

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES



Profesores Patrocinantes:
Dra. Claudia Carrasco C.
Dr. Carlos Camurri P.



Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil de Materiales

**Diseño e implementación de un método para la
fabricación de tubos de un Al-MMC obtenidos
mediante thixoforming y extrusión en caliente**

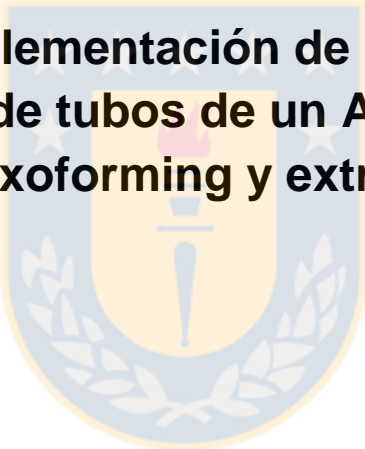
Concepción, Enero de 2019

Roberto Adrián Navalón Pino



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería de Materiales

Profesores Patrocinantes:
Dra. Claudia Carrasco C.
Dr. Carlos Camurri P.



**Diseño e implementación de un método para la
fabricación de tubos de un Al-MMC obtenidos
mediante thixoforming y extrusión en caliente**

Roberto Navalón Pino

Informe de Memoria de Título

Para optar al título de **Ingeniero Civil de Materiales**

Enero 2019

Agradecimientos

Primeramente a Dios,

... por fortalecerme en cada momento que enfrenté en mis años de estudiante.

A mis padres,

...por alentarme en todo momento, incluso cuando las cosas se complicaron sentí su apoyo. Por el esfuerzo que hicieron ambos para sacarme adelante y darme todas las herramientas para desarrollarme como una persona de bien.

A mis profesores,

...que me formaron como ingeniero, dándome las herramientas necesarias para fortalecer el conocimiento adquirido.

A mis compañeros Ivan, Javier, Pamela y Mytzy,

...con quienes pasamos gran parte de nuestros años de universidad. Con ustedes se logró hacer más ameno cada momento de estudio, incluso cuando los resultados al final de cada certamen no eran muy buenos.

Al equipo TFEP

...por hacer más agradable cada día mientras estuve en el desarrollo de mi tesis, incluso ayudando a terminar el día con risas cuando no se obtenían los resultados esperados, además de ayudarme en la redacción de esta memoria.

A Macarena

...por estar conmigo siempre, y por ser parte de esta etapa tan importante, haciéndome ver que era capaz de lograrlo, y que era el mejor.

Sumario

La presente memoria de título se desarrolla en el marco del proyecto Fondef ID16I10353, la cual tiene como objetivo principal fabricar tubos de un material compuesto base aluminio (Al-MMC), mediante un proceso de thixoforming y extrusión directa en caliente para la obtención de tubos con buenas propiedades mecánicas que permitan su uso estructural, utilizando como materia prima latas de bebidas. El desarrollo que se expone en los capítulos siguientes se enfocó en el diseño e implementación de un método para la fabricación de tubos de un Al-MMC obtenidos mediante thixoforming y extrusión en caliente, con el fin de obtener un material que alcance propiedades mecánicas iguales o superiores a una aleación de aluminio estructural.

Para la fabricación de este Al-MMC se utilizó como materia prima latas de bebidas, las cuales pasaron por un proceso de fundición no convencional (rheocasting modificado). Luego, mediante el procedimiento expresado en los capítulos siguientes se procedió a llevar el material a una prensa hidráulica, en la cual se fabricaron tubos por extrusión inversa y posteriormente por extrusión directa. Finalmente, los tubos se sometieron a un tratamiento térmico de enfriado desde un proceso de conformado a alta temperatura y posterior envejecido artificial (tipo T5), realizando luego a los tubos caracterización mecánica y microestructural.

La caracterización microestructural del material se basó en el estudio de la morfología y composición de los intermetálicos de hierro, precipitación de nuevas fases por efecto del tratamiento térmico, distribución de los intermetálicos dependiendo del tipo de conformado que se aplica y como estas variables afectan las propiedades mecánicas finales. Se compararon, además, los resultados obtenidos por extrusión directa con respecto a la extrusión inversa.

Además, las propiedades mecánicas obtenidas para la aleación desarrollada se comparan con las correspondientes al aluminio estructural A6063.

Finalmente, el método utilizado, logró la fractura de los intermetálicos de hierro, lo cual confirmó lo obtenido en investigaciones anteriores, relacionando esta variable con las propiedades mecánicas de los tubos.

Por lo tanto, podemos decir que los resultados obtenidos permanecieron dentro del rango de una aleación A6063 (T4-T6), concluyendo así, que el material cumple con las condiciones para ser usado como un aluminio estructural, y competir con lo que ofrece el mercado.

Para el proceso de extrusión directa, se diseñó y fabricó un sistema de matrices que permitiera el desarrollo del proceso de conformado a escala de laboratorio, proyectando su implementación a nivel industrial.



