



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTENEDOR CON  
ATMÓSFERA CONTROLADA PARA LA FABRICACIÓN DE  
ESPUMA DE ALUMINIO PARA EL LABORATORIO DE  
MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE  
LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**

---

**Autores:** Sánchez Núñez Esteban David  
Jijón Cunalata Erick Steven

**Tutor:** Ing. Mg. López Villacis Gonzalo Eduardo

**AMBATO- ECUADOR**

**Septiembre - 2021**

## CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTENEDOR CON ATMÓSFERA CONTROLADA PARA LA FABRICACIÓN DE ESPUMA DE ALUMINIO PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, elaborado por los señores. Sánchez Núñez Esteban David portador de la cédula de ciudadanía: Cl. 1804717708 y Jijón Cunalata Erick Steven portador de la cédula de ciudadanía: Cl. 1804394235, estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de sus autores.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, Septiembre 2021

---

**Ing. Mg. López Villacis Gonzalo Eduardo**  
**TUTOR**

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Nosotros, **Sánchez Núñez Esteban David** con Cl. 1804717708 y **Jijón Cunalata Erick Steven** con Cl. 1804394235 declaramos que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente proyecto técnico con el tema “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTENEDOR CON ATMÓSFERA CONTROLADA PARA LA FABRICACIÓN DE ESPUMA DE ALUMINIO PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**”, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de nuestra exclusiva responsabilidad como autores del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Septiembre 2021



**Sánchez Núñez Esteban David**

**C.I:1804717708**

**AUTOR**



**Jijón Cunalata Erick Steven**

**C.I: 1804394235**

**AUTOR**

## DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedemos los Derechos en línea patrimoniales de nuestro Proyecto Técnico, con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor.

Ambato, Septiembre 2021



**Sánchez Núñez Esteban David**

**C.I:1804717708**

**AUTOR**



**Jijón Cunalata Erick Steven**

**C.I: 1804394235**

**AUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por los estudiantes Sánchez Núñez Esteban David y Jijón Cunalata Erick Steven de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTENEDOR CON ATMÓSFERA CONTROLADA PARA LA FABRICACIÓN DE ESPUMA DE ALUMINIO PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**.

Ambato, Septiembre 2021

Para constancia firman:

---

**Ing. Mg. Guamanquispe Toasa Jorge Patricio**  
**Miembro Calificador**

---

**Ing. Mg. Peña Jordán Francisco Agustín**  
**Miembro Calificador**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi padre Arturo y mi madre Narciza por acompañarme durante toda mi etapa académica con su apoyo, esfuerzo y sabios consejos.

Por sus palabras de aliento y animo que nunca me faltaron. Por haber inculcado en mí el valor de la responsabilidad, la perseverancia y la paciencia, valores que me han servido para poder cumplir mis metas y formarme como una persona de bien.

A mi familia por brindarme todo su apoyo emocional y estar pendiente de mí.

A mis amigos y compañeros de carrera con los cuales compartí buenos y malos momentos.

**Sánchez Esteban**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por haberme permitido tener a mi padre y a mi madre junto a mí durante toda esta travesía académica. Por haber puesto en mí sabiduría, inteligencia y paciencia en todo momento.

A mi tutor Ing. Mg. Gonzalo López por su tiempo, paciencia y conocimiento brindado durante todo el tiempo, pilar fundamental para la culminación de este trabajo.

A los Ingenieros docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica por haberme brindado todos sus conocimientos y experiencias durante mi formación universitaria.

A la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por haberme brindado la oportunidad de formarme dentro de sus aulas como profesional en la carrera de Ingeniería Mecánica.

**Sánchez Esteban**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación se lo dedico primeramente a Dios por darme salud para lograr culminar esta gran etapa de mi vida, por la bendición de mis padres que me acompañaron en mi formación académica, a mis hermanos y demás familiares quienes han estado a mi lado brindándome su apoyo y ayuda para ser mejor cada día.

A los ingenieros de la Carrera de Ingeniería Mecánica quienes me brindaron sus conocimientos para cumplir este sueño tan anhelado, y a mis compañeros que me han ayudado en toda la carrera universitaria.

**Jijón Erick**



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres Franklin y Alicia, a mis hermanos David, Kléver y Cristina quienes me apoyaron en toda mi carrera universitaria, por ayudarme en los momentos más difíciles, por ser quienes confiaron y creyeron en que pudiera llegar a este punto de mi vida, gracias a ellos por no dejarme solo en las decisiones buenas y malas que tomé a lo largo de mi vida.

De igual manera agradezco a cada persona que conforma la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por darme la oportunidad de culminar mis estudios universitarios, y a mi tutor Ing. Mg. Gonzalo López quien nos brindó su apoyo y enseñanzas en todo el proceso del presente proyecto.

Por último, quiero agradecer a mi amigo Christian Safla y a sus familiares quienes me apoyaron en el ámbito profesional y personal, y a mi amigo Richard Guanín quien ha estado a mi lado desde la infancia y actualmente me apoya a la distancia.

**Jijón Erick**

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Certificación.....	ii
Autoría de la investigación.....	iii
Derechos de autor.....	iv
Aprobación del tribunal de grado.....	v
Dedicatoria .....	vi
Agradecimiento .....	vii
Dedicatoria .....	viii
Agradecimiento .....	ix
Índice general de contenidos .....	x
Índice de tablas.....	xiii
Índice de figuras .....	xiv
Índice de anexos .....	xvii
Resumen.....	xviii
Abstract .....	xix
CAPÍTULO 1 .....	1
PROBLEMA.....	1
1.1. Tema de investigación:.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Objetivos .....	2
1.3.1. General .....	2
1.3.2. Objetivos específicos .....	2
1.4. Fundamentación teórica .....	2
1.4.1. Espuma de aluminio.....	2
1.4.2. Metales celulares.....	3
1.4.3. Espuma de aluminio poros cerrados .....	4

1.4.4.	Espuma de aluminio poros abiertos .....	4
1.4.5.	Fundición .....	5
1.4.6.	Fundición de aluminio y sus aleaciones.....	5
1.4.7.	Fundición en arena .....	7
1.4.8.	Fundición por inyección.....	8
1.4.9.	Fabricación de metales celulares.....	8
1.4.10.	Fabricación de metales celulares por vía líquida.....	10
1.4.11.	Probeta a tensión .....	18
CAPÍTULO 2.....		20
METODOLOGÍA .....		20
2.1.	Antecedentes de la investigación.....	20
2.2.	Metodología.....	21
2.2.1.	Descripción inicial para el sistema de contenedor con atmosfera controlada para la fabricación de espuma de aluminio .....	21
2.2.2.	Componentes que intervienen en el contenedor con atmosfera controlada	22
2.2.3.	Dimensionamiento de los componentes que intervienen en el contenedor con atmosfera controlada .....	27
2.2.4.	Dimensionamiento de muestra.....	29
2.2.5.	Diseño de contenedor de atmosfera controlada .....	31
2.2.6.	Cálculos aplicados al recipiente de atmosfera controlada.....	46
2.2.7.	Diseño del sistema de atmosfera controlada para la fabricación de espuma de aluminio.....	67
2.2.8.	Aplicación de temperatura vs tiempo en el proceso de atmosfera controlada para la fabricación de espuma de aluminio .....	68
2.2.9.	Parámetros para la fabricación de la espuma de aluminio .....	68
CAPÍTULO 3.....		70
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....		70

3.1. Ensamblaje de sistemas de atmosfera controlada.....	70
3.2. Fabricación de molde .....	72
3.3. Selección de granos de cloruro de sodio .....	74
3.4. Prácticas de laboratorio .....	79
3.4.1. Equipos a usarse en el laboratorio.....	79
3.4.2. Desarrollo de la práctica de laboratorio .....	81
3.4.3. Resumen de resultados del recipiente de atmosfera controlada para espuma de aluminio.....	85
CAPÍTULO 4 .....	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
4.1. Conclusiones .....	87
4.2. Recomendaciones .....	88
Bibliografía .....	89
Anexos .....	92
Anexo 1: Imágenes de prácticas.....	92
Anexo 2: imágenes de práctica - errores .....	95
Anexo 3: Proformas de partes y piezas del sistema .....	96
Anexo 4: Diseño CAD – Planos molde espuma de aluminio y coche de porta equipos .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades del aluminio [7]. .....	6
Tabla 2: Códigos de las aleaciones de aluminio para forja [7]. .....	6
Tabla 3: Códigos de las aleaciones de aluminio para fundición [7]. .....	7
Tabla 4: Empresas productoras de metales celulares [4]. .....	9
Tabla 5: Proceso Gasar. Metales porosos y gases disponibles [4]. .....	15
Tabla 6: Dimensiones de las muestras de cloruro de sodio. ....	26
Tabla 7: Parámetros de diseño del contenedor.....	31
Tabla 8: Selección de diseño CAD. ....	43
Tabla 9: Tabla de ponderaciones de diseño de tapas del molde. ....	44
Tabla 10: Elementos y materiales constitutivos del molde.....	61
Tabla 11: Características del cilindro de aluminio.....	62
Tabla 12: Componentes menores. ....	63
Tabla 13: Parámetro para determinar el coeficiente de convección. ....	63
Tabla 14: Tabla de temperatura vs tiempo de exposición en horno.....	66
Tabla 15: Ensamblaje de sistemas de atmosfera controlada .....	70
Tabla 16: Selección de granos de cloruro de sodio.....	74
Tabla 17: Equipos a usarse en el laboratorio. ....	79
Tabla 18: Desarrollo de la práctica de laboratorio. ....	81
Tabla 19: Resumen de resultados del recipiente de atmosfera controlada para espuma de aluminio.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Espuma de aluminio [1].....	3
Figura 2: Metales celulares [2].....	3
Figura 3: Espuma de aluminio poros cerrados [5]. .....	4
Figura 4: Espuma de aluminio poros abiertos [5]. .....	4
Figura 5: Etapas del proceso de fundición [6]. .....	5
Figura 6: Fundición en arena [7]. .....	7
Figura 7: Fundición por inyección [7]. .....	8
Figura 8: Esquema del proceso de infiltración [2]. .....	9
Figura 9: Procesos de fabricación de metales celulares [4]. .....	10
Figura 10: Producción de espumas metálicas por inyección de gas [4].....	11
Figura 11: Esquema del proceso Formgrip [4]. .....	12
Figura 12: Tiempo de agitación vs viscosidad aparente [4].....	13
Figura 13: Efecto del calcio sobre la porosidad [4]. .....	13
Figura 14: Proceso Gasar [4]. .....	14
Figura 15: Fundición de precisión con preforma de poliuretano [4]. .....	15
Figura 16: Infiltración de metal fundido en moldes solubles [4].....	17
Figura 17: Infiltración de esferas metálicas huecas [4].....	18
Figura 18: Probeta de ensayo [16]. .....	19
Figura 19: Posiciones de válvulas en la plataforma de fabricación de espuma metálica [14]. .....	22
Figura 20: Vista esquemática del banco de pruebas de fabricación de espuma [14].	23
Figura 21: Horno Universidad Técnica de Ambato – laboratorios FICM. ....	24
Figura 22: Cloruro de sodio sin triturar.....	26
Figura 23: Horno eléctrico Universidad Técnica de Ambato. ....	27
Figura 24: Tanque de argón. ....	28
Figura 25: Mangueras de vacío. ....	28
Figura 26: Mangueras de presión 420Psi.....	29
Figura 27: Accesorios de aluminio. ....	29
Figura 28: Probeta cilíndrica - ensayo de tensión bajo ASTM E8 [17]. ....	30
Figura 29: Dimensiones- Probeta cilíndrica - ensayo de tensión bajo ASTM E8 [17]. .....	30

Figura 30: Bosquejo de sistema de contenedor con atmosfera controlada 1. ....	32
Figura 31: Bosquejo de sistema de contenedor con atmosfera controlada 2. ....	33
Figura 32: Bosquejo de sistema de contenedor con atmosfera controlada 2. ....	33
Figura 33: Bosquejo de sistema de contenedor con atmosfera controlada 3. ....	34
Figura 34: Plano molde espuma de aluminio V1. ....	35
Figura 35: Programa de selección de material – aplicar filtros.....	37
Figura 36: Programa de selección de material – limites de temperatura y resistencia. .....	38
Figura 37: Programa de selección de material – durabilidad del material. ....	39
Figura 38: Programa de selección de material – selección de materiales. ....	39
Figura 39: Programa de selección de material – diagrama agua(sal) vs resistencia a la tensión. ....	40
Figura 40: Programa de selección de material – Temperatura Máxima de servicio vs Durabilidad al agua(sal). ....	41
Figura 41: Programa de selección de material – diagrama Máxima temperatura de servicio vs Flamabilidad. ....	42
Figura 42: Configuración final contenedor atmosfera controlada. ....	45
Figura 43: Molde ensayo no destructivo-aplicar material – acero inoxidable. ....	51
Figura 44: Molde ensayo no destructivo – conexiones – pernos. ....	52
Figura 45: Molde ensayo no destructivo – pernos – carga aplicada. ....	52
Figura 46: Molde ensayo no destructivo- pernos – mallado. ....	53
Figura 47: Molde ensayo no destructivo- resultados tensiones. ....	53
Figura 48: Molde ensayo no destructivo – resultados – factor de seguridad. ....	54
Figura 49: Molde ensayo no destructivo- conexiones validacion de resultados. ....	54
Figura 50: Molde ensayo no destructivo-termico-aplicar material. ....	55
Figura 51: Molde ensayo no destructivo. ....	56
Figura 52: Molde ensayo no destructivo-termico-convección. ....	56
Figura 53: Molde ensayo no destructivo-termica-temperatura final. ....	57
Figura 54: Molde ensayo no destructivo-termico-mallado. ....	57
Figura 55: Molde ensayo no destructivo - termico - resultados termicos. ....	58
Figura 56: Molde ensayo no destructivo- analisis estatico. ....	58
Figura 57: Molde ensayo no destructivo- analisis estatico –sujeciones. ....	59
Figura 58: Molde ensayo no destructivo- analisis estatico –cargas. ....	60

Figura 59: Molde ensayo no destructivo - análisis estatico – refinado de malla. ....	60
Figura 60: Molde ensayo no destructivo - análisis estático – resultados. ....	61
Figura 61: Sistema argón -Banco de pruebas de fabricación de espuma. ....	67
Figura 62: Sistema de vacío -Banco de pruebas de fabricación de espuma.....	68
Figura 63: Sistema de horno -Banco de pruebas de fabricación de espum. [14]. ....	68
Figura 64: Parámetros para la fabricación de la espuma de aluminio.....	69
Figura 65: Eje perforado, corte por hilo.....	72
Figura 66: corte por hilo en acero inoxidable. ....	72
Figura 67: Eje mecanizado con placas soldadas. ....	73
Figura 68: válvula de aguja con acoples. ....	73
Figura 69: molde en acero inoxidable con acople rápido. ....	74



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Imágenes de prácticas.....	92
Anexo 2: imágenes de práctica - errores .....	95
Anexo 3: Proformas de partes y piezas del sistema .....	96
Anexo 4: Diseño CAD – Planos molde espuma de aluminio y coche de porta equipos .....	96

## RESUMEN

En el área de Ingeniería de materiales en la Universidad Técnica de Ambato no se cuenta con una máquina de atmosfera controlada para la investigación en materiales. Por lo que en el desarrollo del proyecto se ha propuesto la construcción de la máquina para la fabricación de espuma de aluminio usada en el proceso de automoción y aeronáutica por sus propiedades mecánicas favorables para la disminución de pesos, en el desarrollo del proyecto se determinó que en la fabricación intervienen tres sistemas, la generación de vacío dentro del recipiente con lo cual se logra una atmosfera controlada, posteriormente ingresa hacia el horno a una temperatura que de 740-800 grados centígrados por un tiempo de 1.5 a 2 horas, al término del tiempo indicado se retira del horno y se concluye con la aplicación del sistema de gas inerte (Argón) durante el enfriamiento, el gas inerte nos permite acelerar el enfriamiento de la muestra y crear una protección al elemento.

El proyecto se concluye con la fabricación de un contenedor, compra de equipos, ensamblaje y pruebas, en la fabricación del molde los parámetros de diseño se han definido en realizar la fundición del aluminio, en un contenedor en acero inoxidable, con tapa de fácil extracción y cierre hermético, se realizaron ensayos en horno a 740-800 grados centígrados con una válvula de aguja con acople rápido que nos permitió la hermeticidad, apertura y cierre del contenedor.

**Palabras claves:** Contenedor, Atmosfera controlada, Espuma de aluminio, Gas inerte, Cierre hermético.

## ABSTRACT

In the area of Materials Engineering at the Technical University of Ambato there is no controlled atmosphere machine for materials research.

Therefore, in the development of the project, the construction of the machine for the manufacture of aluminum foam used in the automotive and aeronautical process has been proposed due to its favorable mechanical properties for the reduction of weights, in the development of the project it was determined that Three systems intervene in the manufacture, the generation of vacuum inside the container with which a controlled atmosphere is achieved, later it enters the oven at a temperature of 740-800 degrees Celsius for a time of 1.5 to 2 hours, at the end of the indicated time is removed from the oven and concluded with the application of the inert gas system (Argon) during cooling, the inert gas allows us to accelerate the cooling of the sample and create a protection for the element.

The project concludes with the manufacture of a container, purchase of equipment, assembly and tests, in the manufacture of the mold the design parameters have been defined in casting the aluminum, in a stainless steel container, with an easy-to-remove lid. and hermetic closure, tests were carried out in an oven at 740-800 degrees centigrade with a needle valve with quick coupling that allowed us to seal, open and close the container.

**Keywords:** Container, Controlled atmosphere, Aluminum foam, Inert gas, Hermetic closure.

# CAPÍTULO 1

## PROBLEMA

### 1.1. Tema de investigación:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTENEDOR CON ATMÓSFERA CONTROLADA PARA LA FABRICACIÓN DE ESPUMA DE ALUMINIO PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”

### 1.2. Justificación

Actualmente en la Ingeniería de Materiales el estudio de la producción de esponja de aluminio ha tomado más relevancia debido a las características físicas y los diversos campos de producción industrial que puede ser utilizado.

Las espumas de aluminio tienen más de dos décadas de aplicación industrial, como principales sectores están la industria automotriz y aeronáutica. Siendo a nivel mundial utilizadas por su elevada rigidez, bajo peso específico y elevada resistencia mecánica. Países que destacan como productores de espuma de aluminio son Alemania con empresas como Exxentis Ltd y Freund GmbH, se suma también Austria y China [1].

La fabricación de este tipo de espuma con matriz metálica asido de difícil ejecución dentro de la región debido a la escasa información, falta de preparación e investigación acerca de los métodos existentes para la obtención de espuma de aluminio. Además, que se suele incurrir en la errónea comparación con materiales de composición completamente diferentes, pero con semejante apariencia [2].

A nivel nacional actualmente no existe ninguna empresa dedicada a la fabricación de espuma de aluminio como un producto que sea de fácil reemplazo e introducción al mercado frente a piezas mecánicas fabricadas con otros materiales de igual o inferior características, precio y tiempo de producción.

En el presente proyecto se diseñó y construyó un recipiente con atmósfera controlada capaz de producir esponja de aluminio, teniendo en cuenta especificaciones técnicas de diseño de elementos mecánicos.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Diseñar y construir un contenedor para la fabricación de espuma de aluminio con atmósfera controlada.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Identificar las diferentes aplicaciones en las que se utiliza la espuma de aluminio.
- Determinar el proceso más adecuado de fabricación de espuma de aluminio.
- Determinar los parámetros de diseño del contenedor para que resista el proceso de fabricación de espuma de aluminio.
- Analizar la calidad de la espuma de aluminio mediante la variación de parámetros de fabricación.

### **1.4. Fundamentación teórica**

#### **1.4.1. Espuma de aluminio**

Son materiales porosos y sus principales usos son la absorción de sonido, la absorción de energía de impacto y vibraciones, no son inflamables y permanecen estables a alta temperatura [1].

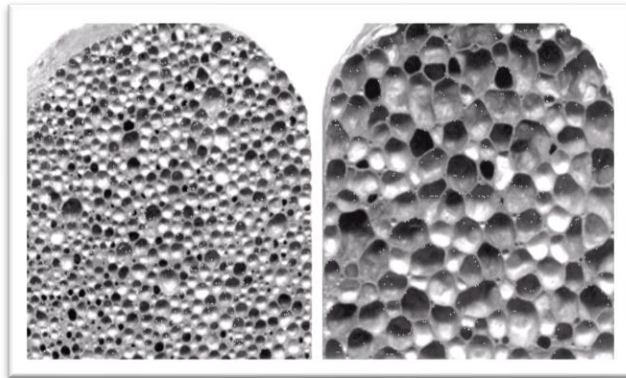


Figura 1: Espuma de aluminio [1].

#### 1.4.2. Metales celulares

En los últimos años, las investigaciones para obtener nuevos materiales han crecido considerablemente debido a la amplia demanda de propiedades de los metales para distintas aplicaciones, sea en el sector automotriz, naval, aeronáutico, entre otros, por lo que esto se ha convertido en un tópico de gran interés en todo el mundo. Se debe investigar proceso de fabricación de metales celulares que sean viables y económicos, consiguiendo así buenas propiedades mecánicas [2].

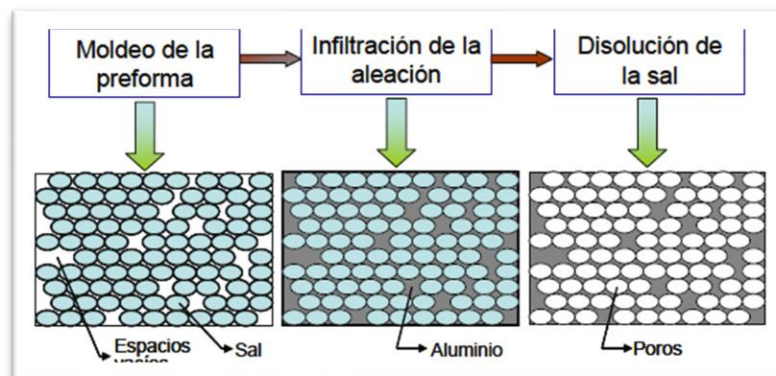


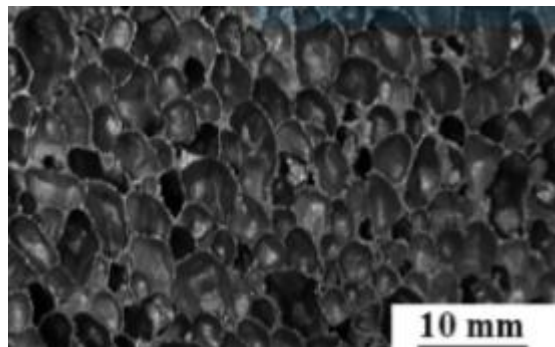
Figura 2: Metales celulares [2].

Los metales celulares, como son las espumas y esponjas, han dado mucho de qué hablar ya que tienen un gran potencial y aplicaciones diversas en varios sectores industriales. Esto se debe a que estos materiales tienen beneficios adicionales como son una alta rigidez, excelente absorción de energía, amortiguación de sonido y vibraciones, y una considerable ligereza; esto es gracias a su estructura porosa [3].

Los metales celulares tienen interesantes y particulares características por lo que se los consideran nuevos materiales, pero aún se busca el perfeccionamiento de las técnicas de fabricación para producir metales celulares reproducibles, confiables y de calidad, ya sean de porosidad abierta o cerrada [4].

#### **1.4.3. Espuma de aluminio poros cerrados**

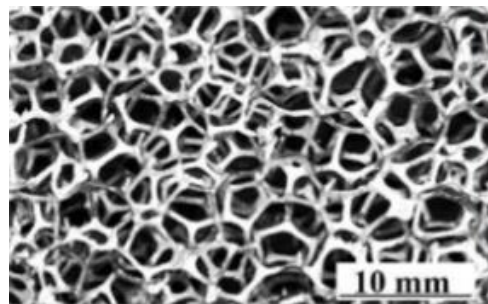
Las espumas de aluminio de poros cerrados se caracterizan por tener una gran rigidez y gran aislamiento acústico. Pueden obtenerse por inyección directa de gases al metal fundido o mediante el uso de un agente espumante o un precursor espumante con el material en el intervalo sólido-líquido [5].



*Figura 3: Espuma de aluminio poros cerrados [5].*

#### **1.4.4. Espuma de aluminio poros abiertos**

Las espumas de aluminio de poros abiertos tienen propiedades térmicas, la principal es la disipación de calor entre otros usos también se tiene la recuperación de elementos, filtros y catalizadores. A diferencia de las espumas de poro cerrado, la fabricación de espumas de poro abierto está principalmente basada en la utilización de materiales de relleno que luego son eliminados [5].



*Figura 4: Espuma de aluminio poros abiertos [5].*

### 1.4.5. Fundición

La fundición es uno de los procesos de formado más antiguos en donde el metal fundido fluye por gravedad dentro de un molde donde se enfría y solidifica tomando la forma de la cavidad del molde o, a su vez, se lingotes del metal fundido [6].

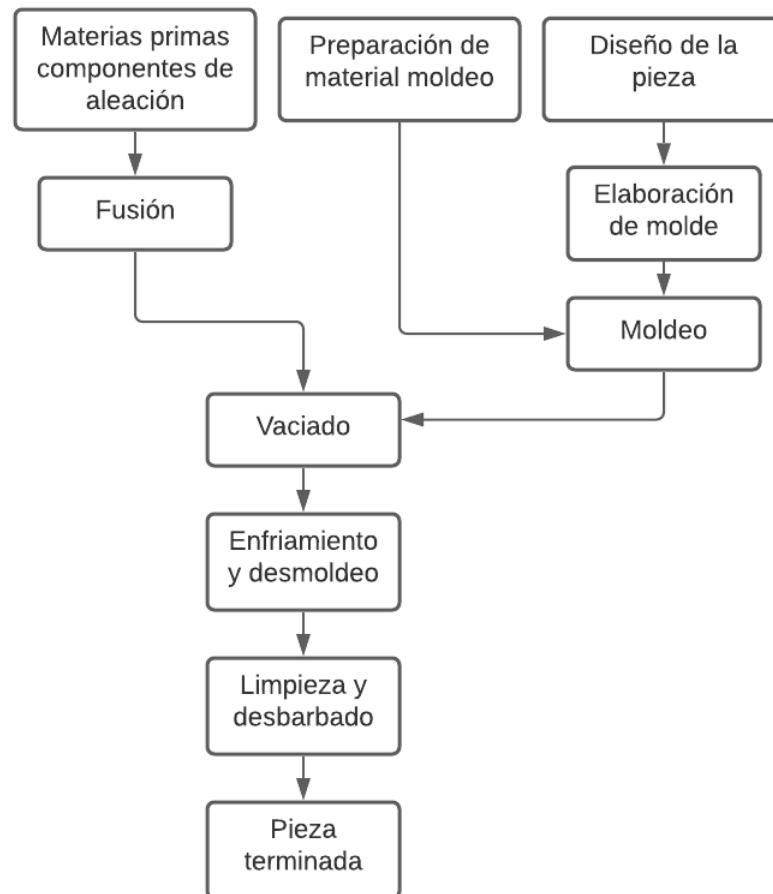


Figura 5: Etapas del proceso de fundición [6].

Los métodos de fundición en donde el molde es permanente, también conocido como matriz, como en el caso de los procesos de fundición a presión, colada por gravedad y colada bajo presión [6].

### 1.4.6. Fundición de aluminio y sus aleaciones

El aluminio siendo un material muy abundante en la tierra, comenzó a ser producido con fines comerciales y en la actualidad supera en cantidad a la suma de los demás metales no ferrosos como son el cobre, estaño y plomo [7].

En la siguiente tabla se puede apreciar las propiedades del aluminio.



Tabla 1: Propiedades del aluminio [7].

Símbolo químico	Al	Unidades
Número atómico	13	
Peso atómico	26,97	g/mol
Peso específico a 20°C	2,7	g/cm <sup>3</sup>
Volumen atómico	9,99	cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusión	659,8	°C
Temperatura de ebullición	2467	°C
Potencial de ionización	5,984	Ev
Potencial normal de electrodo Al <sup>3+</sup> +3 e <sup>-</sup> → Al	-1,67	V
Electronegatividad	1,5	
Estados de oxidación	+3	
Radio atómico Al	0,1248	nm
Conductividad eléctrica a 20°C	0,36	μΩ/cm
Conductividad térmica a 20°C	216,4	W/(m·°C)
Calor latente de fusión	395,14	J/g
Calor específico	0,90	J/g·°C
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras	
Dureza (Mohs)	2-2,9	
Límite elástico	6206,107	kPa
Coefficiente de expansión lineal entre 20-100°C	0,0239	Mm/m·°C

Las aleaciones del aluminio se las clasifican en aleaciones de forja y aleaciones de moldeo [7].

Tabla 2: Códigos de las aleaciones de aluminio para forja [7].

