



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**ALEACIONES DE ALUMINIO RECICLADO  
PROCESADOS POR PULVIMETALURGIA COMO  
MUESTRA PARA SU POSTERIOR USO EN  
MANUFACTURA ADITIVA  
(IMPRESIÓN 3D)**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: CRISTOBAL MONTALBA WEISSE

**YERCKO ALBA SOBARZO**

**CURICÓ - CHILE  
2022**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Curicó, 2023

## **AGRADECIMIENTOS**

En el largo proceso que requirió la elaboración de esta investigación, recibí el apoyo de mucha gente muy importante para mí como el mi familia y amigos cercanos, ayudándome en las distinta etapas que tuve que superar, además de un gran aporte de la maestranza donde trabajo, de parte de los maestros que la conforman ,maestro Alejandro y Victor y jefe que los lidera, don Sandro Cancino Medel , con consejos para la elaboración de mi memoria y una importante cantidad de material, además de una buena disposición en todo momento.

De todos los anteriormente nombrados, quiero expresar mis agradecimientos por su aporte para obtener el resultado de esta investigación y desarrollo de este informe.

## **DEDICATORIA**

La presente memoria la quiero dedicar a todas las personas que me apoyaron para poder llevarla a cabo de la mejor manera, con esto me refiero en primera instancia a mi familia, amigos cercanos y profesores de la universidad por su buena disposición y apoyo prestado en distintas ocasiones

## **RESUMEN**

En la investigación que se presenta a continuación, se elabora un método con cual se busca el máximo aprovechamiento del aluminio secundario mediante pulvimetalurgia, debido al excesivo gasto energético que conlleva la obtención del aluminio de manera primaria tanto de un aluminio de la familia 2xxx como de un aluminio secundario fabricado por la empresa Metalbras de la familia 4xxx, esto con el fin de comparar el comportamiento y las propiedades de cada familia con el aluminio primario AA2070.

La solución tuvo ciertos inconvenientes con el proceso de sinterizado, ya que no se contaba con el horno adecuado para llevar a cabo el proceso por lo que se debió diseñar y fabricar una cámara para adaptarla al horno. Por otro lado, debido a que las muestras de aluminio secundario AA2070 fabricados mediante pulvimetalurgia se oxidaron por la cantidad de litio que contenía, el cual es altamente reactivo con el oxígeno, se optó por mantener la investigación con las muestras de aluminio secundario fabricados por la empresa Metalbras. Este estudio, en caso de dar una respuesta positiva, proporcionará un avance significativo en el aprovechamiento de materiales reciclados, generando un concepto de economía circular basado en máximo aprovechamiento del aluminio obtenido de manera secundaria

## INDICE GENERAL

INDICE GENERAL .....	IV
INDICE DE GRAFICOS .....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	VII
INDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.    ANTECEDENTES .....	2
1.2.    DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3.    SOLUCIÓN PROPUESTA .....	3
1.4.    OBJETIVOS.....	4
1.4.1.  Objetivo general.....	4
1.4.2.  Objetivos específicos .....	4
1.5.    RESULTADOS ESPERADOS .....	4
1.6.    METODOLOGÍA.....	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1.    ALUMINIO .....	8
2.2.    CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS .....	9
2.3.    ALEACIONES DE ALUMINIO .....	9
2.3.1.  ALEACIONES 1XXX .....	10
2.3.2.  ALEACIONES 2XXX .....	10
2.3.3.  ALEACIONES 3XXX: .....	10
2.3.5.  ALEACIONES 5XXX: .....	11
2.3.6.  ALEACIONES 6XXX: .....	11

2.3.7.	ALEACIONES 7XXX: .....	11
2.4.	APLICACIONES .....	12
2.4.1.	ELECTRICIDAD Y TELECOMUNICACIONES .....	12
2.4.2.	TRANSPORTE .....	12
2.4.3.	ENVASES .....	14
2.4.4.	OTROS USOS.....	15
2.5.	ALUMINIO RECICLADO .....	16
2.5.1.1.	AHORRO ENERGÉTICO: .....	17
2.5.1.2.	DISMINUCIÓN DEL USO DE LOS RECURSOS NATURALES .....	18
2.5.1.3.	COLABORA EN EVITAR LA UTILIZACIÓN Y SATURACIÓN DE VERTEDEROS .....	18
2.5.1.4.	MINIMIZA LA CANTIDAD DE CO <sub>2</sub> QUE SE EMITE A LA ATMÓSFERA..	18
2.6.	OBTENCIÓN DEL ALUMINIO SECUNDARIO .....	19
2.6.1.	INSPECCIÓN Y CLASIFICACIÓN .....	19
2.6.2.	PRETRATAMIENTO .....	20
2.6.3.	FUNDICIÓN .....	20
2.7.	IMPRESIÓN 3D.....	21
2.7.1.	VENTAJAS DE LA IMPRESIÓN 3D.....	22
2.8.	CONFORMACIÓN DE CUERPOS VERDES.....	23
2.8.1.	QUÉ ES UN CUERPO VERDE .....	24
2.8.2.	PULVIMETALURGIA .....	24
2.8.3.	MOLIENDA.....	25
2.8.4.	COMPACTACIÓN .....	25
2.8.5.	SINTERIZACIÓN.....	26
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA.....		27

3.1. MATERIALES UTILIZADOS .....	28
3.2. PROCESOS DE MEZCLA .....	28
3.2.1. TABLAS CON COMPOSICION QUIMICA.....	28
3.2. PROCESO DE FORMACIÓN DE CUERPOS VERDE .....	31
3.3. SINTERIZACIÓN.....	32
3.4 Caracterización.....	38
3.4.1. Caracterización física (densidad Arquímedes).....	38
3.4.2. CÁLCULO DE LA DENSIDAD RELATIVA POR MÉTODO GEOMÉTRICO .....	40
3.4.4. Caracterización microestructural.....	42
3.4.5. Caracterización Mecánica. ....	43
3.5. ENSAYO DE MICRODUREZA .....	43
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
CONCLUSIONES.....	61
CAPÍTULO 5. REFERENCIAS .....	62
Referencias .....	63
ANEXO 1: Dimensionamiento de las muestras .....	65
ANEXO 2: DENSIDAD DE ARQUIMIDES.....	69



## INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Disminución de la masa de las latas de 33 cl en gramos .....	15
Gráfico 2: Usos del aluminio .....	16
Gráfico 3: Consumo energético en función de la cantidad de veces que se recicla .....	18
Gráfico 4: Rampa de temperatura a las distintas temperaturas .....	38
Gráfico 5: promedios de densidades y presiones ejercidas al polvo de aluminio primario .....	48
Gráfico 6: Resultados densidad método de Arquímedes .....	52

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cables ACC .....	12
Figura 2: Chasis Audi A8.....	13
Figura 3: Materiales compuestos utilizados en la industria aeronáutica .....	14
Figura 4: Construcción naval .....	16
Figura 5: Símbolo del aluminio reciclado .....	17
Figura 6: Obtención de aluminio Secundario.....	19
Figura 7: Descripción de la clasificación de materia prima para segunda fundición de aluminio	20
Figura 8: Figuras impresas en 3D .....	22
Figura 9: Caja de guantes transportable .....	30
Figura 10: Balanza Boibase modelo LT5002T .....	30
Figura 11: Medida de la muestra, normada. La medida que se ubica en la parte superior corresponde a la medida en pulgadas, mientras que la que se encuentra debajo, entre paréntesis, corresponde a la medida en milímetros.....	32
Figura 12: Nabertherm modelo RHTC 80-230/15 .....	33
Figura 13: Plano general de la cañería desarrollada.....	33
Figura 14: Despiece de cañería .....	34
Figura 15: Tapa de la cañería .....	35
Figura 16: Setup sistema de sinterizado.....	36
Figura 17: Zona e calentamiento efectivo del horno.....	37
Figura 18: Esquema del ensayo.....	39

Figura 19: Montaje del ensayo de Arquímedes.....	40
Figura 20: Base de molde impresa en 3D .....	41
Figura 21: Cuerpo de molde impreso en 3D .....	41
Figura 22: Molde ensamblado con cinta adhesiva para evitar suciedad que pudiera ingresar a la resina .....	42
Figura 23: KB Pruftechnik modelo Kb 250 BVRZ.....	43
Figura 24: Espacio mínimo entre las hendiduras .....	44
Figura 25: Imagen entregada por la máquina para su medición de las diagonales .....	45
Figura 26: Posición de entrada al horno de las muestras .....	49
Figura 27: Resultado de las muestras sometidas al tratamiento de 600°C.....	49
Figura 28: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x100.....	54
Figura 29: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x200.....	54
Figura 30: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x100 en grieta.....	55
Figura 31: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x200 en grieta.....	55
Figura 32: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x100.....	56
Figura 33: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x200.....	56
Figura 34: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x100 en grieta .....	57
Figura 35: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x200 en grieta .....	57
Figura 36: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x100.....	58
Figura 37: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x200.....	58
Figura 38: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x100 en grieta.....	59
Figura 39: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x200 en grieta .....	59

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades físicas.....	9
Tabla 2: Clasificación de aleaciones de aluminio por series.....	10
Tabla 3: Composición química aluminio AA2070 primario en porcentaje de peso .....	28
Tabla 4: Composición química aluminio AA2070 + 0,15% de Fe en porcentaje de peso.....	28
Tabla 5: Composición química aluminio AA2070 + 0,5% de Fe en porcentaje de peso.....	29

Tabla 6: Composición química aluminio AA2070 + 1,5% de Fe en porcentaje de peso.....	29
Tabla 7: Composición química aluminio secundario en porcentaje de peso .....	29
Tabla 8: características horno Nabertherm.....	37
Tabla 9: Relación de indentación y aumento .....	43
Tabla 10: Calculo de densidades de las muestras .....	47
Tabla 11: Calculo de densidades de aluminio secundario de METALBRAS.....	48
Tabla 12:Comparación diámetro a 550°C	Tabla 13:Comparación altura a 550°C.....
50	50
Tabla 14:Comparación diámetro a 575°C	Tabla 15:Comparación altura a 575°C.....
51	51
Tabla 16: Comparación diámetro a 600°C	Tabla 17:Comparación altura a 600°C.....
51	51
Tabla 18: Dimensionamiento de las muestras .....	65
Tabla 19: Dimensionamiento muestras aluminio secundario Metalbras .....	66

# **CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN**

## 1.1. ANTECEDENTES

El elemento metálico más abundante en la corteza terrestre es el aluminio, siendo un metal muy electropositivo y reactivo. Cuando el aluminio está en contacto con el aire se forma una capa dura y transparente de óxido de aluminio que actúa como protección ante la acción corrosiva del entorno. Por otro lado, el aluminio es un metal altamente reciclable, pudiendo ser el 100% del material reutilizado, además, este proceso puede ser llevado a cabo indefinidamente sobre el mismo material sin perder sus propiedades basales (Alu-Stock, 2018).

Las aleaciones a tratar en esta investigación son las AA2070 y aleación secundaria de aluminio silicio, perteneciente a la serie 4xxx. La primera contiene una importante cantidad de cobre entre sus constituyentes, de lo cual cabe destacar que el cobre y el litio son dos elementos relevantes económicamente para Chile por lo tanto al encontrarles una mayor cantidad de usos a estos elementos genera una mayor demanda y aprovechamiento de estos, lo que eleva su valor. Tal como las aleaciones Al-Cu-Li de tercera generación, la aleación AA2070, se caracteriza por su rigidez elevada tanto en microestructuras policristalinas como monocristalinas, una resistencia específica muy superior a las establecidas en la serie 2xxx, su destacable comportamiento frente a la fractura esto debido a la buena tenacidad y ductilidad que la caracterizan, además de su importante resistencia a la corrosión. Con respecto a la segunda aleación a tratar se enfocan a generar aleaciones que sean capaces de ser fundidas a temperaturas menores que el resto de las aleaciones, por lo tanto, es una aleación buscada para usarla como elemento para soldar. (Metrar, 2019)

La aleación AA2070 es considerada una aleación de alto rendimiento que, al aumentar su porcentaje de litio, disminuye su densidad y aumenta su módulo elástico. Esta aleación, debido a todas las características mencionadas anteriormente, posee costos muy elevados, restringiendo su uso de forma masiva, Considerando que el procesamiento y obtención de aluminio a partir de fuentes primarias (Bauxita) provoca una importante huella de carbono y un alto gasto energético. Es un importante desafío poder desarrollar aleaciones de tan alto rendimiento a partir de fuentes secundaria (reciclado), permitiendo disminuir los costos de la aleación y la huella de carbono, además, permitiría abrir el campo de aplicaciones.

## Capítulo 1. Introducción.

Esta investigación tiene como propósito elaborar un proceso efectivo para la fabricación de muestras mediante pulvimetalurgia, su óptima compresión y posterior tratamiento térmico. Todo esto son el fin de caracterizar el material y establecer una metodología óptima. Esto se llevará a cabo tanto con aleaciones primarias como secundarias con el fin de caracterizar el comportamiento de las distintas aleaciones a las mismas tres temperaturas de sinterizado establecidas y así poder obtener una comparativa entre las propiedades de las aleaciones para poder determinar el uso que se le pueden asignar y si el aluminio secundario puede sustituir al primario en procesos de manufactura aditiva. Debido a que hoy en día este proceso no es del todo competitivo, ya que los materiales a utilizar están bastante acotados por la incompatibilidad de las propiedades para llevar a cabo este proceso y los costos de la materia prima es muy elevada. Aprovechando la disminución de los costos por utilizar un material reciclado podría masificarse de mejor manera y así ayudar a impulsar la manufactura aditiva a un siguiente nivel, mejorando su valorización en cuanto a residuos, ingresando a un sistema de economía circular relevante para el crecimiento de la manufactura avanzada.

El desafío más relevante en el desarrollo de aleaciones base aluminio reciclado están relacionados con los elementos hierro y el silicio los que influyen negativamente en las propiedades mecánicas del aluminio reciclado, debido a que estos elementos son los que aparecen como contaminantes en el proceso de reciclaje. Ambos elementos aportan en el aumento de la dureza del aluminio, sin embargo, disminuyen su plasticidad y resistencia a la corrosión.

### **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El problema detectado radica en la ausencia de un método establecido para procesar muestras de aluminio secundario mediante pulvimetalurgia. Además, que, por su alto costo en cuanto a gasto energético para obtener este elemento de manera primaria, la búsqueda del máximo aprovechamiento del aluminio de manera secundaria teniendo el silicio y hierro los elementos que generan un mayor impacto negativo en las propiedades mecánicas. Esto impide proporcionar un rendimiento óptimo y un correcto aprovechamiento del aluminio reciclado.

### **1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA**

## Capítulo 1. Introducción.

En la actualidad los procesos dedicados al reciclado de materiales no ferrosos, donde se encuentra ubicado el aluminio, son por el método convencional del re-fundido, en el que los residuos para el reciclaje se funden y luego se conforman los nuevos productos de metal secundario por medio del moldeo. Debido al alto gasto energético, los costes e impacto medioambiental, la facilidad para controlar los porcentajes de cada componente de la aleación a sinterizar y la necesidad de una menor cantidad de elementos para el proceso en cuanto a maquinas, instrumentos de trabajo y seguridad, se utilizará el método de pulvimetalurgia.

Debido a que el aluminio reciclado posee impurezas como el hierro (Fe) y silicio (Si) (provenientes del proceso de reciclado), se hará un seguimiento de los factores involucrados en las distintas etapas del proceso de conformado de las muestras para poder identificar el procedimiento óptimo y obtener el máximo provecho al aluminio reciclado.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar y desarrollar un sistema para la sinterización de aleaciones de aluminio secundarias mediante el proceso de metalurgia de polvos y optimización del sistema en base los resultados obtenidos de la sinterización de las aleaciones secundarias.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Diseñar cámara para la sinterización de polvos metálicos mediante atmósfera controlada.
- Fabricar sistema de sinterizado diseñado y puesta en marcha.
- Desarrollar mezclas de aluminio secundario para sinterizado
- Sinterizar muestras de aluminio secundario a distintas temperaturas en cámara de atmosfera controlada
- Caracterizar física, microestructural y mecánicamente las aleaciones secundarias sinterizadas y el efecto del proceso de atmosfera controlada diseñado.

### **1.5. RESULTADOS ESPERADOS**

## Capítulo 1. Introducción.

Se espera desarrollar un sistema de sinterización con atmosfera controlada para la síntesis de aleaciones secundarias de aluminio.

A partir del sinterizado controlado a distintas temperaturas de las aleaciones desarrolladas mediante pulvimetalurgia y sus respectivas caracterizaciones físicas, microestructurales y mecánicas, se pretende obtener los parámetros óptimos para el desarrollo de aleaciones competitivas con sus respectivas comparativas primarias.

### **1.6. METODOLOGÍA**

El procedimiento establecido para esta investigación está regido por las normas del sistema internacional ASTM B 595 – 95 (Standard Specification for Sintered Aluminum Structural Parts) que trata sobre el proceso de sinterizado de piezas de aluminio y los instrumentos para llevar a cabo este proceso, B 243 – 04<sup>a</sup> (Standard Terminology of Powder Metallurgy) que trata principalmente de la terminología utilizada para el proceso de pulvimetalurgia, B 312 – 96 (Standard Test Method for Green Strength for Compacted Metal Powder Specimens) tiene como finalidad describir materiales instrumentos y pasos para llevar a cabo el compactado para el conformado de cuerpos verdes, donde se establecen tanto los materiales y requerimientos de estos como el correcto procedimiento a llevar a cabo. (ASTM International, 2000) (ASTM International) (ASTM International, 2002)

En primera instancia se encuentra solución al proceso de sinterizado debido a que el horno disponible no cumplía con las condiciones establecidas para contar con una atmosfera protectora. Debido a esto se consigue un horno tubular al cual se le fabrica una cámara tubular con la capacidad de ingresarle y extraerle gas con la finalidad de generar un flujo constante de gas y así evitar la contaminación de las muestras. Una vez fabricada la cámara protectora del horno, se procede a generar la mezcla de los polvos de los metales a utilizar en la aleación con el objetivo de crear una mezcla homogénea utilizando un molino de bolas o de manera manual agitando las mezclas. Luego de obtener una mezcla homogénea de la aleación, se procede a prensar el polvo en cápsulas denominadas cuerpos verdes, primeramente, con el fin de obtener la fuerza de compactación óptima de la muestra y con este resultado compactar el resto. Estas capsulas serán prensadas a distintas presiones, lo cual afectaría en la capacidad de interactuar de los polvos de la aleación sometidos a compresión, de los cuerpos verdes se debe obtener sus



## Capítulo 1. Introducción.

medidas y masa para poder calcular su densidad y posteriormente graficar los valores obtenidos para poder observar el comportamiento de la mezcla en compresión.

