensayo	Laboratorio de Resistencia de Materiales
Dirección	Ambato / Catigлата. Av. Toronto y Río de Janeiro
Método de ensayo	No Normalizado
Tipo de ensayo	Cuantitativo
Tipo de Probeta	Rectangular
Material	Espuma graduada de aluminio
Numero de probetas	4
Identificación de Grupo	EIM 01

Energía utilizada	450 (J)
Fecha de inicio de ensayo	2020/04/22
Fecha de finalización de ensayo	2020/04/22

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Tabla. 14-4: Datos previos y dimensiones de las probetas sujetas a Impacto

Probeta	Identificación	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Sección transversal de la probeta		
				Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)
1	EIM 01-1	21.1	52.4	1.522	1.497	2.278
2	EIM 01-2	21.1	52.4	1.522	1.498	2.325
3	EIM 01-3	21.1	52.4	1.575	1.498	2.359
4	EIM 01-4	21.1	52.4	1.665	1.497	2.493

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Los resultados del ensayo de impacto en cada una de las probetas, se presenta a continuación:

Tabla. 15-4: Propiedades mecánicas de las espumas sujetas a compresión

Probeta	Identificación	Energía Absorbida (J)	Resistencia al Impacto (J/cm ²)	Fractura de Probeta		Probeta
				SI	NO	
1	EIM 01-1	14.45	6.34	X		
2	EIM 01-2	13.41	5.77	X		
3	EIM 01-3	15.15	6.42	X		
4	EIM 01-4	17.33	6.95	X		
Promedio (\bar{x})		15.085	6.371			
Desviación Estándar (S_{n-1})		1.659	0.485			
Coeficiente de Variación (CV)		10.995	7.612			

Realizado por: José Rodríguez, 2021

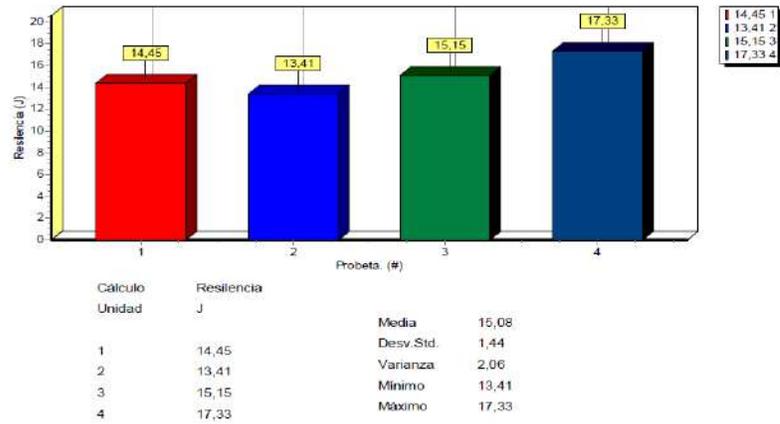


Figura. 30-4: Gráfico de barras de la energía de impacto
Realizado por: José Rodríguez, 2021

4.1.2.4. Ensayo dinámico de impacto

Este tipo de ensayo se realizó gracias al apoyo del Grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH, que mediante el diseño de una máquina de prueba para aplicaciones automotrices se pudo dar efecto los ensayos a nuestras probetas.

Como absorbedores de impacto las espumas son empleadas como refuerzo de parachoques que van acoplados a la estructura de los vehículos y a través del ensayo dinámico se pretende simular el choque directo de una masa de 380 kg que impacta directamente a una probeta de espuma de aluminio acoplada a la máquina. En la figura 31-4 se muestra la máquina para ensayo de impacto en aplicaciones automotrices.



Figura. 31-4: Máquina de ensayo dinámico de impacto
Realizado por: José Rodríguez, 2021

A continuación, se describe la serie de pasos efectuar el ensayo dinámico:

- Primeramente, se realizó un acople con el fin de sujetar la probeta al punto centro de impacto de la máquina en base a las dimensiones del péndulo, como podemos apreciar en la figura 32-4.



Figura. 32-4: Construcción de acople para sujetar la probeta
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Luego, se procedió a montar el acople a la máquina de manera que la probeta se encuentre en la posición centro de impacto.



Figura. 33-4: ensamble del acople a la máquina de impacto dinámico
Realizado por: José Rodríguez, 2021

Cabe recalcar que este tipo de ensayo no está normalizado por lo que, después de varios intentos prueba-error al variar el ángulo de caída y la masa del péndulo; se consideró simplemente la masa

con que fue diseñado (380 Kg) y un ángulo de abertura de 25-30°, a fin de lograr que absorba la mayor cantidad de energía durante el impacto y evitar que se produzca la destrucción total de la probeta por exceso de peso del péndulo.

- Antes del ensayo, se tomó las dimensiones de cada probeta para su posterior análisis.

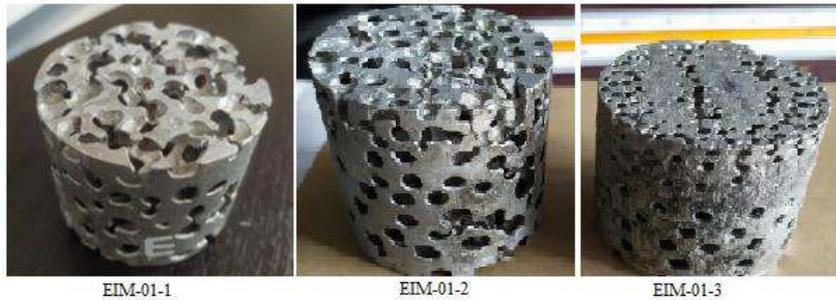


Figura. 34-4: Probetas antes del ensayo de impacto dinámico
Realizado por: José Rodríguez, 2021

- Finalmente, mediante un teclé manual se elevó el péndulo a un ángulo deseado y a través de un sistema de adquisición de datos se obtuvo los resultados del ensayo (tiempo, ángulo y energía potencial).



Figura. 35-4: A) Sistema de adquisición B) Sujeción de la probeta C) Elevación del péndulo
Realizado por: José Rodríguez., 2021

Para poder calcular la energía que absorbida por la probeta se grabó el impacto a cámara lenta y así establecer el ángulo final aproximado que alcanza la masa del péndulo luego del impacto. El cálculo de la energía absorbida se procede de la siguiente manera.