Aluminio con más de un 99.0% de pureza	1XXX
Aluminio-cobre	2XXX
Aluminio-manganeso	3XXX
Aluminio-silicio	4XXX
Aluminio-magnesio	5XXX
Aluminio-magnesio-silicio	6XXX
Aluminio-zinc	7XXX
Aluminio-otros elementos	8XXX

A continuación, se presenta la tabla de clasificación de las aleaciones de aluminio para fundición.

*Tabla 3: Códigos de las aleaciones de aluminio para fundición [7].*

Aluminio con más de un 99,0% de pureza	1XX.X
Aluminio-cobre	2XX.X
Aluminio-silicio, con adición de cobre y/o manganeso	3XX.X
Aluminio-silicio	4XX.X
Aluminio-magnesio	5XX.X
Aluminio-zinc	6XX.X
Aluminio-estaño	7XX.X
Aluminio-otros elementos	8XX.X

#### 1.4.7. Fundición en arena

El molde es construido a partir de un modelo que es colocado en un núcleo de arena especial que no se altera por la temperatura del metal líquido. La fabricación del modelo se lo puede realizar en tiempos cortos y en materiales que se consumen al tener contacto con el aluminio fundido. Este es un proceso sumamente económico y es apropiado para la elaboración de piezas personalizadas complejas y, además, de gran tamaño [7].



*Figura 6: Fundición en arena [7].*

### 1.4.8. Fundición por inyección

El aluminio, es inyectado en núcleos fabricados en aceros especiales, lo que los hace funcionales en tiempos prolongados y son cambiados a largo plazo. Las piezas obtenidas por este tipo de fundición se caracterizan por su exactitud en sus dimensiones, calidad superficial y espesor de pared muy pequeño y, por ende, estas piezas pueden ser utilizadas sin un mecanizado previo [7].

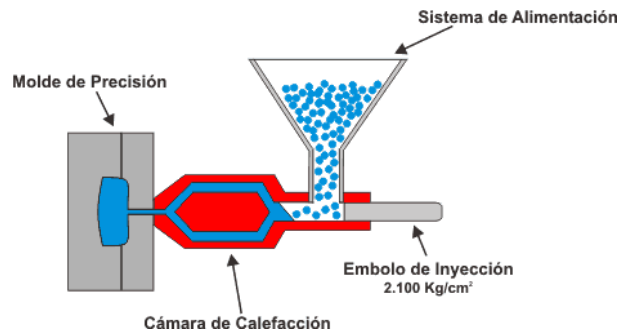


Figura 7: Fundición por inyección [7].

### 1.4.9. Fabricación de metales celulares

Para la fabricación de espumas de aluminio de poro abierto utilizando granos de sal se usa el proceso de infiltración – disolución, para la obtención de espumas de aluminio con propiedades mecánicas interesantes y, a su vez, una alta ligereza del material. El proceso antes mencionado se trata básicamente de la utilización de aluminio y cristales de sal comercial, el cual debe ser previamente tamizado y separado en tamaños entre 2 a 3 milímetros de diámetro promedio [2].

Se debe determinar el punto de fusión del aluminio para fundirlo. Teniendo la sal tratada térmicamente y el aluminio ya fundido, se procede a la introducción de los cristales de sal en un molde, posteriormente se coloca la fundición del aluminio directamente en el molde que contiene la sal [2].

El proceso de infiltración - disolución se da por la gravedad; una vez que el molde se ha enfriado y la mezcla se ha solidificado, se obtiene la espuma de aluminio mediante la disolución de la sal, con la ayuda de agua caliente y agitación [2].

La Figura 5: Etapas del proceso de fundición indica el proceso anteriormente mencionado:

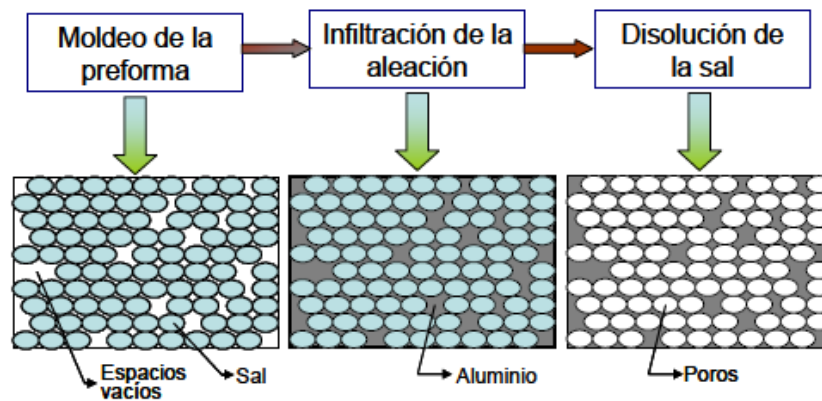


Figura 8: Esquema del proceso de infiltración [2].

En la siguiente tabla se presenta empresas que han desarrollado procesamientos de metales celulares:

Tabla 4: Empresas productoras de metales celulares [4].

Proceso de producción	Compañía	Denominación comercial/ proceso
Espumación directa del fundido por inyección de gas	Cymat Aluminium Corporation, Canadá HKB-LKR, Austria Foamtech, Korea Sperre, Noruega	Cymat Metcomb Lasom
Espumación directa del fundido por adición de agente espumante	Shinko Wire Co, Japón Cambridge University, Inglaterra	Alporas Formgrip
Fundición de precisión ( <i>investment casting</i> )	IPP, Alemania M-Pore, Alemania ERG, Oakland, USA	Duocel
Infiltración en moldes solubles	Instituto de Tecnología Federal de Suiza Northwestern University, EE.UU.	
Reacción eutéctica sólido-gas	DMI, Ucrania	Gasar
Infiltración del metal líquido en molde de esferas huecas	Instituto Tecnológico de Georgia, EE.UU.	Syntactic Alulight
Adición de agente espumante a precursores producidos por PM	Mepura, Austria Gleich-IWE, Alemania Fraunhofer Institute, Bremen, Alemania Neuman, Austria Schunk-Honsel, Alemania	Foaminal Alufoam
Sinterización de polvos / fibras	GKN Sinter Metals Filter GMBH	
Sinterización de polvos	Porvair Advanced Materials, EE.UU.	Metpor
Sinterización – disolución de moldes solubles	Liverpool University, Inglaterra	DSP
Sinterización de esferas huecas metálicas	IFAM, Bremen, Alemania Inco Special Products, Canadá	Incofoam
Técnicas de deposición	Recemat Internacional Sumitomo, Japón Fiberride, Canadá Dunlop, Inglaterra	Recemat Celmet Retimet

Fernández, Cruz y Coletto, indican que existen diferentes criterios para la clasificación de los procesos de fabricación de los metales celulares, los cuales se detallan a continuación:

- Separar los procesos en espumación directa y espumación indirecta.

- Clasificación en función del estado de la materia prima, los cuales se los agrupan en 3 familias de procesos:
  - a) A partir de un fundido metálico.
  - b) A partir de solidos metálicos.
  - c) A partir de deposición gaseosa.

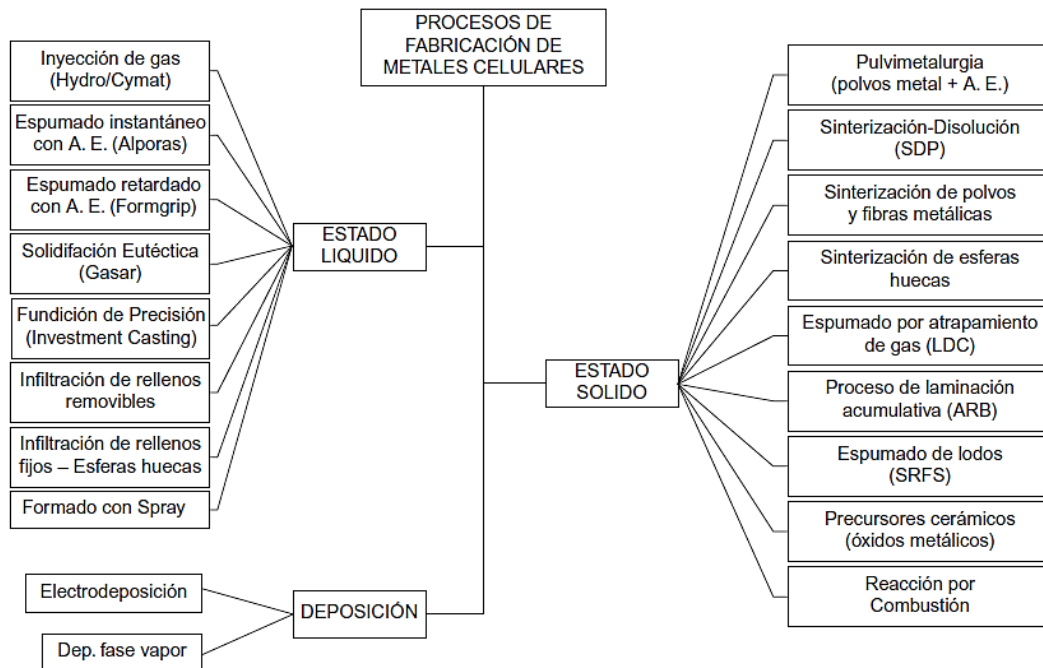


Figura 9: Procesos de fabricación de metales celulares [4].

#### 1.4.10. Fabricación de metales celulares por vía líquida

##### a. Inyección de gas en el fundido

En la actualidad, las espumas de aluminio que resultan a partir de este método son altamente comercializadas por Cymat Aluminium Corporation, en Canadá, y por Hydro Aluminium, en Noruega, aunque este proceso fue patentado por Alcan International Ltd, perteneciente a Canadá [4].

En la siguiente figura se puede apreciar un esquema del método de inyección de gas fundido para la fabricación de espumas metálicas.

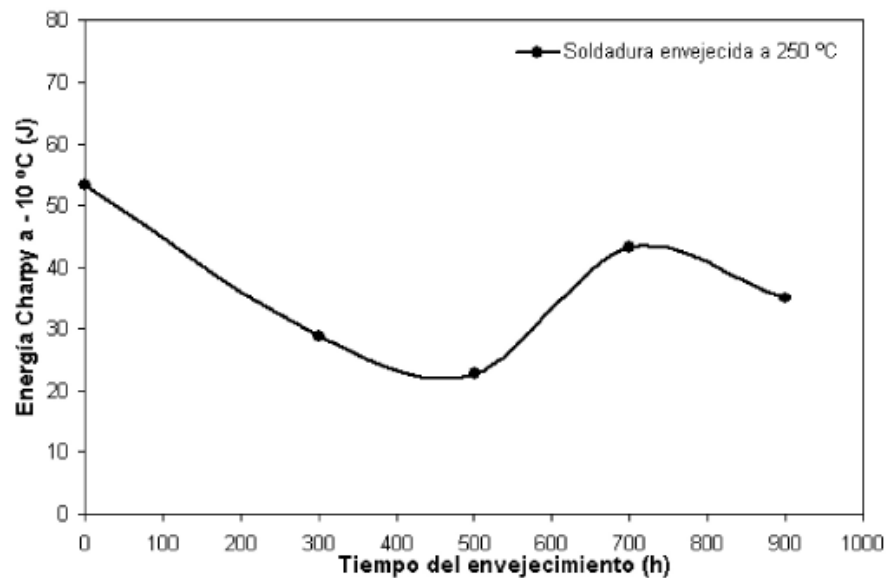


Figura 10: Producción de espumas metálicas por inyección de gas [4].

Las ventajas del proceso de inyección de gas en el fundido son:

- El método de producción es simple y es de bajo costo.
- Se puede obtener densidades muy bajas y un buen control del mismo.
- La capacidad de producción y tamaños es grande, además es un proceso continuo.
- El material de partida es de bajo costo.

Las desventajas de este proceso son:

- El proceso no es tan versátil.
- El control del tamaño del poro es difícil, por lo general se obtienen poros demasiado grandes e irregulares.
- Baja calidad de las espumas obtenidas.
- Posibilidad de problemas de maquinabilidad por la presencia de partículas cerámicas.
- Problemas de drenaje.

#### **b. Espuma de lingotes con agente espumante**

Este proceso también es llamado Formgrip y fue desarrollado por el Departamento de Ciencia de Materiales y Metalurgia de la Universidad de Cambridge, el cual consiste en la incorporación de polvos del agente espumante, en un porcentaje de 0.6 a 1.2%

en peso, directamente al metal fundido el cual está mezclado con partículas cerámicas en un 5 al 15% del volumen, los cuales actúan como estabilizadores de la espuma metálica [4].

Una vez realizada la mezcla, se lo calienta en un horno por encima de su temperatura de fusión, obteniendo así el metal espumado que pasa a un proceso de solidificación. Para el caso del aluminio, la mezcla se agita mecánicamente a una velocidad de 1000 a 1200rpm y a una temperatura entre 620 – 640°C [4].

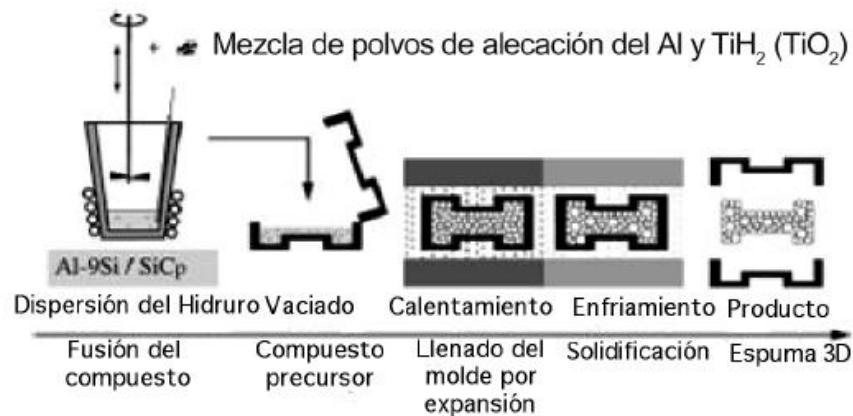


Figura 11: Esquema del proceso Formgrip [4].

Las ventajas de este proceso son:

- La descomposición del agente espumante es más lenta.
- Se puede controlar el tamaño de poros y estructuras uniformes.
- Producción de componentes finales y llenado de moldes complicados.
- Posibilidad de trabajar con un material sólido espumable.

Por otro lado, las desventajas son:

- Este proceso tiene limitaciones para otros metales que no sea aluminio.
- Se necesita la adición de partículas cerámicas.
- Problemas de maquinabilidad de la espuma.

### c. Proceso de Alporas

Los parámetros para controlar la porosidad y la calidad de la espuma son la cantidad y la cinética del hidrogeno generado, el espesor crítico de ruptura de las paredes, la

coalescencia de las celdas, el ciclo térmico, la velocidad de enfriamiento, la viscosidad y el punto de fusión del metal [4].

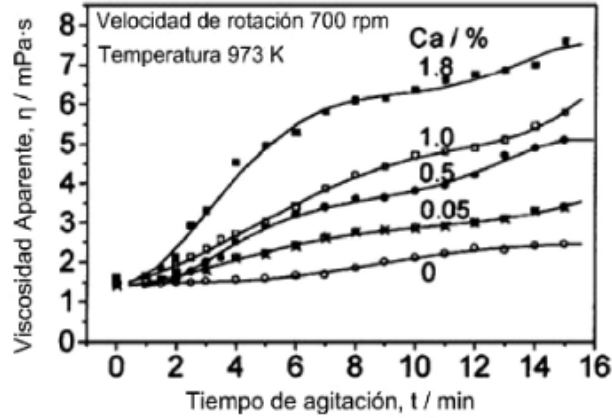


Figura 12: Tiempo de agitación vs viscosidad aparente [4].

En la figura anterior se muestra como para los mayores porcentajes de calcio, la viscosidad aparente del aluminio aumenta a medida que incrementa el tiempo de agitación [4].

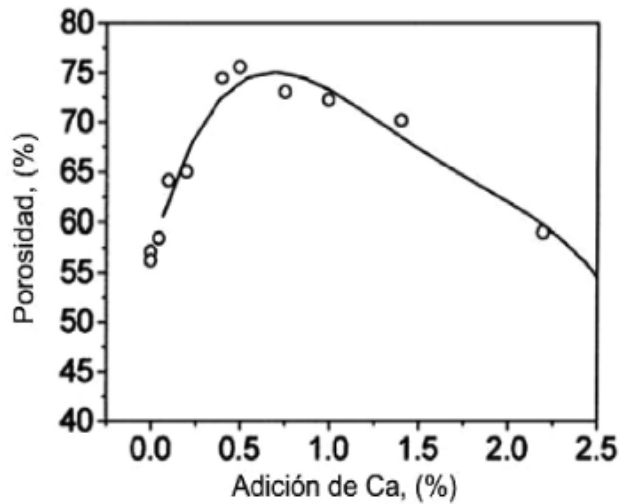


Figura 13: Efecto del calcio sobre la porosidad [4].

En la figura se aprecia como el contenido de calcio afecta la porosidad de la espuma.

Para el proceso de Alporas se detallan algunas ventajas:

- Este método es relativamente simple.
- Sencillo de llevarlo a escala industrial.
- Se obtiene mejores características estructurales.



Como desventajas de este proceso tenemos:

- Su costo de producción es relativamente alto con respecto a la inyección de gas.
- La densidad y tamaño de los poros es de difícil control por su agente espumante.
- El aluminio se contamina debido a la presencia de calcio y titanio.

#### d. Solidificación eutéctica de un fundido saturado de hidrogeno (Gasar)

Este proceso también denominado Gasar (acrónimo de gas reinforced), aprovecha la forma eutéctica de la mezcla de y funde el metal a una alta presión del gas (mayor a 50 atm). Cuando el metal se solidifica, el gas sale debido a su baja solubilidad en el metal sólido, formándose así un material poroso anisotrópico con poros cuasi-cilíndricos.

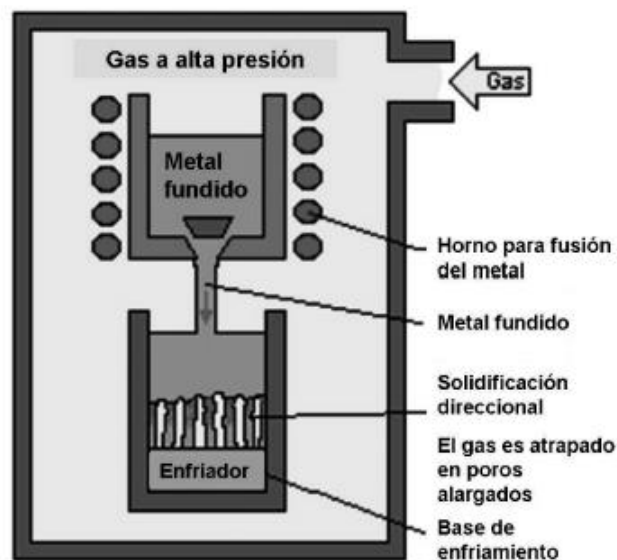


Figura 14: Proceso Gasar [4].

En la figura se muestra un esquema del proceso de producción Gasar, en donde se pueden obtener espumas de aluminio, níquel, magnesio, cobalto, cobre, titanio, cromo y aceros, con poros entre 5 y 75% [4].

En la siguiente tabla se puede apreciar los diferentes gases que se utilizan en este proceso, dependiendo del metal a procesar.

Tabla 5: Proceso Gasar. Metales porosos y gases disponibles [4].

Gas Disponible	Metales porosos a fabricar
Hidrógeno	Fe, aceros al carbono, aceros inoxidables, Ni, Al, Cu, Mg, Co, W, Mn, Cr, Be, Ti
Nitrógeno	Fe, Ni
Oxígeno	Ag, Au

Como ventajas de este proceso tenemos:

- El proceso Gasar no requiere de la utilización de partículas estabilizantes.
- El proceso es aplicable para distintos metales.
- Se puede controlar el tamaño y dirección de los poros.

Las desventajas son:

- Las porosidades obtenidas son relativamente bajas.
- El hidrogeno requiere de presiones altas.
- Se requiere el uso de autoclave.

#### e. Fundición de precisión (Investment casting)

Con este método se producen esponjas metálicas para ser ensambla el sistema de alimentación y otros componentes por medio de técnicas tradicionales como el moldeo por inyección a la cera perdida, luego, el modelo es llenado con arcilla refractaria resistente a temperaturas altas y, por medio de un tratamiento térmico, se elimina el modelo de cera. [4]

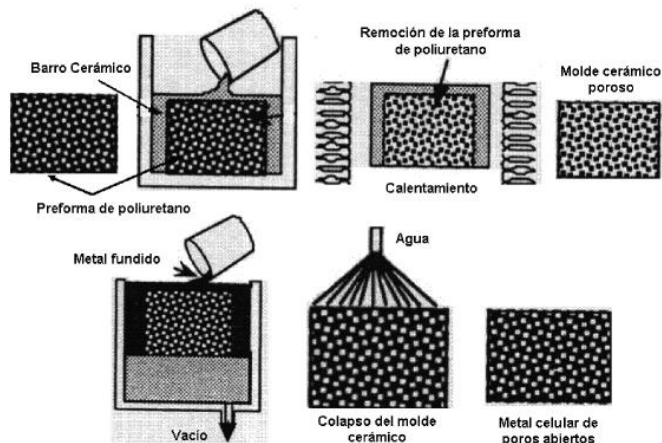


Figura 15: Fundición de precisión con preforma de poliuretano [4].

Con este proceso se obtienen esponjas de algunos metales puros, así como también de sus aleaciones, de los cuales tenemos aluminio, zinc, cobre, hierro, magnesio y níquel.

Las ventajas de este proceso son:

- Su estructura homogénea es totalmente controlable.
- Libertad de diseño y materiales colables.
- Buena calidad metalúrgica del material obtenido.
- Los poros obtenidos están interconectados.
- Tamaño de poro y densidad variable.

Las desventajas se las detalla a continuación:

- Dificultad para llevarlo a escalas industriales.
- El costo por componente es sumamente elevado.
- La extracción de gases generados en el proceso es necesaria.
- Su sistema es discontinuo y sus tamaños son limitados.
- Tiene gran variedad de etapas y tiempos de remoción de molde elevados.

#### **f. Infiltración por fundición de moldes con rellenos removibles**

Se prepara un molde con materiales orgánicos o inorgánicos de relleno para luego ser sinterizados y enfriados, formando un molde con poros interconectados el cual es infiltrado con el metal fundido para, posteriormente, ser enfriado y solidificado. Finalmente, el metal celular obtenido es sometido a un proceso de disolución para la remoción del molde creado con los materiales de relleno, y así obtener la esponja metálica [4].

Las esponjas metálicas obtenidas en este proceso alcanzan porosidades entre 55 – 98% y densidades relativas entre 0.3 – 0.5 [4].

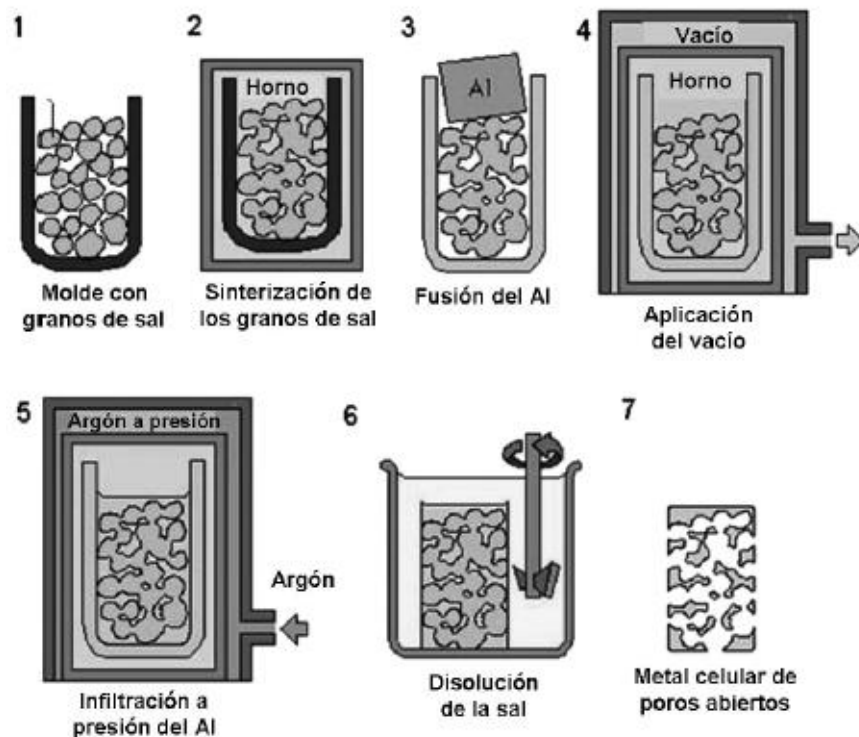


Figura 16: Infiltración de metal fundido en moldes solubles [4].

Para la elaboración de la preforma se puede utilizar cloruro de sodio, obteniendo esponjas con tamaños mínimos de poro de 1mm y porosidades entre 60 y 70% [4].

A continuación, se detallan las ventajas de este proceso:

- Es posible obtener esponjas con diferentes características y distribución de tamaño de poros.
- Las esponjas obtenidas son de buena calidad.
- Se puede obtener espumas de tamaño de poro muy pequeño.
- El proceso es de bajo costo.

Este proceso también presenta desventajas las cuales son:

- Dificultad para llevarlo a escalas industriales.
- En el caso que se utilice preformas de cristales de sal, se requiere utilizar metales que no reacciones con la misma.
- Su procesamiento es lento y necesita de un tiempo prolongado para obtener una eficiente disolución de sal.
- El metal utilizado puede presentar problemas de corrosión producidos por residuos de sal.

### g. Infiltración de metal líquido en molde compuesto por rellenos no removibles

Este proceso consiste en infiltrar el metal fundido en un molde con esferas huecas de paredes finas en condiciones de alta presión y vacío, como se muestra en la siguiente figura [4].

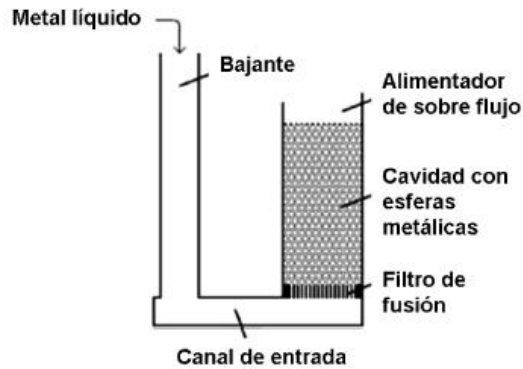


Figura 17: Infiltración de esferas metálicas huecas [4].

Estas esferas deben tener un punto de fusión más alto al del metal infiltrado, el metal celular obtenido por este método tiene porosidades entre 40 y 55%, y tamaño de poros mayores a 2mm.

Entre sus ventajas tenemos:

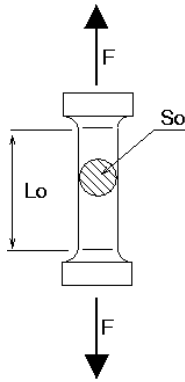
- Se puede obtener espumas de mayor porosidad, dependiendo del relleno.
- El control de la distribución del tamaño de los poros es estrecho.
- Se puede procesar un amplio rango de metales.

Desventajas:

- El metal de las esferas de relleno puede reaccionar con el metal fundido.
- Los poros dependen del tamaño y forma del metal de relleno.
- Llenado incompleto entre los gránulos con el metal líquido.
- Conformado por aspersion (Osprey process or spray forming)

#### 1.4.11. Probeta a tensión

Las probetas para la máquina universal de ensayos de tensión se lo realizan de las siguientes dimensiones:



*Figura 18: Probeta de ensayo [16].*

Donde:

Lo = Longitud inicial

So = Sección inicial

Do = Diámetro inicial

$$L_o = 5,65x\sqrt{S_o}$$

Probetas normalizadas:

con (Do=20mm, Lo=100mm)

con (Do=10mm, Lo=50mm)

Las probetas se sujetan de cada extremo aplicando una carga gradual y verificando la distancia estirada hasta la rotura, para la finalización del ensayo se presenta una curva, tensión vs distancia.

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

Patricio Abarca Pérez y Marcelo Castillo Cárdenas, en la revista ciencia digital, publicaron su investigación acerca de “Obtención de espumas metálicas de aluminio por el método de infiltración en preformas lixiviables” para describir y analizar el método de obtención de espumas metálicas de aluminio, mediante el método infiltración de metal fundido y la preforma utilizada es el NaCl, con un tamaño de grano de 0,85 a 1,7 mm [8].

En el trabajo de titulación de magister de diseño y producción en la Escuela Politécnica Nacional, Edison Patricio Abarca Pérez presenta “Síntesis de espumas metálicas de aluminio de celda abierta”, con el cual se toma muestras de aluminio de celda abierta mediante el método de infiltración por metal fundido den preformas solubles, usando NaCl con dimensiones de 0,85 a 1,7 mm y se obtuvo granos de dimensiones superiores a los granos de los químicos aplicados [9].