Obtenidos los cuerpos verdes, se les aplica un tratamiento térmico (sinterizado) introduciéndolos a un horno a tres temperaturas distintas inferiores a la de fusión del aluminio y posteriormente se procede a enfriar el cuerpo dentro del horno para finalizar el tratamiento.

Finalmente se caracterizan los cuerpos, tanto física, mecánica y microestructuralmente mediante ensayos de compactibilidad, densidad, microdureza, análisis metalográfico, etc. Con el fin de establecer variables óptimas de fabricación, y así, generar una comparativa de las propiedades de las mismas aleaciones desarrolladas a partir de fuentes primarias, para obtener como resultado un método óptimo para desarrollar el proceso de pulvimetalurgia.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1. ALUMINIO

El aluminio es un material con un amplio abanico de propiedades que lo ubican en una posición muy favorable para distintas aplicaciones en diversas áreas, tales como la industria de transporte, construcción, envases, etc. De las propiedades que más destacan de este material son las presentada a continuación nombradas por ARPAL, asociación que promueve la recuperación y reciclado de envases de aluminio de todo España: (ARPAL, 2013)

- Superficie de metal clara y fácil de colorear.
- Baja densidad, ideal para la construcción de vehículos aeroespaciales.
- Muy maleable.
- Bajo punto de fusión.
- Resistencia a la corrosión, cualidad muy valorada en la construcción.
- No magnético, pero magnetizable.
- Resistencia al agua y al olor, cualidad esencial de los envases.
- Poderosa capacidad de restauración.
- Alta conductividad eléctrica.
- Cuando se combina con otros metales, puede producir muchas aleaciones, algunas de las cuales tienen propiedades mecánicas comparables al acero al carbono, pero solo un tercio de la densidad del acero al carbono. El aluminio forma aleaciones con casi todos los elementos químicos, pero las aleaciones con magnesio (Mg), manganeso (Mn), silicio (Si), cobre (Cu) y zinc (Zn) son las más prominentes y además de las aleaciones, el aluminio también se utiliza para fabricar compuestos.
- Fácil de reciclar. El hecho de que el aluminio sea reciclado desde el inicio de su fabricación es una actividad normal, técnicamente sólida y rentable con beneficios tanto ambientales como económicos. Por ejemplo, más del 75% del aluminio producido hace más de 100 años sigue en uso gracias al reciclaje. (ARPAL, 2013)

A continuación, se presentan tablas que abarca distintas propiedades físicas del aluminio:

Tabla 1: Propiedades físicas

Fuente: Alu-Stock

Propiedades físicas	
Estado ordinario	Sólido
Densidad	2698,4 kg/m <sup>3</sup>
Punto de fusión	933,47 K (660 °C)
Punto de ebullición	2792 K (2519 °C)
Entalpia de vaporización	293,4 kJ/mol
Entalpia de fisión	10,79 kJ/mol
Presión de vapor	2,42 x 10 <sup>-6</sup> Pa a 577 K
Volumen molar	10,00 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /mol

## 2.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Mecánicamente el aluminio presenta la característica de ser blando y maleable, además en estado puro posee un límite de resistencia a la tracción de 160-200 Mpa. A pesar de poseer esta resistencia a la tracción, sigue siendo un material inapropiado para su uso como material estructural, es por eso que se alea con otros elementos, lo que permite realizar procesos de fundición, extrusión y forja. (Alu-stock, 2017)

## 2.3. ALEACIONES DE ALUMINIO

El aluminio en su implementación en el área industrial se ha reconocido como uno de los más importantes en distintas áreas. Es un material blando y con una baja resistencia a la tracción, a pesar de esto se utiliza en la fabricación de estructuras soportantes en la arquitectura y en la fabricación de piezas de distintos tipos de vehículos.

El aluminio se alea con otros elementos con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas. Principalmente se alea con manganeso, magnesio, cobre, silicio y zinc, en algunos casos también se añade titanio y cromo a la aleación. En la actualidad las aleaciones de aluminio son clasificadas

## Capítulo 2. Marco teórico

en series, las cuales van desde la 1000 a 8000, como se presenta en la siguiente tabla. (Alu-stock, 2017)

Tabla 2: Clasificación de aleaciones de aluminio por series

Fuente: Alu-Stock

Serie	Designación	Aleante principal	Principales compuestos en la aleación
Serie 1000	1XXX	99% al menos de aluminio	-
Serie 2000	2XXX	Cobre (Cu)	$Al_2Cu - Al_2CuMg$
Serie 3000	3XXX	Manganeso (Mn)	$Al_6Mn$
Serie 4000	4XXX	Silicio (Si)	-
Serie 5000	5XXX	Magnesio (Mg)	$Al_3Mg_2$
Serie 6000	6XXX	Magnesio (Mg) y Silicio (Si)	$Mg_2Si$
Serie 7000	7XXX	Zinc (Zn)	$MgZn_2$
Serie 8000	8XXX	Otros elementos	-

De las alegaciones presentadas en la tabla 2 existen series donde a la aleación no se le aplica un tratamiento térmico, con el fin de mejorar su resistencia. Las principales aleaciones de este tipo consideradas por la norma AISI-SAE son las que se presentan en los siguientes puntos (Alu-stock, 2017)

### 2.3.1. ALEACIONES 1XXX

Este tipo de aleaciones son técnicamente puras (99,9 %), sus impurezas principales son reconocidas como el hierro y silicio como elementos aleantes. Por otro lado, se le aporta un 0,12% de cobre con el fin de mejorar su resistencia, obteniendo una resistencia de 90 MPa. Esta serie se emplea principalmente en el proceso de laminado en frío. Esta serie de aluminio se utiliza principalmente en equipos químicos, artículos para el hogar, productos eléctricos, etc.

### 2.3.2. ALEACIONES 2XXX

El principal aleante de este grupo de aleaciones es el cobre (Cu), aunque también contiene Mg. Esta aleación tratada con tratamiento térmico T6 tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 64 ksi (442 MPa) y se utiliza en la fabricación de fuselajes.

### 2.3.3. ALEACIONES 3XXX:

## Capítulo 2. Marco teórico

El principal elemento de aleación de este grupo de oro es el manganeso (Mn) al 1,2% y está diseñado para fortalecer el aluminio. Su resistencia en estado recocido es de aproximadamente 16 ksi (110 MPa). Se utilizan para componentes que requieren buena maquinabilidad.

### **2.3.4. ALEACIONES 4XXX**

Se trata de aleaciones de aluminio y silicio, en las que el silicio puede ir del 0,6 hasta el 21,5%. El silicio aleado con el aluminio reduce su punto de fusión y le proporciona una mayor característica de fluido una vez fundido. Se puede añadir magnesio o cobre para aumentar su capacidad de respuesta térmica en cuanto a la conductividad del material, ya que el silicio no es tratable térmicamente. Esto es interesante en aplicaciones de soldadura, por lo que estas aleaciones se suelen usar como material de relleno (Alcotec, 2012).

### **2.3.5. ALEACIONES 5XXX:**

En esta combinación de oro, el magnesio es el principal componente de la aleación, con un aporte que va del 2% al 5%.

Algunas aleaciones se pueden fortalecer mediante tratamiento térmico durante la precipitación. El grado de tratamiento térmico de la aleación se indica con la letra T seguida de un número, por ejemplo, T5.

### **2.3.6. ALEACIONES 6XXX:**

Los principales elementos de aleación de este grupo son el magnesio y el silicio. Con la condición de tratamiento térmico T6, alcanza una resistencia a la tracción de 42 ksi (290 MPa) y se utiliza para perfiles y ensamblajes generales.

### **2.3.7. ALEACIONES 7XXX:**

Los principales agentes de aleación de este grupo de aleaciones son con zinc, magnesio y cobre. Con procesamiento T6, tiene una resistencia a la tracción de alrededor de 73 ksi (504MPa) y se usa para fabricar fuselajes.

## 2.4. APLICACIONES

El aluminio tiene un amplio campo de aplicaciones en distintas áreas industriales las cuales se presentan y detallan a continuación: (ARPAL, 2013)

### 2.4.1. ELECTRICIDAD Y TELECOMUNICACIONES

El aluminio ha reemplazado paulatinamente al cobre desde la década de 1950 en las líneas de transmisión de alta tensión (ver Figura 1), y actualmente es uno de los medios más económicos de transmisión de electricidad debido a su baja densidad y alta conductividad. El aluminio también se utiliza en antenas de televisión y satélite. (ARPAL, 2013)



*Figura 1: Cables ACC*

*Fuente: <https://www.centelsa.com/aluminio-desnudo/>*

### 2.4.2. TRANSPORTE

Durante la última década, el uso de aluminio en la industria del transporte (camiones, aviones, automóviles, etc.) ha aumentado de manera constante y se están destinando importantes recursos para aumentar su participación en este sector. Alrededor del 8% del peso del vehículo es aluminio. Esta preocupación cumple con los estándares ambientales, pero también cumple con los estándares económicos.

Actualmente, las piezas de fundición (pistones, ruedas, transmisión, conjuntos de suspensión), radiadores, chasis y carrocería, etc. Todos ellos, entre otras, están hechos de aluminio. Ahora hay

## Capítulo 2. Marco teórico

automóviles, no solo deportivos, sino también sedanes de lujo (Audi A8) y vehículos comerciales (Audi A4) fabricados en aluminio.

El uso de estos materiales en la producción de vehículos tiene importantes beneficios medioambientales: los materiales ligeros hacen que el peso del vehículo se reduzca hasta en un 30 %, lo que se traduce en un mayor ahorro de combustible y, en consecuencia, en una reducción de los índices de contaminación. (ARPAL, 2013)

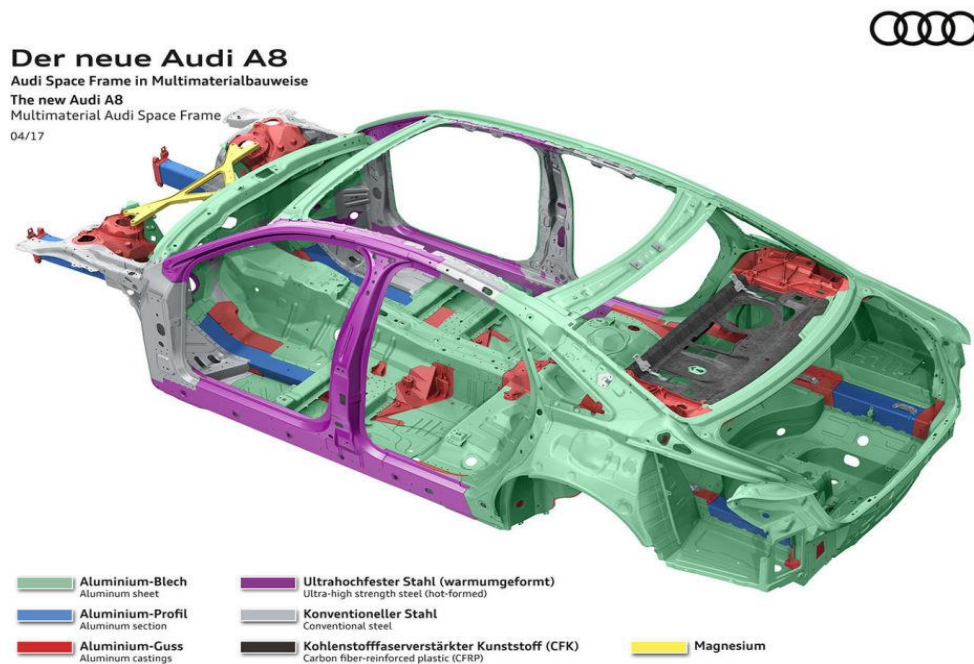


Figura 2: Chasis Audi A8

Fuente: <https://www.diariomotor.com>

En aviación, el aluminio es indispensable por su ligereza. Desde la creación del primer avión, el aluminio ha jugado un papel importante en su construcción y ha sustituido a materiales utilizados en un principio, como la madera y el acero. De hecho, el primer avión de aluminio se fabricó en la década de 1920 y se ha asociado con la industria desde entonces gracias a su combinación de resistencia, ligereza y ductilidad.



## Capítulo 2. Marco teórico

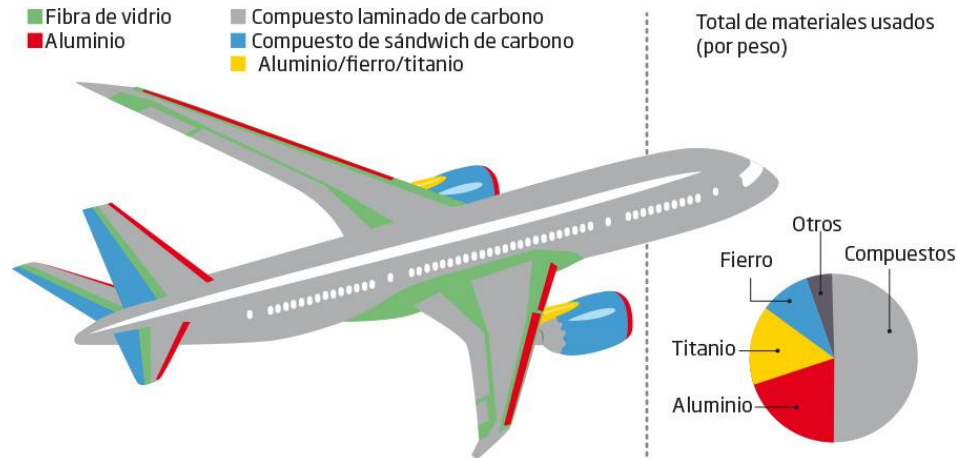


Figura 3: Materiales compuestos utilizados en la industria aeronáutica

Fuente: <https://www.cyd.conacyt.gob.mx>

### 2.4.3. ENVASES

El uso del aluminio se emplea en envases como latas, papel aluminio de cocina, la capa Intermedia de envases de cartón (tet brick), lamina de cierre de distintos yogurt o postres, blisters de medicamento, además de envasar aerosoles, envases de comida para conservar la temperatura, etc.

Por otro lado, hoy en día el peso de los envases de lata de bebidas ha disminuido de manera considerable utilizando el 40% menos de material requerido para el mismo propósito hace 25 años atrás, esto se traduce a menor consumo de energía y materia prima, conservando las mismas propiedades de la aleación. A continuación, se muestra gráficamente (ver gráfico 1) la disminución de la masa de la lata de aluminio de 33 cl. (ARPAL, 2013)

## Capítulo 2. Marco teórico

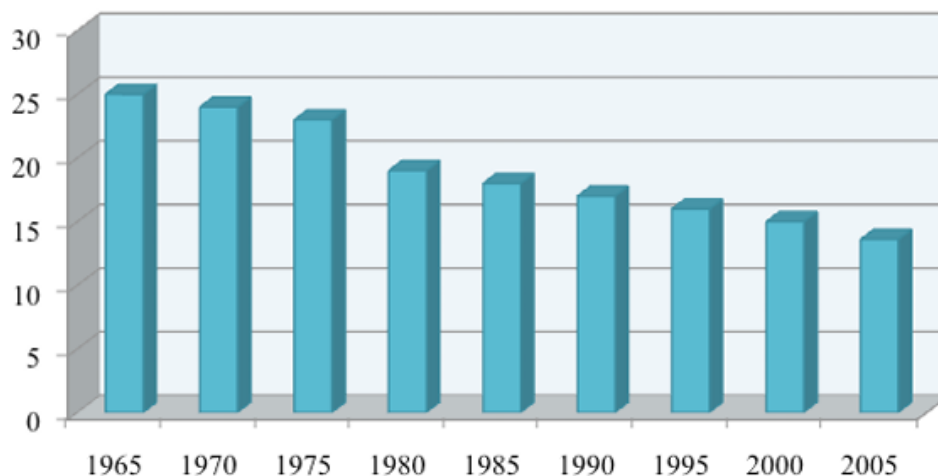


Gráfico 1: Disminución de la masa de las latas de 33 cl en gramos

Fuente: ARPAL

### 2.4.4. OTROS USOS

Debido a que el aluminio posee una alta conductividad térmica, su uso se amplía a utensilios de cocina. Además, su resistencia a la corrosión lo hacen una excelente opción para su implementación en cascos de barcos y otros mecanismos acuáticos (ver Figura 4). Por otro lado, el aluminio puede tener una vida útil muy versátil, debido a que puede ser de meses como es el caso de los envases de refrescos o décadas en el caso de marcos de ventanas, fachadas de edificios o chasis de vehículos en general (ARPAL, 2013)

A continuación, en el gráfico 2 se muestra cómo se distribuye en porcentajes los usos que se le da al aluminio.