- *La energía potencial del péndulo antes del impacto*

$$U_1 = W * R (1 - \cos \alpha)$$

Dónde:

U_1 =energía inicial del péndulo

W =peso del péndulo

R =Distancia desde el centro de gravedad del péndulo al eje de rotación

- Energía después del impacto

$$U_2 = W * R (1 - \cos \beta)$$

- Energía absorbida por la probeta

$$U_a = U_1 - U_2$$

$$U_a = W * R (\cos \alpha - \cos \beta)$$

A continuación, se presenta el diagrama para el ensayo de impacto.

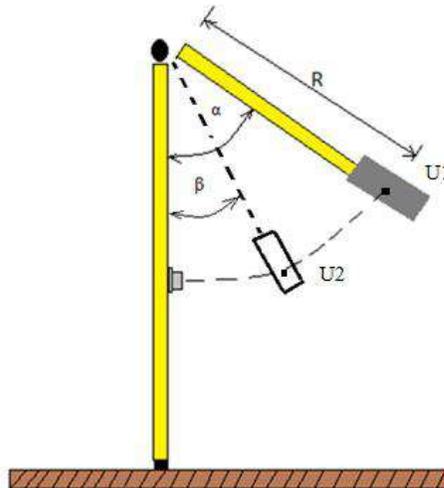


Figura. 36-4: Diagrama para el ensayo de impacto dinámico
Realizado por: José Rodríguez., 2021

En la figura 37-4, se muestra la probeta luego del ensayo de impacto.



Figura. 37-4: Probetas posterior al ensayo de impacto dinámico
Realizado por: José Rodríguez, 2021

Las dimensiones de las probetas antes y después del ensayo se muestra en la tabla 16-4, así como los resultados del porcentaje de deformación y la cantidad de energía absorbida.

Tabla. 16-4: Resultados del ensayo de impacto dinámico

N° Probeta	D (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Deformación Porcentual (%)	α (°)	β (°)	U_1 (J)	U_2 (J)	U_a (J)
EIM-01-1	51.00	43.20	38.00	12.04	25.00	17.21	1063.39	592.85	470.54
EIM-01-2	54.00	55.20	40.00	27.27	30.00	16.02	1769.43	514.08	1255.35
EIM-01-3	54.10	48.00	35.00	27.08	30.00	16.1	1769.43	525.81	1243.62

Realizado por: José Rodríguez, 2021

A continuación, se muestra las curvas de la energía absorbida en función del tiempo.

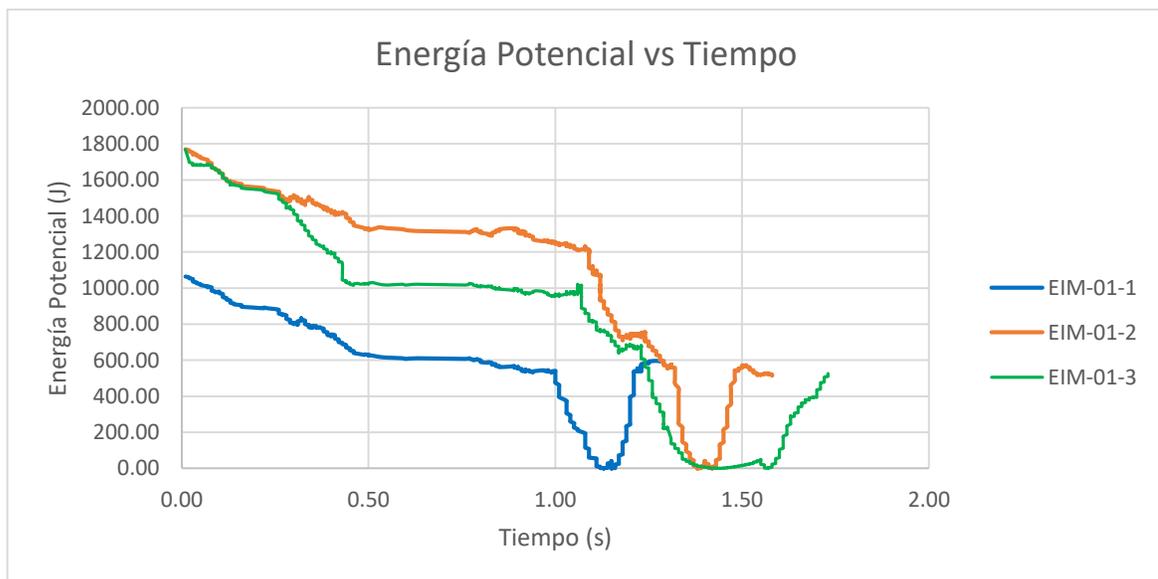


Figura. 38-4: Energía absorbida en función del tiempo
Realizado por: José Rodríguez, 2021

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Caracterización estructural

4.2.1.1. Metalografía

Se hizo un análisis metalográfico a una probeta de espuma de aluminio, la cual fue atacada con ácido fluorhídrico durante 15 segundos, se tomó fotografías a 100x, 200x, 500x y 1000x, con el objeto de ver la microestructura resultante luego de la obtención de la espuma. Esta presenta hojuelas aciculares características del aluminio que se evidencia de mejor manera a una ampliación de 1000x. También se puede observar pocas imperfecciones e la fundición, esto se debe al proceso de obtención el cual depende directamente de la temperatura a la cual se fundió el aluminio (600 a 700°C), el cual fue controlado específicamente con el pirómetro.

4.2.1.2. Dureza

El ensayo de dureza, se realizó en la misma probeta a la cual se hizo la micrografía. Se hizo un ensayo de dureza Vickers, ya que este método se lo puede hacer en espesores de pared mucho más pequeños que los del ensayo Brinell (hasta 0.2 mm). Por otro lado, este método es el más sensible para realizar el cálculo de dureza de los materiales. La dureza normal del aluminio relativamente puro al 99.7 % oscila de 20 a 30 HB, los valores de dureza Brinell y Vickers proporcionan valores muy parecidos hasta un valor de 300 HB. (Ingemeconica, 2020)

Como se puede apreciar en la tabla 3-4. La espuma de aluminio tiene una dureza de 72.6 HV, esto es superior a la dureza nominal, lo que se puede deducir, es que se produjo un tratamiento térmico ya sea por el aumento o disminución de la temperatura de fusión del aluminio. Cabe recalcar que esta temperatura es difícil de controlar con el método de obtención empleado.