En el centro de investigación en materiales avanzados, S.C. en Chihuahua - México, Manuel Romero presenta “Obtención de estructura de poros homogénea de espumas de aluminio a356, utilizando como agente espumante partículas núcleo/multi-coraza basadas en TiH<sub>2</sub>”, que concluye “Se sintetizaron de manera exitosa partículas núcleo/coraza TiH<sub>2</sub>/Ni-B con espesor de coraza variable en función de cuatro diferentes concentraciones de reactivos de solución electroless (25, 50, 75 y 100%), donde el espesor más uniforme fue el correspondiente a la solución electroless de concentración de 25 % (181 ± 37 nm)” [10].

En la tesis doctoral de Bernabé Cárcel, en la Universidad Politécnica de Valencia, presenta: “Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenidas por fusión aplicación en absorbedores de energía”, en la investigación se ha concluido que “La resistencia y la absorción de energía han sido evaluados y con la anisotropía y los gradientes de densidad han

permitido cuantificar y justificar las desviaciones en los valores de resistencias observados para la muestra [11].

En el artículo investigativo de Fernández, Cruz y Coletto, indica que existen, por lo menos, 12 empresas que comercializan metales celulares, las cuales se encuentran en Europa, Norteamérica y Japón. Además, existen un sin número de empresas, universidades e investigaciones que trabajan en realizar nuevos procesos de fabricación y búsqueda de nuevas aplicaciones [4].

Adicional a lo anterior, la fabricación de metales celulares es muy costoso debido a que requieren equipos y tecnologías avanzadas, por consiguiente, ha surgido la necesidad de que estos metales sean amigables con el ambiente. Trabajar con metales reciclables es el punto principal para el procesamiento de nuevos materiales con propiedades sobresalientes [12].

El doctor Said Robles del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Puebla presento la patente “Manufactura de materiales ligeros porosos de aleaciones Zinc Aluminio” en el instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), en este proyecto se ha fabricado un frente de un vehículo de competencia e indica que la espuma metálica ha sido bien recibida en la industria automotriz debido a su alta resistencia a los golpes causados por choques, lo que brinda mayor seguridad y protección a los tripulantes [14].

## **2.2. Metodología**

En este capítulo se tratará el diseño de las partes, selección de materiales y selección de equipos para el desarrollo del proyecto.

### **2.2.1. Descripción inicial para el sistema de contenedor con atmosfera controlada para la fabricación de espuma de aluminio**

Se tiene una muestra de aluminio, sal o químicos reactivos, se coloca el aluminio en un envase resistente a la temperatura y a la reacción química, se coloca la tapa con sujetadores de presión para evitar explosiones y se ingresa al horno a alta temperatura por un tiempo a determinar, en el proceso de calentado se aplica vacío durante un



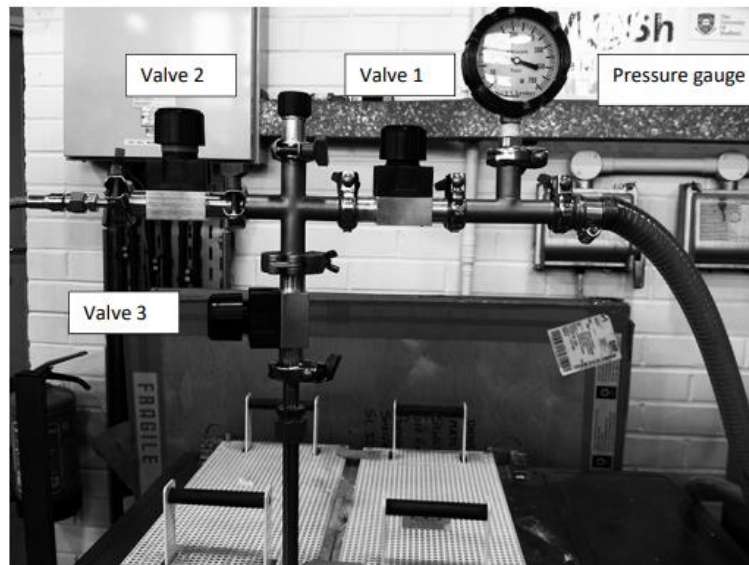
tiempo determinado, pasado el tiempo requerido se introduce gas inerte (Argón) para completar el proceso.

Se retira del horno y se obtiene el resultado, esta descripción es detallada para referencia del proceso, obtenida de la presentación en video de la universidad de Sheffield, departamento de materiales [13].

### 2.2.2. Componentes que intervienen en el contenedor con atmosfera controlada

Al ser un sistema de atmosfera controlada en el cual interviene un sistema de vacío que genere la presión de vacío para controlar la reacción química.

Siguiendo las especificaciones indicadas por Farzad Barari en la tesis de doctorado titulada “Metal foam regenerators; heat transfer and pressure drop in porous metals” en la universidad de Sheffield, Reino Unido se toma en referencia para replicar el sistema que se muestra a continuación:



*Figura 19: Posiciones de válvulas en la plataforma de fabricación de espuma metálica [14].*

En la figura anterior se tiene la posición de válvulas, ingreso al horno y salida y entrada de gases.

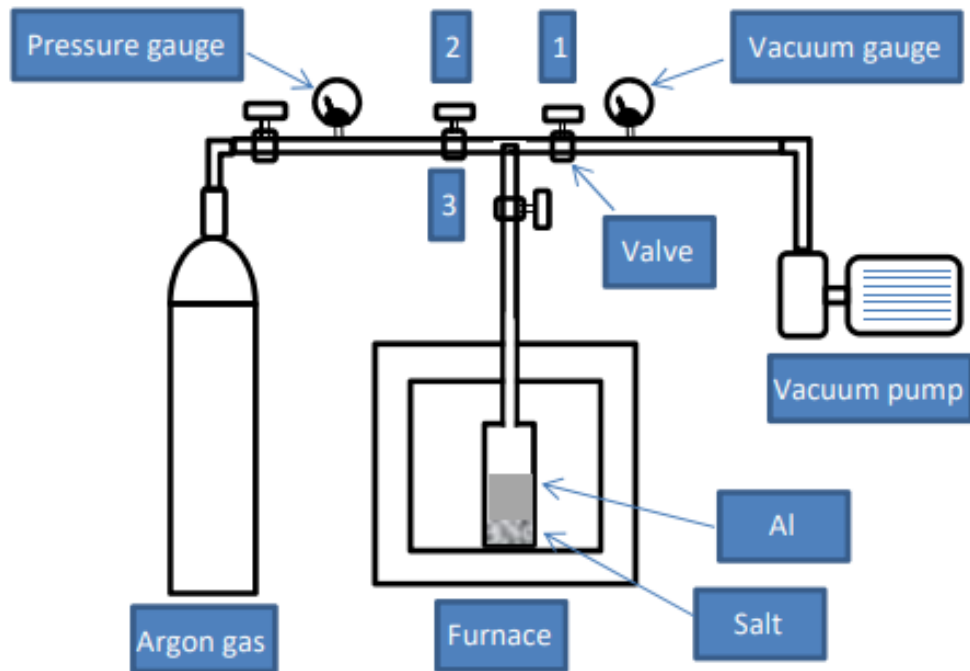


Figura 20: Vista esquemática del banco de pruebas de fabricación de espuma [14].

En la figura se muestra la siguiente lista de materiales.

- Bomba de vacío
- Medidor de vacío
- Válvula 1 (abre y cierra paso a la bomba de vacío)
- Válvula 2 (abre y cierra paso a el tanque de gas de Argón)
- Válvula 3 (válvula de abrir y cerrar paso hacia el molde)
- Medidor de presión de argón
- Material (Aluminio)
- Químico (cloruro de sodio)
- Horno
- Tubería de acero inoxidable

#### a. Sistema de vacío

El sistema de vacío nos permite retirar el mayor porcentaje de aire en el ambiente seleccionado, en este caso el molde para la espuma de aluminio, este proceso se lo realiza para generar una reacción de los componentes en el cual se necesita que el oxígeno no esté presente.

El sistema de vacío se aplica mediante una bomba de vacío a 0.96 Psi, según las recomendaciones de la Universidad de Sheffield, departamento de materiales [15].

### **b. Horno**

Para generar la reacción se necesita fundir el aluminio, su punto de fusión es de 660 grados centígrados según lo indicado en la Tabla 1: Propiedades del aluminio .

Siguiendo las recomendaciones de la investigación realizada por Universidad de Sheffield, departamento de materiales, en la tesis titulada “Metal foam regenerators; heat transfer and pressure drop in porous metals” se debe mantener durante 1.5 a 2 horas a una temperatura cercana a los 740 grados centígrados.

Esta temperatura se alcanza en un horno, manteniendo controlada la temperatura durante el tiempo necesario, para objeto de investigación se ha decidido utilizar el horno de la Universidad Técnica de Ambato, laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.



*Figura 21: Horno Universidad Técnica de Ambato – laboratorios FICM.*

Las dimensiones internas del horno son de 20cm de alto. 18cm ancho, 30cm de profundidad, medidas necesarias para el diseño del molde para la espuma de aluminio.

### **c. Válvulas**

Las válvulas diseñadas para un sello hermético en las cada una de las partes abren o cierran el paso hacia los distintos subsistemas que tiene el sistema de atmosfera controlada para la fabricación de espuma de aluminio.

Se usarán 3 válvulas, la válvula 1 cierra el sistema de vacío, la válvula 2 independiza el sistema de ingreso de gas (argón), la válvula 3 independiza el molde, modelo y sirve para ver si existiera alguna fuga en los otros subsistemas.

### **d. Conexiones del sistema**

Se tiene en cuenta dos líneas en el sistema, línea de gas inerte, Argón y línea de vacío, para los sistemas se aplicarán presiones por lo cual se utilizará tuberías de presión flexibles.

### **e. Químicos usados para la fabricación de espuma de aluminio**

Para seleccionar el químico para la reacción se debe tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ Tener un punto de fusión más alto que el metal que se va a fundir.
- ✓ Ser químicamente estable en contacto con el metal fundido.
- ✓ Fácil de quitar una vez solidificado el metal.

En la revisión bibliográfica se ha encontrado que el cloruro de sodio (SAL), cumple con las especificaciones requeridas [14].

#### **Cloruro de sodio:**

- ✓ Su punto de fusión es de 801 ° C.
- ✓ Es químicamente inerte en contacto con el aluminio durante la infiltración y lixiviación.
- ✓ Al eliminarlo de la espuma no crea subproductos tóxicos o peligrosos.

El cloruro de sodio en su estado natural viene en cristales o tabletas, para métodos de fabricación de muestra y estudio se debe obtener granos menores a 2mm de diámetro aproximadamente.



Figura 22: Cloruro de sodio sin triturar.

#### f. Dimensionamiento de granos de cloruro de sodio

Para la obtención de granos de cloruro de sodio se tritura y se pasa por tamices de varias medidas.

Tamiz 1mm: El tamiz menor a 1 mm se utilizará para descartar los polvos.

Tamiz de 1 a 1.5 mm: se reciben cristales de cloruro de sodio entre 1 a 1.5 mm de diámetro.

Tamiz de 2mm de diámetro: se recogen cristales de 1.5 a 2mm de diámetro.

Tamiz de 3 mm de diámetro: se recogen cristales de 2 a 3mm de diámetro.

La información se la detalla de manera más entendible en la siguiente tabla:

Tabla 6: Dimensiones de las muestras de cloruro de sodio.

Tamiz	Muestra	Detalle	Observaciones
Menor a 1mm	Menor a 1 mm	Polvos	Para desecho
De 1.5 mm	De 1 a 1.5 mm	Primera muestra	Uso en estudio
De 2 mm	De 1.5 a 2mm	Segunda muestra	Uso en estudio
De 3 mm	De 2 a 3mm	Tercera muestra	Uso en estudio
De 4 mm	De 3 a 4mm	Cuarta muestra	Uso en estudio
De 5 mm	De 4 a 5mm	Quinta muestra	Uso en estudio
De 6 mm	De 5 a 6mm	Sexta muestra	Uso en estudio

En esta tabla hace referencia a los tamices encontrados en el mercado nacional (Ecuador).

### 2.2.3. Dimensionamiento de los componentes que intervienen en el contenedor con atmosfera controlada

En este apartado se indica las dimensiones de los componentes que intervienen en el diseño del contenedor de la atmosfera controlada.

#### a. Bomba de vacío

Para el sistema de vacío se ha tomado del catálogo de distribución en la empresa mega frio.

#### b. Horno eléctrico - selección

Se requiere un horno que tenga las siguientes características:

- Llegar a 680 grados centígrados.
- Acondicionado con control de temperatura.
- Puertas herméticas.

Se ha seleccionado el horno eléctrico del laboratorio de materiales de la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, que cuenta con todas las características necesarias para el ensayo y sus medidas son las siguientes:

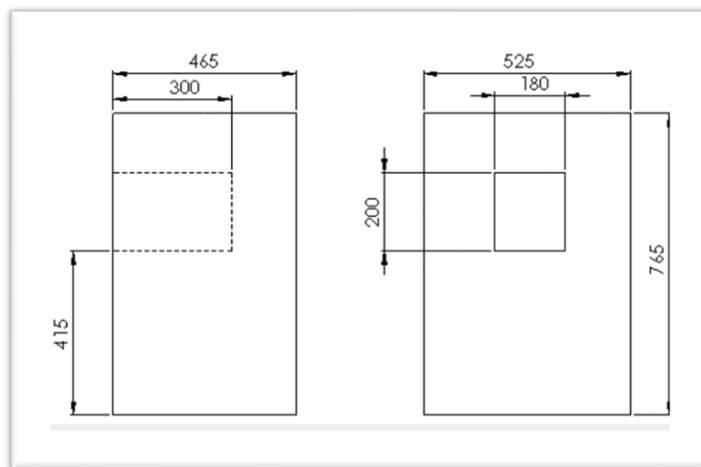


Figura 23: Horno eléctrico Universidad Técnica de Ambato.

Las dimensiones disponibles para la colocación del molde en la fundición, son de 200mm de alto, 180mm de ancho y 300mm de profundidad.

### **c. Gas inerte – Argón**

El gas inerte “argón”, por la facilidad de transporte, dimensiones y rotación en la compra o cambio de cilindro se considera el tanque de 2kilos de producto.



*Figura 24: Tanque de argón.*

El tanque esta acompañado de los manómetro, regulador y llave de paso de tanque.

### **d. Cañerías o mangueras**

Para el sistema de vacío se usarán mangueras de presión de 420 a 500 Psi, por la facilidad de compra y las especificaciones son superiores a la presión de vacío sugerida.



*Figura 25: Mangueras de vacío.*

Para el sistema de gas inerte – argón se usarán mangueras de presión de 420 Psi color negras como identificativo para el gas.



*Figura 26: Mangueras de presión 420Psi.*

Los accesorios de unión de mangueras, manómetros y vacuómetros se los usara con accesorios de aluminio para mejor hermeticidad en el sistema.



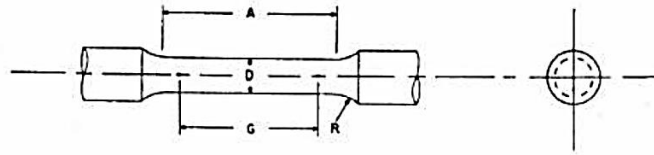
*Figura 27: Accesorios de aluminio.*

#### **2.2.4. Dimensionamiento de muestra**

Para métodos de estudio e investigación se realizó muestras con el objetivo de realizar probetas de tensión las cuales tienen las siguientes dimensiones:



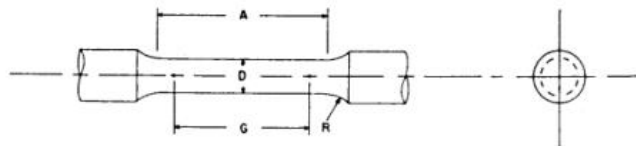
**E8/E8M - 13a**



Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]					
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Figura 28: Probeta cilíndrica - ensayo de tensión bajo ASTM E8 [17].

La probeta tiene un diámetro de 20mm y un largo total de 155mm, la probeta se obtendrá mediante proceso de torneado.



Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]					
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Five times the Diameter [E8M]					
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	45.0 ± 0.1 [1.750 ± 0.005]	30.0 ± 0.1 [1.250 ± 0.005]	20.0 ± 0.1 [0.800 ± 0.005]	12.5 ± 0.1 [0.565 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75 [3.0]	54 [2.0]	36 [1.4]	24 [1.0]	20 [0.75]

Figura 29: Dimensiones- Probeta cilíndrica - ensayo de tensión bajo ASTM E8 [17].

Debido a las consideraciones finales de la probeta se propone realizar un tocho del diámetro interior de 25mm y 200mm de longitud, las medidas se han sobredimensionado para poder desbastar el diámetro y usar el sobrante del largo para las sujeciones del torno a usarse.

Las medidas mencionadas se deben usar para el diseño de los contenedores de atmosfera controlada.

### 2.2.5. Diseño de contenedor de atmosfera controlada

En el diseño del contenedor se indica los datos para la construcción del contenedor, el diseño usando programas CAD (diseño asistido por ordenador).

#### a. Datos para el diseño de contenedor

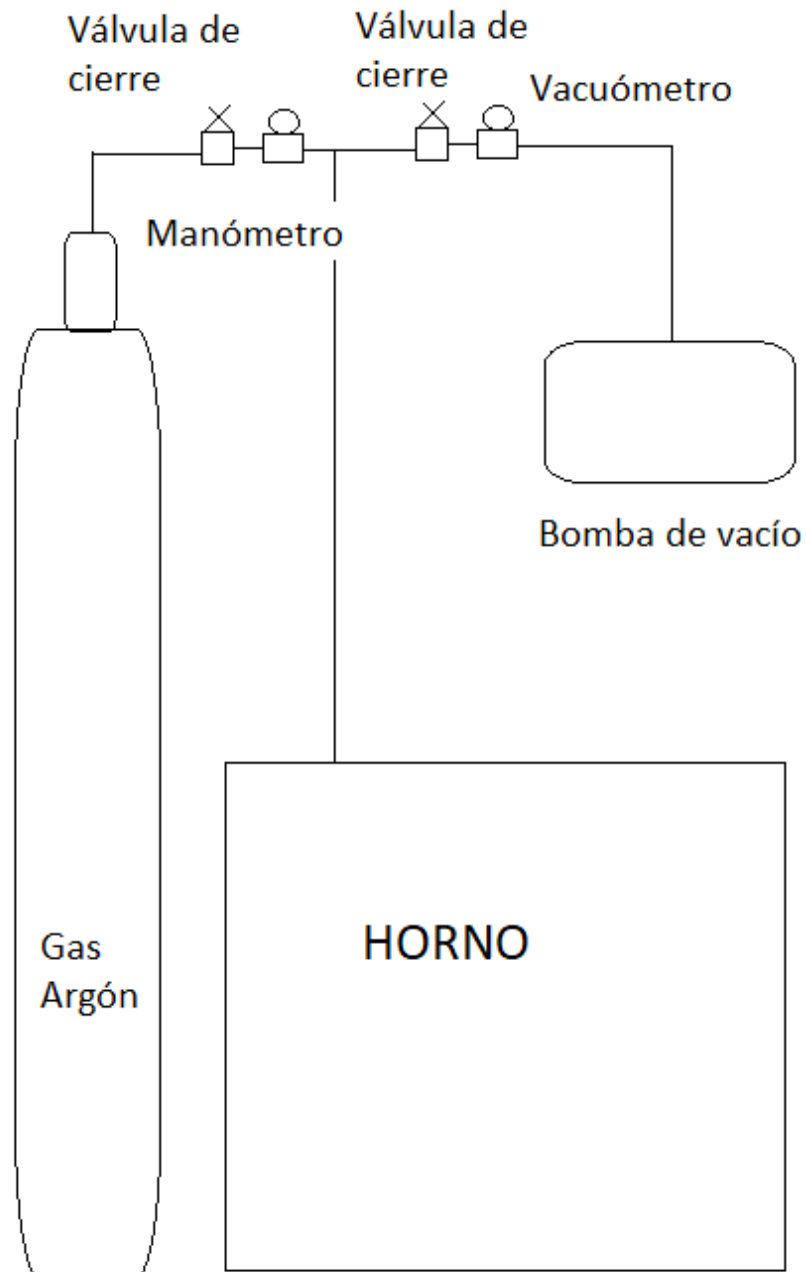
Se requiere fabricar un contenedor/molde para realizar el proceso de fundición de aluminio el cual tiene los siguientes datos de entrada:

*Tabla 7: Parámetros de diseño del contenedor.*

Tabla de datos para el diseño del contenedor		
Detalle	Dimensiones	Observaciones
Material a fundir	Aluminio	Componente principal de la fabricación de la espuma de aluminio.
Dimensiones de parte a fabricar.	25mm diámetro 200mm de largo	La medida necesaria es de 20mm de diámetro y 155mm de largo, se ha sobre dimensionado para el proceso de mecanizado.
Apertura	Pernos M8x1.5mm	Tuerca fija perno extraíble, para facilidad de desarmado de partes.
Temperatura aplicable	740 °C	Temperatura sobre el punto de fusión del aluminio.
Material del contenedor	Acero inoxidable AISI 304	Punto de fusión más alto que el aluminio. No genera oxidación.
Temperatura de fusión del contenedor	1454°C	Fuente IMPORTACEROS ecuador
Salida hermética	Válvula de aguja	Válvula hermética en acero inoxidable.
Conexión a sistema	Acople rápido	Fabricado en acero inoxidable

**b. Borrador**

Sistema de fabricación de espuma de aluminio.



*Figura 30: Bosquejo de sistema de contenedor con atmosfera controlada 1.*

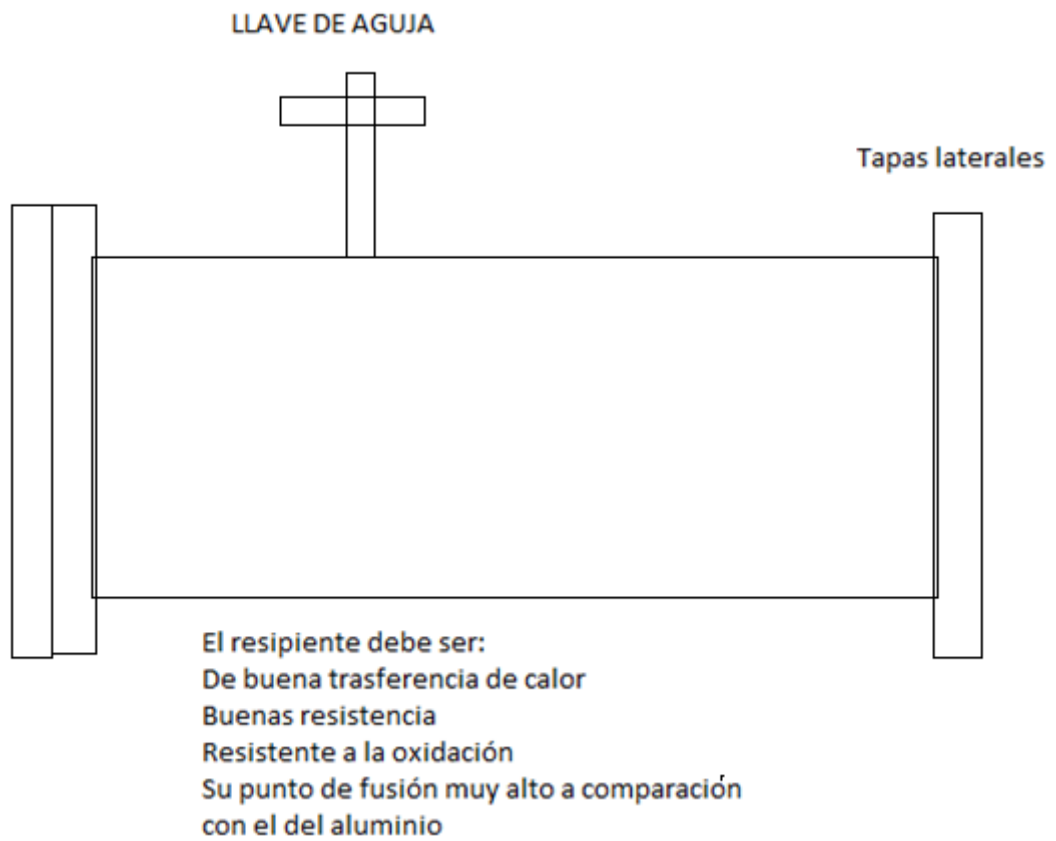


Figura 31: Bosquejo de sistema de contenedor con atmosfera controlada  
2.

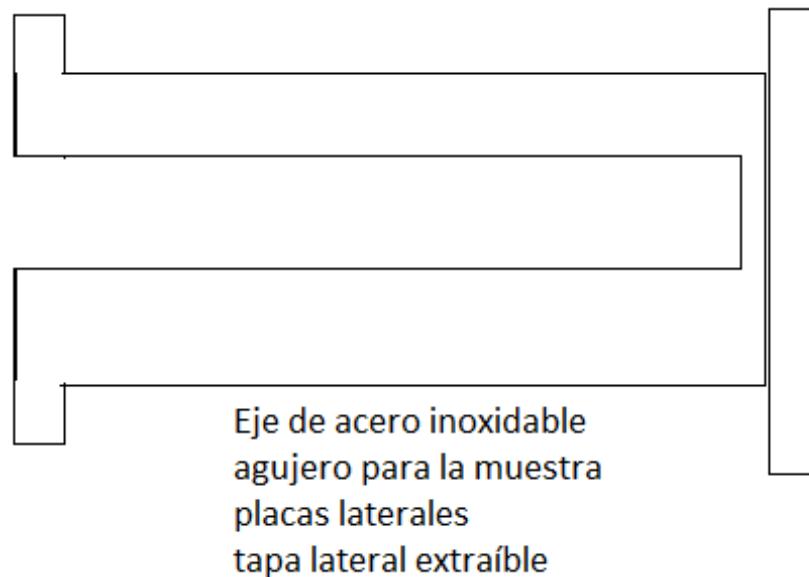
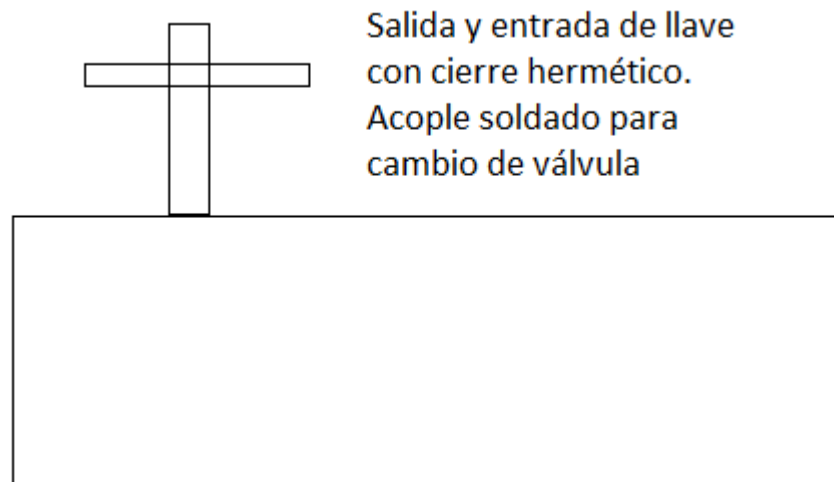


Figura 32: Bosquejo de sistema de contenedor con atmosfera controlada  
2.



*Figura 33: Bosquejo de sistema de contenedor con atmósfera controlada  
3.*

### **c. Diseño CAD 1**

Se realiza los diseños en los programas de diseño computarizado CAD para su aprobación y posterior fabricación.