## Capítulo 2. Marco teórico



Figura 4: Construcción naval

Fuente: ARPAL

### Usos del aluminio

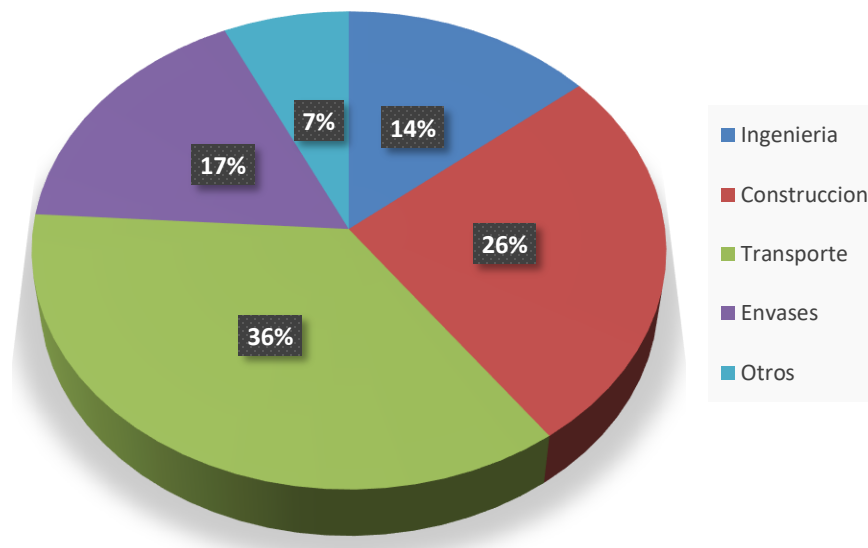


Gráfico 2: Usos del aluminio

Fuente: ARPAL

## 2.5. ALUMINIO RECICLADO

El aluminio tiene la ventaja de ser un material de fácil manejo, liviano, resistente a la rotura, no es

## Capítulo 2. Marco teórico

inflamable y resistente a la corrosión (gracias a la película protectora generada al estar en contacto con el medio ambiente). Además, tiene la ventaja de ser un material fácil de compactar dando la posibilidad de ahorrar una cantidad considerable en cuanto a espacio en transporte.

Ya en el proceso de reciclado sin importar el método utilizado, el aluminio puede ser reutilizado al 100% indefinidamente, sin verse afectada su calidad, esto dado que no se descompone en presencia de agua ni se altera al entrar en contacto con el aire.

Actualmente se encuentran circulando aproximadamente 700 millones de toneladas de aluminio de manera activa en distintos usos, siendo este valor equivalente al 70% de todo el aluminio fabricado desde 1888. Todo esto es posible a la larga vida útil que puede alcanzar el aluminio siendo de 10 a 20 años en medios de transporte y de 50 a 80 años en material de construcción. Esto respaldado por la alta tasa de reciclaje en distintas áreas de uso, alcanzado una tasa 90 % en material de construcción y transporte, más del 55 % en envases y hasta un 90 % en reciclaje de latas de bebestibles (Ángel Silvio Machado Rodríguez<sup>1\*</sup>, 2017).



*Figura 5: Símbolo del aluminio reciclado*

### **2.5.1. ENTRE LAS VENTAJAS DEL ALUMINIO RECICLADO DESTACAN LOS SIGUIENTES FACTORES:**

#### **2.5.1.1. AHORRO ENERGÉTICO:**

Con el reciclado del aluminio se logra reducir hasta el 95% de la energía para producir el mismo aluminio a partir de bauxita, de esta manera también se reduce el consumo de esta materia prima. Esto se ve reflejado con los datos entregados en los años cincuenta donde se necesitaban 21 kw/h

## Capítulo 2. Marco teórico

para la fabricación de un kilo de aluminio de la alúmina mientras que en 1977 este valor se redujo a 14 kw/h siendo un 30 % menos con respecto a los años cincuenta.

A continuación, se presenta un gráfico que representa el consumo energético en función del número de veces que se recicla el aluminio: (ARPAL, 2013)

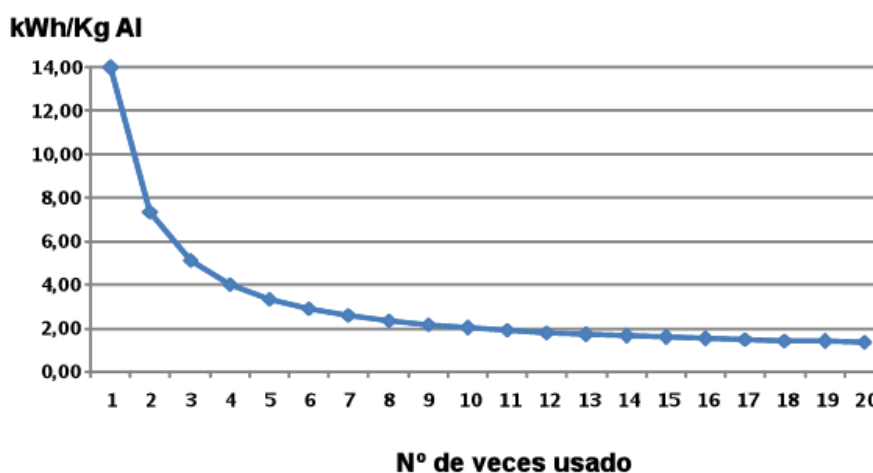


Gráfico 3: Consumo energético en función de la cantidad de veces que se recicla

Fuente: ARPAL, 2013

### 2.5.1.2. DISMINUCIÓN DEL USO DE LOS RECURSOS NATURALES

Además de la energía reducida para el reciclaje del aluminio, también ha reducido la cantidad de materia prima para llevar a cabo la fabricación de elementos con la misma finalidad y manteniendo todas sus propiedades, como es el caso de las latas nombrado anteriormente donde se requiere casi el 40% menos de material para fabricar las latas que hace 25 años.

### 2.5.1.3. COLABORA EN EVITAR LA UTILIZACIÓN Y SATURACIÓN DE VERTEDEROS

Esto se produce debido a que el aluminio tiene la cualidad de ser 100% reciclable y de manera ilimitada, siendo recuperado totalmente.

### 2.5.1.4. MINIMIZA LA CANTIDAD DE CO<sub>2</sub> QUE SE EMITE A LA ATMÓSFERA

Esto debido a que, al ser reciclado de manera indefinida, se evita la obtención del aluminio desde la bauxita, siendo un proceso mucho más amigable para el medio ambiente.

## 2.6. OBTENCIÓN DEL ALUMINIO SECUNDARIO

El aluminio secundario es conocido también como aluminio de segunda fundición. Su producción se lleva a cabo a partir de restos usados de dicho material, los cuales son procesados para posteriormente ser recuperados mediante pretratamiento, fundición y refinado. (PATRICIA IDALIA CHÉVEZ APARICIO, 2012)

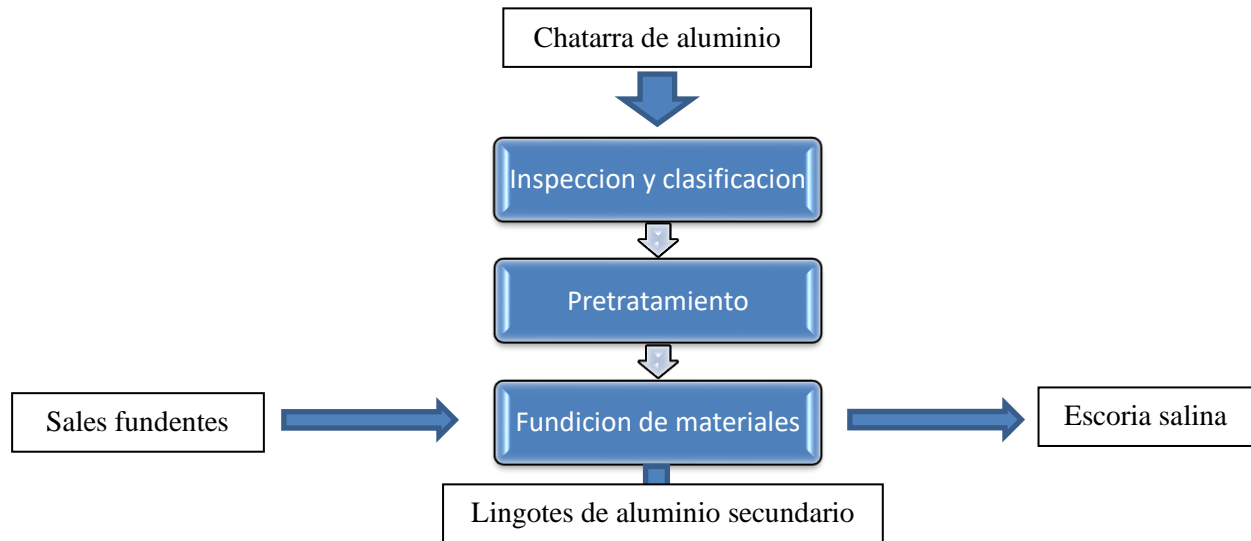


Figura 6: Obtención de aluminio Secundario

Fuente: PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LA ESCORIA SALINA DE LA INDUSTRIA DE ALUMINIO EN EL SALVADOR. El Salvador: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

### 2.6.1. INSPECCIÓN Y CLASIFICACIÓN

Esta etapa se enfoca principalmente en la separación del aluminio que requiere un proceso previo a la entrada al horno del que no, ya que se encuentra lo suficientemente limpio para ingresar al horno de fundición.

La materia prima es inspeccionada y clasificada según su tamaño, cantidad de impurezas visibles que no sean posibles de separar manualmente, naturaleza de la materia prima y otros factores a considerar. Este proceso se lleva a cabo de manera manual mediante un personal previamente capacitado (PATRICIA IDALIA CHÉVEZ APARICIO, 2012).

## Capítulo 2. Marco teórico

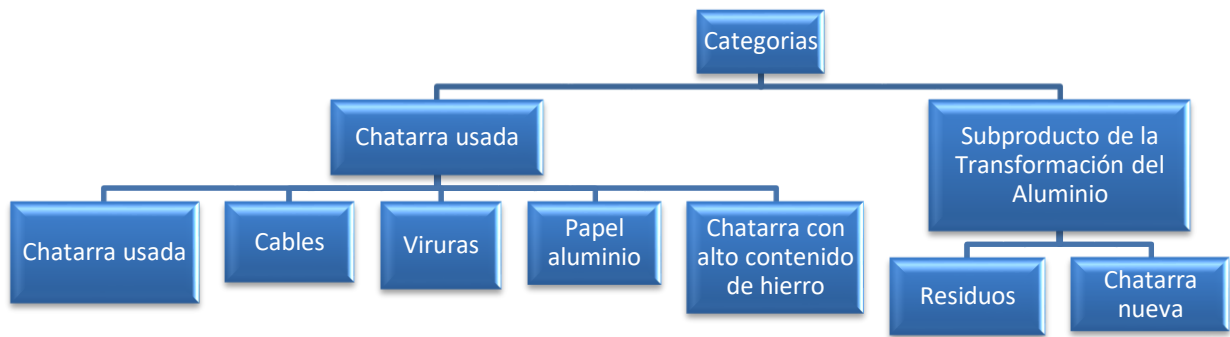


Figura 7: Descripción de la clasificación de materia prima para segunda fundición de aluminio

Fuente: PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LA ESCORIA SALINA DE LA INDUSTRIA DE ALUMINIO EN EL SALVADOR. El Salvador: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

### 2.6.2. PRETRATAMIENTO

Una vez teniendo los materiales a reciclar ya clasificados por categorías, se procede a aplicar el pretratamiento correspondiente a cada caso de cada clasificación, estos procedimientos son los siguientes:

- a. Trituración y cribado
- b. Embalado
- c. Desmenuzado y clasificación
- d. Calcinación y secado
- e. Procesado de impurezas calientes
- f. Molturación en seco
- g. Tostación
- h. Exudación de aluminio

### 2.6.3. FUNDICIÓN

Luego del pretratamiento todo material se somete a la fundición y posterior refinado, las especificaciones de este proceso dependen de la naturaleza del material a fundir. Existen muchos tipos de hornos para llevar a cabo este proceso, sin embargo, en la industria el más utilizado es el horno rotatorio, esto debido a que es el horno que posee la mayor versatilidad en cuanto a cantidad de materiales a reciclar (se pueden reciclar escoria de la primera y segunda fusión, además de

## Capítulo 2. Marco teórico

espumas de fundición). Dentro de este horno, la materia prima se funde bajo una capa de sal (fundente), que consiste en un método general, en una mezcla de 30% de KCl y 70% de NaCl. La temperatura de trabajo del horno oscila del orden de 850°C. (PATRICIA IDALIA CHÉVEZ APARICIO, 2012)

Tipos de hornos:

- Horno de reverbero
- Horno de reverbero con pozo lateral / pozo de carga
- Horno rotatorio
- Horno rotatorio basculante
- Horno de inducción
- Horno de cuba (Meltower)

### **2.7. IMPRESIÓN 3D**

La impresión 3D o proceso de manufactura aditiva (AM) es un proceso que consiste en la confección de y creación de diseños tridimensionales mediante la añadidura de material capa a capa. Los objetos físicos se obtienen usando datos de un modelo digital 3D u otra fuente de datos similar (archivo AMF). Este método de fabricación permite desarrollar y crear elementos físicos de casi todas las formas (Erasmus + programa de la union europea, 2018).





*Figura 8: Figuras impresas en 3D*

*Fuente: formlabs.com*

### **2.7.1. VENTAJAS DE LA IMPRESIÓN 3D**

- Complejidad y libertad de diseño:

Este método de fabricación permite el desarrollo de piezas de formas complejas, difíciles de llevar a cabo mediante otro método de fabricación, generando una gran libertad de diseño por otro lado se pueden fabricar modelos complejos de una sola pieza, sin la necesidad de la utilización de piezas de unión entre componentes. (Erasmus + programa de la union europea, 2018)

- Customización y personalización:

En el caso de querer modificar el diseño a imprimir, no se requiere un proceso adicional, solo la modificación del diseño digital, sin la necesidad de costos ni herramientas adicionales al proceso. (Erasmus + programa de la union europea, 2018)

- Sin necesidad de herramientas:

En comparación con la fabricación convencional, este proceso no requiere de ninguna herramienta adicional, además de ser un método bastante autónomo e independiente a factores externo una vez

## Capítulo 2. Marco teórico

iniciada la acción de imprimir.

- Velocidad y ahorro de costes:

Esta es una ventaja muy importante debido a que se pueden realizar piezas complejas en periodos relativamente cortos en comparación a los métodos de fabricación tradicional. Además, con la reducción del tiempo de producción aumentan las ganancias por lo que los costes de almacenamiento de inventario y tiempo de trabajo se podrían reducir.

- Mas rápido y con acceso al mercado menos peligroso:

Debido al reducido tiempo en el que fabrica las piezas, se utiliza para hacer piezas de prueba con el fin de realizar verificaciones rápidas y desarrollo de ideas de diseño. Por otro lado, reduce los riesgos o peligros relacionados con algún tipo de prototipo manual

- Menos residuos, sostenibilidad, ecológico:

Por lo general solo usan el material cargado para llevar a cabo la fabricación de la pieza. en el caso de que sobre material simplemente se puede utilizar el material restante en la fabricación de otra pieza, dejando mucho menos margen para la perdida de residuos

### **2.8. CONFORMACIÓN DE CUERPOS VERDES**

El conformado de los cuerpos verde se llevará a cabo mediante el proceso de pulvimetalurgia. La pulvimetalurgia se basa en la transformación de polvos tanto metálicos, no metálicos como aleaciones mediante presión y calor a través de un proceso denominado sinterización. Ésta se lleva a cabo a temperaturas inferiores a las del punto de fusión del componente principal, es decir, sin fusión del mismo.

El proceso denominado pulvimetalúrgia abarca desde la fabricación del polvo hasta la obtención de la pieza. A grandes rasgos se puede decir que abarca dos grandes grupos de etapas claramente diferenciadas, la fabricación del propio polvo y la consolidación de los mismos. En general podemos discernir tres fases principales:

- Fabricación y mezcla o aglomerado de polvos.

## Capítulo 2. Marco teórico

- Compactación: consiste en cohesionar el material a través de la aplicación de presión, obteniendo la pieza en verde.
- Sinterización: se somete la pieza en verde a temperaturas inferiores a las del punto de fusión del constituyente principal, alcanzando la pieza su resistencia final.

### **2.8.1. QUÉ ES UN CUERPO VERDE**

El procedimiento a llevar a cabo consiste en primera instancia en establecer las diferencias en cuanto a propiedades del aluminio puro del aluminio reciclado de la aleación AA2070, siendo el segundo el más afectado negativamente en cuanto a propiedades mecánicas por su contenido de Hierro (Fe) y Silicio (Si). Luego se procede a generar la mezcla de los polvos de los metales a utilizar en la aleación los cuales poseen un tamaño de partícula medio de 44  $\mu\text{m}$ , con el objetivo de generar una mezcla homogénea utilizando un molino de bolas o de manera manual.

Una vez llevada a cabo la mezcla homogénea de la aleación, se procede a prensar el polvo en capsulas denominadas cuerpos verdes. Estas cápsulas serán prensadas a distintas fuerzas lo cual afectaría en la capacidad de interactuar de los polvos de la aleación sometidos a compresión, de los cuerpos verdes se debe obtener sus medidas y masa para poder calcular su densidad y posteriormente graficar los valores obtenidos para poder observar el comportamiento de la mezcla en compresión.

### **2.8.2. PULVIMETALURGIA**

La pulvimetalurgia permite la fabricación de piezas con un nivel de complejidad muy elevado que serían imposibles de mecanizar mediante los procesos convencionales. Este proceso se basa en el prensado de polvos de molde de metal y la consolidación de la pieza por calentamiento, teniendo control sobre la temperatura aplicada. Obteniendo como resultado un producto un acabado superficial bastante bueno, la composición y propiedades mecánicas controladas. (Ángel Silvio Machado Rodríguez<sup>1\*</sup>, 2017)

A lo largo de esta investigación se regirá por la norma con la investigación con la designación “B 243 – 04a” donde se detalla la terminología estándar de la pulvimetalurgia. (ASTM International)

## Capítulo 2. Marco teórico

### **2.8.3. MOLIENDA**

Los polvos para pulvimetalurgia pueden clasificarse según tres categorías:

- Por sus propiedades metalúrgicas (composición química e impurezas, microestructura y microdureza).
- Por sus propiedades geométricas (distribución de las partículas por forma, tamaño y estructura interna (porosidad)).
- Por sus propiedades mecánicas (tasa de fluidez, densidad aparente, compresibilidad, dureza en verde, etc).