ALEACION	CARGA ROTURA	LÍMITE ELÁSTICO	ALARGAMIENTO	DUREZA BRINELL
NORMAS A.A.	Rm - N/mm ²	Rp 0.2 - N/mm ²	A 5,65 %	HB
7073- T73B1	440	280	8	140
7075- T6 / T6B1	470	400	8	130
2024- T6	428	318	8	128
7020- T6 / T6B1	380	290	10	120
2024- T3	400	270	8	120
2007- T3	340	220	8	118
2014- T4	430	278	18	110
2007- T4	330	210	7	110
2017- T4	380	280	12	108
2011- T3	360	288	18	100
6061- T6 / T6B1	190	110	18	95
6062- T6 / T6B1	295	280	8	95
2030- T4	330	210	7	95
6060- T6	190	180	8	88
6062- H34	198	90	30	70
6063- O / H111	270	110	18	70

Figura. 39-4: Dureza del aluminio
Fuente: (Ingemeconica, 2020)

4.2.1.3. Densidad relativa y porosidad

La densidad relativa y la porosidad son uno de los parámetros más importantes a calcular en las espumas metálicas. Para nuestro caso se ha considerado cinco probetas, mismas que en promedio tienen una densidad relativa de 0.504, con una desviación estándar de 0.074, que se puede evidenciar en la tabla 4-4. Esto quiere decir que los resultados de la densidad relativa son semejantes en todas las probetas con un 7,4. % de desviación alrededor de la media y también está dentro de los valores obtenidos de otros trabajos de investigación

El promedio del porcentaje de porosidad de las cinco muestras de 49.58%, con una desviación estándar del 7.43%, siendo este valor menor al de otros trabajos, pero esto se debe al tamaño de la preforma empleado.

4.2.1.4. Tamaño de poro

Como se puede evidenciar en las figuras 8-4 y 9-4 respectivamente. El gradiente de porosidad es apreciable, también se puede deducir que la forma del poro es esférico regular. Como resultado de la medición del diámetro de poro de cada región, fue en promedio de 3.09 mm, 5.14 mm y 6.72 mm para la primera probeta. De la misma manera para la segunda probeta en promedio de diez mediciones fueron de 3.15mm, 5.05 mm y 6.92 mm. (ver tabla 5-4). Cabe recalcar que dichas mediciones son aproximadas siendo evidentes al valor de las preformas de óxido de sodio empleadas.

4.2.2. Caracterización mecánica

Debido al enfoque de nuestra tesis, es la obtención de espumas metálicas y su aplicación en absorbedores de impacto, es necesario realizar pruebas mecánicas de compresión e impacto con el fin de conocer la capacidad de absorción y compararlas con estudios previos.

4.2.2.1. Ensayo de compresión

La tensión plateau de las dos muestras analizadas, se encuentran dentro del rango de resultados presentados por otros autores, como podemos observar en la Figura 18-4 de la muestra ECM-01-1, se puede decir que oscila entre 16 MPa y de la probeta ECM-01-2 oscila entre los 30MPa. Además se puede evidenciar que tiene una región elástica que luego desciende hasta la región plateau. En la tabla 17-4 se muestra los valores estimados del Módulo de Young (E), esfuerzo máximo de compresión (σ_c), meseta de la tensión plateau (σ_{pl}).

A continuación, en la Figura 27-4. se muestra la grafica del esfuerzo a compresión uniaxial vs la deformacion unitaria de las dos probetas. En la misma se puede apreciar que existe un aumento significativo del esfuerzo en la probeta EMC-01-1, así mismo sucede con los valores de la deformación unitaria. Esto podría deberse a la temperatura de fusión del aluminio, ya que es factor critico y resulta difícil controlar dentro del cilindro molde de la espuma metálica. También se puede asumir que el tiempo de infiltración no fue el adecuado o no infiltró toda la preforma, ocasionando vacíos que provocan una compactación mas rápida de los poros al someterlos al ensayo de compresión.

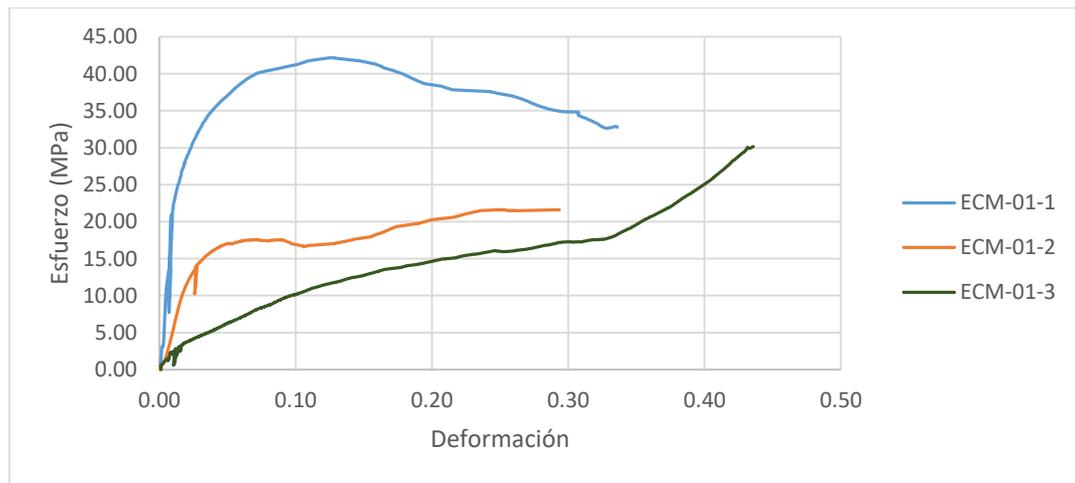


Figura. 40-4: Esfuerzo de compresión vs Deformación unitaria (Probeta EMC-01-1 y EMC-01-2)
Realizado por: José Rodríguez, 2021

Para el cálculo del módulo de Young, se analiza la zona elástica de cada una de las curvas correspondientes a las probetas mostrada en la figura 40-4. Se traza una nube de puntos de dicha zona con tendencia lineal y finalmente se muestra la ecuación ya que la pendiente representa en valor del modulo de Young.