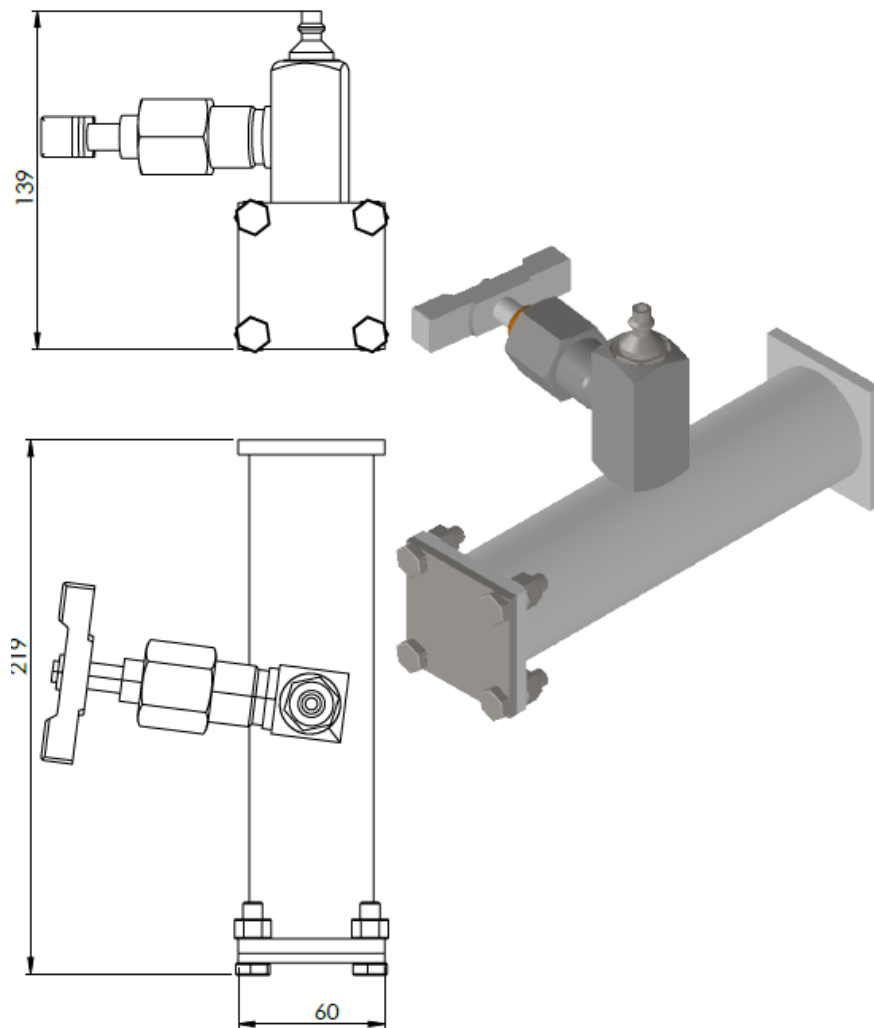
Las partes diseñadas son:

- Molde de espuma de aluminio
  - Molde
  - Tapa de molde

El molde se ha propuesto realizarlo mediante mecanizado de un eje para tener mayor precisión en las medidas y que mantenga la forma circular que se requiere para las probetas de tensión.

La tapa de molde se propone fabricar de placas de acero inoxidable para mayor duración y menor desgaste, también se realizará perforaciones en la tapa para soldar la tubería de ingreso y salida de gases al sistema.

En el diseño mostrado no se contempla la parte de ensamblaje del sistema de vacío ni el ingreso de gases (argón).

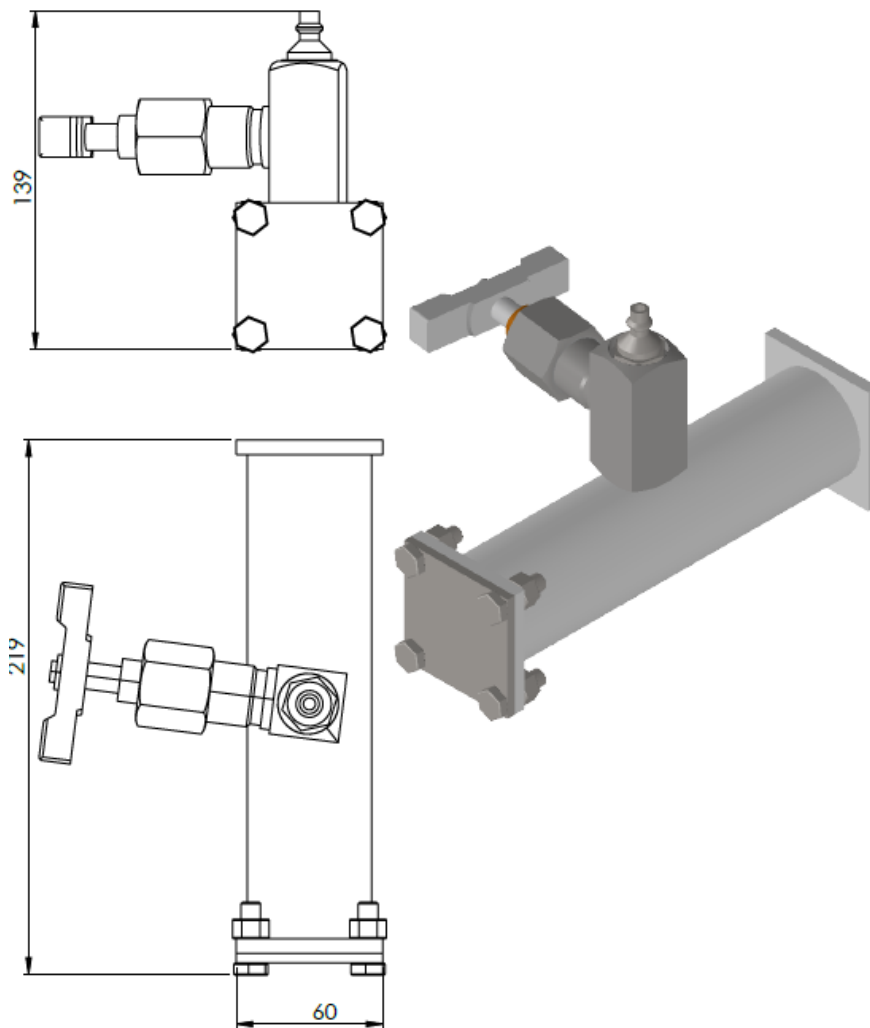


*Figura 34: Plano molde espuma de aluminio V1.*

Se pone el planos de la pieza ensamblada principal de cada modelo, los demas planos se indican en el Anexo 4: Diseño CAD – Planos molde espuma de aluminio.

Los modelos expresados en las figuras anteriores tienen el mismo molde, la diferencia se encuentra en el tipo de conexión al sistema de vacio y a la inserción de gas en el proceso.

En el Anexo 4: Diseño CAD – Planos molde espuma de aluminio. se observa una salida en tubo de acero inoxidable hacia el sistema de vacio e insercion de gas al proceso. Tambien se observa un acople rapido para colocar las cañerías para generar el vacuum vagging e ingresar argón al sistema de admosfera controlada.



*Figura 34: Plano molde espuma de aluminio VI.*

Se muestra como un molde para colocarlo en posición horizontal, el diseño de lo ha realizado pensando en las dimensiones internas del horno a usarse en el proceso, el ingreso y salida de gases y aire se lo ha pensado de manera que no se encuentre fijo a los demás componentes del sistema, para asegurar la hermeticidad al momento de colocarlo en el horno para calentarlo, este modelo contempla un acople rápido para la fácil colocación del complemento del sistema.

#### **d. Selección de material del contenedor**

La selección de material se realiza mediante un software de computador, usando los siguientes datos:

- Resistencia a la tracción: 500 a 1000 MPa
- Máxima temperatura de servicio: Mínimo 600 °C y Máximo 800 °C

- Exposición al agua(sal): Excelente
- Flamabilidad: No Inflamable

En la base de datos que encontramos en el programa se observa que es muy amplia, aplicando filtros seleccionamos solo materiales metálicos:

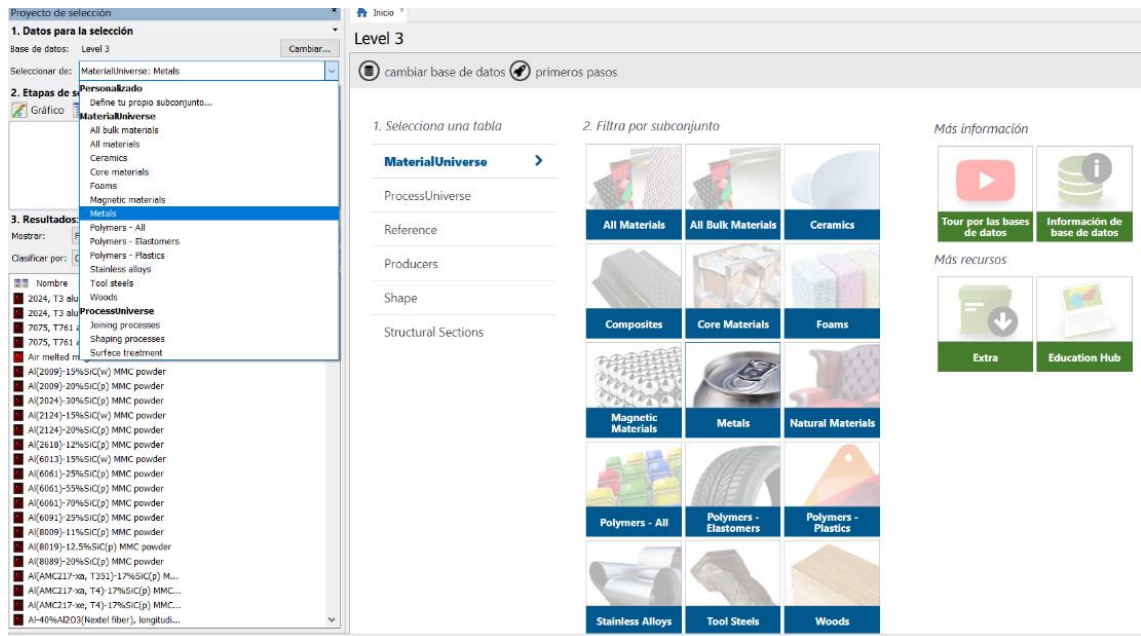


Figura 35: Programa de selección de material – aplicar filtros.

Dentro del programa de selección de materiales, se observa que la base de datos es muy extensa, para iniciar la selección de material aplicamos filtros de las propiedades que necesitamos para nuestro material.



Al iniciar el programa de selección de materiales aplicamos límites de temperatura y límites de resistencia, estos valores coinciden con la temperatura que se va a trabajar en el horno.

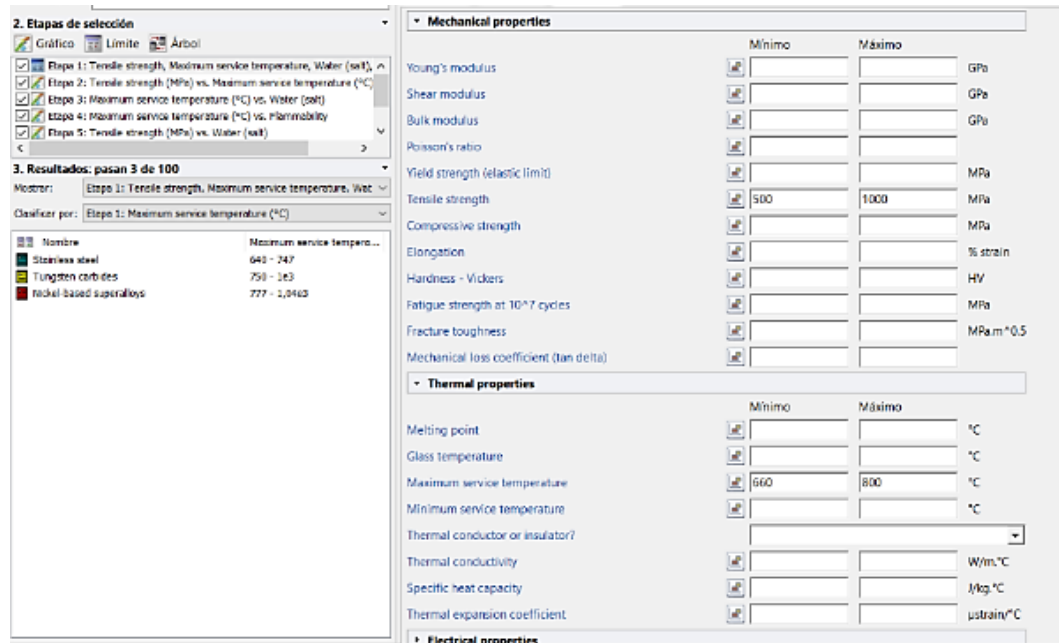


Figura 36: Programa de selección de material – límites de temperatura y resistencia.

Los límites de temperatura y resistencia se colocan de acuerdo a las temperaturas necesarias para la fusión del aluminio, los valores son entre 600 °C y 800 °C.

Los materiales a usarse son Aluminio y cloruro de sodio (sal en grano), en este caso limitaremos el modelo para la durabilidad de contacto entre agua y sal, como se indica en la siguiente figura:

▸ Electrical properties  
 ▸ Optical properties  
 ▸ Critical Materials Risk  
 ▸ Processability  
 ▸ Durability: water and aqueous solutions  
 Water (fresh) [dropdown]  
 Water (salt) Excellent [dropdown]  
 Soils, acidic (peat) [dropdown]  
 Soils, alkaline (clay) [dropdown]  
 Wine [dropdown]  
 ▸ Durability: acids  
 ▸ Durability: alkalis  
 ▸ Durability: fuels, oils and solvents  
 ▸ Durability: alcohols, aldehydes, ketones  
 ▸ Durability: halogens and gases  
 ▸ Durability: built environments  
 ▸ Durability: flammability  
 Flammability Non-flammable [dropdown]

Figura 37: Programa de selección de material – durabilidad del material.

En la selección de materiales, se utiliza los parámetros de contacto con agua sal, el comportamiento se necesita que sea excelente y el parámetro de la flamabilidad se necesita que sea no inflamable, estas especificaciones fueron ingresadas para obtener como resultado un material resistente al contacto con el cloruro de sodio (sal) y no inflamable.

El programa basado en los datos aportados nos indica la siguiente gráfica de la Resistencia a la tensión vs Máxima Temperatura de servicio.

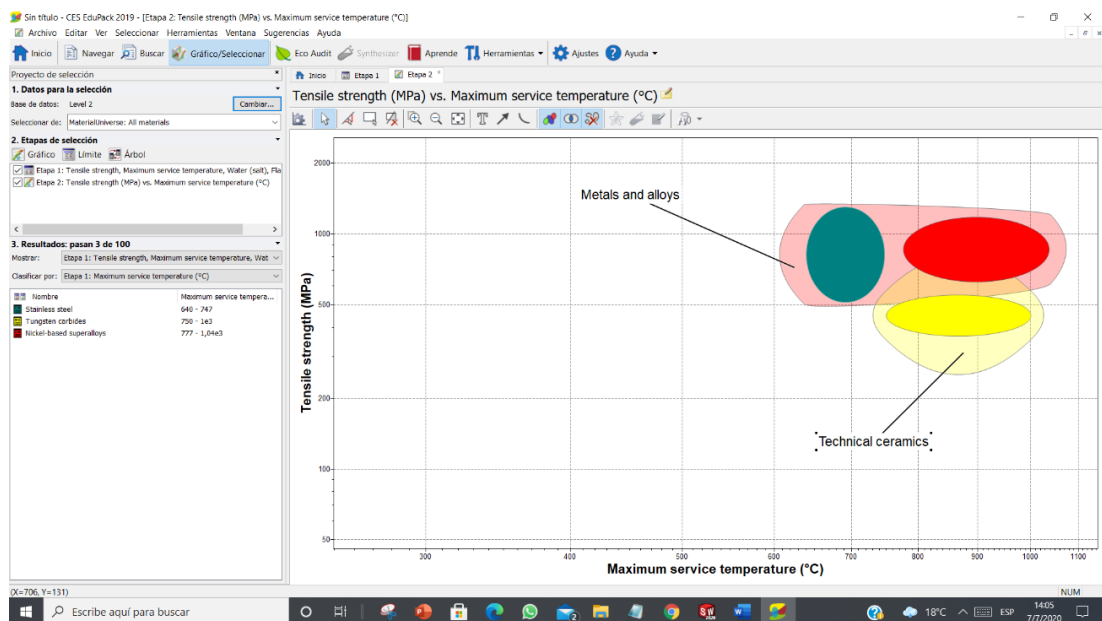


Figura 38: Programa de selección de material – selección de materiales.

El programa de selección de materiales, nos indica en los resultados que para la comparación entre Resistencia a la tensión vs Máxima Temperatura de servicio los materiales más adecuados son los metales y sus aleaciones, materiales cerámicos.

Se genera una gráfica de la Resistencia a la tensión vs Agua (sal), en el programa de selección de materiales, la gráfica es útil para analizar que material se comporta mejor y con mejores características para el uso dentro del horno a altas temperatura y en contacto con cloruro de sodio (sal).

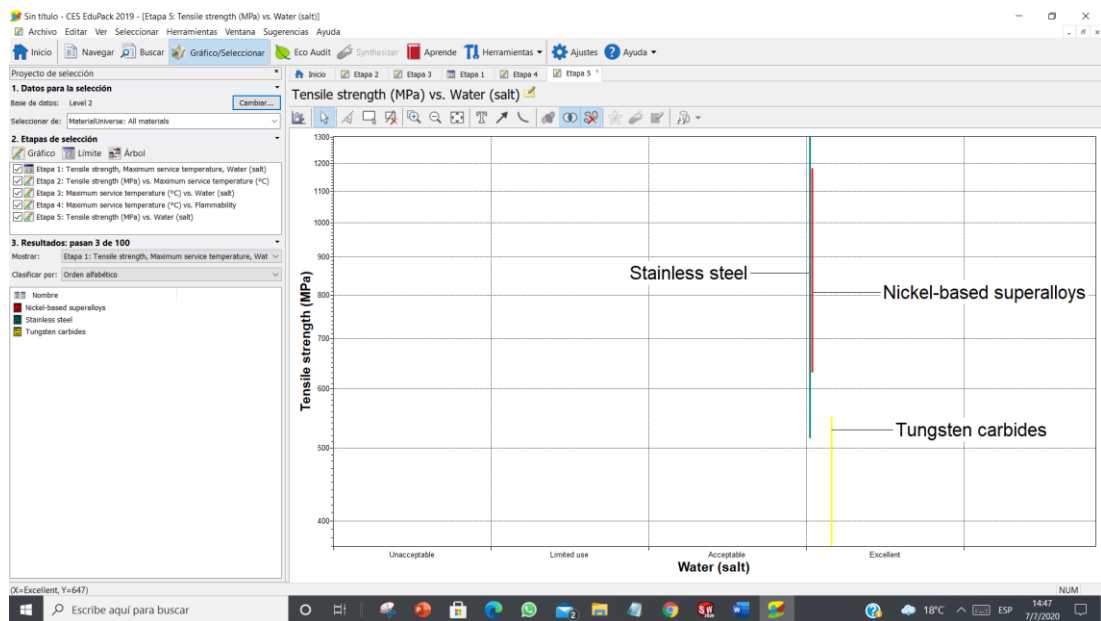


Figura 39: Programa de selección de material – diagrama agua(sal) vs resistencia a la tensión.

El programa nos da como resultado, acero inoxidable, superaleaciones con base de níquel y carburo de tungsteno, esto se expresa en la figura del diagrama agua(sal) vs resistencia a la tensión.

La siguiente gráfica se generó para filtrar los resultados con los materiales que tienen durabilidad en contacto con sal a elevada temperatura.

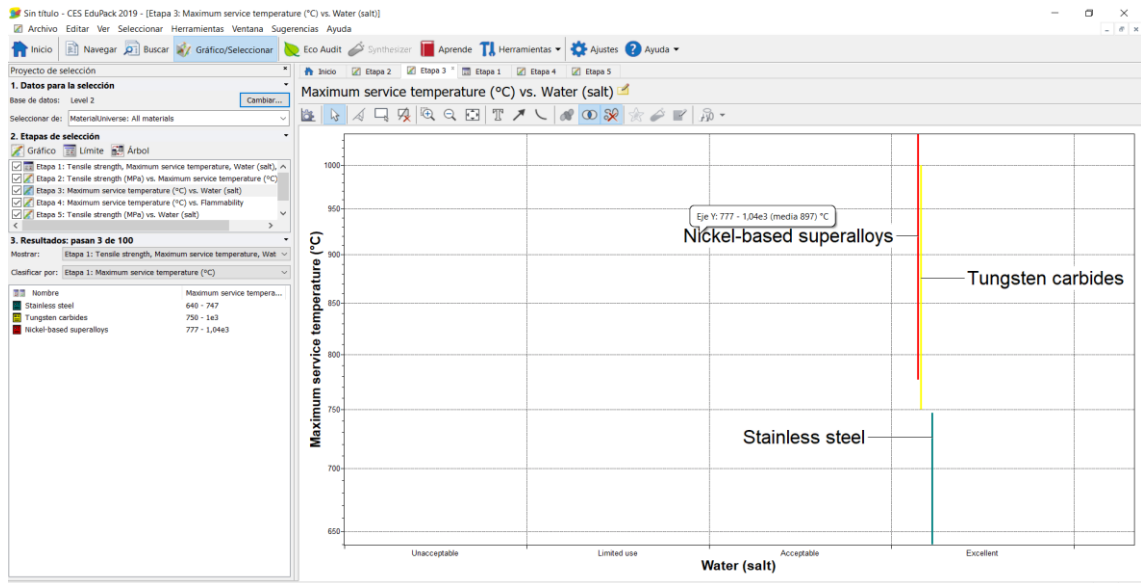


Figura 40: Programa de selección de material – Temperatura Máxima de servicio vs Durabilidad al agua(sal).

El programa de selección de materiales en la figura Temperatura Máxima de servicio vs Durabilidad al agua(sal) nos indica que los materiales más adecuados son el acero inoxidable, superaleaciones con base de níquel y carburo de tungsteno.

En la siguiente figura se muestra la gráfica de la Máxima temperatura de servicio vs Flamabilidad, muestra los materiales con su capacidad de flamabilidad y la temperatura de trabajo en la que pueden ser usados, este filtro nos ayuda a reducir el número de materiales a escoger.

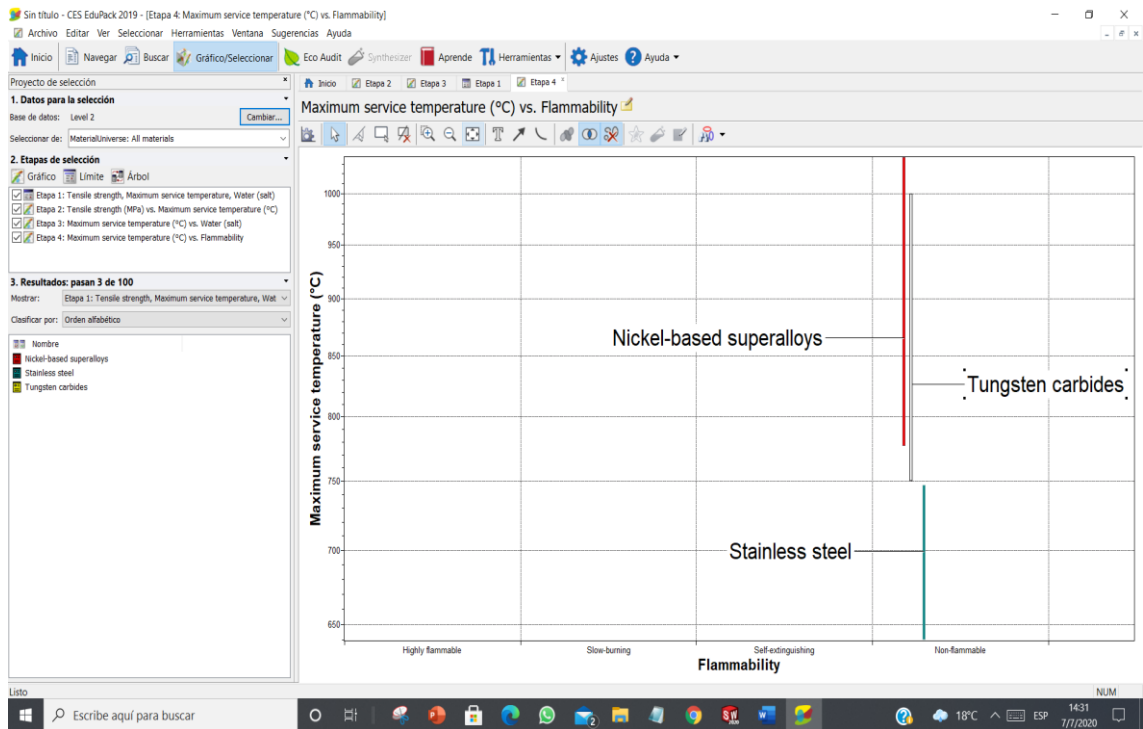
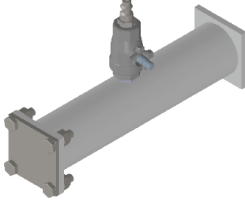


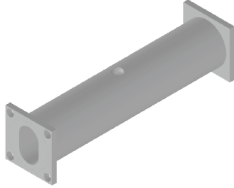

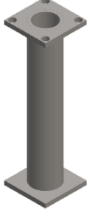
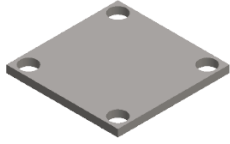
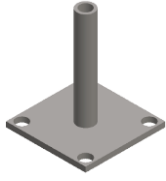
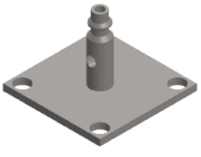
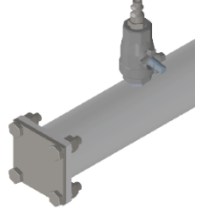
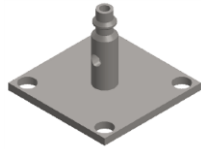


Figura 41: Programa de selección de material – diagrama Máxima temperatura de servicio vs Flamabilidad.

En el programa observamos que el mejor material para las características del proceso está dado el acero inoxidable.

**e. Selección de diseño CAD**

*Tabla 8: Selección de diseño CAD.*

<b>SELECCIÓN DE DISEÑO CAD</b>				
<b>Detalle</b>	<b>Modelo CAD 1</b>	<b>Modelo CAD 2</b>	<b>Modelo CAD 3</b>	<b>Observaciones</b>
Diseño de contenedor de atmosfera controlada				
Molde de contenedor				Mismo molde en los dos diseños
Tapa de molde de contenedor				Tapa diferente
Acople de contenedor		N/A		

Al observar la tabla anterior, se observa que la diferencia está en la tapa, exactamente en la salida, esta tapa fue seleccionada por una tabla de ponderaciones.

Tabla 9: Tabla de ponderaciones de diseño de tapas del molde.

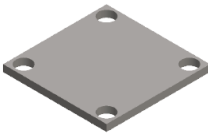
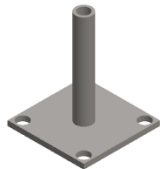
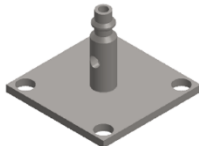
Tabla de ponderaciones de diseño de tapas de molde						
Detalle	 <b>V1</b>		 <b>V2</b>		 <b>V3</b>	
	Ponderación	Descripción	Ponderación	Descripción	Ponderación	Descripción
Resistente a la temperatura	5	AISI 304	5	AISI 304	5	AISI 304
Facilidad de anclaje en frío	5	Solo funciona como tapa.	5	Va unido al sistema de vacío y gas inerte.	5	La tapa contiene el acople rápido para la unión al sistema de vacío
Facilidad de anclaje en caliente	3	Temperatura a alcanzar 640 grados. Pernos.	5	Va instalado al sistema.	3	Temperatura a alcanzar 640 grados. Pernos.
Apertura	5	Pernos	5	Pernos.	5	Pernos
Altura	5	Baja. Colocada en forma horizontal.	1	Alta, perforación en tapa superior del horno.	3	Alta. Posición vertical.

Tabla 9: Continuación.

Hermeticidad del sistema	5	Placa con pernos sin perforaciones. Hermético.	3	Se puede revisar en los manómetros y vacuómetros.	1	Lleva válvula de bola en la salida. No se podría verificar fugas en el envase.
TOTAL	28		24		22	
Alto 5 – Medio 3 – Bajo 1						

Se selecciono el modelo de tapa V1, por la altura que restringe el honor a usarse en el proceso de fabricación de la espuma de aluminio.

**f. Esquema de configuración final**

Después de realizado el diseño se ha llegado a seleccionar los siguientes componentes para el contenedor de atmosfera controlada.

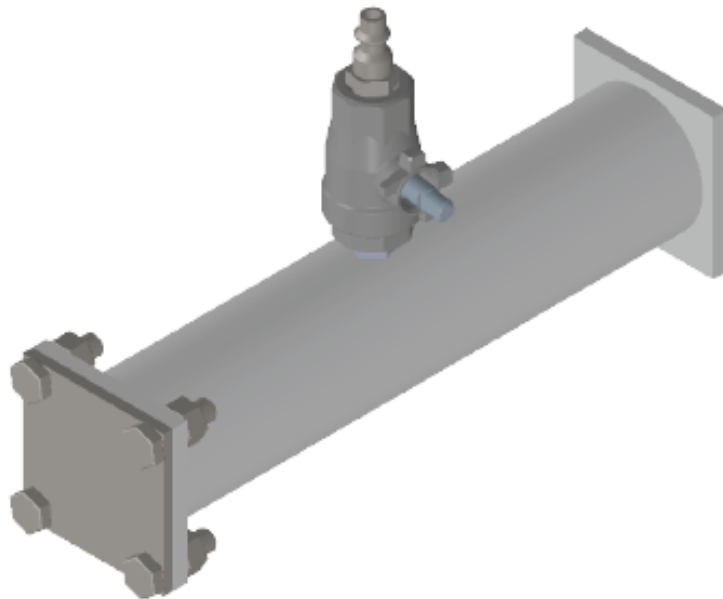


Figura 42: Configuración final contenedor atmosfera controlada.