Estas características vienen derivadas del proceso de obtención y tienen elevada relevancia en el posterior sinterizado y en las propiedades finales del material. Entre los métodos más comunes de obtención de polvo se encuentran:

- Métodos de conminución mecánica sin cambio de fase
- Desintegración del fundido (atomización)
- Métodos especiales de atomización
- Reducción en estado sólido de compuestos metálicos
- Procesos químicos

### **2.8.4. COMPACTACIÓN**

La compactación de las probetas es una de las etapas que tiene mayor relevancia y tiene directa relación con la calidad del resultado final. Ya que, al compactar a una presión muy elevada, esta muestra terminara en una rotura y deformación temprana, mientras que si la presión es muy inferior la pieza presentara desmoronamientos de las piezas verdes, grietas y/o abundante porosidad (PATRICIA IDALIA CHÉVEZ APARICIO, 2012).

Este proceso será regido por la norma con la designación “B 312 – 96” donde se establece el

## Capítulo 2. Marco teórico

método de compactación para el conformado de las muestras verdes. Para este proceso se necesitan principalmente los siguientes componentes para poder llevar cabo el proceso de manera correcta regido por esta norma. Los componentes necesarios se presentan a continuación (ASTM International, 2002):

- Punzones y troqueles
- Máquina de ensayo de compresión
- Balanza (con precisión de 0,01 g)
- Micrómetro o pie de metro (con precisión de 0,03 mm)
- Lubricante de compactado

### **2.8.5. SINTERIZACIÓN**

Tratamiento térmico de un polvo o compacto a temperatura inferior a la de fusión del principal constituyente, con el propósito de aumentar su resistencia a través de la unión de partículas a través de procesos de difusión en estado sólido (Ángel Silvio Machado Rodríguez<sup>1\*</sup>, 2017).

Este procedimiento está regido por la norma con la designación B 595 – 95 donde están caracterizadas las especificaciones estándar para piezas estructurales de aluminio sinterizado (ASTM International, 2000).

Capítulo 2. Marco teórico

## **CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA**

### 3.1. MATERIALES UTILIZADOS

Para llevar a cabo la solución planteada se necesitan varios instrumentos tanto de medición como recipientes y máquinas: Prensa hidráulica, Pie de metro, balanza, recipientes para pesar los polvos, e instrumentos para manipular los polvos. Los polvos utilizados para fabricar las distintas aleaciones fueron cobre, manganeso, magnesio, zinc, titanio, litio y aluminio puro.

Por otro lado, en el estudio realizado se utilizó de una caja de guates llenada con argón con el fin de proteger el ambiente de cualquier contaminación, evitar la oxidación de los polvos, además de proporcionar una mayor seguridad en la manipulación de estos.

### 3.2. PROCESOS DE MEZCLA

#### 3.2.1. TABLAS CON COMPOSICION QUIMICA.

Los polvos fueron mezclados de manera manual introduciendo la mezcla dentro de un frasco y posteriormente agitándolo con la mano, depositando la mezcla en un frasco para posteriormente agitarla durante una hora aproximadamente. Esta mezcla se lleva a cabo en un ambiente protegido por un gas inerte, en este caso argón, con el fin de evitar la contaminación de las muestras.

Estas mezclas se llevaron a cabo con polvos de cada elemento que compone el aluminio de la aleación AA2070, con ciertas modificaciones de dependiendo del tipo de muestra que se desee realizar, variando sus elementos y porcentajes (ver tablas 3, 4, 5 y 6). Además, se entrega la composición química de la aleación aluminio-silicio de la empresa Metalbras (Ver tabla 7).

Tabla 3: Composición química aluminio AA2070 primario en porcentaje de peso

<b>AA2070 PRIMARIO</b>							
<b>Porcentaje en peso</b>							
	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>Li</b>	<b>Al</b>
Rangos	<b>2,9-3,8</b>	<b>0,10-0,50</b>	<b>0,05-0,40</b>	<b>0,10-0,50</b>	<b>0,1</b>	<b>1,0-1,4</b>	rem
Media	3,35	0,3	0,225	0,3	0,1	1,2	94,525

Tabla 4: Composición química aluminio AA2070 + 0,15% de Fe en porcentaje de peso

<b>AA2070 + 0,15% Fe</b>
--------------------------

### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Porcentaje en peso									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Li	Al
Rangos	0,12	0,15-1,5	2,9-3,8	0,10-0,50	0,05-0,40	0,10-0,50	0,1	1,0-1,4	rem
Media		0,15	3,35	0,3	0,225	0,3	0,1	1,2	94,525

Tabla 5: Composición química aluminio AA2070 + 0,5% de Fe en porcentaje de peso

AA2070 + 0,5% Fe									
Porcentaje en peso									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Li	Al
Rangos	0,12	0,15-1,5	2,9-3,8	0,10-0,50	0,05-0,40	0,10-0,50	0,1	1,0-1,4	rem
Media		0,5	3,35	0,3	0,225	0,3	0,1	1,2	94,525

Tabla 6: Composición química aluminio AA2070 + 1,5% de Fe en porcentaje de peso

AA2070 + 1,5% Fe									
Porcentaje en peso									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Li	Al
Rangos	0,12	0,15-1,5	2,9-3,8	0,10-0,50	0,05-0,40	0,10-0,50	0,1	1,0-1,4	rem
Media		1,5	3,35	0,3	0,225	0,3	0,1	1,2	94,525

Tabla 7: Composición química aluminio secundario en porcentaje de peso

Aleación de Aluminio con silicio (secundario)						
	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Al
Promedio Medición	0,3996	2,1958	0,1778	0,55	0,1008	96,576

#### 3.2.2. MEZCLA

La mezcla se lleva a cabo en un ambiente protegido conformado por una caja de guantes transportable. Esta, tiene forma de pirámide con unas dimensiones de 860 mm de ancho, 560 mm de profundidad y 725 mm de alto tal como se muestra en la figura 9. Esta cámara protectora tiene como finalidad que los polvos involucrados en la mezcla no se vean contaminados por factores externos del ambiente gracias a que se llena de un gas noble purgando el aire de su interior, el gas noble en este caso es el argón, siendo el gas más utilizado en los procesos industriales para prevenir el contacto y la interacción entre el metal y la atmosfera que lo rodea.



### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática



Figura 9: Caja de guantes transportable

Dentro de esta atmósfera protectora se ingresan todos los elementos para poder llevar a cabo las mezclas de las muestras como los polvos, recipientes para almacenar las mezclas, toalla de papel, vidrio reloj y lo más importante, la balanza. La balanza requerida por la norma ASTM B-610, solicita una precisión de 0,01 g para poder llevar a cabo las mezclas de los polvos, por lo que se utilizará la balanza de la marca Boibase del modelo LT5002T que mide una masa máxima de 5000 g con una precisión de 0,01 g (ver figura 10).

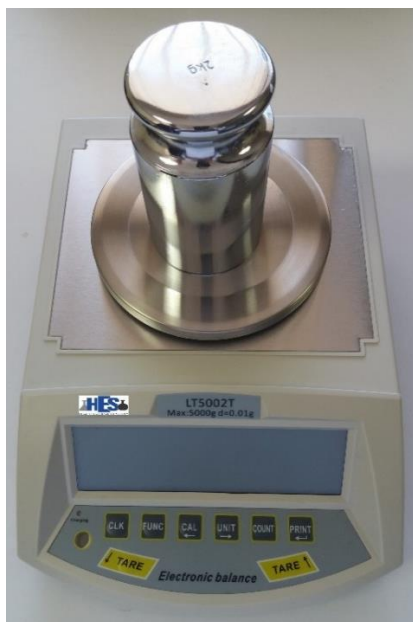


Figura 10: Balanza Boibase modelo LT5002T

Con todos lo elemento ya mencionados anteriormente se lleva a cabo las mezclas de todos los polvos que componen las aleaciones, pesándolos uno n por uno y mezclado los en un recipiente

### 3.2. PROCESO DE FORMACIÓN DE CUERPOS VERDE

Previo al proceso definitivo de formación de cuerpos verdes, se realizó un ensayo de compactibilidad siguiendo la norma ASTM B-331. Para llevar cabo este ensayo se procede a calcular el peso requerido de la aleación para poder obtener una muestra del tamaño necesario para que cumpla con la norma ASTM internacional B-331, donde indica las especificaciones del procedimiento para testear la compresibilidad de un sólido. Esto se lleva a cabo mediante la siguiente formula:

$$\begin{aligned} P_g &= \text{Densidad en verde, } \frac{g}{cm^3} \\ &= \left( \frac{4}{\pi * (2,54)^3} * \frac{M}{d^2} * t \right) \\ &= 0,0777 * \left( \frac{M}{d^2} * t \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

M = Masa a compactar (g)

d = Diámetro a compactar (in)

t = Espesor a compactar (in)

Según la norma ASTM B-331 es necesario una balanza con una precisión de 0,01 g y un pie de metro digital con una precisión de 0,01 mm con el fin de obtener una mayor precisión en la medición del volumen, además de una prensa hidráulica para poder comprimir las mezclas desarrolladas.

Las dimensiones de la muestra esta dadas por la misma norma, y que se muestra más en detalle en la siguiente ilustración:

### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

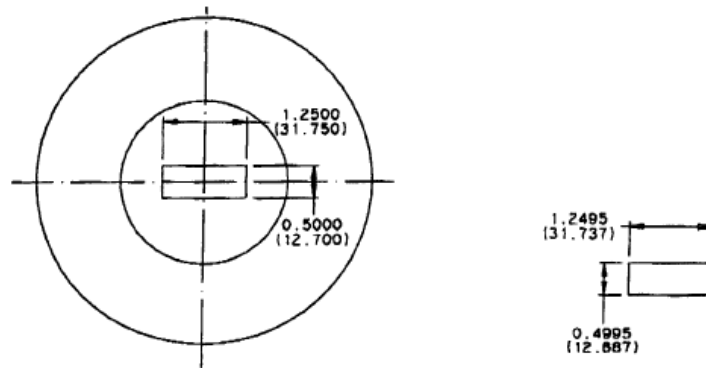


Figura 11: Medida de la muestra, normada. La medida que se ubica en la parte superior corresponde a la medida en pulgadas, mientras que la que se encuentra debajo, entre paréntesis, corresponde a la medida en milímetros.

Fuente: ASTM B-331

Para poder obtener la compresión óptima para una densidad máxima se lleva a cabo varias compactaciones a distintas cargas. Para el caso de los polvos de aluminio, se realizaron ensayos desde 14 toneladas (tomando como referencia un estudio ya realizado con polvos de aluminio) a 18,5 toneladas con el fin de determinar la compresión óptima.

### 3.3. SINTERIZACIÓN

Se utilizó un horno tubular de la marca Nabertherm del modelo RHTC 80-230/15 (ver figura 12) de 600 mm de longitud. Para desarrollar el proceso de sinterizado en una atmosfera protectora se diseñó y fabricó una cámara de acero inoxidable la cual se adosó al equipo poder incorporar gas y controlar el proceso a temperatura.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática



Figura 12: Nabertherm modelo RHTC 80-230/15

Fuente: Catalogo general Nabertherm

Esta cámara cuyo diámetro exterior, espesor y largo son 80 mm, 3 mm y 1000 mm respectivamente el cual atraviesa todo el largo del horno, quedando una distancia de 400 mm cañería para su manipulación (ver figura 13).

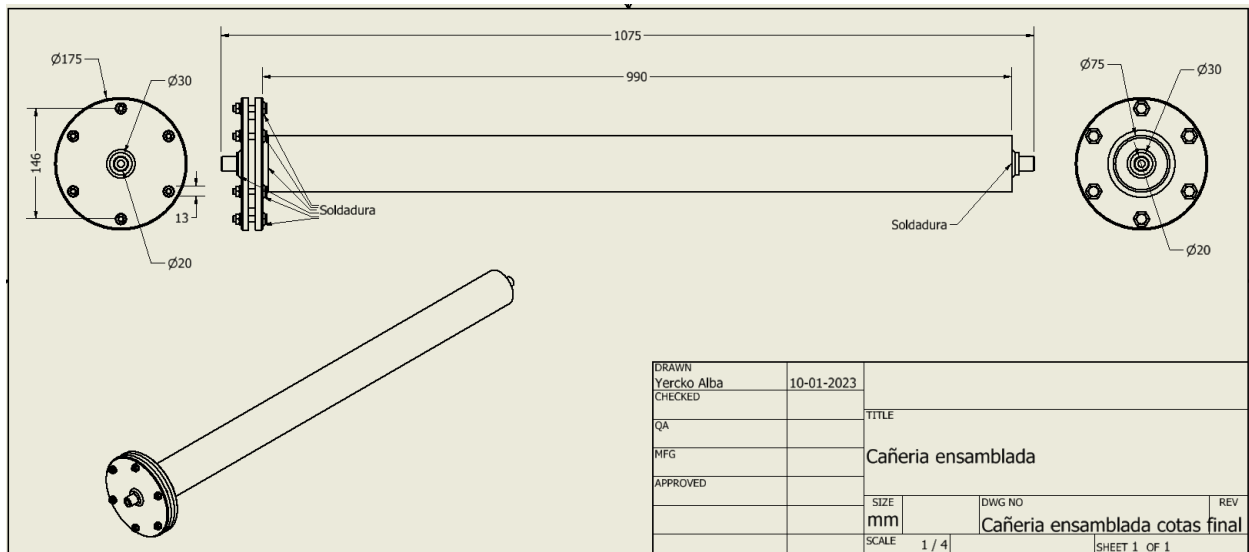


Figura 13: Plano general de la cañería desarrollada

Fuente: Elaboración propia

### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Los flanges que conforman esta cañería tiene un espesor de 10 mm para evitar su deformación debido a las altas temperaturas a las que será sometida la estructura y 175 mm de diámetro con 5 perforaciones para asegurar su cierre y una cinta de asbesto de 13 x13 mm para garantizar la hermeticidad en el cierre y que logre soportar las altas temperaturas a las que será sometida la estructura siendo la temperatura máxima 600°C. A continuación, se presenta el despiece de los componentes de la cañería en la figura 14.

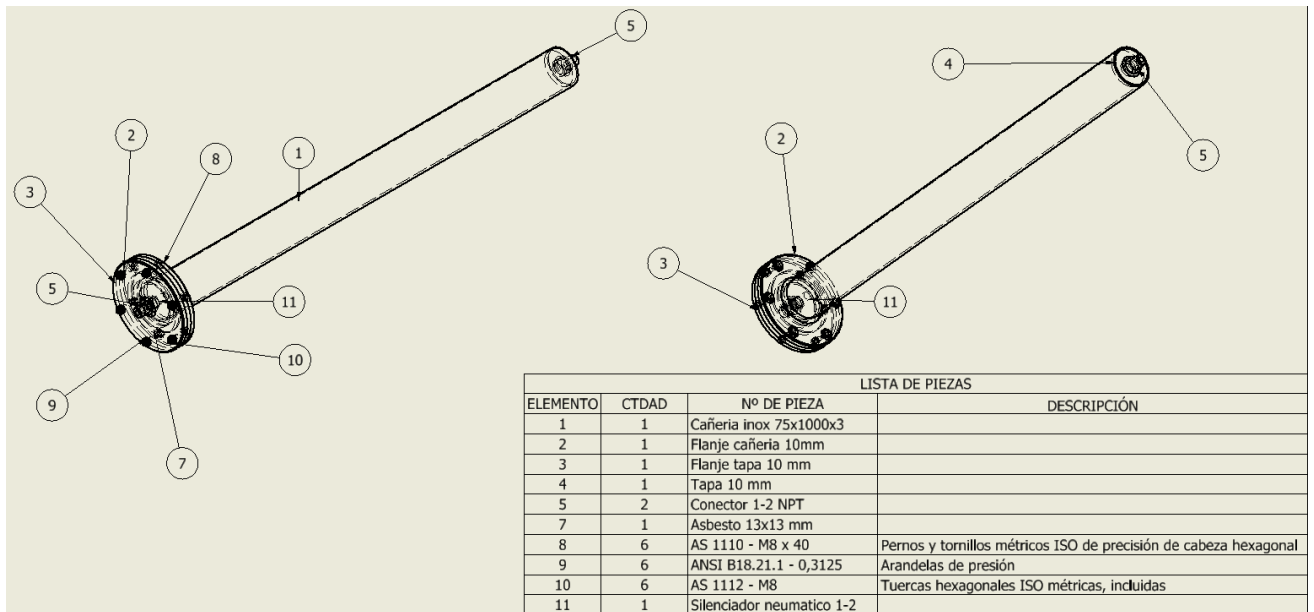


Figura 14: Despiece de cañería

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, a ambos extremos de la estructura se le incorporaron acoples NPT de acero inoxidable de 1/2" para poder proporcionar gas al interior de la cámara sin fugas con el fin de que las muestras no se vean afectadas por agentes externos el cual pueda contaminarlas y afectar en el resultado final. A continuación, en la figura 16 se presenta el armado de la tapa y los componentes que lo conforman:

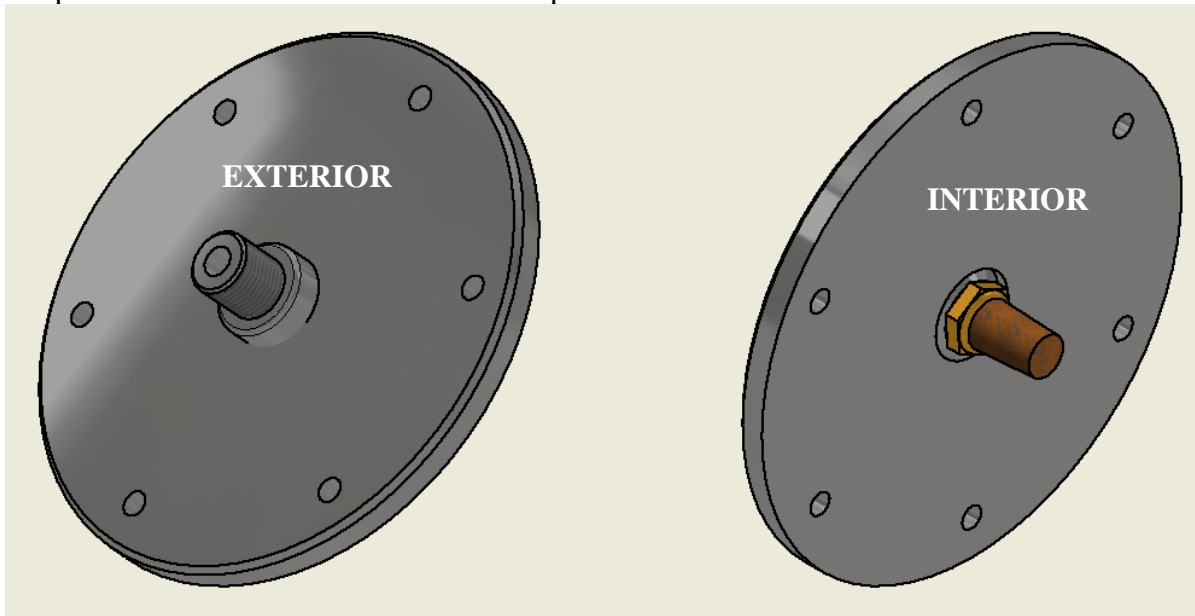


Figura 15: Tapa de la cañería

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura anterior al flange por la parte exterior donde ingresa el gas a la cañería, se instaló un niple de 1/2 pulgada de gas al cual se le mecanizo un silenciador neumático por dentro con el fin de evitar que la presión con la que ingrese el gas altere la posición de las muestras al interior de la cañería, generando un ingreso más homogéneo del gas.