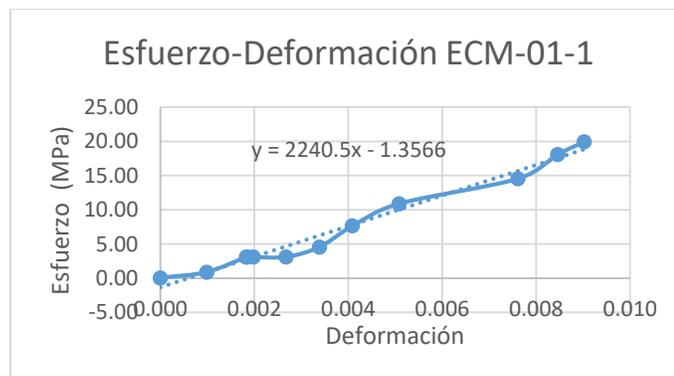


Figura. 41-4: Cálculo del módulo de young probeta EMC-01-1
Realizado por: José Rodríguez, 2021

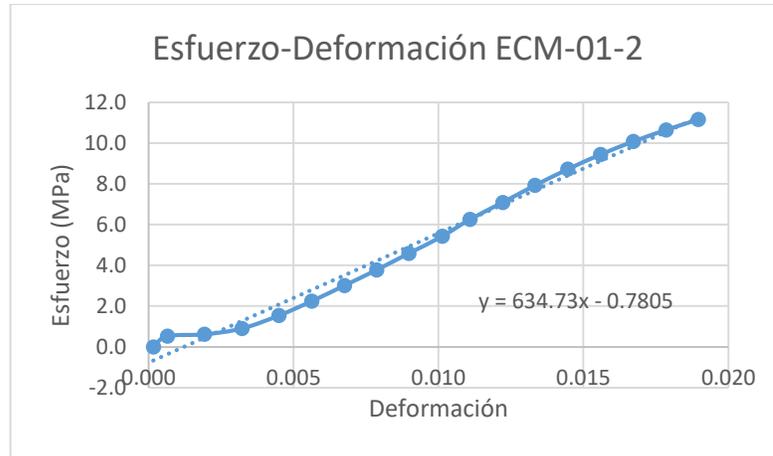


Figura. 42-4: Cálculo del módulo de Young de la probeta EMC-01-2
Realizado por: José Rodríguez, 2021

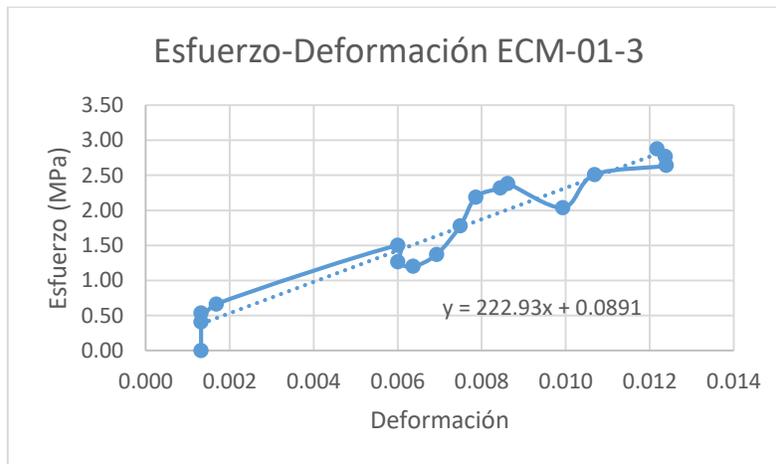


Figura. 43-4: Cálculo del módulo de Young de la probeta EMC-01-2
Realizado por: José Rodríguez, 2021

En la figura 41-4, 42-4 y 43-4, se aprecia la pendiente de las rectas generadas de la zona elástica, siendo estas de 2, 06 y 0.2 GPa respectivamente. En la Tabla 17-4. se muestra en resumen los valores cuasiestáticos al someter las probetas al ensayo de compresión.

Tabla. 17-4: Propiedades mecánicas de las espumas sujetas a compresión

Probeta	E (GPa)	σ_c (MPa)	σ_{pl} (MPa)	ϵ (%)
ECM-01-1	2	41.99	30	34
ECM-01-2	0.6	17.56	16	29
ECM-01-3	0.2	17.67	16.25	35

Realizado por: José Rodríguez

Como se puede observar los valores de las propiedades mecánicas de las espumas sujetas a compresión en la probeta ECM-01-1 son elevadas, esto se debe al efecto del incremento del material

involucrado en el colapso plástico para las muestras mas densas, y los posibles efectos de endurecimiento por deformación plástica del aluminio. (Cárcel, 2015)

En la Figura 44-4, se muestra varias curvas de tension-deformación para espumas de aluminio con diferentes densidades relativas, en nuestro caso la densidad relativa en promedio fue de $\rho_r = 0.504$ con una desviación estandar de 0.074. que que nos permite asumir que estamos dentro del rango de las espumas con una densidad relativa de 0.49.

Por otro lado, el aumento de dureza y el valor de las propiedades mecánicas se debe al tamaño de grano de óxido de sodio, el cual es mayor al de trabajos similares. El espesor de ligamento es relativamente mayor al aumentar el tamaño de grano de la preforma, esto genera un aumento en la resistencia mecánica de las espumas. En la Tabla 6-4. Se muestra el espesor de ligamento el cual oscila entre 0.9 a 2.2 mm para granulos de 3,5 y 7mm.

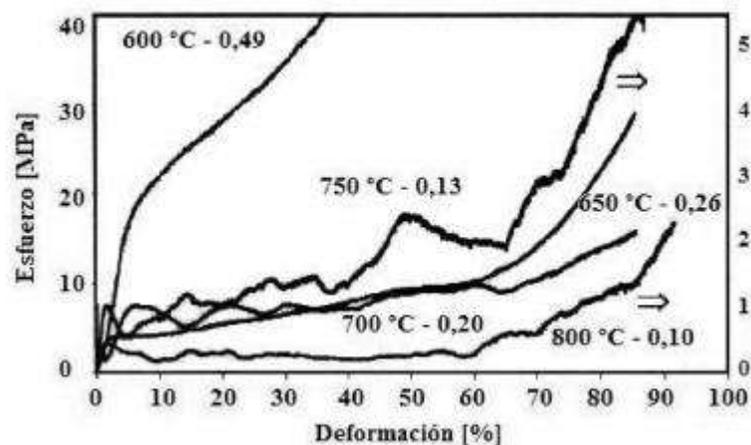


Figura. 44-4: Curva Esfuerzo-deformación de espumas de aluminio con diferentes densidades relativas

Fuente: (Gutiérrez & Oñoro, 2008)

4.2.2.2. Ensayo de impacto

En la tabla 15-4. Se presenta en resumen los valores de la energía de impacto generada por las cuatro probetas ensayadas mediante el ensayo Charpy. En promedio, la energía absorbida fue de 15.085 J, cabe recalcar que para el ensayo de impacto por charpy no está establecido en alguna norma. Por lo que en nuestro trabajo solamente las probetas fueron cortadas a fin de que estas ingresen en el alojamiento para proceder a ensayar. El resultado de la energía de absorbida es baja ya que las

probetas poseen una sección menor con puntos críticos, siendo la porosidad misma que ocasiona que la energía sea menor.