En la gráfica se muestra que se ha tomado el modelo CAD 1 de la Tabla 8: Selección de diseño CAD.

### 2.2.6. Cálculos aplicados al recipiente de atmosfera controlada

Utilizando un programa de diseño CAD, se ha generado el modelo para fabricación, para validar el modelo se ingresa al módulo de elementos finitos, como se muestra a continuación.

#### a. Cálculos teóricos del recipiente de atmosfera controlada

##### RESISTENCIA DE PERNOS

Para el cálculo de la resistencia de los pernos utilizados en el recipiente de atmosfera controlada se utilizó las fórmulas del libro diseño en ingeniería mecánica de SHIGLEY [19].

- Espesor del material apretado

Todo el material apretado entre la cara del perno y la cara de la tuerca

$$l = \text{espesor de la tapa} + \text{contrapa}$$

$$l = 6 \text{ mm} + 6 \text{ mm}$$

$$l = 12 \text{ mm}$$

$$l = 0.012 \text{ m}$$

- Longitud del sujetador

$$L \geq l + H$$

Donde:

$l = \text{Espesor de la tapa y contratapa}$

$H = \text{Altura de tuerca hexagonal}$

$L = \text{Longitud del sujetador}$

$$L \geq 18.8 \text{ mm} \cong 25 \text{ mm}$$

- Longitud roscada

Para:

$$L \leq 125 \text{ mm}$$

$$L_T = 2d + 6$$

Donde:

$d = \text{diametro nominal del perno}$

$$L_T = 22 \text{ mm}$$

- Longitud de la parte útil sin rosca en el agarre

$$l_d = L - L_T$$

$$l_d = 25 \text{ mm} - 22 \text{ mm}$$

$$l_d = 3 \text{ mm}$$

$$l_d = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

- Longitud de la parte con rosca en el agarre

$$l_t = l - l_d$$

$$l_t = 12 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$$

$$l_t = 9 \text{ mm}$$

$$l_t = 9 * 10^{-3} \text{ m}$$

- Rigidez del sujetador

$$k_b = \frac{A_d(A_t)(E)}{A_d(l_t) + A_t(l_d)}$$

Donde:

$A_d = \text{Area de la parte sin rosca}$

$A_t = \text{Area de la parte roscada}$

$E = \text{Modulo de elasticidad del acero inoxidable 304}$

$l_d = \text{Longitud de la parte util en el agarre}$

$l_t =$  Longitud de la parte roscada en el agarre

$$A_d = \frac{\pi(d)^2}{4}$$

$$A_d = \frac{\pi(0.008)^2}{4}$$

$$A_d = 5.02 * 10^{-5} m^2$$

$$k_b = \frac{(5.027 \times 10^{-5})(3.66 \times 10^{-5})(193 \text{ GPa})}{(5.027 \times 10^{-5} m^2)(9 \times 10^{-3} m) + (3.66 \times 10^{-5} m^2)(3 \times 10^{-3} m)}$$

$$k_b = 0.63 \frac{GN}{m}$$

- Rigidez de los elementos

$$k_m = \frac{0.5774\pi(E)(d)}{2 \ln \left( 5 \frac{(0.5774l + 0.5d)}{(0.5774l + 2.5d)} \right)}$$

$$k_m = \frac{0.5774\pi(193 \text{ GPa})(0.008)}{2 \ln \left( 5 \frac{(0.5774(0.012) + 0.5(0.008))}{(0.5774(0.012) + 2.5(0.008))} \right)}$$

$$k_m = 2.0 \frac{GN}{m}$$

- Constante de rigidez de la unión

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

$$C = \frac{0.63 \frac{GN}{m}}{0.63 \frac{GN}{m} + 2.0 \frac{GN}{m}}$$

$$C = 0.20$$

- Precarga

$$S_p = 830 \text{ MPa}$$

Donde:

$S_p =$  Resistencia de prueba del perno

$F_i = \text{Precarga}$

$F_p = \text{Carga resultante en el perno}$

$$F_p = A_t(S_p)$$

$$F_p = (3.66 * 10^{-5} m^2)(830 \frac{MN}{m^2})$$

$$F_p = 0.0303 N$$

$$F_i = 0.75F_p$$

$$F_i = 0.75(0.0303 MN)$$

$$F_i = 0.0200 N$$

- Carga externa

$$P = \frac{P_{Total}}{4}$$

$$P = \frac{0.101325 \frac{MN}{m^2}}{4}$$

$$P = 0.02533 \frac{MN}{m^2}$$

- Factor de seguridad

$$n = \frac{S_p A_t - F_i}{CP}$$

$$n = \frac{830(3.66 \times 10^{-5}) - 0.0200}{0.202 \times 0.02533}$$

$$n = 2.031$$

## RESISTENCIA DEL COTENEDOR

- Cálculo de los esfuerzos

$$P_o = 101325.9 Pa$$

$$r_o = 0.0508 mm$$

$$P_i = -2 \text{ Pa}$$

$$r_i = 0.041 \text{ mm}$$

$$r = 0.041 \text{ mm}$$

Donde:

$P_o =$  Presion externa

$r_o =$  Radio externo

$P_i =$  Presion interna

$r_i =$  Radio interno

$r =$  Radio punto critico

Esfuerzo Tangencial

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 - r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_t = 59.984 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Radial

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 + r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_r = -60.2778 \text{ MPa}$$

Esfuerzo axial

$$\sigma_a = \frac{P_i (r_i)^2 - P_o (r_o)^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_a = -2.90 * 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

$$59.984 \text{ MPa} > -2.90 * 10^{-3} \text{ MPa} > -60.2778 \text{ MPa}$$

- Cálculo de factor de seguridad

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma' = 104.151 MPa$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma'}$$

$$n = \frac{206.8 MPa}{104.151 MPa}$$

$$n = 1.98$$

## b. Ensayos de conexiones (pernos)

Ingresamos el modelo en el análisis estático del programa, se aplica el material del cual se fabricará el molde, acero inoxidable 304.

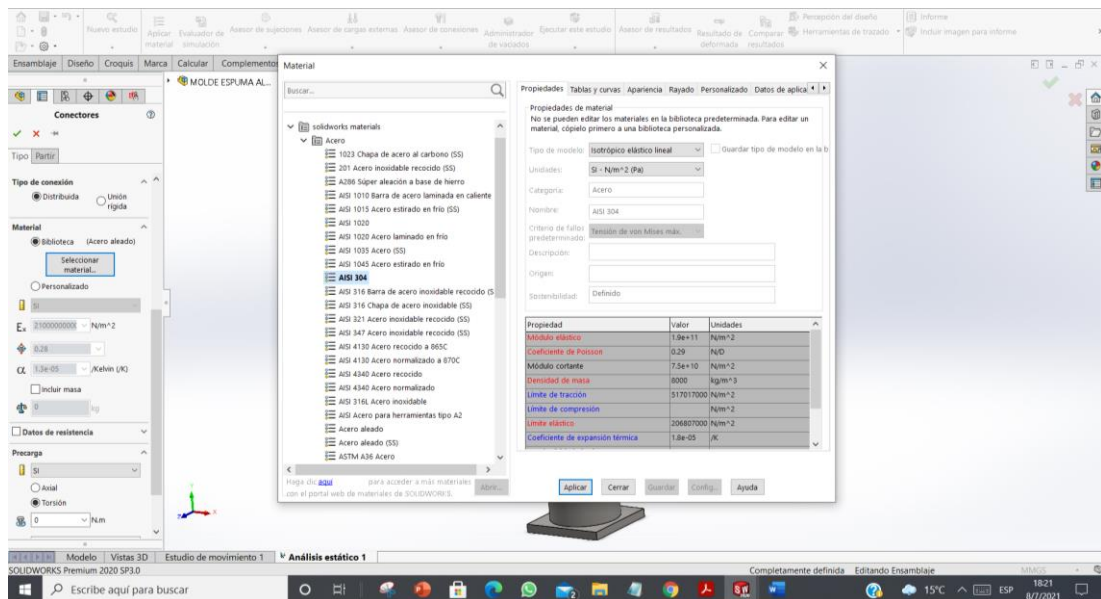


Figura 43: Molde ensayo no destructivo-aplicar material – acero inoxidable.

Ingresamos al módulo de conexiones y aplicamos pernos seleccionando aristas y poniendo en cada lugar, total 4 pernos.

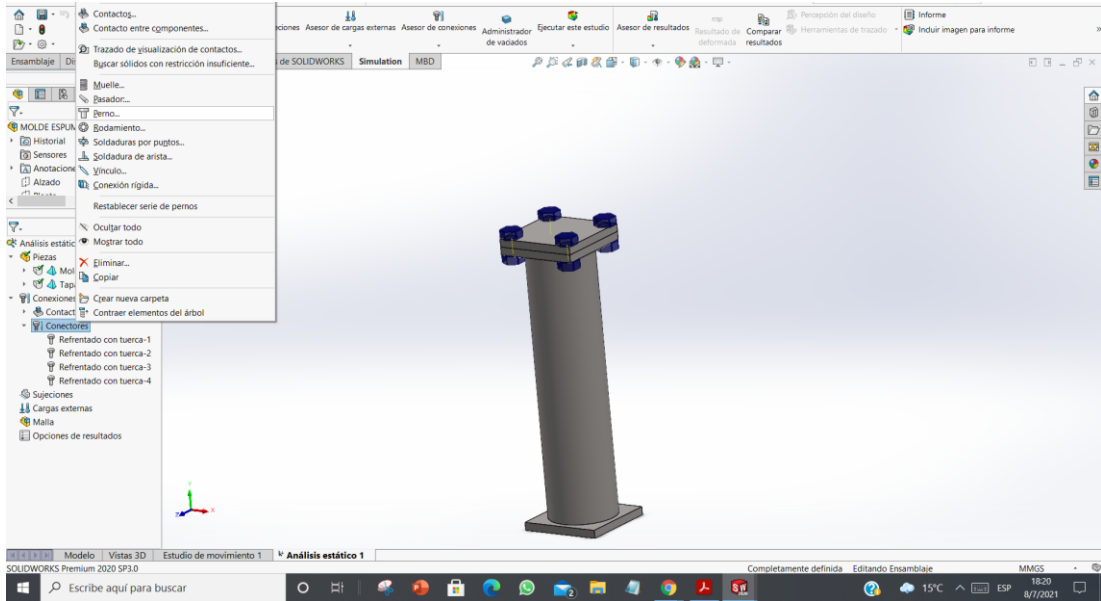


Figura 44: Molde ensayo no destructivo – conexiones – pernos.

Al modelo se debe dar restricciones para verificar la resistencia de los pernos:

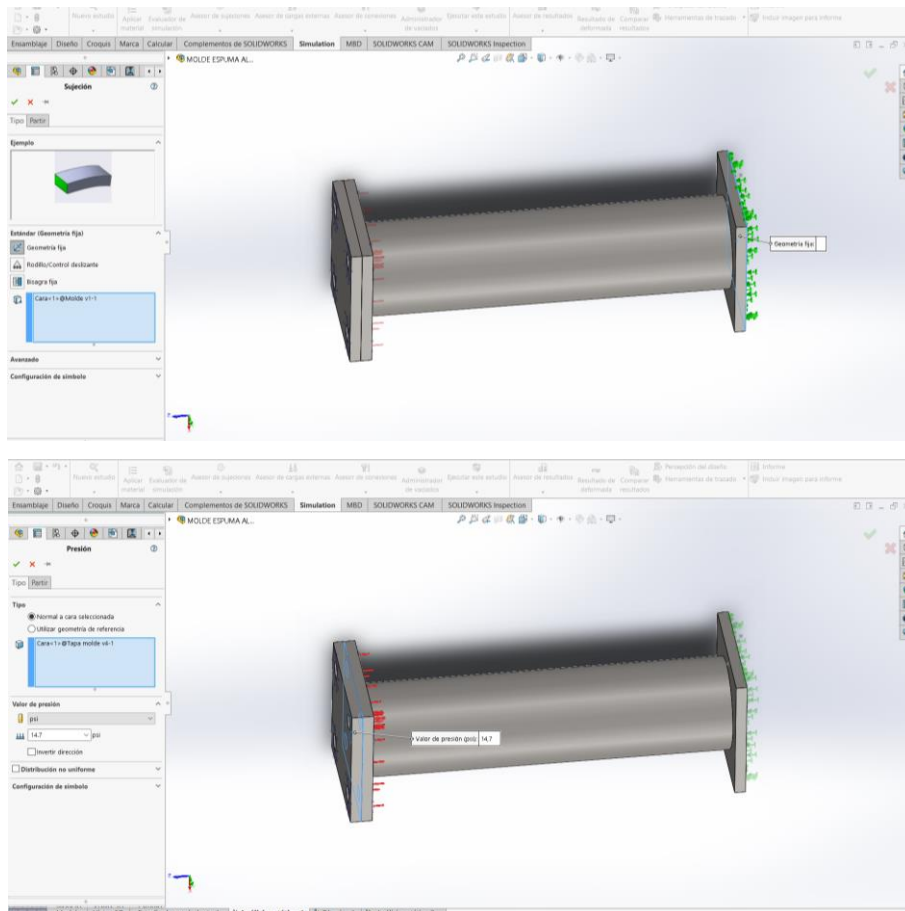


Figura 45: Molde ensayo no destructivo – pernos – carga aplicada.

Se realiza el análisis de conexiones, creando una malla fina para mejorar el resultado y evitar errores:

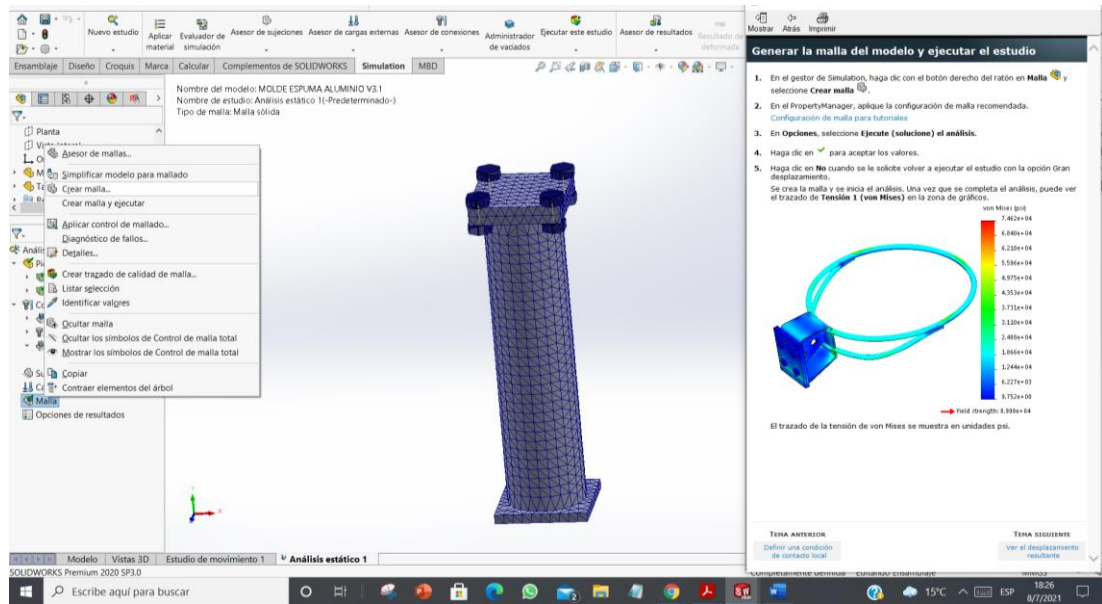


Figura 46: Molde ensayo no destructivo- pernos – mallado.

Teniendo el programa configurado y enviado a ejecutarse, leemos los resultados de tensiones en cada lugar del recipiente

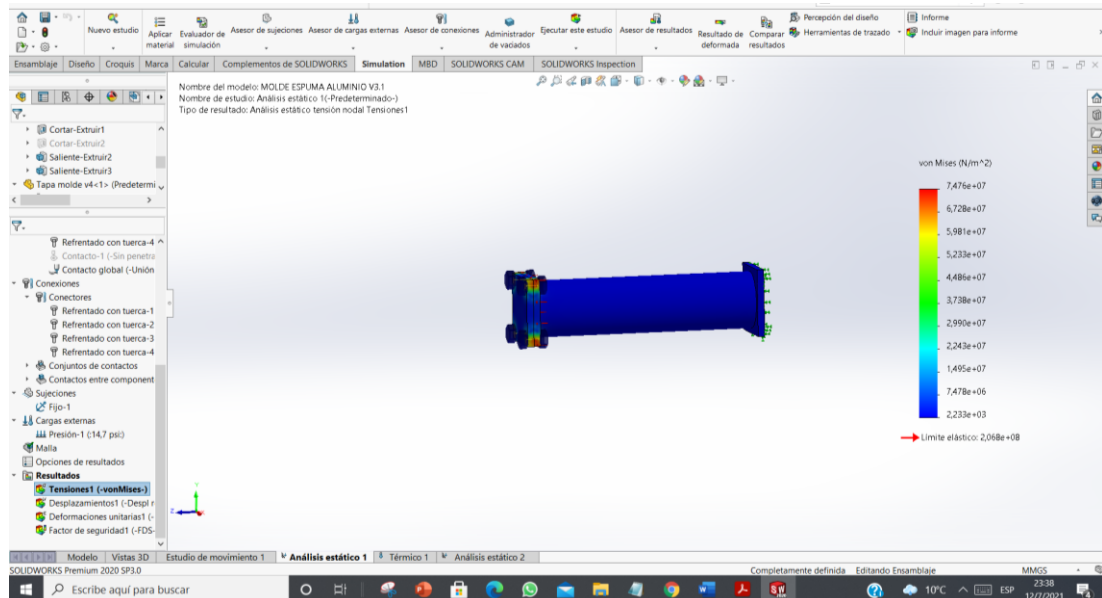
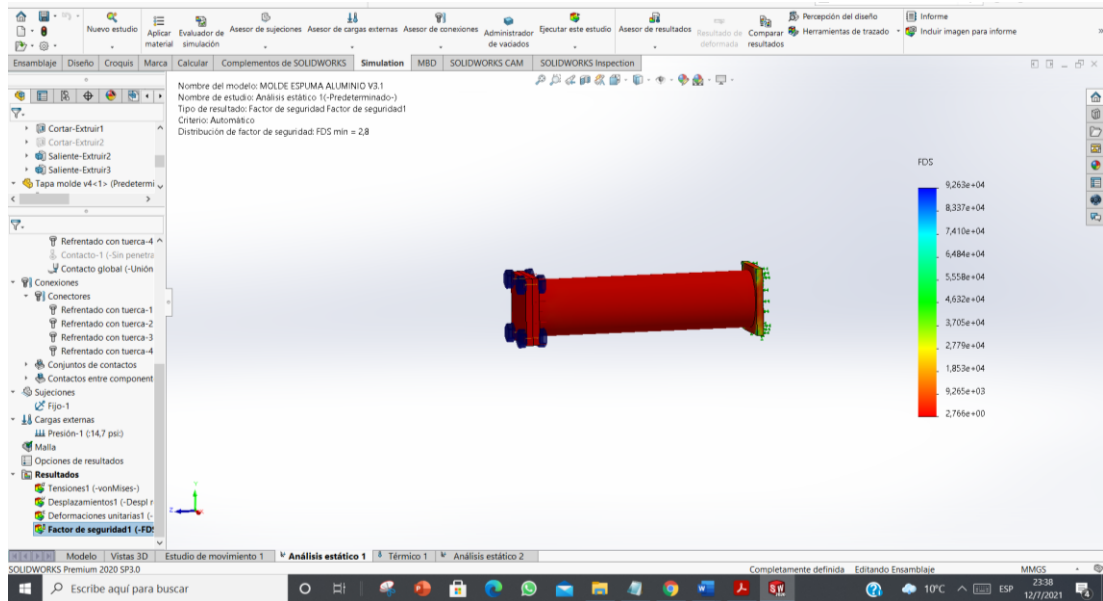


Figura 47: Molde ensayo no destructivo- resultados tensiones.

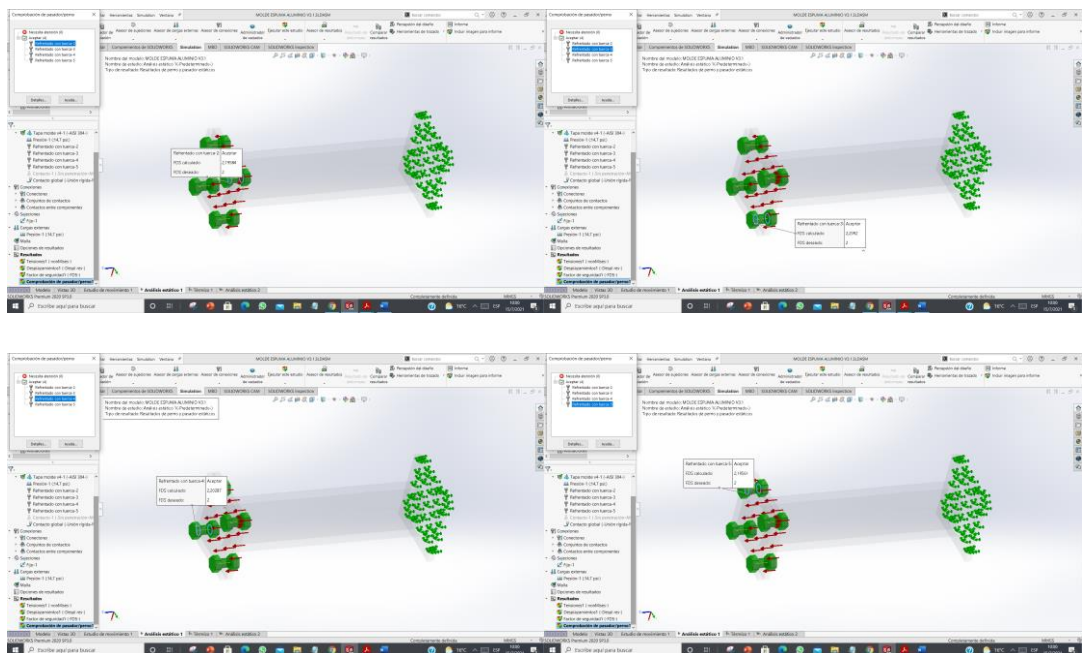
El programa también nos muestra el resultado de factor de seguridad:





*Figura 48: Molde ensayo no destructivo – resultados – factor de seguridad.*

El análisis actual se ejecutó para verificar la resistencia de las conexiones empernadas ubicadas en la tapa del contenedor.



*Figura 49: Molde ensayo no destructivo- conexiones validacion de resultados.*

En la figura anterior tenemos cuatro pernos colocados en el recipiente y nos muestra que todos los pernos se encuentran dentro del factor de seguridad deseado.

### c. Análisis térmico de recipiente de atmosfera controlada

Para el análisis termino colocamos en el módulo de nuevo análisis / análisis térmico, este análisis deberá contener un material para tomar sus datos de resistencia:

Los datos de resistencia son dados de la biblioteca de materiales del programa cada, asignando el material acero inoxidable 304, como se muestra a continuación:

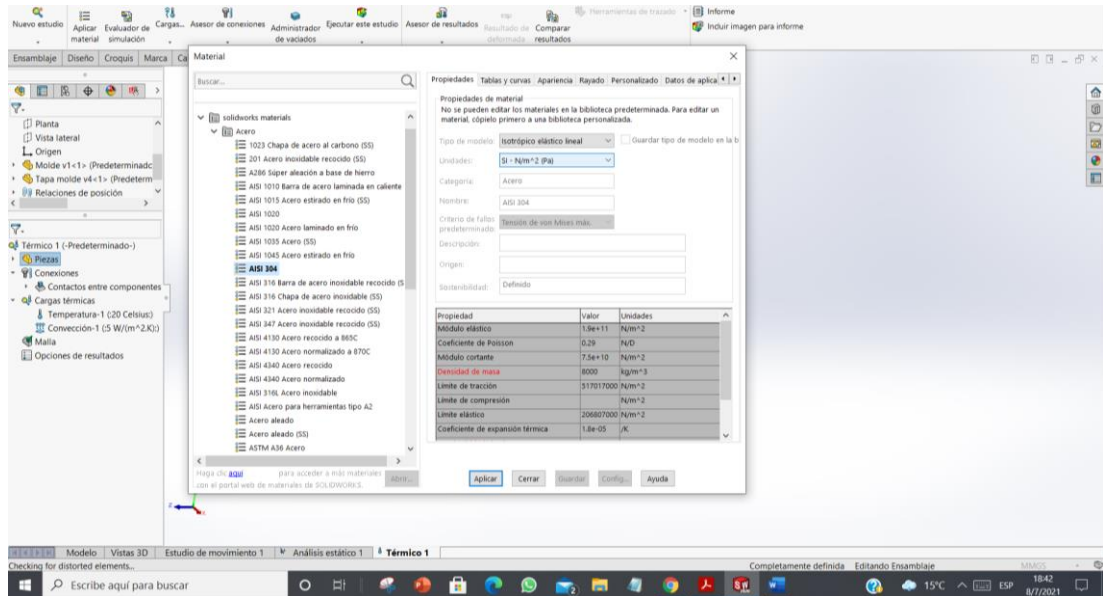


Figura 50: Molde ensayo no destructivo-termico-aplicar material.

Teniendo un modelo con un material especificado, colocamos la temperatura inicial a las que está sometido:

Esta carga térmica se aplicará al recipiente por todas sus caras exteriores, el valor de temperatura inicial es de 20 grados centígrados.

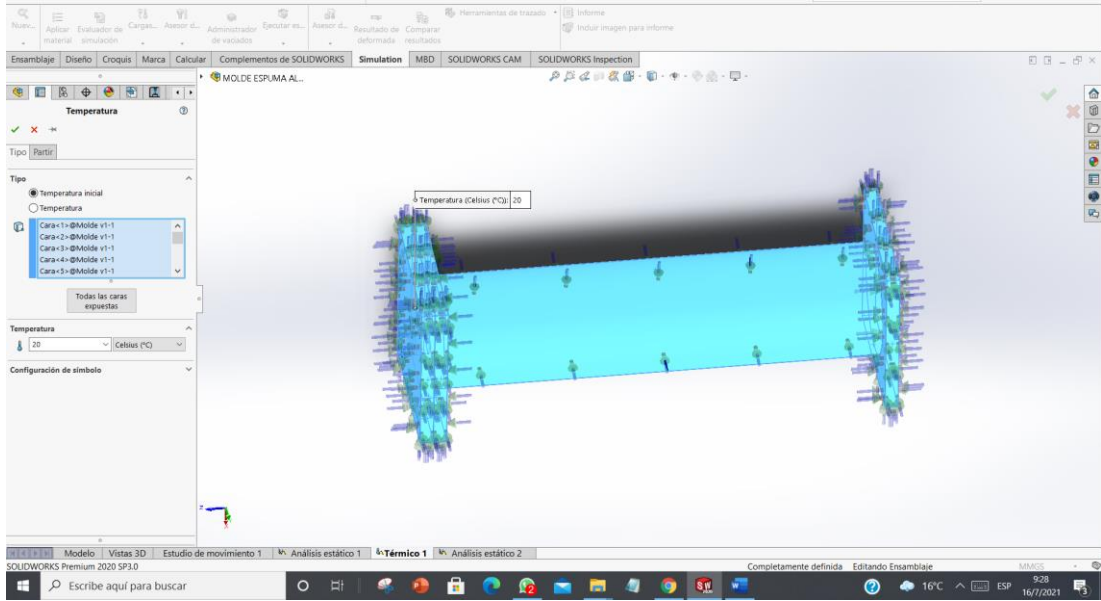


Figura 51: Molde ensayo no destructivo.

Al modelo se le da una característica de convección, con el valor del aire (5 W/m<sup>2</sup>.K).