Toda esta estructura está respaldada por la nueva norma UNE 60670 cuyo nombre completo es "Instalaciones receptoras de gas suministradas a una presión máxima de operación (MOP) inferior o igual a 5 bar" en la cual están establecidos los materiales, espesores y métodos de unión relacionados con la presión de gas a trasladar por la cámara. Con respecto a esto se decidió aumentar el factor de seguridad aumentando al doble el espesor de la cámara debido a la temperatura que debe alcanzar dentro del horno evitando cualquier deformación que se pueda generar para así poder asegurar el seguro y correcto funcionamiento de la cámara.

En cuanto al setup de sinterizado es necesario contar con un horno tubular, una cámara hermética que permita realizar ensayos en atmósfera controlada para introducir en el horno, un gas noble (en este caso argón), recipientes apropiados para alta temperatura para introducir los cuerpos verdes en la cámara. Este setup estaría conformado como se muestra en la Figura 12.

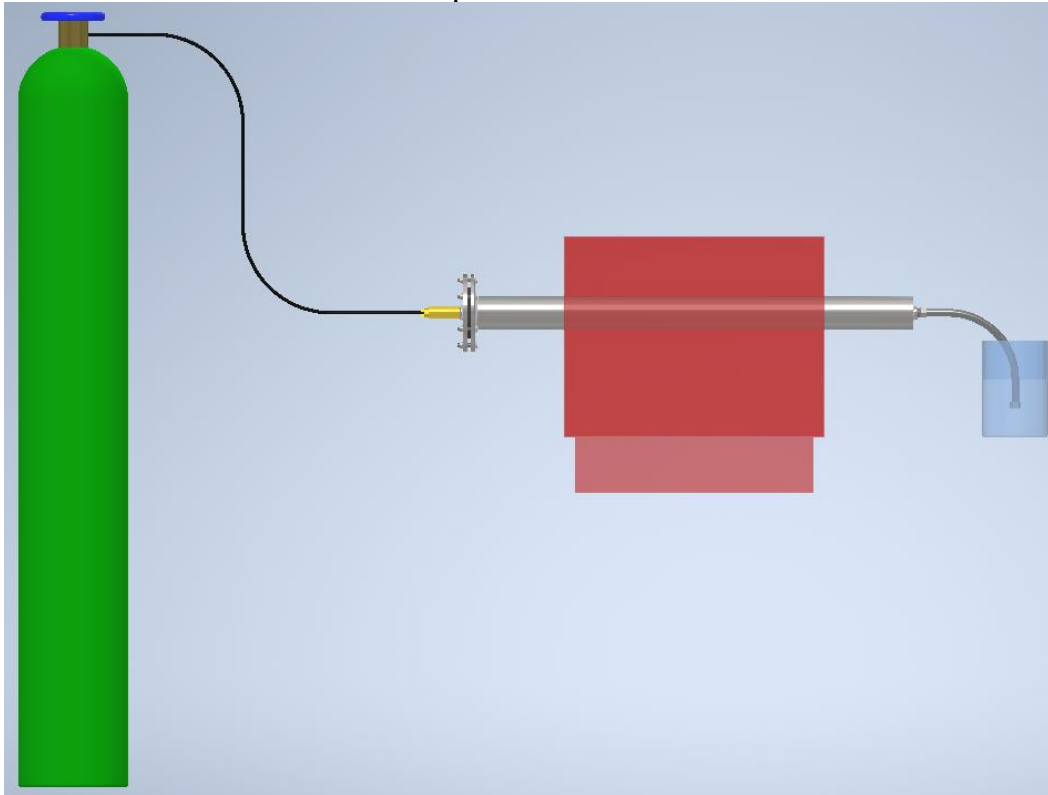


Figura 16: Setup sistema de sinterizado

Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede observar en la Figura 12, se muestra un tanque verde que representa el suministro de argón que ingresa a la cámara la cual se deposita por un orificio que posee el horno y lo atraviesa en su totalidad. Por el extremo derecho (salida del horno y cañería) se instala un flexible para gas con el fin de expulsar el argón del interior de la cámara, depositándolo en un contenedor con agua donde la punta del flexible debe estar sumergida para evitar la liberación del gas al ambiente.

Para este proceso se someterán los cuerpos verdes a 550, 575 y 600. Esto debido a que el sinterizado se lleva a cabo a temperaturas inferiores al punto de fusión, que en el caso del aluminio es de aproximadamente 660 °C.

### 3.3.1. PROCESO DE SINTERIZADO

Para llevar a cabo el proceso el proceso de sinterizado, primero se deben identificar las zonas efectivas de sinterizado, lugares donde el horno cumple cien por ciento las temperaturas solicitadas correspondientes a las dimensiones del horno, siendo estas las entregadas por la siguiente tabla.

### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Tabla 8: características horno Nabertherm

Fuente: Catálogo general Nabertherm

Modelo	Tmax °C	Dimensiones ext. mm			Ø ext. Tubo (mm)	Long de calentado (mm)	Long cte. tempera tura $\Delta T$ 10K	Long del tubo (mm)	Potencia kW	Conexión eléctrica	Peso en Kg
		Anch	Prof	Alt							
RHT 80- 230/15	1500	600	430	580	80	230	80	600	6,3	Trifásico	50

Según las características entregadas por el catálogo, la longitud de calentamiento es de 230 mm, lo que significa que esa distancia la temperatura indicada por el horno es efectiva con precisión, lo que hace preferir trabajar en ese espacio para poder tener resultados más certeros. Por lo tanto, los recipientes donde irán las muestras deben estar situados en esa área del horno

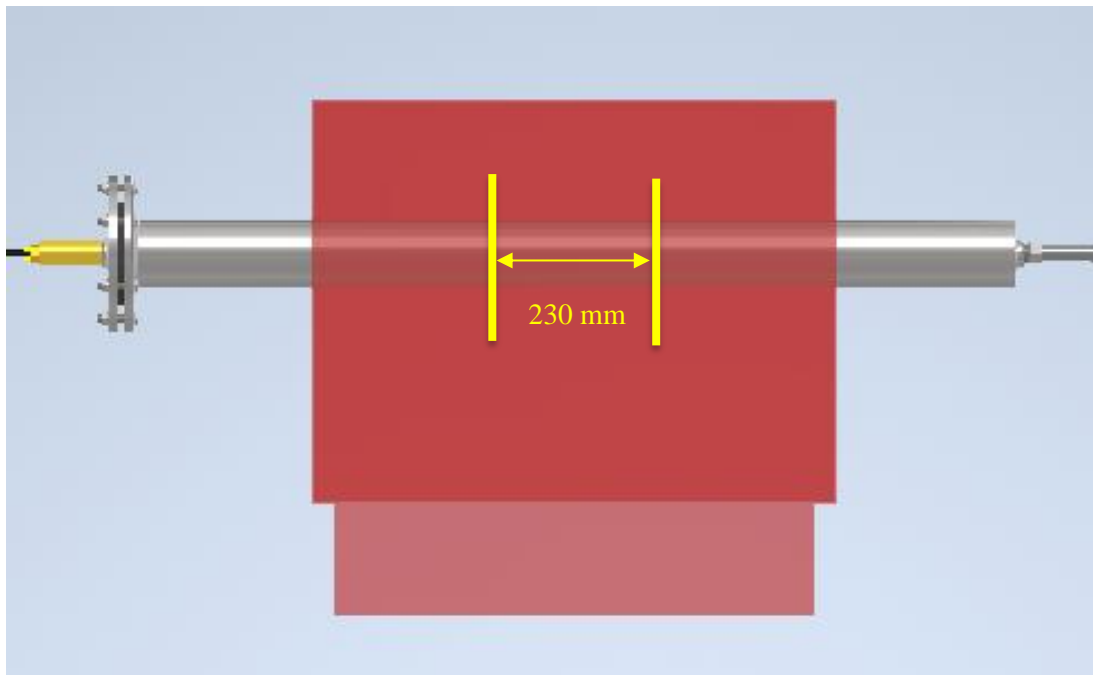


Figura 17: Zona e calentamiento efectivo del horno

Fuente: Elaboración propia

Dentro de la zona indicada en la figura 17 los cuerpos verdes de las distintas aleaciones se someterán a tres temperaturas distintas aumentando 5 °C por minuto desde los 25°C hasta los 550,



Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática 575, y 600 °C respectivamente a cada proceso de sinterizado. Luego se mantendrá la temperatura final establecida durante una hora y posteriormente se disminuye la temperatura de forma natural (no forzada) hasta temperatura ambiente, presentando un gráfico como el que se muestra en los gráficos 4.

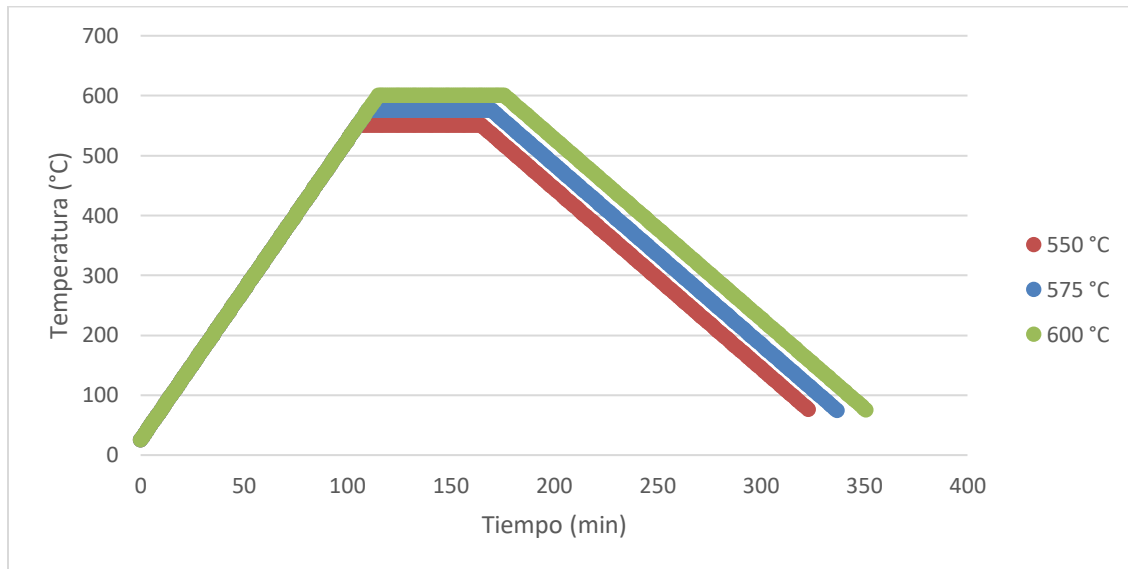


Gráfico 4: Rampa de temperatura a las distintas temperaturas

Tal como se puede apreciar en los gráficos 4, 5 y 6, la rampa de temperatura tiene una duración aproximada de casi 6 horas dependiendo de las condiciones ambientales, esta condición siendo de mayor influencia en el enfriado de las muestras.

Por otro lado, otro factor importante fue el flujo de gas dentro de la cámara, este siendo de un valor menor a 5 L/min. este valor no se pudo obtener de manera más exacta debido a que el manómetro utilizado marca un flujo de gas mínimo de 5 L/min y al momento de poner en marcha el experimento, el manómetro no alcanzaba a marcar su mínimo.

### 3.4 Caracterización

#### 3.4.1. Caracterización física (densidad Arquímedes)

La medición de densidad en el estudio se llevará a cabo mediante el método de Arquímedes, el cual se basa en la tercera ley de Newton, también conocida como principio de acción y reacción establece que: “cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo, éste realiza una fuerza igual, pero de sentido contrario”. La aplicación conjunta del principio de Arquímedes y de la tercera ley de

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática  
Newton, permite determinar la densidad de un cuerpo de forma irregular sumergiéndolo en un líquido de densidad conocida.

Basándose en estos dos principios, se puede determinar la densidad  $\rho_c$ , de un cuerpo de forma irregular, sumergiéndolo en un líquido de densidad conocida  $\rho_l$ . Cuando el cuerpo, de masa  $m_c$ , se sumerge en una masa  $m_l$  de líquido, éste ejerce un empuje  $F$  sobre el cuerpo. De acuerdo con la tercera ley de Newton, el cuerpo ejercerá sobre el agua una fuerza igual y de sentido contrario,  $-F$ . Esta fuerza será igual al peso del líquido desalojado. Si el sistema se sitúa sobre una balanza, esta leerá una masa mayor que cuando el cuerpo no está sumergido.

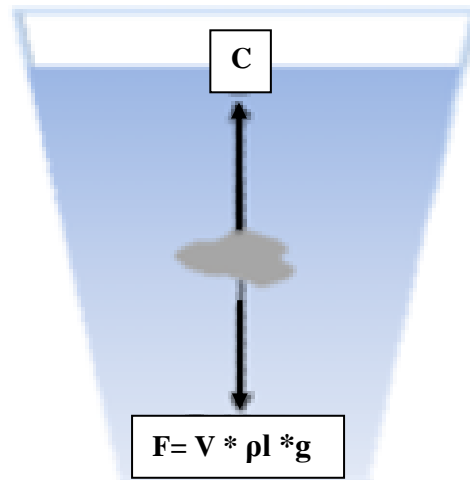


Figura 18: Esquema del ensayo

Teniendo en cuenta el principio de Arquímedes, el volumen de líquido desalojado,  $V$ , será igual al volumen del cuerpo sumergido. De acuerdo con la definición de densidad de un cuerpo, expresada como la masa de un cuerpo por unidad de volumen, se tiene:

$$V = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{m_l}{\rho_l} \quad (1)$$

Donde:

Por lo tanto:

$$\rho_c = \frac{m_c}{m_l} \rho_l \quad (2)$$

En primer lugar, se coloca el cuerpo en estudio sobre la balanza para posteriormente registrar la lectura de su masa. Luego se retira el cuerpo y se coloca un vaso lleno de agua y se tara la balanza.

Posteriormente se sumerge el cuerpo en estudio en el vaso con agua teniendo la precaución de que no se derrame agua en el proceso. Se debe hacer uso de un soporte con el fin de que el cuerpo se mantenga sumergido y suspendido en el agua sujetado de un hilo, sin que se apoye en el fondo del vaso y, por lo tanto, sin apoyar sobre la balanza. Se anota de nuevo la lectura de la balanza.

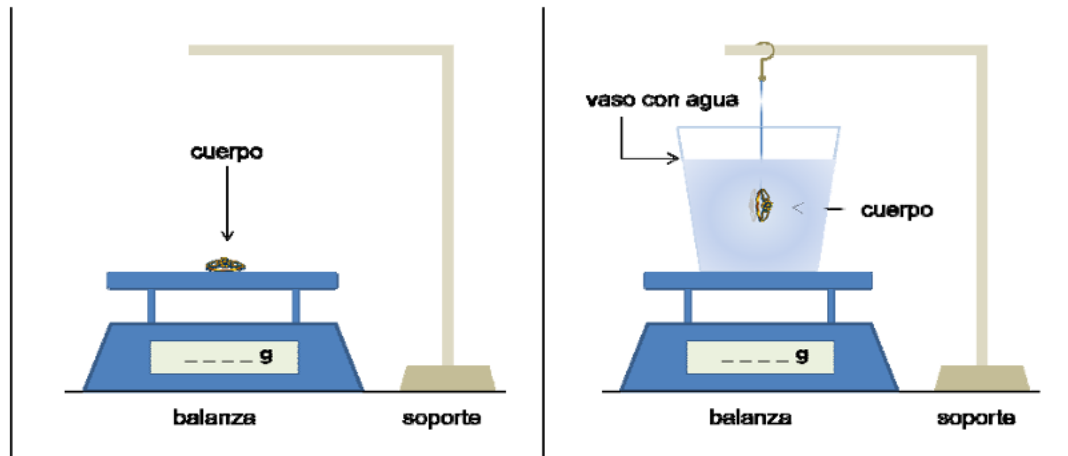


Figura 19: Montaje del ensayo de Arquímedes

Fuente: <http://www.ucm.es/theoscarlab/>

El valor arrojado indica la fuerza de empuje ejercida por el agua sobre el cuerpo y permite a través de la ecuación (2), determinar la densidad del cuerpo desconocido.