4.2.2.3. Ensayo de impacto dinámico

El ensayo de impacto, nos permite comparar los resultados con los del ensayo cuasiestático. En tabla 18-4 se observa que el porcentaje de deformación y energía absorbida en algunos casos es similar, de la misma manera hay variación esto se debe a la estructura porosa de cada probeta.

Tabla. 18-4: Resultados del ensayo de compresión e impacto

Tipo de ensayo	Probeta	D (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Porcentaje de deformación (%)	Energía Absorbida (J)
Compresión	ECM-01-1	54.54	61.59	41.08	33.30	41 266.2.
	ECM-01-2	53.86	54.01	48.30	10.57	3 426.49
	ECM-01-3	54.45	46.35	31.18	32.74	519.48
Impacto Dinámico	EIM-01-1	51.00	43.20	38.00	12.04	597.00
	EIM-01-2	54.00	55.20	40.00	27.27	1255.35
	EIM-01-3	54.10	48.00	35.00	27.08	1243.62

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Resultado de ensayar las probetas a compresión e impacto se puede observar en la figura 45-4, que la compactación de los poros sucede de menor a mayor diámetro, por lo que se puede intuir que la porosidad menor absorbe la mayor cantidad de energía.



Figura. 45-4: Espumas de aluminio posterior al ensayo de compresión e impacto

Realizado por: José Rodríguez, 2021

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Aplicación de espumas de aluminio funcionalmente graduadas en absorbedores de impacto

En la tabla 15-4. Se presenta en resumen los valores de la energía de impacto generada por las cuatro probetas ensayadas mediante el ensayo Charpy. En promedio, la energía absorbida fue de 15.085 J, cabe recalcar que para el ensayo de impacto por charpy no está establecido en alguna norma. Por lo que en nuestro trabajo solamente las probetas fueron cortadas a fin de que estas ingresen en el alojamiento para proceder a ensayar. El resultado mostrado en nuestra investigación específicamente en el ensayo de impacto es netamente investigativo mas no para emitir o corroborar alguna información ya que no existen datos de este ensayo hecho por otros autores a espumas de aluminio para comparar. (Illescas, 2009)

La severidad de un accidente no está ligada a la velocidad del vehículo antes de la colisión, sino por el cambio de velocidad Δv que el vehículo experimenta y por la rapidez con la que se produce este cambio, es decir, la deceleración. La deceleración viene determinada por la masa y la rigidez de los objetos que colisionan entre sí. (Illescas, 2009)

Para detener el vehículo por completo, el impacto debe disipar toda esta energía. Cuando el objeto golpeado es muy rígido, como una barrera de hormigón, toda la energía debe ser absorbida por el vehículo. Durante la colisión, la deformación continúa hasta que se ha absorbido toda la energía involucrada en el accidente, es decir, hasta que la energía cinética es igual a la energía necesaria para deformar la estructura.

Para ver si nuestras espumas pueden cumplir con su utilización en absorbedores de impacto, vamos a comparar las propiedades mecánicas con un trabajo similar, pero con otro tipo de espumas de aluminio.

Tabla . 1-5: Propiedades mecánicas de las espumas de aluminio funcionalmente graduadas vs alporas 10%

Probeta	Densidad relativa	Porosidad %	E (GPa)	σ_c (MPa)	σ_{pl} (MPa)	ϵ (%)
ECM-01-1	0.474	52.6	2	41.99	30	34
ECM-01-2	0.389	61.10	0.6	17.56	16	29
ECM-01-3	0.48	51.54	0.2	17.67	16.25	35
Alporas 10%	0.1	90	0.17	1.9	2.2	53

Realizado por: José Rodríguez, 2021

Como podemos observar en la Tabla 1-5 las propiedades de las espumas funcionalmente graduadas ECM-01-1, ECM-01-2 y ECM-01-3 superan a las Alporas 10%, aunque como se observa la deformación unitaria de la espuma alporas es mayor, lo que posiblemente posea mayor capacidad de absorción debido a que el porcentaje de porosidad es mayor. Como habíamos discutido en el ensayo de compresión el aumento de las propiedades mecánicas se debe al tamaño del ligamento de los poros, y también al aumento de precipitados que provocan el endurecimiento del material.

Como trabajo futuro sería mejorar el control de temperatura dentro del cilindro durante la fundición de las espumas de aluminio, así como hacer un análisis más riguroso del ensayo de impacto, ya que nuestro país no cuenta con la tecnología necesaria para hacer un Crash Test, que permita medir la eficiencia de nuestras espumas dentro de algún elemento de la estructura del vehículo.

5.2. Costos de fabricación

Los costos que se muestra en la Tabla 2-5, abarcan el costo de los elementos para el ensamble del equipo para la fabricación de las espumas de aluminio, así como la mano de obra y logística que intervinieron en su realización.