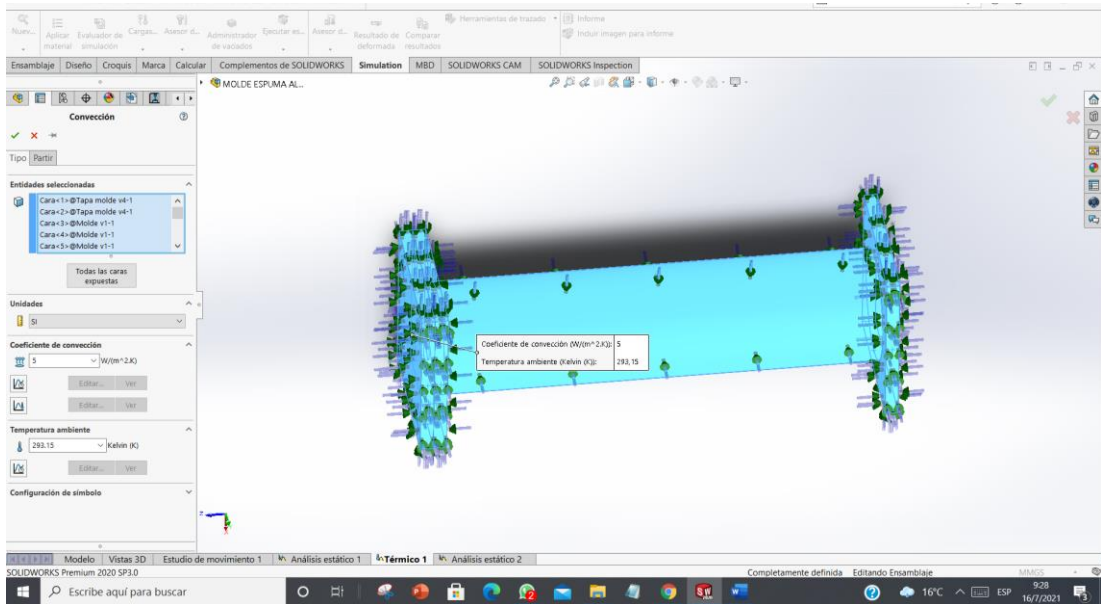
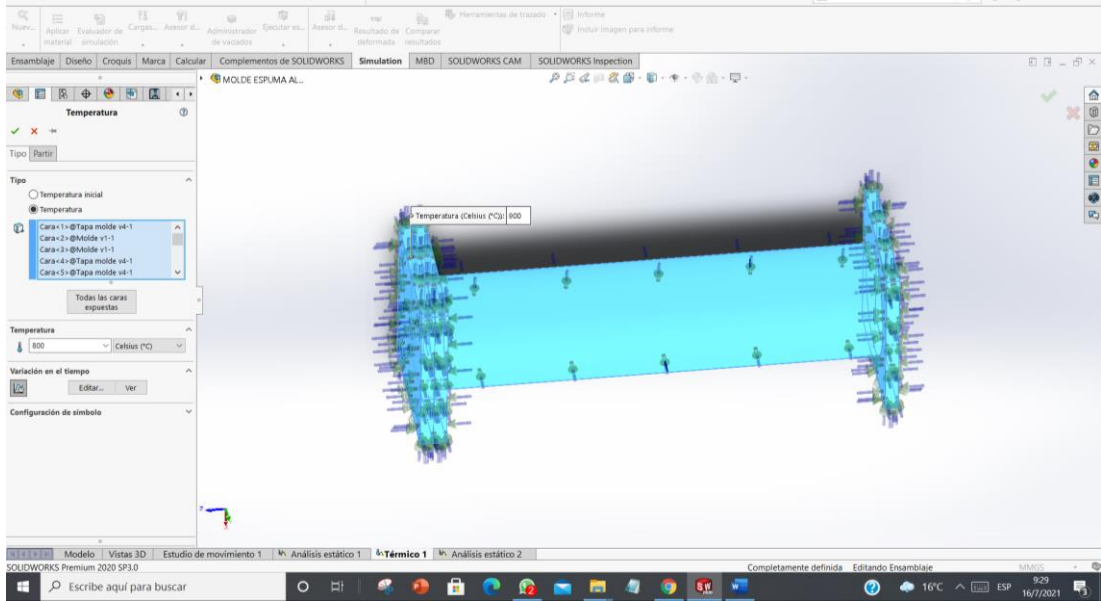


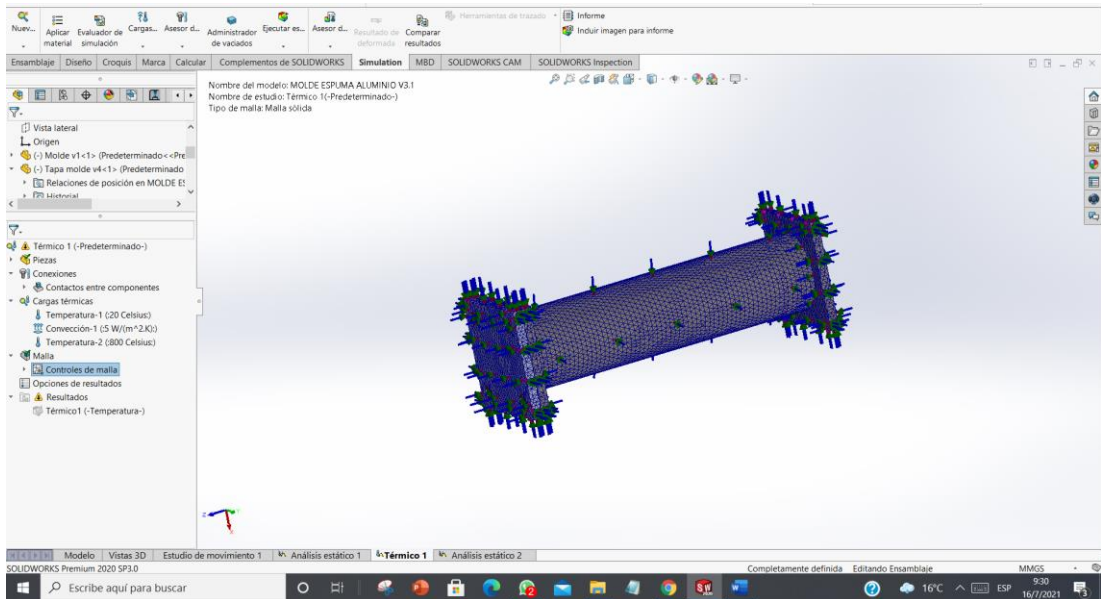
Figura 52: Molde ensayo no destructivo-termico-convección.

Aplicamos una carga térmica que indique la temperatura final, que deseamos obtener, esta carga térmica se ha establecido en 800 grados Celsius.



*Figura 53: Molde ensayo no destructivo-termica-temperatura final.*

Se coloca una restricción en una arista para soportar el modelo y se procede a mallar para ejecutar el modelo.



*Figura 54: Molde ensayo no destructivo-termico-mallado.*

El análisis se ha realizado para un análisis térmico transitorio de 10 tiempos con duración de una hora y media (1.5 horas), con 10 intervalos de 540 segundos cada uno. Los datos resultantes se obtienen favorables para la fabricación del molde y se muestran en la siguiente figura:

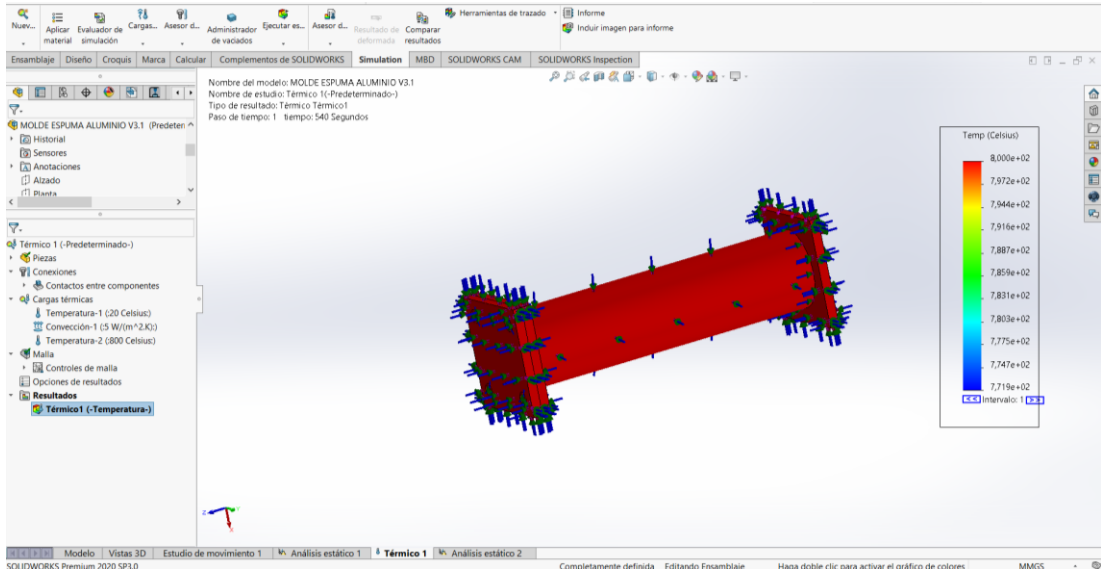


Figura 55: Molde ensayo no destructivo - termico - resultados termicos

En la gráfica de resultados del análisis térmico se muestra que el valor máximo de temperatura es de 800 grados Celsius y el valor de menor magnitud mostrado es 771.9 grados Celsius.

En el resultado del análisis térmico transitorio se observa que en el primer intervalo alcanza la temperatura de 800 grados centígrados.

#### d. Diseño de elementos finitos para molde

Teniendo el análisis térmico seleccionamos un análisis estático para desarrollar la el caso de esfuerzos considerando la temperatura critica a la que llegara el recipiente:

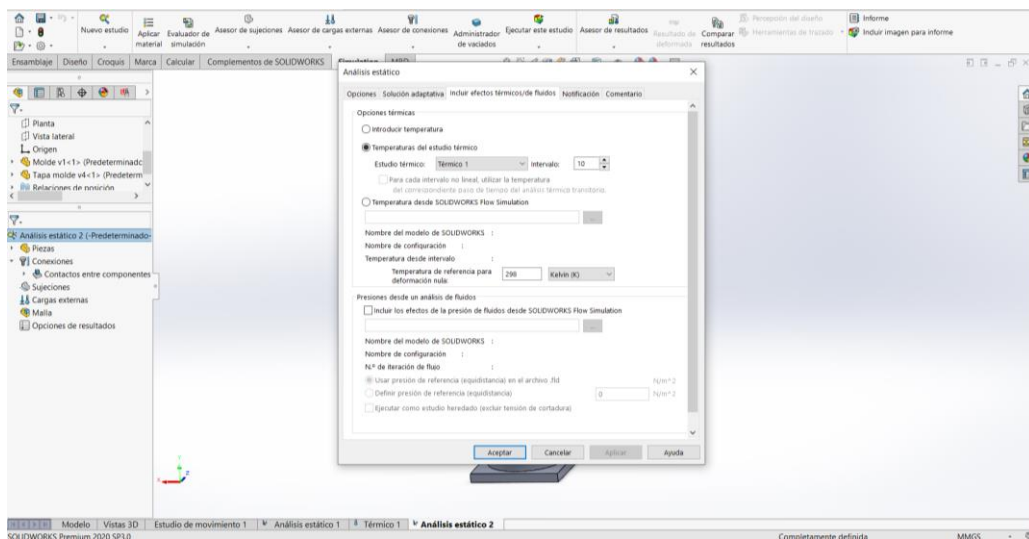
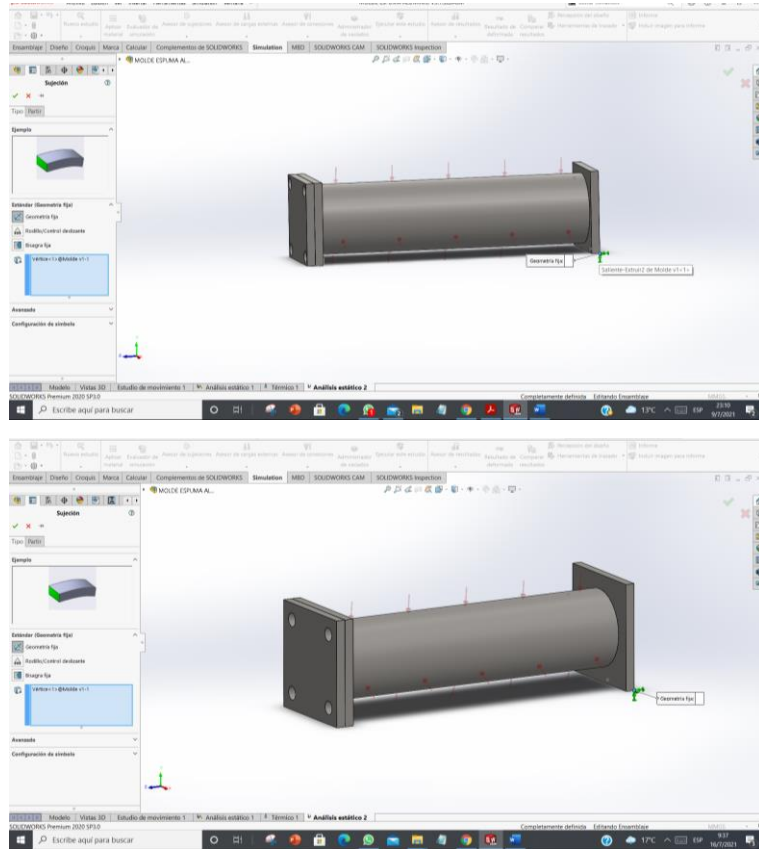


Figura 56: Molde ensayo no destructivo- analisis estatico.

En la figura anterior creamos un análisis estático y en las propiedades indicamos que se deberá tomar en cuenta el análisis estático que hemos generado anteriormente.

Para el análisis estático en el modelo se coloca una restricción en una arista de la geometría, geometría fija, también aplicamos una carga externa a todo el modelo:



*Figura 57: Molde ensayo no destructivo- analisis estatico –sujeciones.*

Presión atmosférica: 14.7 Psi

Esta carga se verá aplicada en todas las cargas (presión) que tengan contacto con el exterior.

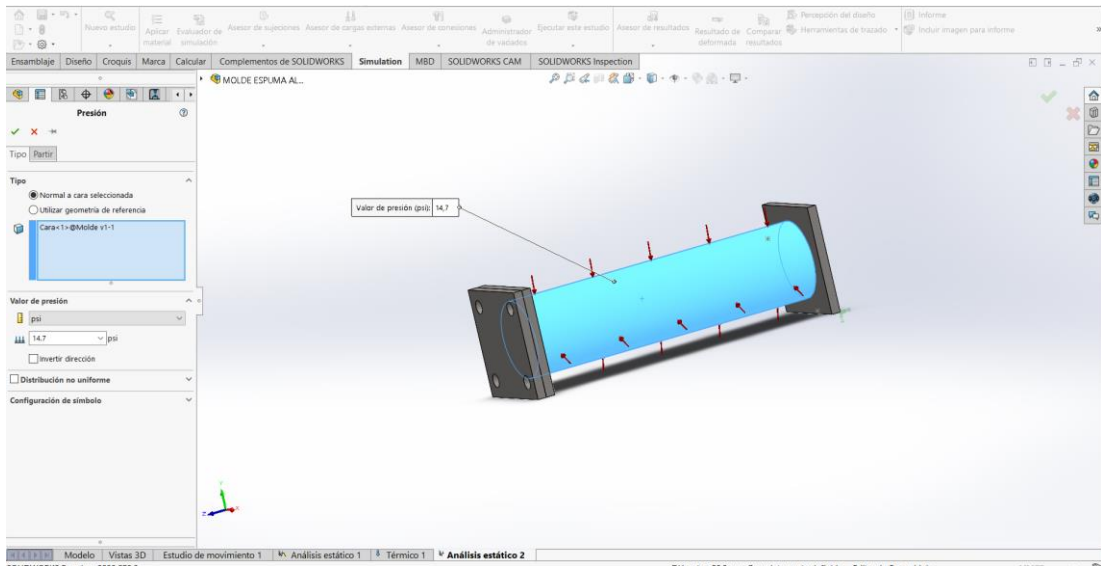


Figura 58: Molde ensayo no destructivo- analisis estatico –cargas.

Al colocar las cargas generamos el mallado con un control de malla en las caras que deseamos que los resultados sean más confiables.

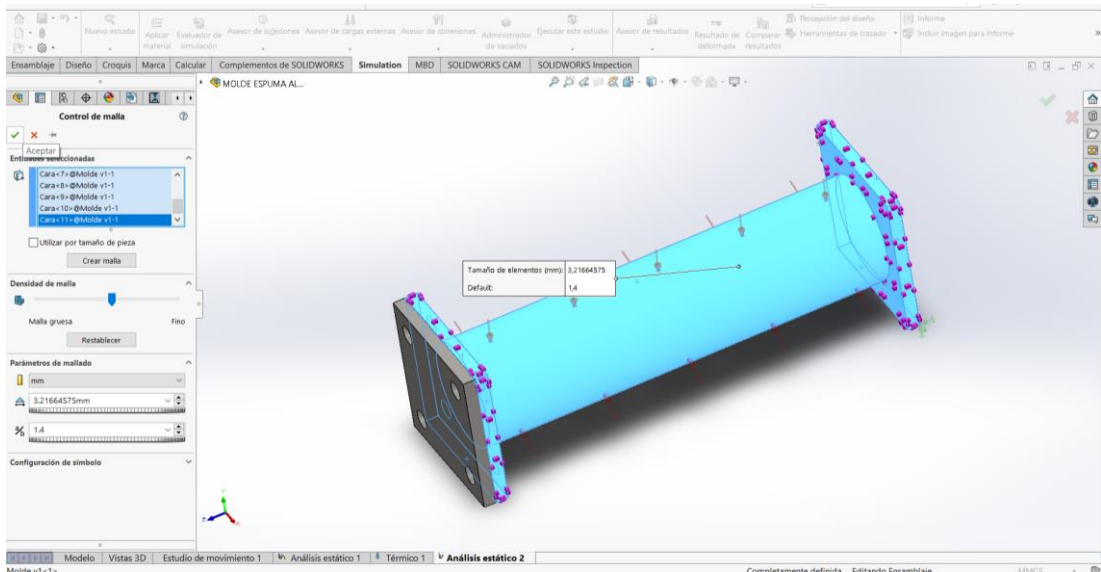


Figura 59: Molde ensayo no destructivo - analisis estatico – refinado de malla.

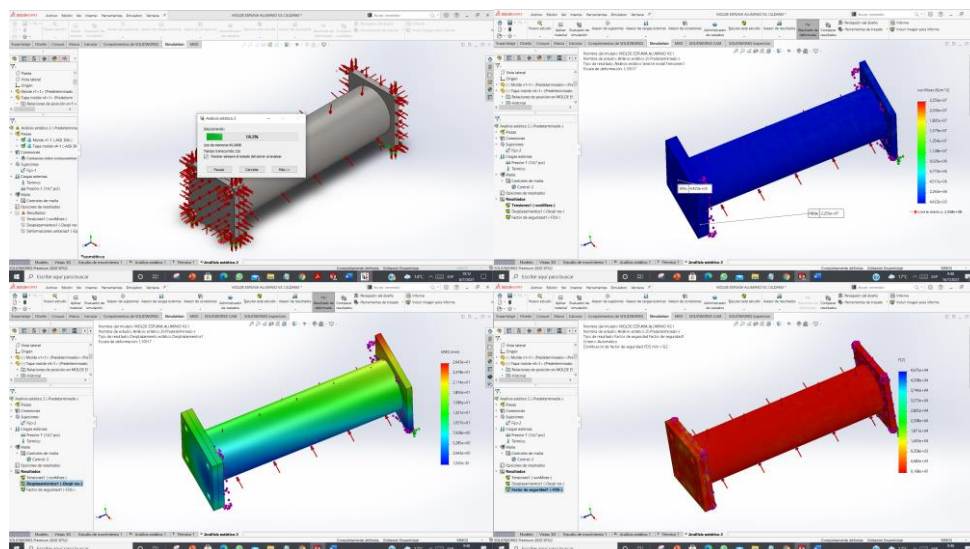


Figura 60: Molde ensayo no destructivo - análisis estático – resultados.

Los resultados obtenidos son que el factor de seguridad mínimo obtenido es de 9.2, lo cual nos da a comprender que no existirá ningún problema en la fabricación del molde y los ensayos a 800 grados de temperatura durante 1.5 a 2 horas.

#### e. Cálculos térmicos

##### Componentes del molde

Los elementos principales que forman parte del molde de espuma de aluminio, se presentan a continuación, con los materiales de los cuales están constituidos y sus respectivos valores de calor específico y módulo de elasticidad.

Tabla 10: Elementos y materiales constitutivos del molde

No.	Elemento	Material	Calor esp. (J/Kg.K)	Módulo de Elastic. (GPa)	Coef. de conduct. (W/mK)
1	Cilindro	Acero AISI 304	500	Masa 193	16.3
2	Asiento				
3	Contratapa				
4	Tapa				
5	Pernos	Acero AISI 304	468	200	----
6	Objeto de estudio	Aluminio	897	70	205



Calor necesario para fundir el aluminio

Las magnitudes físicas del objeto de estudio (aluminio), el cual va a ser sometido a un proceso de fundición, son las que se muestran en la tabla:

*Tabla 11: Características del cilindro de aluminio.*

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
Diámetro	$D$	0.024	$m$
Longitud	$L$	0.19	$m$
Calor específico	$c$	897	$\frac{J}{Kg * K}$
Calor latente de fusión	$L_f$	358000	$\frac{J}{Kg}$
Temperatura de fusión	$T_f$	658.7	$^{\circ}C$
Densidad	$d$	2700	$\frac{Kg}{m^3}$

El calor necesario para llevar a cabo el proceso de fundición del cilindro de aluminio, el cual es el objeto de estudio, está dado por:

Cálculo de la masa de Aluminio

$$d = \frac{m}{V}$$

$$m = dV$$

$$m = d \frac{\pi D^2}{4} (L)$$

$$m = 2700 \frac{Kg}{m^3} \left( \frac{\pi * (0.024 m)^2}{4} \right) (0.19 m)$$

$$m = 0.232 Kg$$

Cálculo del calor requerido

$$Q_1 = mc\Delta T + mL_f$$

$$Q_1 = 0.232 Kg(897) \left( \frac{J}{KgK} \right) (800 - 20)^{\circ}C + (0.232 Kg)358000 \frac{J}{Kg}$$

$$Q_1 = 245377.12 J$$

Calor en componentes menores

La tabla muestra los valores de las masas de cada uno de los componentes del molde obtenidas a partir de la modelación en software, al igual que la variación de temperatura ocurrida durante el proceso operativo.

Tabla 12: Componentes menores.

Elemento	No. de comp.	Masa (Kg)	Masa Total (Kg)	$T_o$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
Asiento	1	0.2352	0.2352	20	800	780
Contratapa	1	0.1802	0.1802	20	800	780
Tapa	1	0.223	0.2230	20	800	780
Pernos	4	0.030	0.1200	20	800	780

$$Q_2 = [(m_{asiento} + m_{ctapa} + m_{tapa})c_{304} + m_{pernos}c_{1010}](\Delta T)$$

$$Q_2 = [(0.2352 + 0.1802 + 0.223)500 + (0.12)(468)](780)$$

$$Q_2 = 292780.8 J$$

#### Análisis del circuito térmico

La normativa establece que el aluminio debe llegar a una temperatura de 800 °C, por lo que es necesario determinar la temperatura a la que debería estar el medio ambiente del horno, con la finalidad de conseguir la temperatura requerida.

Los parámetros necesarios, para determinar el coeficiente de convección del medio ambiente, dentro del horno, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13: Parámetro para determinar el coeficiente de convección.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Temperatura de película	$T_f$	800	°C
Conductividad térmica	$k$	0.07037	$\frac{w}{mK}$
Viscosidad cinemática	$\nu$	$1.326 * 10^{-4}$	$\frac{m^2}{s}$
Número de Prandtl	$P_r$	0.7149	—

La temperatura de película está dada por:

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{800 + 273} = 0.000932$$

El número de Grashof:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_o)L^3}{\nu^2}$$

$$Gr = \frac{9.81(0.000932)(800 - 20)(0.19)^3}{(1.326 * 10^{-4})^2}$$

$$Gr = (2.782)(10^6)$$

El número de Rayleigh:

$$Ra = (Gr)(Pl)$$

$$Ra = (2.782 \times 10^6)(0.7149)$$

$$Ra = 1.989 * 10^6$$

Número de Nusselt

$$Nu = \left( 0.825 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu = \left( 0.825 + \frac{0.387(1.989 * 10^6)^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{0.7149} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu = 19.94$$

Coefficiente de convección:

$$h = \frac{Nu(k)}{L}$$

$$h = \frac{(19.94)(0.07037)}{0.19}$$

$$h = 7.39 \frac{W}{m^2 * K}$$

Coefficiente de convección corregido:

$$\bar{h} = \frac{4}{3} h$$

$$\bar{h} = \frac{4}{3} \left( 7.39 \frac{W}{m^2 * K} \right)$$

$$\bar{h} = 9.85 \frac{W}{m^2 * K}$$

Radio exterior del cilindro del molde

$$r_2 = \frac{50.8 \text{ mm}}{2} = 25.4 \text{ mm} = 0.0254 \text{ m}$$

Radio interior del cilindro del molde

Se procede a determinar un radio equivalente interior, al no poseer como sección una circunferencia.

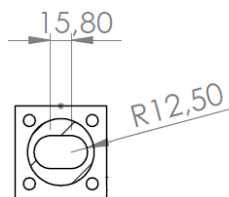


Fig. 1 Sección del cilindro del molde.

$$15.8(25) + \pi(12.5)^2 = \pi r_1^2$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{15.8(25) + \pi(12.5)^2}{\pi}}$$

$$r_1 = 16.79 \text{ mm} = 0.01679 \text{ m}$$

La temperatura de la pared interna del cilindro, se la asumirá como igual a la requerida por el aluminio que está en su interior, pues están en contacto directo; por lo tanto, la resistencia térmica del sistema desde el ambiente del horno, hasta la superficie interior del cilindro está dada por:

Resistencia térmica equivalente

$$R_T = R_{conv.} + R_{cond.}$$

$$R_T = \frac{1}{hA_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk}$$

$$R_T = \frac{1}{h2\pi r_2 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk}$$

$$R_T = \frac{1}{9.85 \frac{W}{m^2K} (2\pi)(0.0254m)(0.1985m)} + \frac{\ln\left(\frac{0.0254 m}{0.01679 m}\right)}{2\pi(0.1985 m) \left(16.3 \frac{W}{mK}\right)}$$

$$R_T = 3.225 \frac{K}{W}$$

Temperatura requerida del horno

$$\frac{Q_T}{t} = \frac{\Delta T}{R_T}$$

$$\frac{Q_1 + Q_2}{t} = \frac{T_{horno} - T_{Al}}{R_T}$$

$$T_{horno} = \frac{Q}{t} R_T + T_{Al}$$

$$T_{horno} = \left\{ \left[ \frac{(245377.12 + 292780.8)J}{t} \left(3.225 \frac{K}{W}\right) + (800 + 273)K \right] - 273 \right\} ^\circ C$$

$$T_{horno} = \left[ \frac{1735559.29}{t} + 800 \right] ^\circ C$$

Tabla 14: Tabla de temperatura vs tiempo de exposición en horno

Tiempo (h)	Tiempo (s)	T (horno) °C
1.0	3600	1282.10
1.5	5400	1121.40
2.0	7200	1041.05

2.5	9000	992.84
3.0	10800	960.70

En la tabla se muestra el resultado de la variación de la fórmula para la temperatura de horno y que al reemplazar los diferentes tiempos se obtuvo la temperatura que alcanza el horno.

### 2.2.7. Diseño del sistema de atmosfera controlada para la fabricación de espuma de aluminio

El sistema propuesto por Farzad Barari en la tesis de doctorado titulada “Metal foam regenerators; heat transfer and pressure drop in porous metals” en la universidad de Sheffield, Reino Unido se lo ha dividido en varias partes para realizar un en el diseño del molde con el objetivo de ingresarlo en el horno eléctrico que se tiene en los laboratorios de la Universidad Técnica de Ambato. Como se indica en el apartado 2.2.5 Diseño de contenedor de atmosfera controlada.

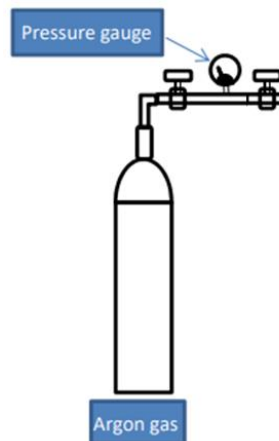


Figura 61: Sistema argón -Banco de pruebas de fabricación de espuma.

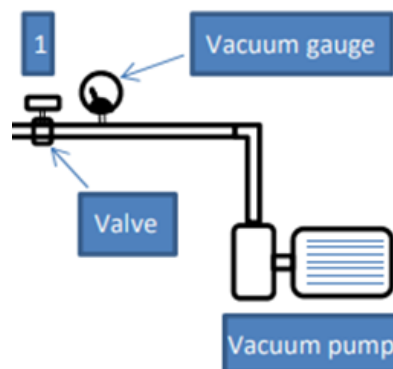


Figura 62: Sistema de vacío -Banco de pruebas de fabricación de espuma.