### 3.4.2. CÁLCULO DE LA DENSIDAD RELATIVA POR MÉTODO GEOMÉTRICO

Este cálculo se basa en la definición física de densidad. Donde teniendo la masa y calculando el volumen mediante medidas obtenidas se calcula la densidad del cuerpo verde.

Con la ecuación (3) se calcula la densidad de la pieza sinterizada:

$$\rho_{\text{geométrica}} \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right) = \frac{m_{\text{sinterizada}}}{V_{\text{probeta}}} \quad (3)$$

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática  
Mientras que con la ecuación (4) se obtiene la porosidad de las probetas mediante cálculo geométrico:

$$P(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{geometria}}}{\rho_{\text{teorica}}}\right) \quad (4)$$

### 3.4.3. Caracterización óptica

Para llevar a cabo la caracterización óptica primero se realizó el corte de las muestras de cada una de las aleaciones a cada una de las temperaturas a las que fueron sometidas, siendo un total de tres muestras. Estas muestras fueron ubicadas en el fondo de un molde que fue rellenado con resina epóxica y posteriormente se dejó endurecer.

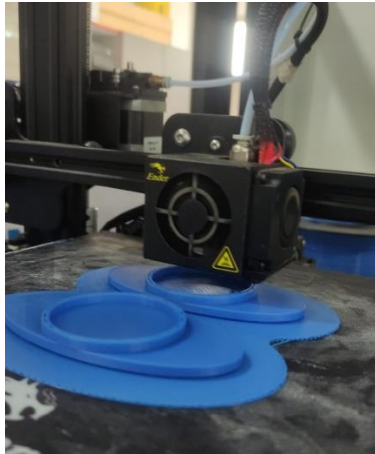


Figura 20: Base de molde impresa en 3D

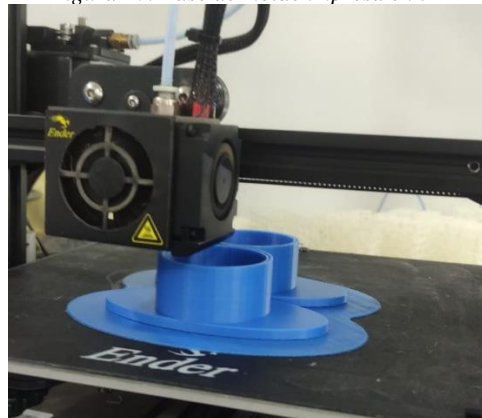


Figura 21: Cuerpo de molde impreso en 3D



*Figura 22: Molde ensamblado con cinta adhesiva para evitar suciedad que pudiera ingresar a la resina*

Una vez seco el molde, se procede a pulir las muestras en una máquina pulidora de muestras metalográficas hasta lograr un acabado de espejo en todas las superficies de las muestras.

#### **3.4.4. Caracterización microestructural**

Según la norma ASTM E 3 - 01 que tiene como nombre “Guía normalizada para Preparación de Muestras Metalográficas”, el objetivo principal de los exámenes metalográficos es revelar los constituyentes y la estructura de los metales y sus aleaciones mediante un microscopio óptico de luz o electrónico de barrido.

Para preparar las muestras metalográficas se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente asociado a corte y montaje.

El proceso de pulido de las muestras se ha llevado a cabo en una pulidora de muestras metalográficas yendo de lijas más abrasivas a las menos abrasivas hasta llegar a pulir con un tamiz dando vueltas a la pieza en distintos sentidos y movimientos para poder llegar al acabado necesario para poder observar las muestras de la manera más precisa posible.

Luego de haber pulido las muestras hasta obtener un acabado espejo y haber alcanzado la calidad de pulido necesaria para poder ver claramente sin rayas de lija las muestras, se procede a aplicar un ataque químico, en este caso, se utilizó ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) con el fin de observar la microestructura de la muestra en cuestión, Este ataque químico se ve regido por la norma ASTM E - 407 - 99, donde se ve estipulado el tiempo de sometimiento al ataque dependiendo de la sustancia que se aplica.

### 3.4.5. Caracterización Mecánica.

#### 3.5. ENSAYO DE MICRODUREZA

Este ensayo fue regido por la norma ASTM B - 933 – 04 que lleva como nombre “*Método de ensayo normalizado para Dureza por microindentación de materiales pulvimetalúrgicos (P/M)*” entregando los parámetros y condiciones a tomar en cuenta para que el ensayo sea válido y estandarizado.

Para obtener la dureza de Vickers llevar cabo este ensayo se utilizó una máquina de la marca KB Pruftechnik modelo Kb 250 BVRZ



Figura 23: KB Pruftechnik modelo Kb 250 BVRZ

Fuente: instalaciones de Universidad de Talca

Tabla 9: Relación de indentación y aumento

Fuente: ASTM B-933-04

Longitud de indentación ( $\mu\text{m}$ )	Aumento	
	Max	Min
< 76	---	400
76 a 125	800	300

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

>125	600	200
------	-----	-----

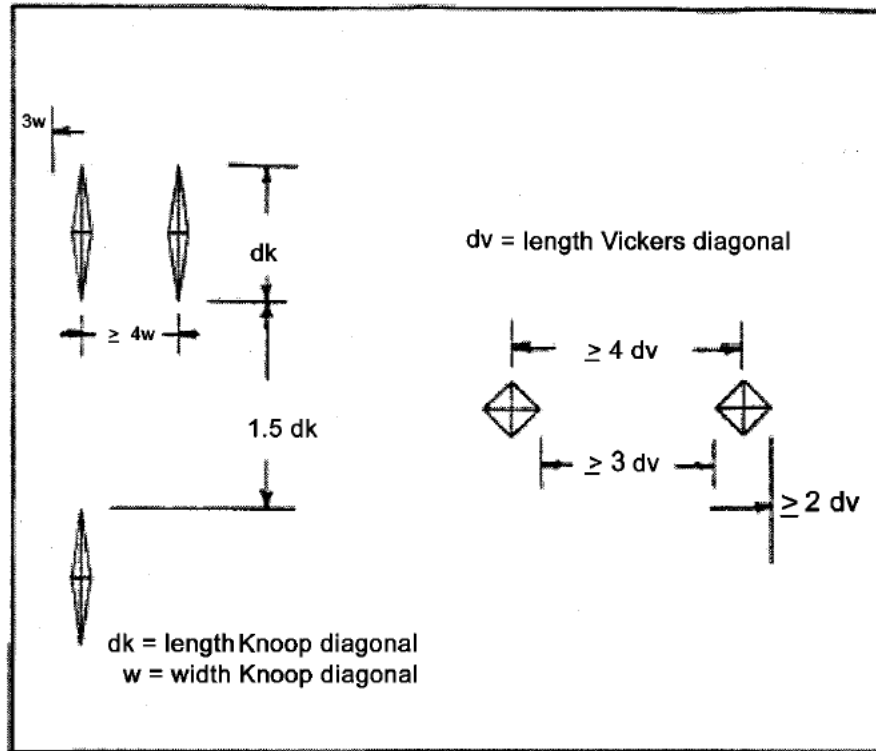


Figura 24: Espacio mínimo entre las hendiduras

Fuente: ASTM B-933-04

Utilizando las unidades de fuerza y longitud comúnmente empleadas, es decir, para la fuerza P en gf, y la media de las dos diagonales d en micrómetros, se calcula la dureza Vickers con la ecuación (4):

$$HV = 1854,4 \cdot P/d^2 \quad (4)$$

A continuación, se presentan en la figura 19 las imágenes entregadas por el equipo utilizado para llevar a cabo la medición:

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática



Figura 25: Imagen entregada por la máquina para su medición de las diagonales



## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## 4. RESULTADOS MUESTRAS

A continuación, se presentan los resultados de las caracterizaciones realizadas a las aleaciones de aluminio desarrolladas en su estado verde (previo a sinterizado) y una vez sinterizadas. Dentro de los resultados se encuentran los ensayos de compresibilidad para establecer carga óptima, mediciones físicas para determinar la variación de las aleaciones producto del sinterizado, y resultados de las muestras asociadas a caracterizaciones físicas (densidad), microestructural, y mecánicas.

### 4.1. COMPRESIBILIDAD

Para poder obtener la compresión óptima para una densidad máxima densificación de los polvos, se realiza una compresión a los polvos a distintas cargas. Se generaron compactaciones desde las 14 hasta las 18,5 toneladas. Los resultados obtenidos son los siguientes (ver tabla 7 y gráfico 4):

Tabla 10: Calculo de densidades de las muestras

Fuente: Elaboración propia

Aluminio Primario								
Código de la muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Presión ejercida (MPa)	Presión ejercida (Ton)	Volumen Muestras (cm3)	Masa (gr)	Densidad (gr/cm3)	Promedio
A10	1,296	0,717	215,385	14,000	0,947	2,530	2,673	2,673
A11	1,296	0,719	230,769	15,000	0,949	2,540	2,678	2,678
A12	1,296	0,718	246,154	16,000	0,947	2,540	2,681	
A13	1,296	0,729	246,154	16,000	0,961	2,580	2,685	
A14	1,296	0,718	246,154	16,000	0,947	2,540	2,682	2,680
A15	1,296	0,718	246,154	16,000	0,947	2,530	2,672	
A16	1,296	0,722	246,154	16,000	0,952	2,550	2,679	
A1	1,293	0,711	261,538	17,000	0,934	2,490	2,667	
A2	1,295	0,723	261,538	17,000	0,952	2,530	2,657	2,660
A3	1,294	0,727	261,538	17,000	0,957	2,540	2,655	
A4	1,296	0,719	269,231	17,500	0,948	2,540	2,680	
A5	1,296	0,715	269,231	17,500	0,943	2,520	2,674	2,677
A6	1,294	0,719	276,923	18,000	0,946	2,550	2,697	
A7	1,296	0,726	276,923	18,000	0,957	2,560	2,675	2,686
A8	1,296	0,718	284,615	18,500	0,947	2,540	2,682	

Capítulo 4. Análisis de resultados

<b>A9</b>	1,296	0,719	284,615	18,500	0,948	2,530	2,669	2,676
-----------	-------	-------	---------	--------	-------	-------	-------	-------

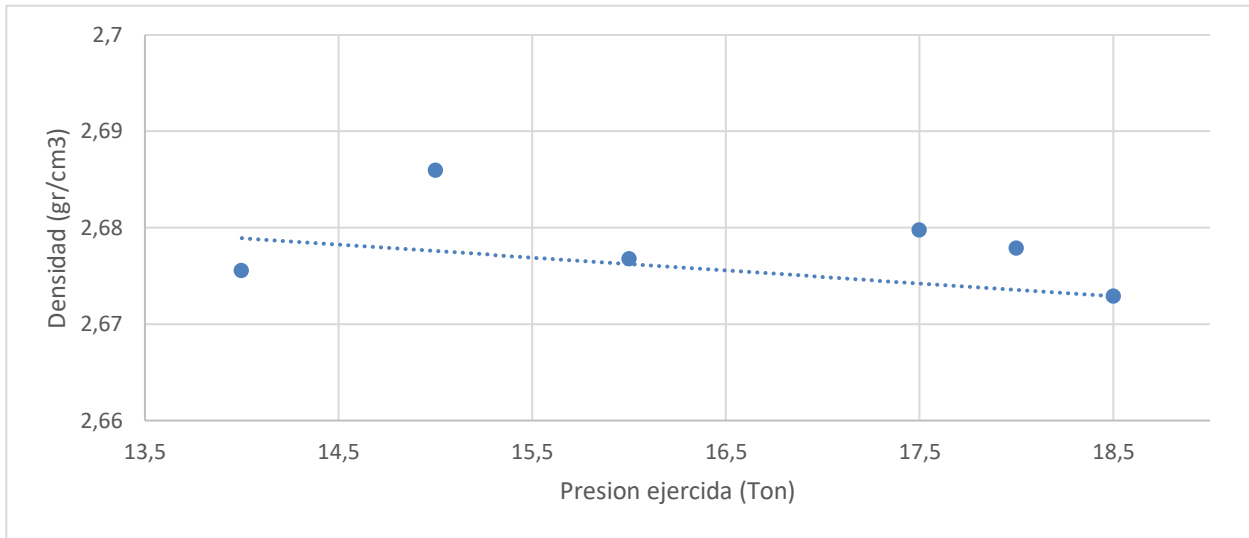


Gráfico 5: promedios de densidades y presiones ejercidas al polvo de aluminio primario

Al llevar a cabo el estudio que se muestra en el gráfico 5, se determinó de trabajar con el resto de las muestras a 16 toneladas de compresión, debido a que, en ese valor, la densidad solo varia 0,01 gr/cm<sup>3</sup> considerándolo como la compresión mínima para la máxima densidad con relación a la muestra.

Utilizando el mismo método aplicado para el aluminio primario se procedió a fabricar muestras de aluminio secundario generado por la empresa METALBRAS. Se fabricaron quince muestras comprimidas con la misma presión óptima obtenida para la aleación anterior cada una, entregando en el ensayo de compresibilidad, regido por la norma ASTM B – 331, los siguientes resultados:

Tabla 11: Calculo de densidades de aluminio secundario de METALBRAS

Aluminio Secundario METALBRAS								
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Presión ejercida (MPa)	Presión ejercida (Ton)	Volumen Muestras (cm <sup>3</sup> )	Masa (gr)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Promedio
<b>B1</b>	1,296	0,717	246,154	16,000	0,946	2,540	2,684	
<b>B2</b>	1,296	0,718	246,154	16,000	0,947	2,540	2,682	
<b>B3</b>	1,296	0,719	246,154	16,000	0,949	2,540	2,678	
<b>B4</b>	1,296	0,720	246,154	16,000	0,950	2,550	2,686	

#### Capítulo 4. Análisis de resultados

<b>B5</b>	1,296	0,717	246,154	16,000	0,946	2,530	2,676	
<b>B6</b>	1,296	0,713	246,154	16,000	0,941	2,540	2,699	
<b>B7</b>	1,296	0,718	246,154	16,000	0,947	2,540	2,684	
<b>B8</b>	1,296	0,717	246,154	16,000	0,946	2,540	2,686	
<b>B9</b>	1,296	0,713	246,154	16,000	0,941	2,540	2,699	
<b>B10</b>	1,296	0,715	246,154	16,000	0,943	2,520	2,674	
<b>B11</b>	1,296	0,716	246,154	16,000	0,944	2,540	2,691	
<b>B12</b>	1,296	0,716	246,154	16,000	0,944	2,540	2,690	
<b>B13</b>	1,296	0,714	246,154	16,000	0,942	2,530	2,686	
<b>B14</b>	1,296	0,711	246,154	16,000	0,938	2,530	2,696	
<b>B15</b>	1,296	0,710	246,154	16,000	0,937	2,540	2,711	2,688

## 4.2. RESULTADOS SINTERIZADO

En cuanto a los resultados en primera instancia al extraer de la cámara las muestras que fueron sometidas a al tratamiento de 600°C se obtuvo lo siguiente (ver figura 27)

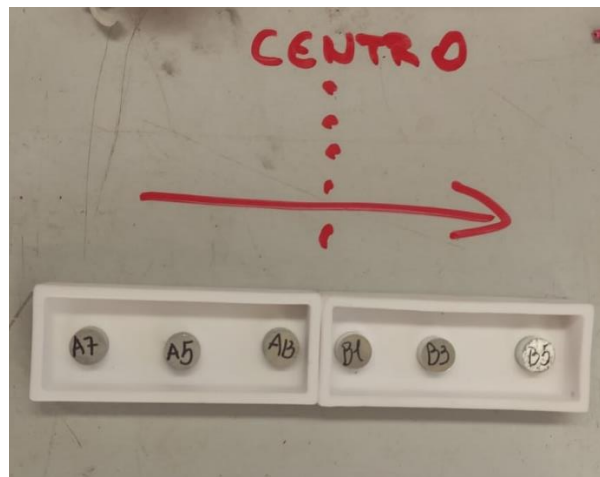


Figura 26: Posición de entrada al horno de las muestras



Figura 27: Resultado de las muestras sometidas al tratamiento de 600°C

#### Capítulo 4. Análisis de resultados

Estos resultados arrojaron que las muestras A7, A5 y A13, correspondiente a la aleación de aluminio primario AA2070, sufrieron una oxidación superficial durante el tratamiento, atribuyendo este resultado a los distintos componentes que conforman la aleación de Al-Li, comparado con los componentes que conforman las muestras B1, B3 y B5, correspondientes al aluminio secundario de Metalbras, estas últimas sin sufrir ningún tipo de oxidación.

Debido al resultado entregado en la situación anterior, se optó por conceptos de tiempo y baja disposición de técnicas de caracterización continuar la investigación con las muestras de aluminio secundario de Metalbras.

### 4.3. VARIACIÓN DIMENSIONAL POST SINTERIZADO

Se realizó una comparación entre los dimensionamientos pre y post del sinterizado, obteniendo un porcentaje de variación de las medidas obtenidas.