Tabla . 2-5: Costos de fabricación

Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Horno mufla para fundición de metales	1	1250	1250
Bomba de vacío	1	275	275
Cilindro de gas argón	1	100	100
molde cilíndrico	1	110	110
Sistema de válvulas	1	100	100
Láminas de grafito		20	20
Grafito en polvo		20	20
Aluminio y Óxido de Sodio		40	40
Accesorios		25	25
Logística		400	400
		Total	\$ 2 340

Realizado por: José Rodríguez, 2021

CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se logró obtener espumas metálicas de aluminio de celda abierta por el método de infiltración en preforma graduada soluble (óxido de sodio) en agua, con tamaño de grano de 3, 5 y 7 mm como se puede observar en la figura 9-4.
- Las espumas obtenidas poseen una densidad relativa en promedio de 0.49, es decir tiene un 50.95% de porosidad. Lo que indica que el porcentaje de porosidad de las espumas generadas es un poco menor al mostrado en otros trabajos. Una de las razones se debe al uso de preforma con diámetros mayor a trabajos similares.
- Con respecto a la caracterización estructural, se ha seccionado a una probeta con el fin de observar y medir el tamaño de poros, mediante el programa Image J. Se midió, el diámetro de poro en seis regiones, siendo en promedio un valor semejante al propuesto inicialmente (3, 5 y 7 mm). Estos valores se muestran en la tabla 5-4. De la misma manera, se midió el espesor de ligamento entre los poros, dando en promedio un espesor de ligamento de 0.94mm, 1.49 mm y 1.69mm para un tamaño de poro de 3, 5 y 7mm respectivamente.
- La curva esfuerzo-deformación del ensayo a compresión muestra cierta variación entre las tres probetas, esto se debe al fenómeno de flotabilidad de la preforma durante la etapa de infiltración, lo que provoca un incremento en el espesor de ligamento y por ende aumenta la resistencia mecánica durante la compactación de las capas de porosidad. En base al ensayo cuasiestático se observa que los primeros ligamentos en colapsar son los correspondientes a los diámetros de menor porosidad, con esto se puede concluir que en las zonas donde se requiera que la deformación ocurra primero debe ir una preforma de diámetro menor a fin de absorber la mayor cantidad de energía posible.
- En base a los valores obtenidos de energía, se puede concluir que en el ensayo de compresión se produce una mejor compactación de los poros que en el ensayo de impacto dinámico. El mayor valor generado de energía fue de 41 266.2 J a compresión en la probeta ECM-01-1, y de 1255.35 J a impacto en la probeta EIM-01-2. Esto nos permite concluir que la energía es mayor a compresión, ya que en el ensayo de impacto el tiempo de contacto entre el impactador y la probeta es mínimo.

RECOMENDACIONES

- Ver un mejor método de control de la temperatura dentro del molde cilíndrico, y evitar posibles efectos de endurecimiento por deformación plástica del aluminio
- Para trabajos futuros, se recomienda ensayar las espumas de aluminio acopladas en elementos de seguridad como parachoques, estribos, etc. Para verificar y validar su eficiencia durante un impacto y así cuantificar la energía absorbida
- Realizar el estudio de la solidificación con el fin de identificar porosidad debido a gases atrapados en las probetas y su incidencia en las propiedades mecánicas de las espumas metálicas de aluminio.
- Realizar mas ensayos de compresión que permitan comprender el comportamiento en base a las curvas de esfuerzo-deformación.
- Reducir el tamaño de porosidad ya que como se observo en los ensayos de compresión cuasiestático las capas de porosidad en colapsar primero fueron las de menor tamaño.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, P. (2017). *Bibdigital*. Obtenido de bibdigital.epn.edu.ec:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17431>
- Amir, H., Ali, H., & Hassan, B. (2012). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306912002671>
- Ashby, Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. (2002). *Espumas Metálicas. Una guía de diseño*. Johannesburg: Butterworth-Heinemann.
- Avila, D., & Murias, D. (16 de 07 de 2016). *Circula Seguro*. Obtenido de Circula Seguro:
<https://www.circulaseguro.com/las-zonas-deformacion-programada-coche-pueden-salvarnos-la-vida/>
- Cárcel, B. (Noviembre de 2015). *Universidad Politécnica de Valencia*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/61298/C%C3%A1rcel%20-%20Efectos%20de%20la%20estructura%20celular%20sobre%20el%20comportamiento%20mec%C3%A1nico%20de%20espumas%20de%20aluminio....pdf?sequence=1>
- Cerit, M., & Guler, M. (02 de 01 de 2010). *International LS-DYNA Users Conference*. Obtenido de International LS-DYNA Users Conference:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Improvement-of-the-Energy-Absorption-Capacity-of-an-Cerit-Guler/b805120ccf23437a631c1082a18e916b15681389>
- Diaz, R. (10 de 08 de 2020). *Lifeder*. Obtenido de Diaz, Rafael: <https://www.lifeder.com/oxido-sodio/>
- Elizondo Luna, E., Barari, F., Woolley, R., & Russell, G. (11 de 12 de 2014). *Jove*. Obtenido de Jove: <https://www.jove.com/v/52268/casting-protocols-for-production-open-cell-aluminum-foams-replication>
- Fernandez, P., Cruz, L. J., & Coletto, J. (2008). Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida. *Revista de Metalurgia*, 540-555. Obtenido de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/142/140>
- Gutiérrez, J. A., & Oñoro, J. (2008). Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. *Revista de Metalurgia*, 457-476. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/44200232_Espumas_de_aluminio_Fabricacion_propiedades_y_aplicaciones/fulltext/0e609c04f0c44a2d53520d1e/Espumas-de-aluminio-Fabricacion-propiedades-y-aplicaciones.pdf
- Hamza, O., Omran, A. M., Atlan, A. A., & Moatasem, M. K. (2017). CHARACTERIZATION OF ALUMINIUM FOAM PRODUCED FROM ALUMINIUM SCRAP BY USING CaCO₃ AS FOAMING AGENT. *Journal of Engineering Sciences*, 448-459.
- Illescas, D. (Octubre de 2009). *creandoconciencia*. Obtenido de creandoconciencia:
<http://creandoconciencia.org.ar/enciclopedia/accidentologia/modelos-fisicos-matematicos/SIMULACION-DE-CHOQUE-FRONTAL.pdf>

- Ingemecanica. (02 de 2020). *Ingemecanica*. Obtenido de Ingemecanica:
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>
- Irausquín, I. (2012). *Universidad Carlos II de Madrid*. Obtenido de Universidad Carlos II de Madrid: <https://core.ac.uk/download/pdf/29403142.pdf>
- Matolcsy, M. (1996). Crassthiness of bus structures and rollover protection. *Advance science institutes series*, 327.
- Mohd, A., Noor, A., Muhammad, H., & Valliyappan, D. (2018). *International Journal of Engineering & Technology*. Obtenido de International Journal of Engineering & Technology: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/21897/10573>

ANEXO

ANEXO A: RESULTADO DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN



Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Caracora



Honorable Gobierno
Provincial de Tanguahua

RECEPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Informe N°: 180446774220200908-ECM	
DATOS DEL CLIENTE	
Empresa / Cliente: José Israel Rodríguez Guambo,	
Dirección: Barrio Miraflores, Patate.	
Núm. de cédula / RUC: 1804467742	Teléfono: +593979934321.
E-mail: jr1@hotmail.es	

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	Probetas a Ensayar
1	180446774220200908-ECM 01	Espuma metálica de Aluminio	2
		Total	2

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



ENSAYO SOLICITADO			
No.	No. DE PROBETA	DESCRIPCIÓN	FECHA DE RECEPCIÓN
1	180446774220200908-ECM 01-1	Cumple con los criterios dimensionales	2020/05/09
2	180446774220200908-ECM 01-1	Cumple con los criterios dimensionales	2020/05/09

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.