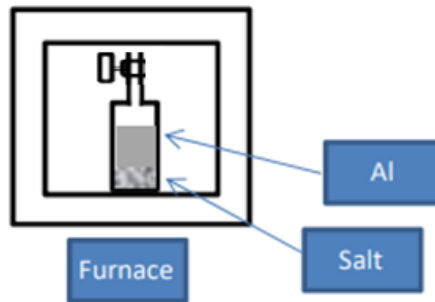


Figura 63: Sistema de horno -Banco de pruebas de fabricación de espum. [14].

Cada uno de los sistemas constara de una unión rápida con el sistema del horno, para su fácil anclaje y des anclaje, se propone este modelo de construcción por las características técnicas del horno eléctrico a usarse.

### 2.2.8. Aplicación de temperatura vs tiempo en el proceso de atmosfera controlada para la fabricación de espuma de aluminio

Farzad Barari de reino unido en su investigación propone ingresar al horno elevar a 660 a 800 grados centígrados, por un tiempo prolongado de 1.5 a 2 horas [14].

La temperatura es controlada mediante un horno eléctrico de la Universidad Técnica de Ambato y el tiempo es controlado con la utilización de cronometro.

### 2.2.9. Parámetros para la fabricación de la espuma de aluminio

En la siguiente tabla los parámetros que se pueden combinar o variar para obtener diferentes tipos o propiedades en el material, espuma de aluminio.

Parámetros para la fabricación de la espuma de aluminio		
Parámetro	Valor	Descripción
Tiempo de exposición a alta temperatura	1.5 a 2 horas	-
Químicos aplicados	Cloruro de sodio	Estado natural
Tamaño de grano de los químicos	1 a 6mm	Mejor apariencia en 6mm de grano.

Tipo de gas	Gas inerte (Argón)	-
-------------	--------------------	---

*Figura 64: Parámetros para la fabricación de la espuma de aluminio.*



## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Ensamblaje de sistemas de atmosfera controlada

A continuación, se muestra el procedimiento de ensamblaje de sistema de vacío y sistema de gas inerte.

Tabla 15: Ensamblaje de sistemas de atmosfera controlada.



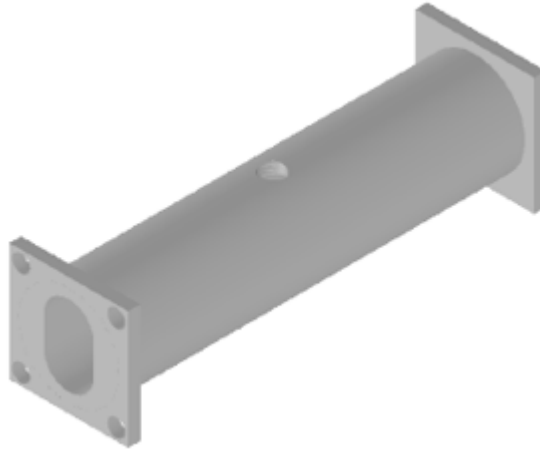
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Porta equipos. Por la dificultad de trasportar los equipos de un lugar a otro, se ha decidido construir un coche porta equipos, los planos se indican en el anexo.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Conectar vacuómetro. Comprado el vacuómetro, se coloca en una base para tener el vacuómetro en posición vertical y fijo.</li></ul>

Tabla 15: Continuación.

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Colocar equipos. Se ha colocado los equipos y se ha seleccionado la mejor ubicación para el proceso. Por facilidad en el encendido se ha colocado la bomba de vacío en la parte superior del coche. El tanque de gas inerte (Argón), se coloca en la parte posterior del coche sobre las ruedas más robustas que soportaran el peso generado.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se colocan las mangueras simulando la utilización y el funcionamiento del equipo, posterior a esto se colocan de la mejor forma y se conectan adecuadamente.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Colocación de válvula de acople rápido. Se coloca y verifica el funcionamiento de la válvula de acople rápido para el sistema de vacío y el sistema de gas inerte.</li></ul>

### 3.2. Fabricación de molde

Por la complejidad de la perforación a realizar, en la forma, dimensiones (largo), se recomienda realizar el corte mediante corte por hilo.



*Figura 65: Eje perforado, corte por hilo.*

El corte por hilo para acero inoxidable se lo realiza en la ciudad de Quito en TECNOMATRIX S.A.



*Figura 66: corte por hilo en acero inoxidable.*

El eje ha quedado perforado listo para el armado como se muestra en la siguiente figura, con el corte por hilo se ha logrado uniformidad en las paredes y la figura deseada para el molde.

Se mecaniza las placas interiores y superiores, según las especificaciones indicadas en los planos para ser soldadas.



*Figura 67: Eje mecanizado con placas soldadas.*

La placa inferior y superior han sido fabricadas de plancha de 6mm de espesor en acero inoxidable, por proceso de corte en máquina cnc y planeado en máquina cnc.

Posterior al armado de eje y placas, se realiza una perforación en la parte superior del molde, la cual conectara el interior del molde con la válvula de aguja, la válvula de aguja hace cello hermético para apertura y cierre del recipiente al interior y exterior de la válvula.



*Figura 68: válvula de aguja con acoples.*

La válvula de aguja en acero inoxidable que se ha conseguido, tiene una medida superior a los acoples seleccionados, para el ensamblaje se ha usado uniones reductoras de medida para su correcto funcionamiento.

Después de realizar la soldadura en el acero inoxidable, en las partes necesarias se realiza una limpieza de con grata circular.

Después del proceso de ensamblaje se ha obtenido el siguiente resultado.



*Figura 69: molde en acero inoxidable con acople rápido.*

El acople rápido instalado, nos ayuda a la conexión del sistema de vacío y la conexión del gas inerte (Argón) que intervienen en la reacción química.

### **3.3. Selección de granos de cloruro de sodio**

*Tabla 16: Selección de granos de cloruro de sodio.*

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tamices para granos. Se ha pedido a la Universidad Técnica de Ambato la utilización de los tamices para separar y seleccionar los granos a usarcé.</li></ul>
---	--

Tabla 16: Continuación.

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Separar el cloruro de sodio El cloruro de sodio en estado natural también se llama como sal en grano, que se tritura y colocara en la muestra para generar la reacción química.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tamizado. Se toma el tamiz se llena con cloruro de sodio triturado, se tapa y se mueve hasta conseguir cada tipo de grano requerido.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tamizado.</li></ul>

Tabla 16: Continuación.


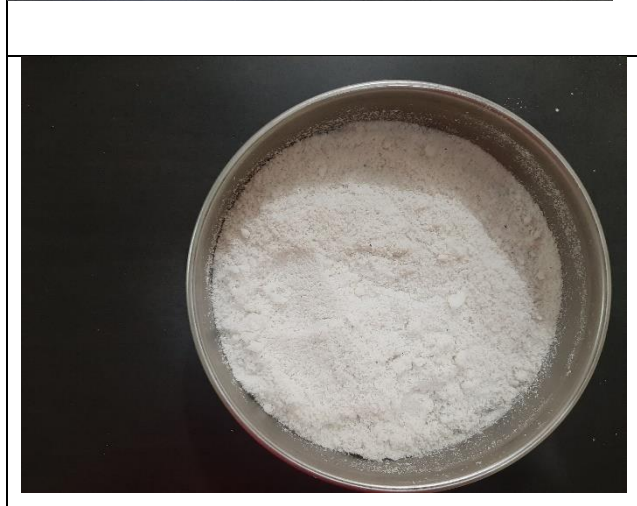
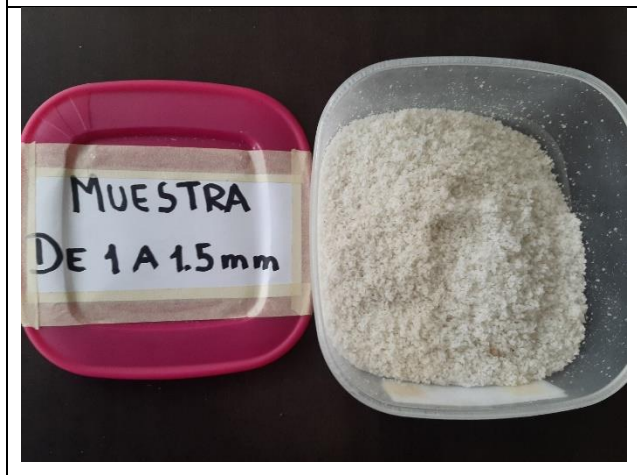
 A photograph of a laboratory workspace. On a dark table, there are several items: a stack of three metal sieves, a white plastic bag labeled 'SAL EN GRANO', a blue container, and a row of pink plastic containers. The background shows a wall with windows and a window blind.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Envasado de granos. Se envasa los granos de forma ordenada en recipientes cerrados.</li></ul>
 A top-down view of a circular metal sieve containing a uniform layer of fine, white, granular material.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Granos homogéneos obtenidos</li></ul>
 A photograph showing two containers. On the left is a pink tray with a white label that reads 'MUESTRA DE 1 A 1.5mm'. On the right is a clear plastic container filled with coarse, white, granular material.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Muestra de 1 a 1.5mm</li></ul>

Tabla 16: Continuación.


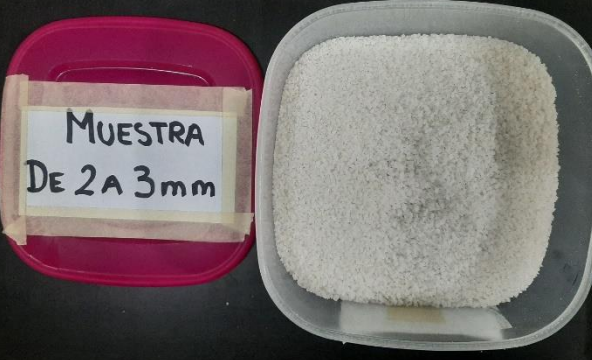

 A photograph showing a red tray with a white label that reads "MUESTRA DE 1.5 A 2mm" and a clear plastic container filled with a light-colored, fine-grained material.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Muestra de 1.5 a 2mm</li></ul>
 A photograph showing a red tray with a white label that reads "MUESTRA DE 2 A 3mm" and a clear plastic container filled with a light-colored, medium-grained material.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Muestra de 2 a 3mm</li></ul>
 A photograph showing a red tray with a white label that reads "MUESTRAS 3m A 4mm" and a clear plastic container filled with a light-colored, coarse-grained material.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Muestra de 3 a 4mm</li></ul>



Tabla 16: Continuación.

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Muestra de 4 a 5mm</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Muestra de 5 a 6mm</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Resultados</li></ul>

### 3.4. Prácticas de laboratorio

#### 3.4.1. Equipos a usarse en el laboratorio

Tabla 17: Equipos a usarse en el laboratorio.

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema de vacío<ul style="list-style-type: none"><li>○ Bomba de vacío</li><li>○ Vacuómetro</li><li>○ Mangueras</li><li>○ Acoples</li><li>○ Acople rápido</li></ul></li><li>• Sistema de gas inerte.<ul style="list-style-type: none"><li>○ Gas Argón</li><li>○ Acople de salida</li><li>○ Regulador</li><li>○ Manómetro</li><li>○ Mangueras</li><li>○ Acople rápido</li></ul></li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Molde de trabajo<ul style="list-style-type: none"><li>○ Molde</li><li>○ Tapa</li><li>○ Válvula de aguja</li><li>○ Conexión para acople rápido.</li></ul></li></ul>

Tabla 17: Continuación.

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pinzas metálicas.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Implementos de seguridad.</li></ul>

### 3.4.2. Desarrollo de la práctica de laboratorio

Tabla 18: Desarrollo de la práctica de laboratorio.



	<ul style="list-style-type: none"><li>• Insertar elementos a fundir en el molde Abriendo la tapa del molde con los cuatro (4) pernos inoxidables se inserta el volumen de aluminio que se requiere obtener</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ingreso de químicos. Se inserta químicos en este caso cloruro de sodio en estado natural, sin tratar de dimensiones variables.</li></ul>

Tabla 18: Continuación.

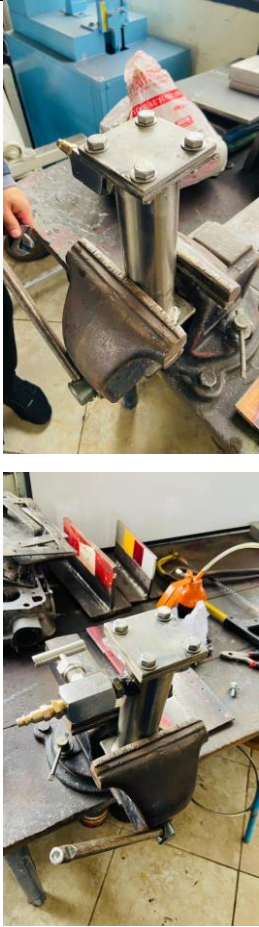




	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cierre hermético. Se cierra herméticamente presionando los pernos, el apriete se lo debe hacer en forma de cruz para conseguir un apriete uniforme de los cuatro pernos, se usan llaves de ½ pulgada o 13mm.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Conexiones de bomba de vacío y argón. Se revisa que estén correctamente conectadas todas las instalaciones de vacío.</li></ul>

Tabla 18: Continuación.

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Conexión de vacío. La conexión de vacío se lo realiza por medio del acople rápido hacia el molde alcanzando los 50mmhg medidos en el vacuómetro, con lo que se verifica la hermeticidad y la presión de vacío existente.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cierre de válvula Se cierra la válvula de aguja y se retira el acople rápido que genera el vacío, posterior a esto se apaga la bomba de vacío.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coloca en el horno El horno ha sido precalentado hasta los 680 grados centígrados que se necesita para la ejecución de la reacción, posterior a eso se ingresa el molde con el aluminio y el cloruro de sodio hacia el interior del horno. Cerramos la puerta y esperamos un tiempo prolongado de 1.45 horas.</li></ul>

Tabla 18: Continuación.

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mediciones periódicas. Para verificar la temperatura se mide periódicamente la temperatura que lleva el recipiente</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Salida de molde del horno e ingreso de gas inerte Sacamos el molde a una alta temperatura del recipiente y colocamos el acople rápido, abrimos el gas a presión y abrimos la válvula de aguja en ese orden para que no ingrese aire sino argón.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Molde después de la práctica de laboratorio. Ha cambiado de color por la aplicación de temperatura.</li></ul>



### 3.4.3. Resumen de resultados del recipiente de atmosfera controlada para espuma de aluminio

Tabla 19: Resumen de resultados del recipiente de atmosfera controlada para espuma de aluminio.

Detalle	Imagen	Peso de la muestra	Observaciones
<p>Muestra 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura máxima 800 grados.</li> <li>• Tiempo: 2 horas</li> <li>• Tamaño de grano de cloruro de sodio: 1.5mm</li> </ul>		220.8g	Se observa que con la aplicación del procedimiento con grano de 1.5mm el tocho de aluminio sufre decoloración y se adhiere el cloruro de sodio.
<p>Muestra 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura máxima 800 grados.</li> <li>• Tiempo: 2 horas</li> <li>• Tamaño de grano de cloruro de sodio: 2mm</li> </ul>		211.8gr	Se observa que la muestra se pega la sal en forma de caracha y se ve pequeños cráteres en la superficie.
<p>Muestra 3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura máxima 800 grados.</li> <li>• Tiempo: 2 horas</li> <li>• Tamaño de grano de cloruro de sodio: 3mm</li> </ul>		167.6g	Se muestra que se pega la sal crea una superficie rugosa con cráteres en toda la superficie, al salir del molde se cristalizó y se rompe.



Tabla 19: Continuación.

<p>Muestra 4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura máxima 800 grados.</li> <li>• Tiempo: 2 horas</li> </ul> <p>Tamaño de grano de cloruro de sodio: 4mm</p>		<p>197.4g</p>	<p>Por inspección visual se ve que la sal esta incrustada en la superficie, al retirar la muestra se rompe fácilmente.</p>
<p>Muestra 5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura máxima 800 grados.</li> <li>• Tiempo: 2 horas</li> </ul> <p>Tamaño de grano de cloruro de sodio: 6mm</p>		<p>215.0g</p>	<p>Se han formado cráteres mas grandes se ve que a simple vista.</p>
<p style="text-align: center;">Observaciones generales:</p> <p>El tiempo y temperatura se han considerado de acuerdo a Farzad Barari en la tesis de doctorado titulada “Metal foam regenerators; heat transfer and pressure drop in porous metals” en la universidad de Sheffield, Reino Unido.</p>			

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- Se ha identificado que las principales aplicaciones de la espuma de aluminio están en el área de la automoción y aeronáutica, tal es el caso de los autos deportivos presentados por el doctor Said Robles en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Puebla, que indica su alta resistencia a los golpes causados por choques, lo que brinda mayor seguridad y protección a los tripulantes.
- El procedimiento para la producción de espuma de aluminio es crear un molde de acero inoxidable con una válvula que nos permita independizar el molde del sistema de vacío y sistema de gas inerte, ingresar dentro del molde aluminio con granos de cloruro de sodio, cerrado herméticamente se aplica vacío y se ingresara al horno durante 1.5 a 2 horas a 740 grados, después del tiempo se retira del horno e inmediatamente se aplica gas inerte(Argón) a presión, con esto se logra la reacción química y un rápido enfriado en la espuma de aluminio.
- Los parámetros de diseño del contenedor para que resista el proceso de fabricación de la espuma de aluminio se muestran en la Tabla 7: Parámetros de diseño del contenedor, entre los más importantes a tener en cuenta son, dimensionamiento de la muestra, temperatura a aplicar para la fundición del aluminio que es 740 °C, el material del contenedor en acero inoxidable y una salida hermética con válvula de aguja fabricada en acero inoxidable.
- Se ha analizado los parámetros a controlar en la fabricación de espuma de aluminio, tiempo de exposición a alta temperatura de 1.5 a 2 horas, temperatura final del recipiente en 740 °C, tamaño de cloruro de sodio (sal en grano), son parámetros que se deben controlar para el correcto funcionamiento de los sistemas, los resultados por inspección visual nos indican que la probeta con mayor porosidad se presenta con el grano de cloruro de sodio de 6 mm.

## 4.2. Recomendaciones

- Generar un proyecto técnico de investigación de materiales para conocer las propiedades que se obtendrán en la espuma de aluminio realizadas en un contenedor con atmosfera controlada, controlando el tamaño de grano, temperaturas, y aditivos de reacción.
- Manipular el molde con las herramientas adecuadas al momento de sacar del horno y colocar el acople rápido para el ingreso del argón.
- Mantener controlada la temperatura en las paredes del molde por que puede variar de la temperatura marcada en el indicador del horno utilizado.
- Ajustar en forma de cruz los pernos de la tapa del molde para obtener el correcto ajuste y la mayor hermeticidad posible.
- En la práctica de laboratorio, precalentar el horno con el molde en el interior y tomar el tiempo desde el momento que el molde llega a la temperatura indicada (740 grados centígrados).
- Realizar limpieza de la tapa y contra tapa entre cada ingreso al horno para mantener la hermeticidad en el molde.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Santalla, «teoriadeconstruccion.net,» teoriadeconstruccion.net, 10 04 2012. [En línea]. Available: <https://teoriadeconstruccion.net/blog/espuma-de-aluminio/>. [Último acceso: 08 04 2021].
- [2] P. Fernández, G. Torres, S. Gaviria y E. Ochoa, «FABRICACIÓN DE METALES CELULARES BASE ALUMINIO,» *Universidad Tecnológica de Pereira*, vol. XIII, n° 36, pp. 677-682, 2007.
- [3] D. Cheneler y A. Kennedy, «A comparison of the manufacture and mechanical performance of porous aluminium and aluminium syntactic foams made by vacuum-assisted casting,» *MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING*, 2020.
- [4] P. Fernández, L. Cruz y J. Coletto, «Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida,» *REVISTA DE METALURGIA*, vol. VI, n° 44, pp. 540-555, 2008.
- [5] ETS Arquitectura Coruña, «<https://es.slideshare.net/>,» slideshare, 02 06 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/FerminBlanco/espuma-de-aluminio>. [Último acceso: 08 04 2021].
- [6] A. Ortiz, O. Ruiz y J. Ortiz, «MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA,» Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2013.
- [7] F. Conde, «DISEÑO DE UN PROCESO DE FUNDICION DE ALEACIONES DE ALUMINIO,» Universidade Da Coruña, La Coruña, 2017.
- [8] M. Andrade, «Wikipedia,» 12 11 2020. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Probeta\\_\(mec%C3%A1nica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Probeta_(mec%C3%A1nica)). [Último acceso: 20 05 2021].

- [9] M. Castillo Cárdenas y P. Abarca Pérez, «Obtención de espumas metálicas de aluminio por el método de infiltración en preformas lixiviables.» *Ciencia digital*, vol. 2, n° 2, pp. 348-360, 2018.
- [10] E. P. Abaca, «Síntesis de espumas metálicas de aluminio de celda abierta,» *Escuela Politécnica Nacional*, vol. 1, n° 1, pp. 0-117, 2017.
- [11] M. I. Romero, «obtención de estructura de poros homogénea de espumas de aluminio A356 utilizando como agente espumante partículas núcleo/multicapa basadas en TiH<sub>2</sub>,» *CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.*, vol. 1, n° 1, pp. 1-104, 2018.
- [12] B. Cárcel, «Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenidas por fusión aplicación en absorbentes de energía.» *Universidad Politécnica de Valencia*, vol. 1, n° 1, pp. 1-244, 2015.
- [13] P. Fernández y L. García-Cambronero, «Uso de aluminio reciclado para la producción a bajo costo de espumas metálicas de poro abierto,» *PROSPECTIVA*, vol. VIII, n° 1, pp. 7-11, 2010.
- [14] Said Robles Casolco, «cienciamx.com/,» <http://www.cienciamx.com>, 2015. [En línea]. Available: <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/materiales/1409-espuma-metalica-innovacion-para-autos-deportivos>. [Último acceso: 2021].
- [15] N. Lowrie, «Youtube,» Departamento de materiales- The university of sheffield, 07 11 2012. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=8FHtk2LzNTY>. [Último acceso: 08 04 2021].
- [16] F. Barari, «Metal foam regenerators; heat transfer and,» *The University of sheffield*, vol. 1, n° 1, pp. 1-138, 2014.

- [17] Universidad de Sheffield, departamento de materiales, «sheffield.ac.uk,» sheffield, 2020. [En línea]. Available: <https://www.sheffield.ac.uk/materials>. [Último acceso: 09 04 2021].
- [18] ASTM E8, «Métodos de prueba estándar para las pruebas de tensión de los materiales metálicos,» de *ASTM E8*, ASTM.
- [19] R. G y n. Keith, «diseño en ingeniería mecánica de shigley,» de *diseño en ingeniería mecánica de shigley*, LTC.; 9th edición, 2012, p. 1012.
- [20] J. Gutiérrez y J. Oñoro, «Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones,» *REVISTA DE METALURGIA*, vol. V, nº 44, pp. 457 - 476, 2008.

## ANEXOS

### Anexo 1: Imágenes de prácticas



Peso de la probeta 1 después del proceso de fundición con atmosfera controlada, la probeta no se ha fundido, la sal se ha desintegrado y se ha adherido al tocho.



En la probeta número 2 se observa que tiene un peso de 211.8 gramos y que se ha creado imperfecciones en la superficie.



En la probeta 3 se tiene un peso de 167.6 gramos, se observa que esta trizada al salir del molde una parte se ha quedado adherida al molde.



En la probeta 4 se tiene un peso de 197.4 gramos, se observa que esta trizada al salir del molde.



En la probeta 5 se muestra un peso de 115.0 gramos, se observa la probeta en mal estado por haberse pegado en el molde, fue retirado aplicando calor al exterior del molde.





Proceso de apertura de gas inerte, enfriamiento brusco.



Salida del molde desde el horno, con pinzas de acero.

**Anexo 2: imágenes de práctica - errores**



Se elevo la temperatura a 1200 grados para ver la reacción de la muestra, no se consigue resultado favorable.



Se aumenta tiempo a 3 horas.

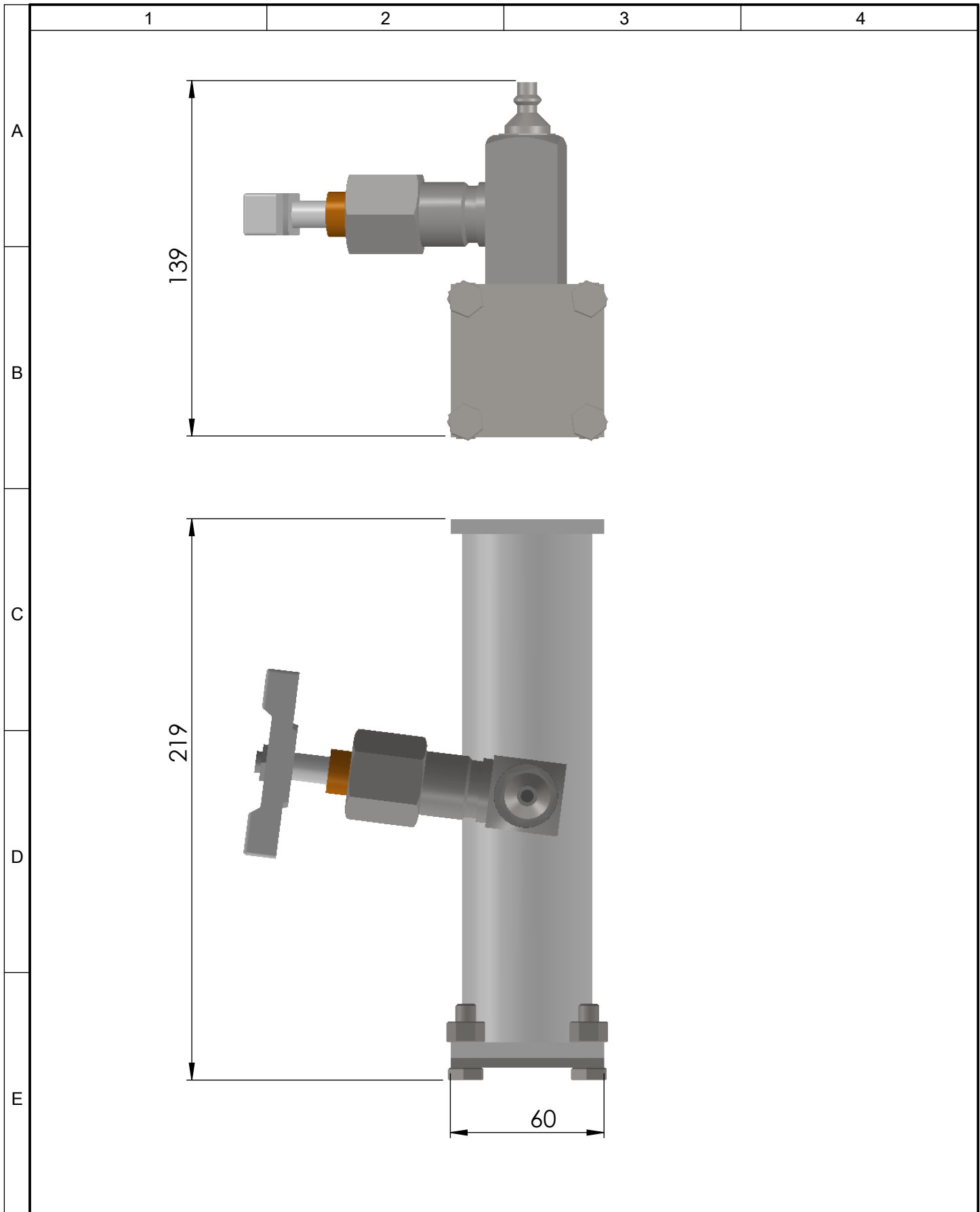
No se consigue resultado favorable.