A continuación, se realizó una comparación entre las medidas del diámetro antes y después del sinterizado y las medidas de altura antes y después del sinterizado, entregando un porcentaje de deformación tanto en diámetro como en altura

#### 4.3.1. Diferencia de dimensionamiento a 550°C

Tabla 12: Comparación diámetro a 550°C

	DIAMETRO (cm)		
	VERDE	SINT	D%
B11	1,296	1,297	0,039
B12	1,296	1,296	0
B13	1,296	1,296	0
B14	1,296	1,296	0
B15	1,296	1,297	0,039
		PROM	0,015

Tabla 13: Comparación altura a 550°C

	ALTURA (cm)		
	VERDE	SINT	H%
B11	0,716	0,717	0,14
B12	0,716	0,714	-0,175
B13	0,714	0,713	-0,105
B14	0,711	0,713	0,316
B15	0,710	0,713	0,422
		PROM	0,12

## Capítulo 4. Análisis de resultados

### 4.1.1. Diferencia de dimensionamiento a 575°C

Tabla 14: Comparación diámetro a 575°C

	DIAMETRO (cm)		
	VERDE	SINT	D%
B6	1,296	1,296	-0,039
B7	1,296	1,296	0
B8	1,296	1,296	-0,019
B9	1,296	1,296	0
B10	1,296	1,296	-0,019
	<b>PROM</b>		-0,015

Tabla 15: Comparación altura a 575°C

	ALTURA (cm)		
	VERDE	SINT	H%
B6	0,713	0,71	-0,456
B7	0,717	0,714	-0,488
B8	0,717	0,714	-0,314
B9	0,713	0,713	-0,035
B10	0,715	0,713	-0,175
	<b>PROM</b>		-0,294

### 4.1.2. Diferencia de dimensionamiento a 600°C

Tabla 16: Comparación diámetro a 600°C

	DIAMETRO (cm)		
	VERDE	SINT	D%
B1	1,296	1,296	0
B3	1,297	1,297	0,0385
B5	1,296	1,3	0,33
	<b>PROM</b>		0,122

Tabla 17: Comparación altura a 600°C

	ALTURA (cm)		
	VERDE	SINT	H%
B1	0,717	0,712	-0,767
B3	0,719	0,715	-0,487
B5	0,716	0,712	-0,593
	<b>PROM</b>		-0,616

Se puede observar en cuanto a los resultados obtenidos una mayor diferencia en la altura de la muestra que en el diámetro de estas, viéndose en mayor medida en las muestras sometidas al proceso de sinterizado de 600°C. esto se puede atribuir a que al haber estado sometidas a mayor temperatura, se produjo una mayor dilatación del material, aumentando las dimensiones de las muestras.

## 4.2. MEDICIÓN DE DENSIDAD

En cuanto al cálculo de la densidad según el principio de Arquímedes, se consideró una temperatura del agua destilada de 22 °C, asignada por la letra T°, lo que arroja según la tabla entregado por la norma ASTM B - 311, una densidad de 0,9978 g/cm<sup>3</sup>, asignado con la letra E. Considerando las condiciones entregadas anteriormente, la densidad de cada una de las muestras estudiadas esta entregada por la letra D (ver anexo 2).

## Capítulo 4. Análisis de resultados

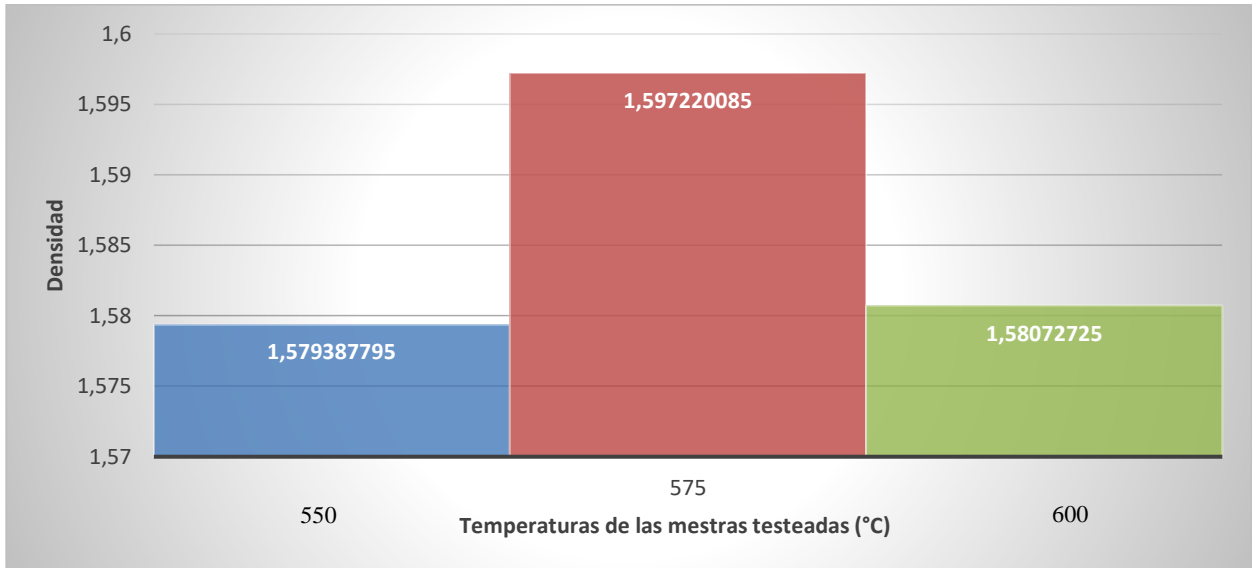


Gráfico 6: Resultados densidad método de Arquímedes

### 4.3. MICRODUREZA

Para el ensayo de microdureza, se realizaron cuatro indentaciones por cada una de las muestras sometidas a tratamiento térmico. Luego de haber obtenido las cuatro mediciones, se procede a calcular un promedio de estas cuatro mediciones, obteniendo un resultado más generalizado de la dureza de cada una de las muestras, lo que nos permite obtener un promedio de general de la dureza considerando la temperatura a la que fueron sometidas.

#### 600°C

B1	
N°	DH
1	39
2	37
3	40,6
4	40
<b>Promedio</b>	39,15

B3	
N°	DH
1	36,7
2	39,7
3	37,9
4	38,3
<b>Promedio</b>	38,15

<b>Promedio 600°C</b>	38,65
-----------------------	-------

Capítulo 4. Análisis de resultados  
575°C

B6	
N°	DH
1	40
2	41,8
3	40,3
4	39,3
<b>Promedio</b>	40,35

B7	
N°	DH
1	40,8
2	41,5
3	42,1
4	40,5
<b>Promedio</b>	41,225

B8	
N°	DH
1	41,2
2	39,3
3	41,5
4	41,4
<b>Promedio</b>	40,85

B9	
N°	DH
1	42
2	37,8
3	41,5
4	42,5
<b>Promedio</b>	40,95

<b>Promedio 575°C</b>	40,84375
-----------------------	----------

550°C

B11	
N°	DH
1	37,2
2	40,3
3	41,2
4	37,1
<b>Promedio</b>	38,95

B12	
N°	DH
1	39,7
2	41,5
3	43,1
4	43,3
<b>Promedio</b>	41,9

B13	
N°	DH
1	43,1
2	42,1
3	42,6
4	41,5
<b>Promedio</b>	42,325

B14	
N°	DH
1	38,6
2	42,1
3	42
4	41,5
<b>Promedio</b>	41,05

<b>Promedio 550°C</b>	41,05625
-----------------------	----------



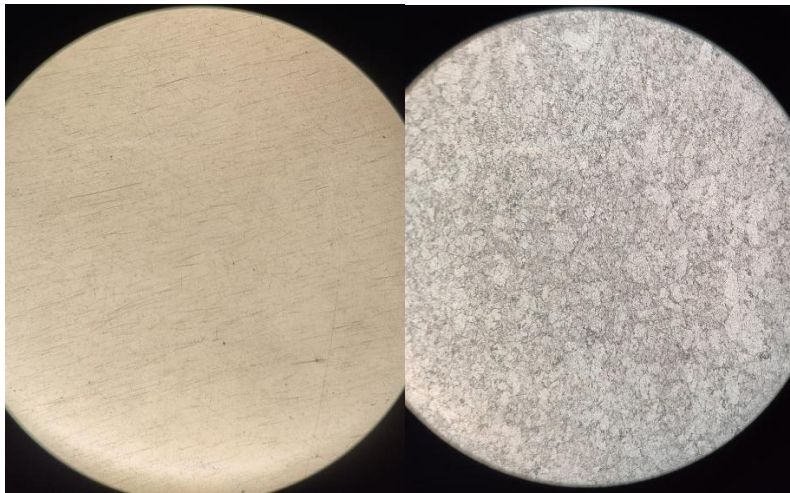
#### 4.4. ANALISIS METALOGRAFICO

Para la caracterización óptica se cortaron por la mitad una muestra de sinterizada de cada una de las diferentes temperaturas (550, 575 y 600 °C) las cuales se colocaron en un molde con resina epóxica para luego poder pulirlas con mayor facilidad.

Una vez pulidas las muestras se utilizó el microscopio óptico para observar a 100x y 200x de aumento con las muestras sin ataque químico y con ataque químico, obteniendo los siguientes resultados:

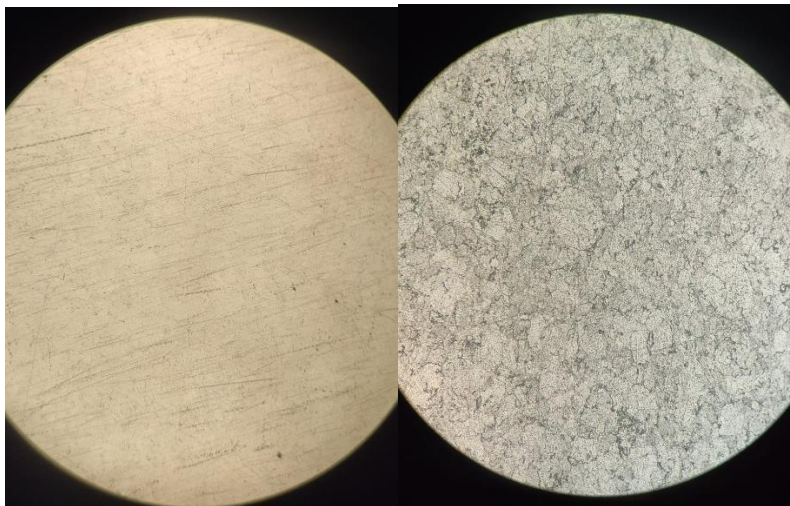
- **Sinterización a 550°C**

100x



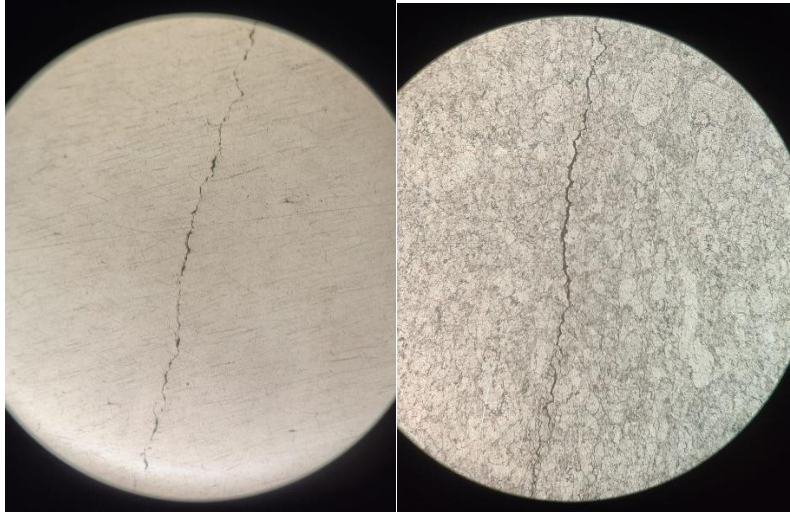
*Figura 28: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x100*

200x



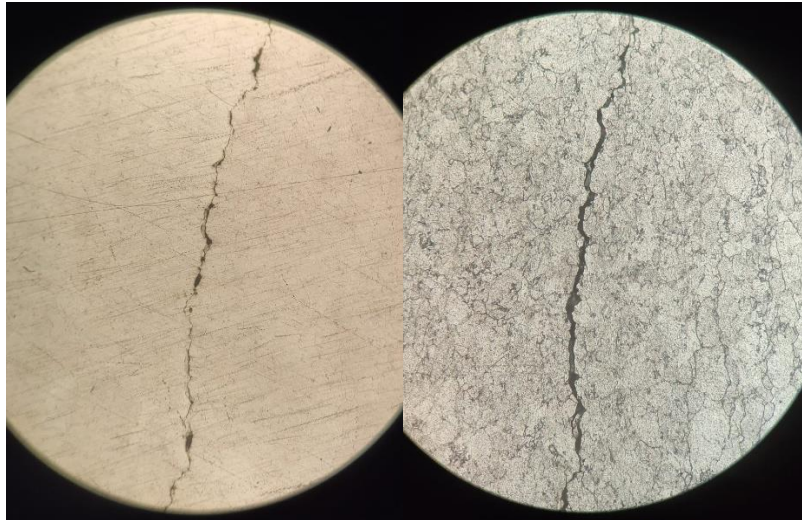
*Figura 29: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x200*