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

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

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
ENSAYO DE COMPRESIÓN DE MATERIAL METÁLICO.
INFORME DE RESULTADOS N°: 180446774220200908-ECM.

DATOS GENERALES

N° de proforma: RM_2020_016.
Empresa / Cliente: José Israel Rodríguez Guambo.
RUC/C.I.: 1804467742. **Teléfono:** +593979934321.
Dirección: Barrio Miraflores, Patate.
Correo: jr1@hotmail.es
DATOS DEL ENSAYO:
Lugar de Ejecución del Ensayo: Laboratorio de Resistencia de Materiales.
Dirección: Ambato/Catigata, Toronto y Río de Janeiro.
Método de ensayo: No Normalizado.
Tipo de ensayo: Cuantitativo. **Tipo de probeta:** Cilíndrica.
Equipo utilizado: Máquina Universal Metrotest. **Modelo:** SH-1500 S/C.
Serie: 8802M001.
Velocidad de ensayo: 10 mm/min. **Precarga:** 1000 N.
Fecha de Inicio de Ensayo: 2020/04/22. **Fecha de Finalización de Ensayo:** 2020/04/22.
 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	Probetas a Ensayar
1	180446774220200908-ECM 01	Espuma metálica de Aluminio	2
Total			2

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 entrega de Informe: Ambato, 11 de septiembre de 2020.

N°. Factura: 001-002-000009541.



Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Camocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

Resultados:

Prueba	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de compresión (MPa)	Desplazamiento (mm)	% de deformación máxima
				Diámetro	Longitud				
1	18044674220200908-ECM 01-1	19,1	58,5	44,24	61,55	98100,01	41,99	7,804	12,67
2	18044674220200908-ECM 01-2	19,4	57,1	51,86	54,01	40000,00	37,36	5,776	6,99

Prueba	Identificación de probeta	Fuerza última (N)	Esfuerzo último de compresión (MPa)	Desplazamiento último (mm)	% de deformación última
2	18044674220200908-ECM 01-2	37800,00	16,59	5,712	10,48

Observaciones: Ninguna



Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Cambozo



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

HOJA DE ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

Informe N°: 180446774220200908-ECM

DATOS DEL CLIENTE:

Empresa / Cliente: José Israel Rodríguez Guambo.

Dirección: Barrio Miraflores, Patate,

Núm. de cédula/RUC: 1804467742,

E-mail: jri@hotmail.es

Teléfono: +593979934321.

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	180446774220200908-ECM 01-1	2020/09/09	2020/09/14	Cliente	Se entrega al cliente	
2	180446774220200908-ECM 01-1	2020/09/09	2020/09/14	Cliente	Se entrega al cliente	

Todas las muestras de los diferentes grupos se destruyeron en su totalidad, lo mismo que es puesto a conocimiento del cliente, el CPPMC no se responsabiliza por las muestras.

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





Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Carrocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

RECEPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Informe N°: 180446774220210317-ECM	
DATOS DEL CLIENTE	
Empresa / Cliente: José Israel Rodríguez Guambo.	
Dirección: Barrio Miraflores, Patate.	
Núm. de cédula / RUC: 1804467742.	Teléfono: +593979934321.
E-mail: jrl@hotmail.es	

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	Probetas a Ensayar
1	180446774220210222-ECM 01	Espuma metálica de Aluminio	1
Total			1

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

ENSAYO SOLICITADO			
No.	No. DE PROBETA	DESCRIPCIÓN	FECHA DE RECEPCIÓN
1	180446774220210222-ECM 01-2	Cumple con los criterios dimensionales	2021/03/16

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.

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.

	
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	



LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
ENSAYO DE COMPRESIÓN DE MATERIAL METÁLICO.
INFORME DE RESULTADOS N°: 180446774220210317-ECM.

DATOS GENERALES

N° de proforma: RM_2021_013.
 Empresa / Cliente: José Israel Rodríguez Guambo.
 RUC/C.I.: 1804467742. Teléfono: +593979934321.
 Dirección: Barrio Miraflores, Patate.
 Correo: jrl@hotmail.es
DATOS DEL ENSAYO:
 Lugar de Ejecución del Ensayo: Laboratorio de Resistencia de Materiales.
 Dirección: Ambato/Catigata. Torontó y Río de Janeiro.
 Método de ensayo: No Normalizado.
 Tipo de ensayo: Cuantitativo. Tipo de probeta: Cilíndrica.
 Equipo utilizado: Máquina Universal Metrotest. Modelo: STH-1500 S/C.
 Serie: 8802M001.
 Velocidad de ensayo: 10 mm/min. Precarga: 1000 N.
 Fecha Inicio de Ensayo: 2021/03/16. Fecha Finalización de Ensayo: 2021/03/16.
 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.

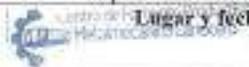
OBJETOS DE ENSAYO

Número de Probetas cuantificadas:

N°	Identificación del grupo	Material	Probetas a Ensayar
1	180446774220210222-ECM-01	Espuma metálica de Aluminio	1
Total			1

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 entrega de Informe: Ambato, 19 de marzo de 2021.
 N° Factura: 001-002-000010495.