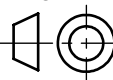
### Anexo 3: Proformas de partes y piezas del sistema

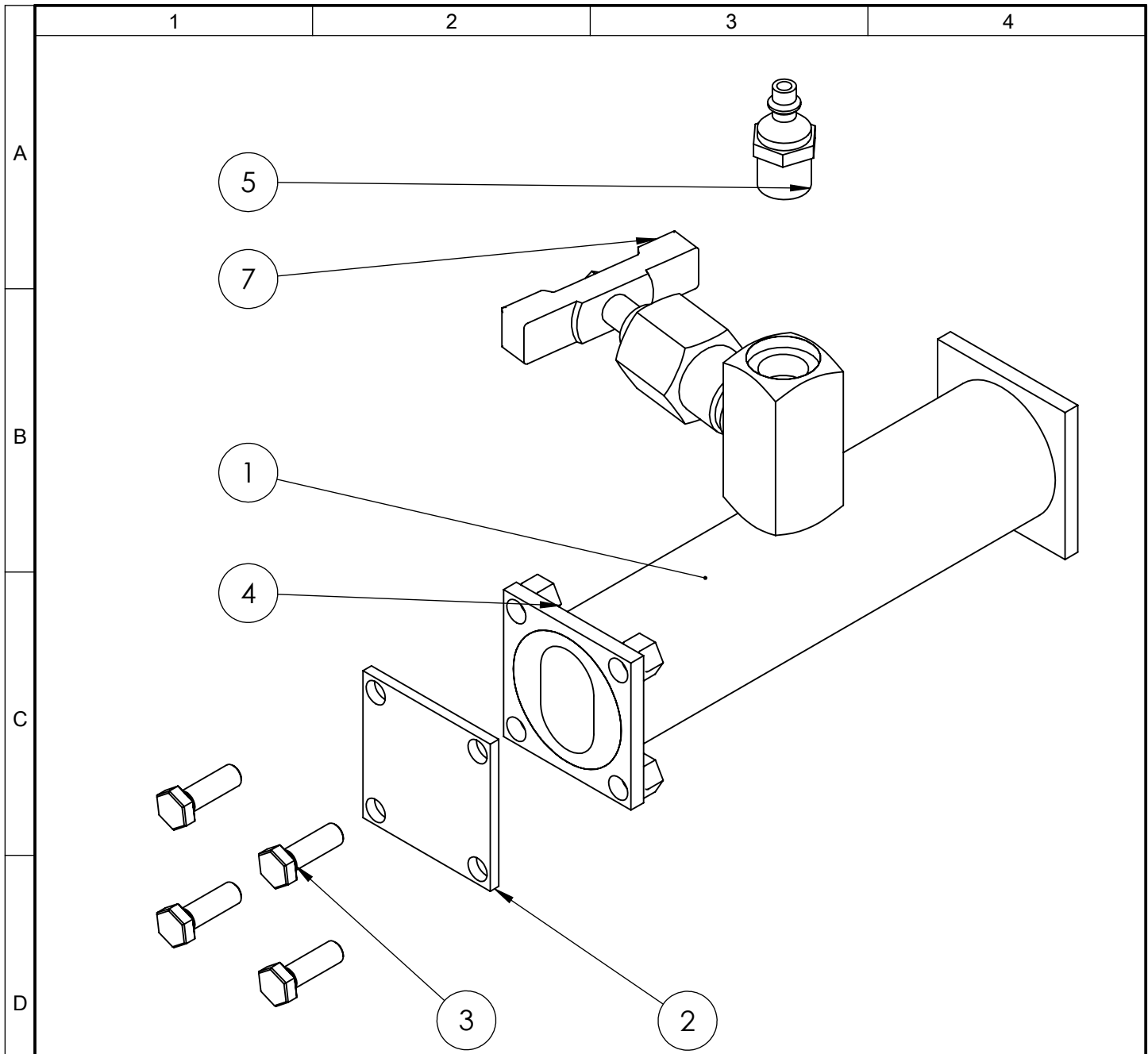
Para el argón se cotiza en Sueldas del Valle que presenta la siguiente proforma.

<b>SUELDAS DEL VALLE</b>		RUC: 180301465100					
BARRIO SOLIS CALLE JULIO JARAMILLO SN Y ALFONSO NIETO		TLF: 032851161					
CLIENTE: ERIK JIJON CODIGO: 00201638      1804394235 DIRECCION IMBABURA Y JACINTO BEJARANO TELEFONO:		<b>PROFORMA N°</b> P0000180 EMISION: 01/06/2021      VENCIMIENTO: 01/06/2021 VENDEDOR: OFICINA					
N°	CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	UND	PRECIO UNITARIO	DESC.	TOTAL
1	02.0032	CILINDRO ARGON VACIO	1.00	UND	165.1786	0.00	165.18
2	02.0008	M3 ARGON INDUSTRIAL	1.00	M3	40.1786	0.00	40.18
3	07.0113	REGULADOR DE ARGON/AGA MIX/ LUJOMETRO	1.00	UND	58.0357	0.00	58.04
		Observaciones:			SUBTOTAL: 263.40 DESCUENTO 0.00 % 0.00 TOTAL NETO: 263.40 I.V.A. 12 % 31.61 VALOR A PAGAR: 295.01		
PREPARADO	ELABORADO						
LA CANTIDAD DE:		RECIBI CONFORME					

### Anexo 4: Diseño CAD – Planos molde espuma de aluminio y coche de porta equipos

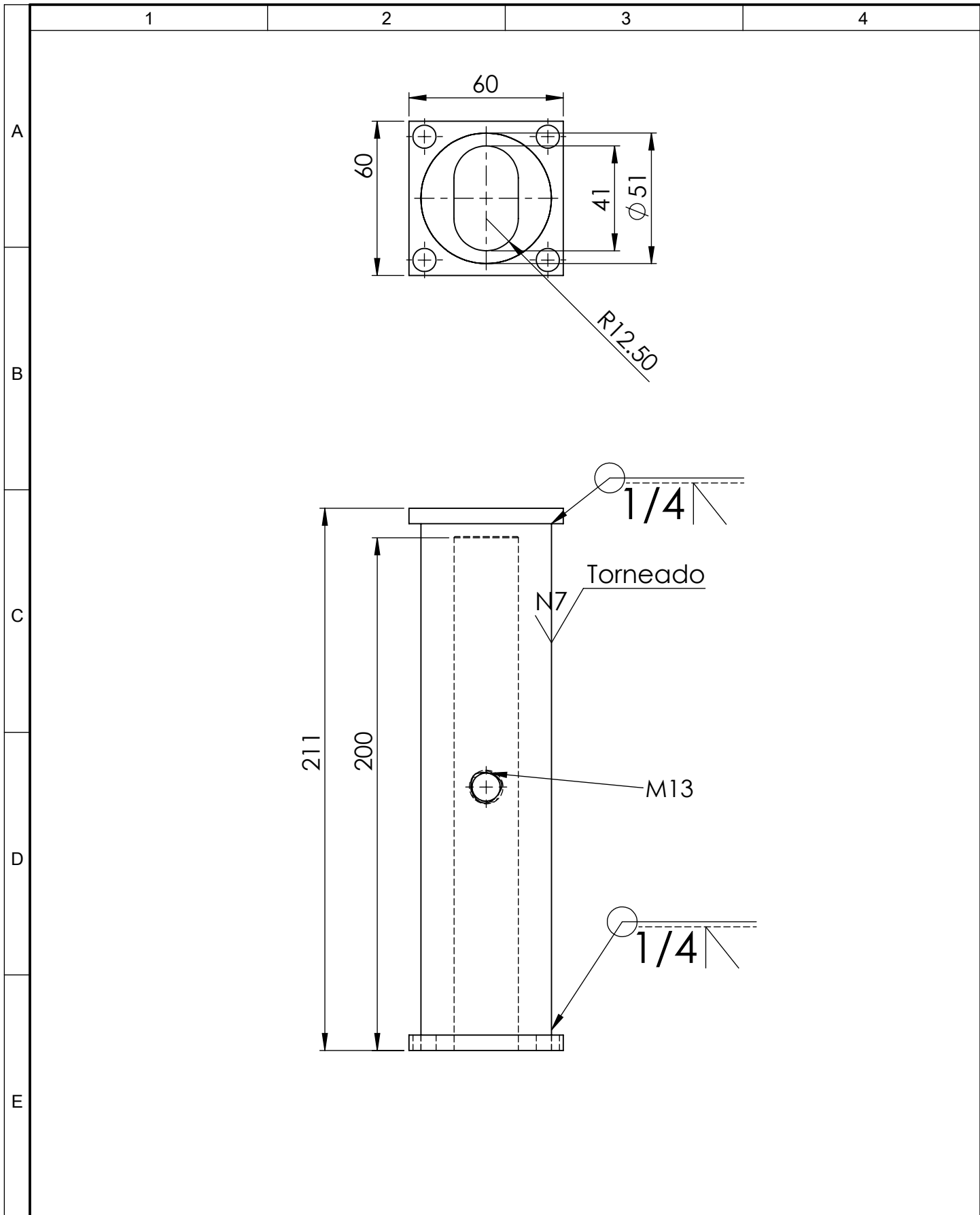


				Tolerancia	Peso	Material:	
				±1	gr		
				Fecha	Nombre	Titulo: MOLDE ESPUMA ALUMINIO V3	Escala: 1:2
				Dibujó: 28/04/2021	Sanchez E - Jjón E		
				Revisó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López		
				Aprobó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López		
				<b>U.T.A</b> <b>INGENIERIA MECANICA</b>		Número de lámina:	Registro: 
Edición	Modificación	Nombre	Fecha			1 de 4	
				Sustitución			



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Molde v1	Plano	1
2	Tapa molde v4	Plano	1
3	perno m8x1.25x25	Comprar	4
4	Tuerca m8x1.25	Tuerca m8x1.25	4
5	Acople rapido v1	Comprar	1
6	Union	comprar	1
7	VALVULA DE AGUJA .750.igs		1

				Tolerancia ±1	Peso gr	Material:	
				Fecha	Nombre	Titulo:	
				Dibujó: 28/04/2021	Sanchez E - Jjón E	MOLDE ESPUMA ALUMINIO V3	
				Revisó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López	Escala: 1:2	
				Aprobó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López	Registro:	
				<b>U.T.A</b> INGENIERIA MECANICA		Número de lámina: 2 de 4	
Edición	Modificación	Nombre	Fecha			Sustitución	



				Tolerancia	Peso	Material:			
				±1	gr	AISI 304			
				Fecha	Nombre	Titulo:	Escala:		
			Dibujó:	28/04/2021	Sanchez E - Jjón E			Molde v3	1:2
			Revisó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López				
			Aprobó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López				
				<b>U.T.A</b> <b>INGENIERIA MECANICA</b>		Número de lámina:	Registro:		
Edición	Modificación	Nombre	Fecha			3 de 4			
				Sustitución					

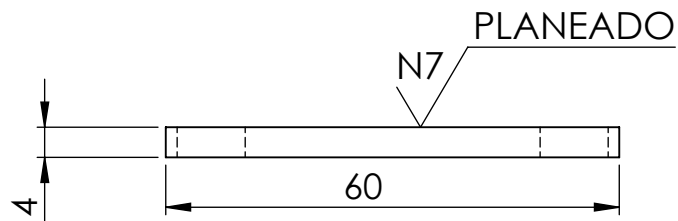
1

2

3

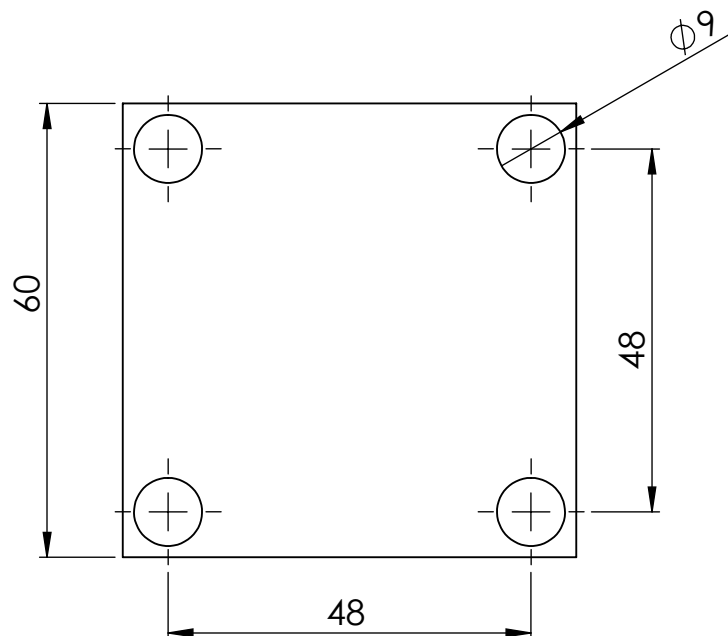
4

A



B

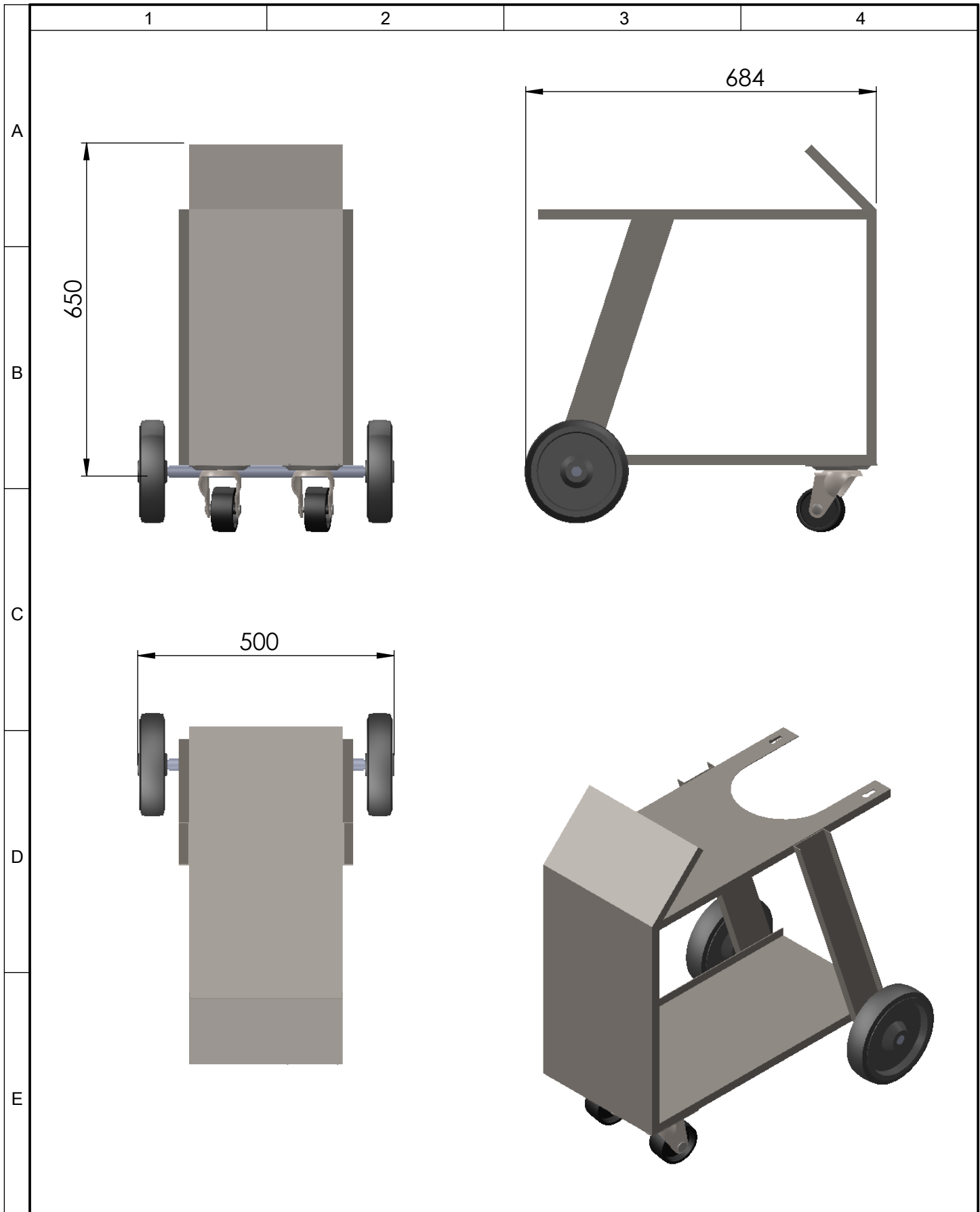
C



D

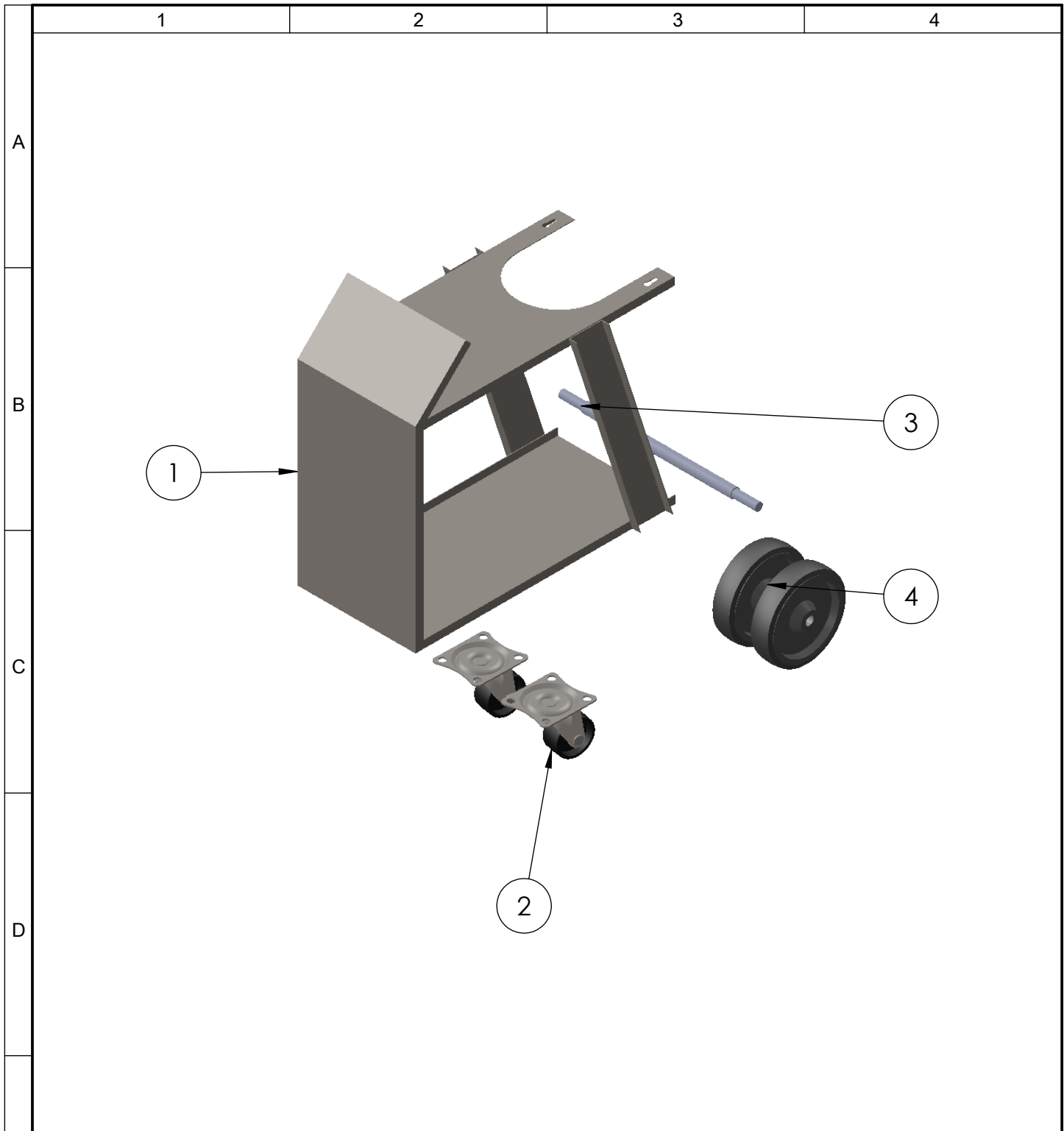
E

				Tolerancia $\pm 1$	Peso gr	Material: AISI 304		
						Titulo: Tapa molde v4	Escala: 1:1	
				Fecha	Nombre			
				Dibujó: 28/04/2021	Sanchez E - Jjón E			
				Revisó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López			
				Aprobó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López			
				<b>U.T.A</b> INGENIERIA MECANICA		Número de lámina: 4 de 4	Registro: 	
Edición	Modificación	Nombre	Fecha			Sustitución		



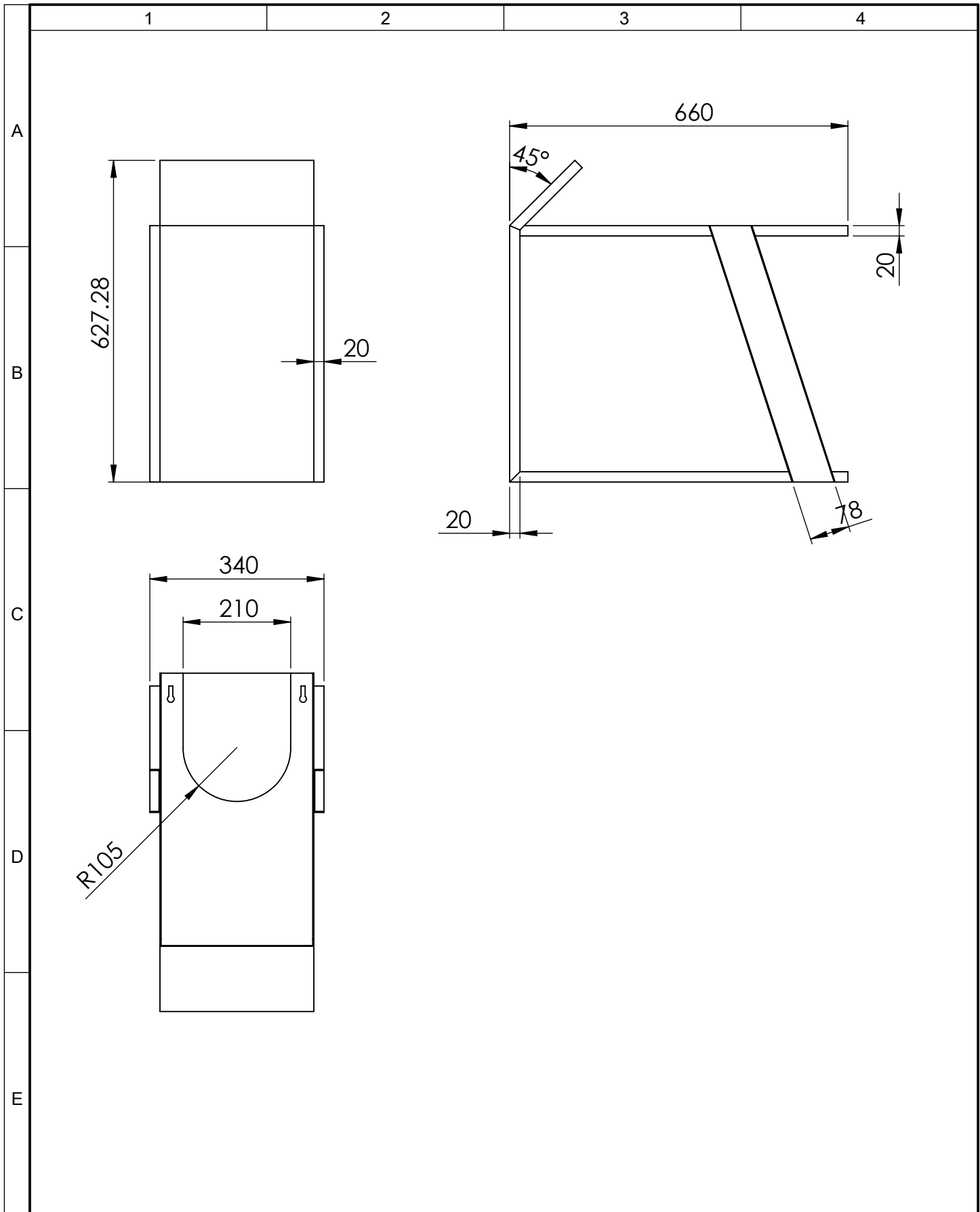
				Tolerancia	Peso	Material:	
				±1	gr		
				Fecha	Nombre	Titulo: <b>Coche porta accesorios</b>	Escala: 1:10
			Dibujó:	20/08/2021	Sanchez E - Jjón E		
			Revisó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López		
			Aprobó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López	Número de lámina: 1 de 4	Registro: 
Edición	Modificación	Nombre	Fecha	<b>U.T.A</b> INGENIERIA MECANICA		Sustitución	



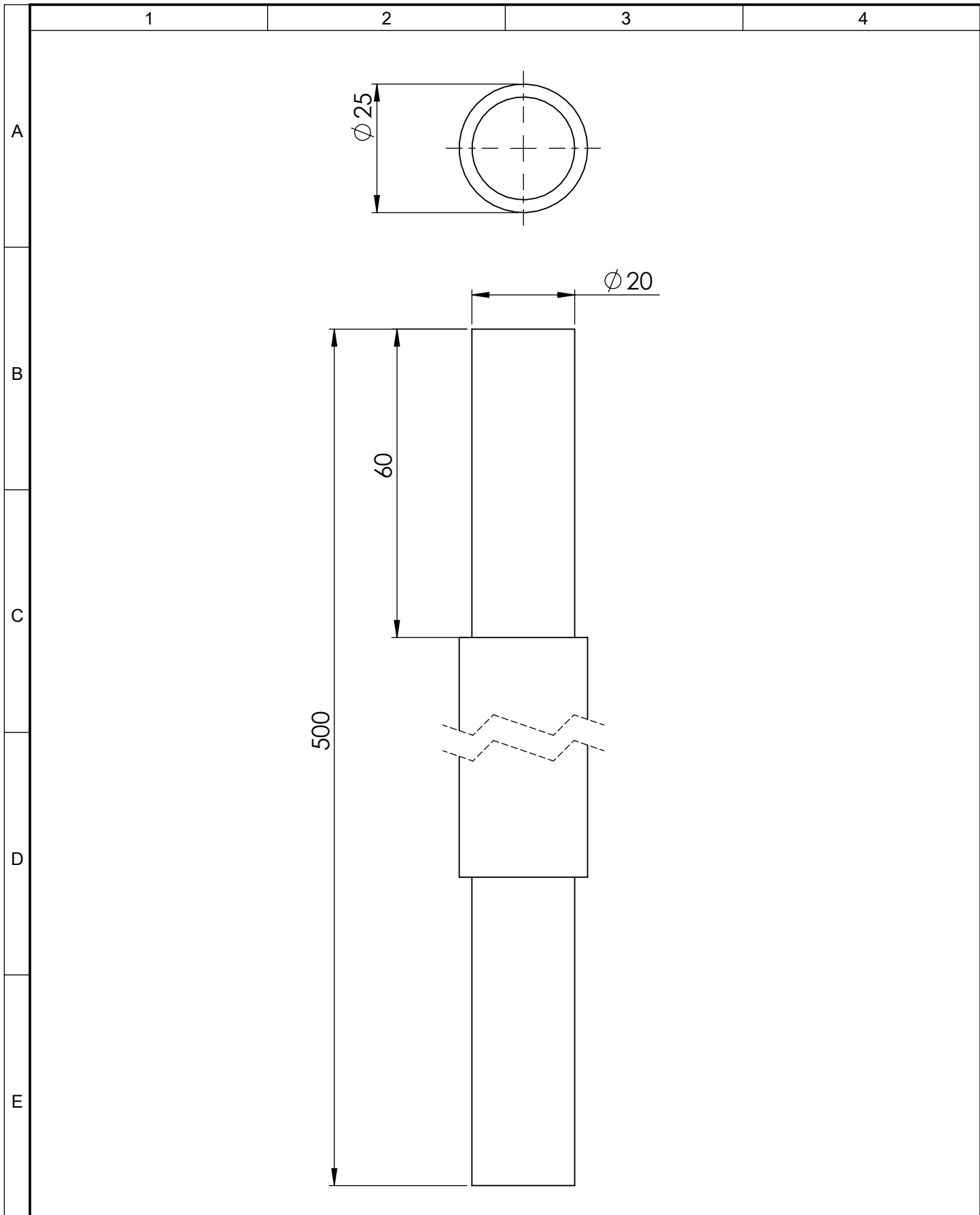


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Coche Accesorios		1
2	Ensamble_Rueda_Loca		2
3	Eje ruedas posteriores		1
4	Caster Wheel		2

				Tolerancia	Peso	Material:	
				±1	gr		
				Fecha	Nombre	Titulo: Coche porta accesorios	Escala: 1:10
			Dibujó:	20/08/2021	Sanchez E - Jjón E		
			Revisó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López		
				Aprobó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López	
				<b>U.T.A</b> <b>INGENIERIA MECANICA</b>		Número de lámina: 2 de 4	Registro: 
Edición	Modificación	Nombre	Fecha			Sustitución	



				Tolerancia	Peso	Material:	
				±1	gr		
				Fecha	Nombre	Titulo: Coche porta accesorios	Escala: 1:10
			Dibujó:	20/08/2021	Sanchez E - Jjón E		
			Revisó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López		
				Aprobó:	23/08/2021	Ing. Gonzalo López	
				<b>U.T.A</b> <b>INGENIERIA MECANICA</b>		Número de lámina:	Registro: 
Edición	Modificación	Nombre	Fecha			3 de 4	
				Sustitución			



				Tolerancia	Peso	Material:	
				±1	gr		
				Fecha	Nombre	Titulo: <b>Coche porta accesorios</b>	Escala: 1:1
				Dibujó: 20/08/2021	Sanchez E - Jjón E		
				Revisó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López		
				Aprobó: 23/08/2021	Ing. Gonzalo López		
				<b>U.T.A</b> INGENIERIA MECANICA		Número de lámina:	Registro: 
Edición	Modificación	Nombre	Fecha	Sustitución			