Capítulo 4. Análisis de resultados  
Grieta 100X



*Figura 30: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x100 en grieta*

Grieta 200x

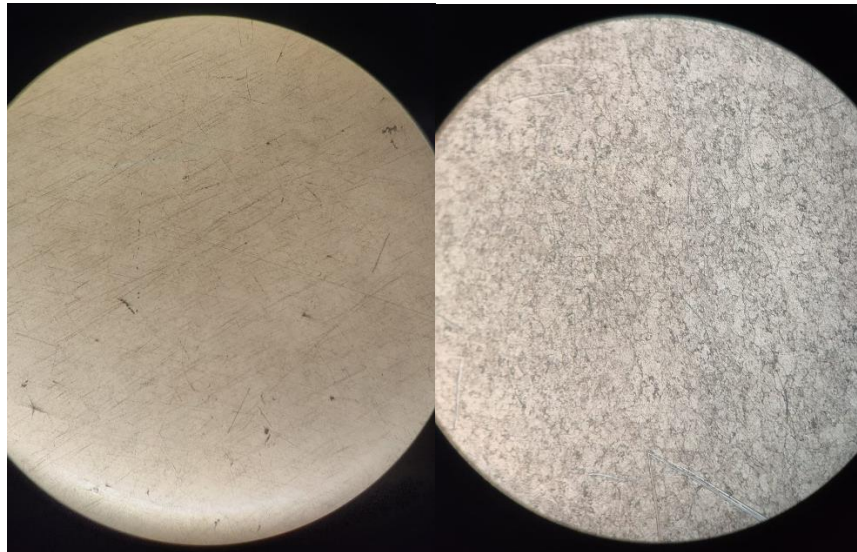


*Figura 31: Muestra sometida a sinterizado a 550°C con aumento x200 en grieta*

## Capitulo 4. Análisis de resultados

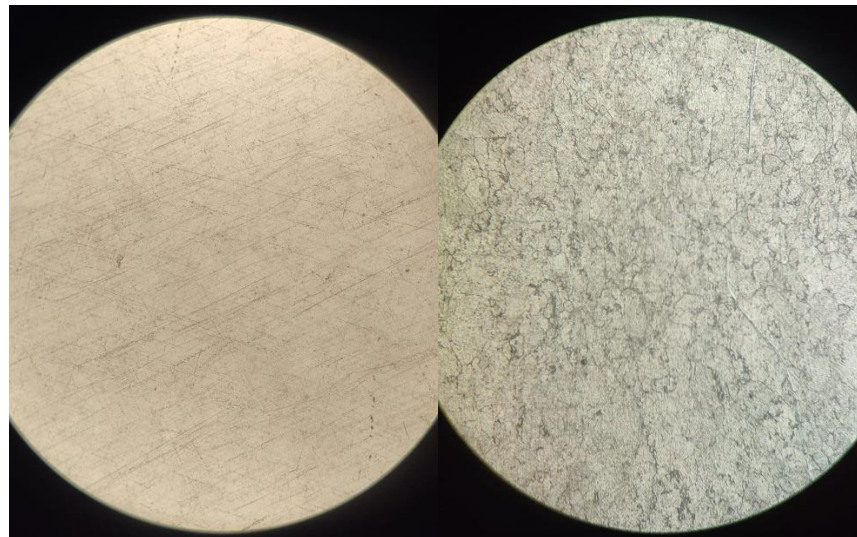
- **Sinterización a 575°C**

100x



*Figura 32: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x100*

200x

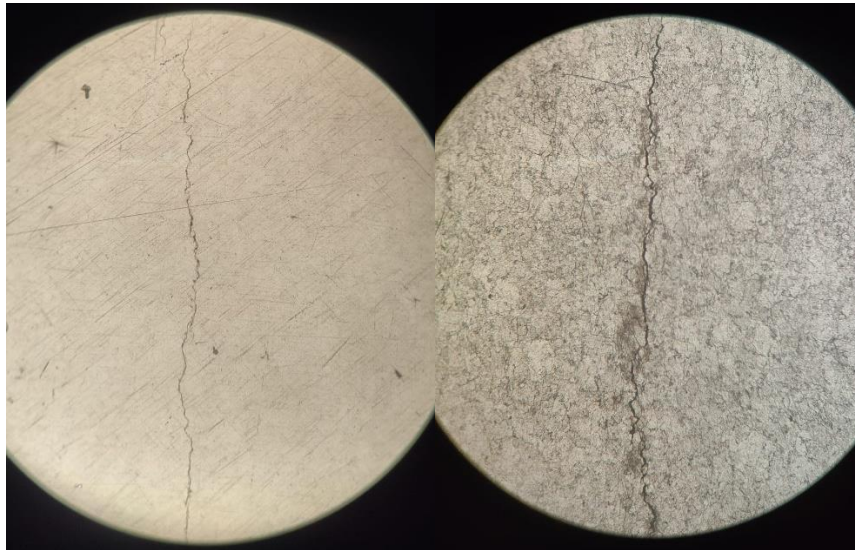


*Figura 33: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x200*



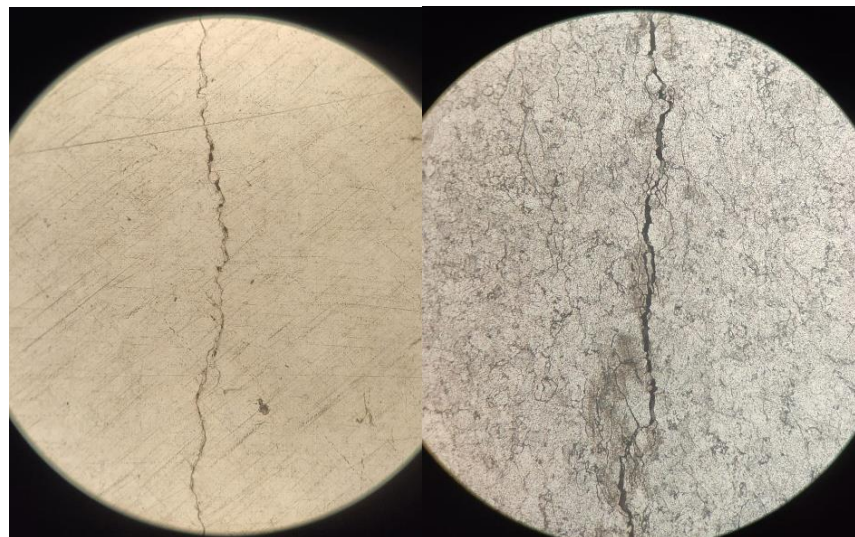
## Capítulo 4. Análisis de resultados

### Grieta 100X



*Figura 34: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x100 en grieta*

### Grieta 200x

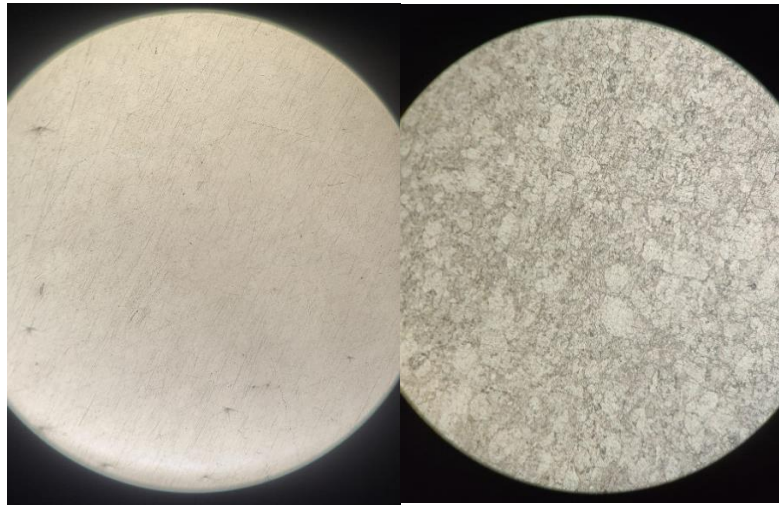


*Figura 35: Muestra sometida a sinterizado a 575°C con aumento x200 en grieta*

Capítulo 4. Análisis de resultados

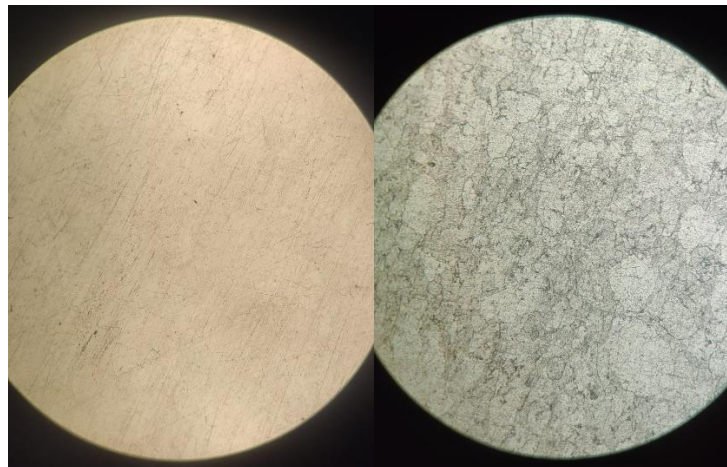
- **Sinterización a 600°C**

100x



*Figura 36: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x100*

200x



*Figura 37: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x200*

## Capítulo 4. Análisis de resultados

### Grieta 100X

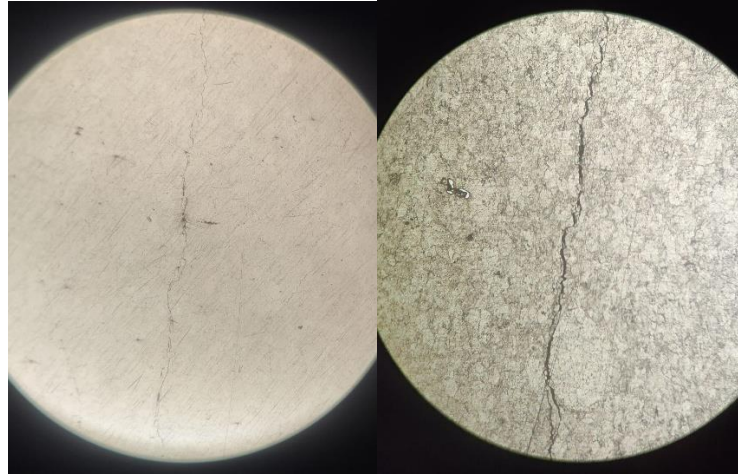


Figura 38: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x100 en grieta

### Grieta 200x

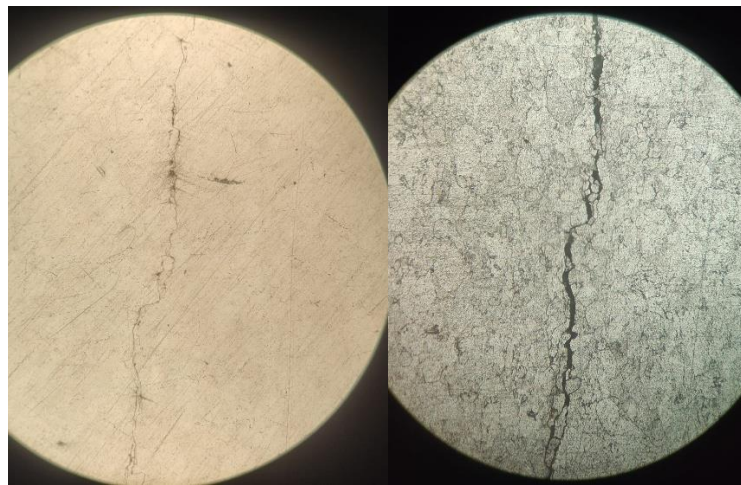


Figura 39: Muestra sometida a sinterizado a 600°C con aumento x200 en grieta

En las imágenes captadas se puede observar a la izquierda la muestra sin el ataque químico y al lado derecho la misma muestra con el ataque químico. En este caso se utilizó de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) observando en primera instancia una mayor definición en la estructura de la muestra y más adelante en las grietas generadas en cada una de ellas.

Por otro lado, evaluando visualmente las 3 muestras sometidas a las distintas temperaturas, se puede observar una estructura mucho más uniforme y definida en la muestra sometida a 600 °C con respecto a las muestras que en las otras temperaturas. Las muestras sinterizadas a las diferentes temperaturas presentan una estructura granular típica a las que se generan en muestras de aluminio producidas por pulvimetalurgia. La microestructura presenta una matriz de aluminio  $\alpha$ , y

#### Capitulo 4. Análisis de resultados

otra fase prominente tintada de color oscuro y que crece en el límite de grano. Esta fase es la fase eutéctica  $AlxSi_y$ , la cual predomina en este tipo de aleaciones con alto contenido de silicio. Esta fase compuesta de silicio entrega al material mayor resistencia mecánica, pero a su vez mayor fragilidad.

Respecto a las grietas que poseen las muestras a las distintas temperaturas, éstas pueden originarse por diversos motivos, sin embargo, el motivo que predomina en este tipo de procesos es la contaminación de las muestras con el ambiente al momento del sinterizado. Debido a la falta de control en la cámara de la atmósfera, átomos de menor tamaño como el hidrógeno se incorporan al aluminio en el proceso (el cual es muy reactivo), y al momento de disminuir la temperatura quedan atrapados en el material, generando tensiones las que se traducen en el agrietamiento de la pieza.

## **CONCLUSIONES**

Para cumplir satisfactoriamente este objetivo, se diseñó y fabricó una cámara para la sinterización de polvos metálicos mediante atmósfera controlada. Una vez fabricada la cámara de sinterizado, se realizaron las mezclas respectivas para obtener las muestras requeridas, las cuales ya mezcladas se proceden a compactar. Posteriormente se sinterizan a las distintas temperaturas las muestras compactadas en la cámara en un principio para verificar la temperatura óptima de sinterizado.

Finalmente haciendo un análisis de los resultados obtenidos mediante la caracterización, física (dimensiones y densidad de muestras), microestructural (Microscopía) y mecánica (ensayo de dureza) de las muestras de aleaciones secundarias sinterizadas en la cámara de sinterizado, se pudo obtener un resultado satisfactorio por parte del aluminio primario (mezclado y fabricado en el laboratorio) y el secundario elaborado por Metalbras. Sin embargo, las muestras de aluminio secundarios fabricados en el laboratorio, no presentaron buen resultado en el sinterizado, debido a que al ser retiradas de la cámara de sinterizado, estas salieron con una superficie negra, asumiendo que sufrieron algún tipo de oxidación por lo que se optó por analizar más en profundidad las muestras fabricadas de los polvos fabricados por Metalbras.

El resultado de estas pruebas da pie para continuar el proceso de sinterización mediante atmósfera protectora en la Universidad de Talca, lo que permitirá que las investigaciones que continúen esta podrán enfocarse en el máximo aprovechamiento del aluminio secundario por esta ruta y lo que permitirá encaminar hacia la aplicación en procesos de manufactura aditiva, debido a su alta reciclabilidad, pero enfocándose en el ahorro energético



## **CAPÍTULO 5. REFERENCIAS**

## Referencias

- Alcotec. (21 de octubre de 2012). *alcotec.com*. Obtenido de *alcotec.com* :  
<http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/techknowledge/understanding-the-alloys-of-aluminum.cfm>
- Alu-stock. (Octubre de 2017). *El Aluminio*. Obtenido de *www.alu-stock.es*: *chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.alu-stock.es/multimedia/descargas/13/Cap10-el-aluminio.pdf*
- Ángel Silvio Machado Rodríguez\*, E. K. (2017). *SINTERIZACIÓN, UN PROCESO DE CONFORMACIÓN DE METALES COMO ALTERNATIVA ECONÓMICA CON UN BAJO IMPACTO AMBIENTAL*. Feijoo.
- ARPAL. (Noviembre de 2013). *www.aluminio.org* . Obtenido de *www.aluminio.org* :  
*www.aluminio.org*
- ASTM International. (2000). *B 595 – 95 Standard Specification for Sintered Aluminum Structural Parts*. United States.
- ASTM International . (1999). *E 384-99 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. E.E.U.U.
- ASTM International . (2001). *E 3 - 01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. E.E.U.U.
- ASTM International. (2002). *B 312 – 96 Standard Test Method for Green Strength for Compacted Metal Powder Specimens*. United states.
- ASTM International. (s.f.). *B 243 – 04a Standard Terminology of Powder Metallurgy*. United States.
- Benson, J. (2012). Safety considerations when handling. *capacio occasio*, 13.
- Blanco, E. A. (2014). BLOQUE II – CAPÍTULO 8. MOLIENDA. En E. A. Blanco, *MOLIENDA* (pág. 55). Cantabria: Open course ware .
- Erasmus + programa de la union europea. (2018). *Introduccion a la impresion 3D*.
- Mettrar. (23 de Septiembre de 2019). *mettrar.com*. Obtenido de *mettrar.com*:  
[https://mettrar.com.ar/blog/las-aleaciones-del-aluminio/#La\\_serie\\_4xxx](https://mettrar.com.ar/blog/las-aleaciones-del-aluminio/#La_serie_4xxx)
- PATRICIA IDALIA CHÉVEZ APARICIO, G. A. (2012). *PROPUESTA DE ALTERNATIVAS*

Referencias

*DE GESTIÓN DE LA ESCORIA SALINA DE LA INDUSTRIA DE ALUMINIO EN EL SALVADOR*. El Salvador: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

Sanchez, A. M. (2011). *DESARROLLO DE ACEROS SINTERIZADOS CON NANOFIBRAS DE CARBONO*. Madrid.

**ANEXO 1: Dimensionamiento de las muestras****Aleación AA2070 primaria**

Tabla 18: Dimensionamiento de las muestras

Fuente: Elaboración propia

<b>A1</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,49				<b>Promedio</b>
17	<b>Diámetro (mm)</b>	12,92	12,93	12,93	12,93	12,9275
	<b>Altura(mm)</b>	7,1	7,08	7,12	7,15	7,1125
<b>A2</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,53				<b>Promedio</b>
17	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,95	12,94	12,94	12,9475
	<b>Altura (mm)</b>	7,21	7,24	7,25	7,23	7,2325
<b>A3</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,54				<b>Promedio</b>
17	<b>Diámetro (mm)</b>	12,94	12,95	12,94	12,94	12,9425
	<b>Altura (mm)</b>	7,29	7,27	7,28	7,25	7,2725
<b>A4</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,54				<b>Promedio</b>
17,5	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>Altura (mm)</b>	7,19	7,2	7,18	7,17	7,185
<b>A5</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,52				<b>Promedio</b>
17,5	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,95	12,96	12,96	12,9575
	<b>Altura (mm)</b>	7,14	7,15	7,15	7,15	7,1475
<b>A6</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,55				<b>Promedio</b>
18	<b>Diámetro (mm)</b>	12,94	12,93	12,94	12,94	12,9375
	<b>Altura (mm)</b>	7,18	7,2	7,19	7,2	7,1925
<b>A7</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,56				<b>Promedio</b>
18	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,95	12,9575
	<b>Altura (mm)</b>	7,25	7,25	7,26	7,27	7,2575
<b>A8</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,54				<b>Promedio</b>
18,5	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,95	12,9575
	<b>Altura (mm)</b>	7,16	7,19	7,18	7,2	7,1825
<b>A9</b>						

Anexos

<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,53				<b>Promedio</b>
18,5	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>Altura (mm)</b>	7,18	7,2	7,19	7,17	7,185
<b>A10</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,53				<b>Promedio</b>
14	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,97	12,96	12,9625
	<b>Altura (mm)</b>	7,17	7,18	7,17	7,17	7,1725
<b>A11</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,54				<b>Promedio</b>
15	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,97	12,96	12,9625
	<b>Altura (mm)</b>	7,19	7,19	7,18	7,19	7,1875
<b>A12</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,54				<b>Promedio</b>
16	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>Altura (mm)</b>	7,19	7,18	7,19	7,17	7,1825
<b>A13</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,58				<b>Promedio</b>
16	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,95	12,9575
	<b>Altura (mm)</b>	7,29	7,28	7,31	7,27	7,2875
<b>A14</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,54				<b>Promedio</b>
16	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,95	12,9575
	<b>Altura (mm)</b>	7,18	7,18	7,2	7,17	7,1825
<b>A15</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,53				<b>Promedio</b>
16	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,95	12,9575
	<b>Altura (mm)</b>	7,18	7,17	7,19	7,18	7,18
<b>A16</b>						
<b>Carga (Ton)</b>	<b>Peso (g)</b>	2,55				<b>Promedio</b>
16	<b>Diámetro (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>Altura (mm)</b>	7,21	7,2	7,23	7,22	7,215

**Aleación de aluminio secundario Metalbras**

Tabla 19: Dimensionamiento muestras aluminio secundario Metalbras

<b>B1</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,96	12,97	12,96	12,9625
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,16	7,19	7,16	7,17	7,17
<b>B2</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>

## Anexos

16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,97	12,96	12,96	12,96	12,9625
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,16	7,19	7,17	7,19	7,1775
<b>B3</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,97	12,97	12,96	12,96	12,965
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,2	7,19	7,17	7,19	7,1875
<b>B4</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,55				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,97	12,96	12,96	12,96	12,9625
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,19	7,18	7,2	7,21	7,195
<b>B5</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,53				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,17	7,19	7,15	7,16	7,1675
<b>B6</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,97	12,96	12,96	12,96	12,9625
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,16	7,15	7,12	7,1	7,1325
<b>B7</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,16	7,14	7,18	7,22	7,175
<b>B8</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,97	12,96	12,96	12,9625
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,15	7,13	7,18	7,2	7,165
<b>B9</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,97	12,96	12,96	12,9625
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,15	7,14	7,11	7,12	7,13
<b>B10</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,52				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,14	7,17	7,12	7,15	7,145
<b>B11</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,95	12,97	12,96	12,96
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,13	7,17	7,15	7,17	7,155
<b>B12</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,95	12,97	12,97	12,9625

## Anexos

	<b>ALTURA (mm)</b>	7,13	7,16	7,15	7,18	7,155
<b>B13</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,53				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,12	7,15	7,15	7,14	7,14
<b>B14</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,53				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,1	7,11	7,09	7,15	7,1125
<b>B15</b>						
<b>CARGA(TON)</b>	<b>PESO (g)</b>	2,54				<b>PORM</b>
16	<b>DIAMETRO (mm)</b>	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
	<b>ALTURA (mm)</b>	7,12	7,06	7,08	7,15	7,1025

**ANEXO 2: DENSIDAD DE ARQUIMIDES**

**600°C**

<b>B1</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,57249561

<b>B2</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,58895889

**575°C**

<b>B6</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,60513448

<b>B7</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,6327578

<b>B8</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,57423071

<b>B9</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,57675735

**550°C**

<b>B11</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,60138472

<b>B12</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,56842151

<b>B13</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,5599634

<b>B14</b>	
<b>T°</b>	22
<b>E</b>	0,9978
<b>D</b>	1,58778155