Resultados:

Próbeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de compresión (MPa)	Desplazamiento (mm)	% de deformación máxima
				Diámetro	Longitud				
1	180446742202009018-ECM 01-2	21,1	61,7	54,45	46,35	41150,00	17,67	15,173	32,74

Observaciones: Ninguna





Centro de Fomento Productivo
Metalmecánico Camocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

HOJA DE ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

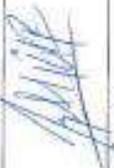
Informe N°: 180446774220210317-ECM	
DATOS DEL CLIENTE	
Empresa / Cliente: José Ismael Rodríguez Guzmán.	
Dirección: Barrio Miraflores, Patate.	
Núm. de cédula/RUC: 1804467742.	
E-mail: jr1@hotmail.es	
Teléfono: +593979934321.	

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.	180446774220210322-ECM 01-2	2021/03/16	2021/03/18	Cliente	Se entrega al cliente	



La muestra ensayada, por acuerdo se entrega al cliente, el CFPMC no se responsabiliza por el mantenimiento y almacenamiento de la misma, 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	

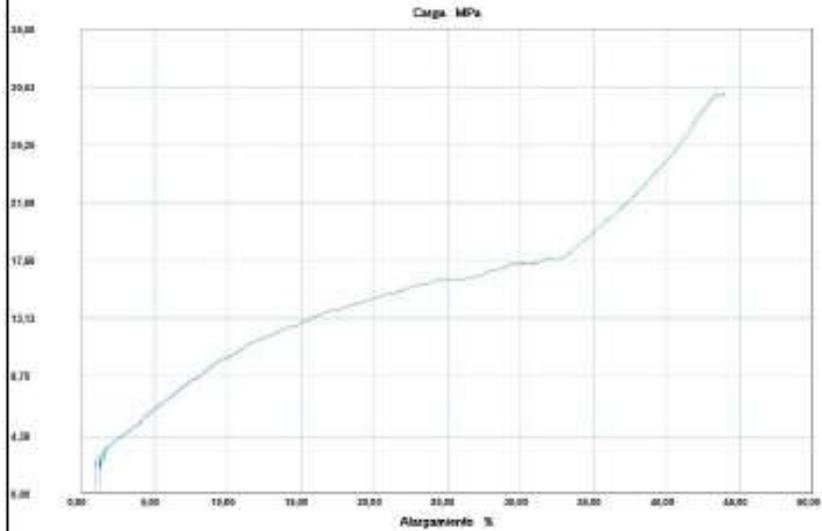


INFORME
ENSAYO

ECM 01
COMPRESION



Referencia : MATERIAL METALICO
Cliente :
Calidad : 30M_2021_013
Operario : A. Técnico
Norma : No Normalizado
Fecha : 16/03/2021
Hora : 15:14:18
Temperatura : 21,1
H.R.% : 61,7
Pedido : 100449774220210222



Probeta	F _{rot} N	C _{rot} MPa
■ 2	41150,00	17,57
Media	41150,000	17,572
Mediana	41150,000	17,572
Desv. Std	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000
Máximo	41150,000	17,572
Mínimo	41150,000	17,572
Rango	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000
+3 Sigma	41150,000	17,572
-3 Sigma	41150,000	17,572

Parametros

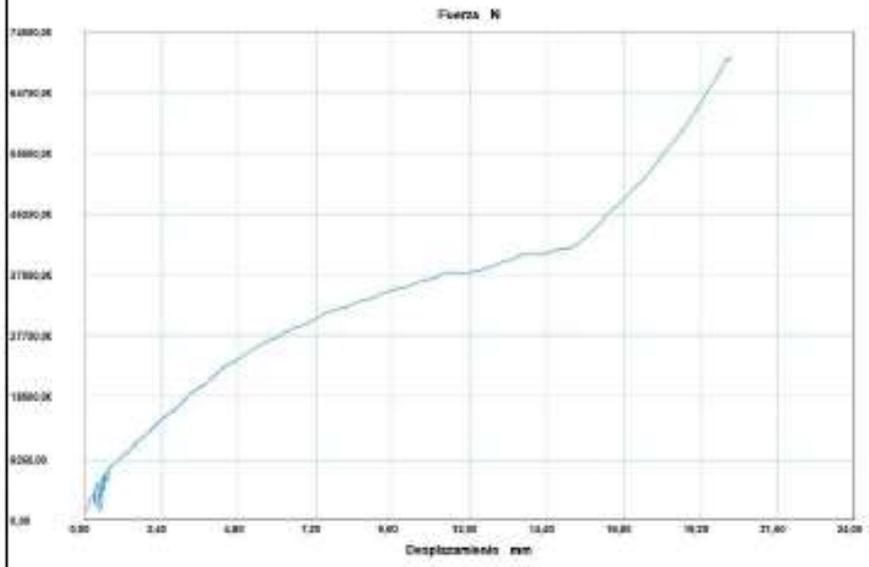
Precarga	=	1000,00	N
Caida %	=	100,00	
Retorno Automatico	=	0,00	
Limite Fuerza	=	1500000,00	N
Limite Desplazamiento	=	45,00	mm
Stop Est	=	50,00	mm

Velocidades

Precarga	=	10,00	mm/min
Ensayo	=	10,00	mm/min
Retorno	=	50,00	mm/min
Posicionamiento	=	50,00	mm/min



Referencia : MATERIAL METALICO
Cliente :
Código : RM_2021_013
Operario : A. Técnico
Norma : No Normalizado
Fecha : 16/03/2021
Hora : 16:14:18
Temperatura : 21,1
H.R.H. : 61,7
Pedido : 180446774220210222



Probeta	F _{Rot} N	C _{Rot} MPa
■ 2	41150,00	17,67
Media	41150,000	17,672
Mediana	41150,000	17,672
Desv. Std	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000
Máximo	41150,000	17,672
Mínimo	41150,000	17,672
Rango	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000
+3 Sigma	41150,000	17,672
-3 Sigma	41150,000	17,672

Parámetros

Precarga	=	1000.00	N
Cálida %	=	100.00	
Retorno Automático	=	0.00	
Límite Fuerza	=	150000.00	N
Límite Desplazamiento	=	45.00	mm
Stop Ext	=	50.00	mm

Velocidades

Precarga	=	10.00	mm/min
Ensayo	=	10.00	mm/min
Retorno	=	50.00	mm/min
Posicionamiento	=	50.00	mm/min



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: 08 / 06 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>José Israel Rodríguez Guambo</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: 2021.06.08 16:17:53
-05'00'



0064-DBRAI-UPT-IPEC-2021