Índice general

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis	4
1.2 Objetivos	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	5
2.1 Reciclaje de aluminio	5
2.2 Fabricación de un Al-MMC a partir de chatarra de aluminio	8
2.3 Fabricación de tubos por extrusión inversa en caliente	12
2.4 Thixoforming	16
2.5 Extrusión directa	18
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	21
3.1 Preparación de materia prima	21
3.2 Alineación de la prensa	21
3.3 Obtención del tocho	22
3.4 Thixoforming con extrusión inversa	24
3.5 Thixoforming con extrusión directa	25
3.6 Tratamiento térmico	27
3.7 Caracterización mecánica y microestructural	27
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES	30
4.1 Tubos obtenidos por extrusión inversa	30
4.1.1 Análisis metalográfico	30
4.1.2 Ensayo de tracción	35
4.2 Tubos obtenidos por extrusión directa	36
4.2.1 Análisis metalográfico	38
4.2.2 Análisis SEM	43
4.2.3 Ensayo de tracción	47
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	50
Anexo n°1: Hoja de control utilizada en el proceso	53
Anexo n°2: Gráficos ensayo de tracción de tubos por extrusión inversa	54
Anexo n°3: Gráficos ensayo de tracción de tubos por extrusión directa	55

Índice de figuras

Figura 2.1. Imagen SEM de partícula fracturada debido al proceso de conformado y redondeada por efecto del tratamiento térmico.....	10
Figura 2.2. Esquema del método usado para extrusión inversa de tubos.....	13
Figura 2.3. Imagen SEM de partícula fracturada y redondeada. Muestra de tubo con tratamiento térmico a 150°C por 5 horas.....	14
Figura 2.4. Metalografía de fases presentes en Al-MMC sin tratamiento térmico, 1000x	15
Figura 2.5. Evolución microestructural de dendrita a roseta debido a la agitación del baño fundido	17
Figura 2.6. Esquema 3D de matriz para extrusión de tubos.....	19
Figura 2.7. Metalografía de zona de soldadura de un tubo obtenido por extrusión directa.....	20
Figura 3.1. a) Perfil frontal de prensa hidráulica, con sistema de extrusión inversa, b) Perfil frontal de prensa hidráulica, con sistema de extrusión directa.....	22
Figura 3.2. Horno de fusión y agitador para proceso de rheocasting.....	23
Figura 3.3. Tocho obtenido por rheocasting para extrusión inversa.....	24
Figura 3.4. Tocho obtenido por rheocasting para extrusión directa.....	24
Figura 3.5. a) Matriz, cara frontal, b) Matriz, cara posterior, c) Punzón, d) Contenedor y e) Porta-matriz montado sobre placa anclada a la prensa.....	26
Figura 3.6. Probetas de tracción con sus dimensiones	29
Figura 4.1. Metalografías sin ataque químico de tubos obtenidos por extrusión inversa, sin tratamiento térmico	31
Figura 4.2. Metalografías con ataque químico de tubos obtenidos por extrusión inversa, sin tratamiento térmico	32
Figura 4.3. Metalografías con ataque químico de tubos obtenidos por extrusión inversa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas.....	34

Figura 4.4. Metalografía de Tubo a 200x, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas y ataque químico 200x	35
Figura 4.5. Resultado de extrusión a: a) 580°C, b) 600°C y c) 630°C.....	37
Figura 4.6. a) Tubos de 200 mm de largo y b) tubo concéntrico con diámetro interno 21 mm y externo 29 mm producidos por extrusión directa	38
Figura 4.7. Metalografía sin ataque químico de tubos obtenidos por extrusión directa con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas. 200x.....	39
Figura 4.8. Metalografías con ataque químico de tubos obtenidos por extrusión directa con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas	40
Figura 4.9. Metalografía de tubo obtenido por extrusión directa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas, sin ataque químico. 500x	41
Figura 4.10. Metalografía de tubo obtenido por extrusión directa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas, con ataque químico, 500x	42
Figura 4.11. Metalografía de zona de soldadura de tubo obtenido por extrusión directa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas, con ataque químico, 50x	42
Figura 4.12. Metalografía de tubo obtenido por extrusión directa, con ataque químico y tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas. 100x.	43
Figura 4.13. Imagen SEM de la zona de soldadura.....	44
Figura 4.14. Intermetálicos y poros en zona de soldadura.....	44
Figura 4.15. Análisis EDS en zona de soldadura, con composición química cualitativa en % en peso	45
Figura 4.16. Distribución de elementos.....	46

Índice de tablas

Tabla 2.1. Composición química de las latas de aluminio.....	9
Tabla 2.2. Fases relacionadas con los puntos señalados en la figura 2.1	11
Tabla 2.3. Propiedades mecánicas del AA6063 (T4-T6) y Al-MMC T8.....	11
Tabla 2.4. Resultados ensayo de tracción de tubos obtenidos por extrusión inversa.....	15
Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de probetas de tracción de tubos obtenidos por extrusión inversa	35
Tabla 4.2. Propiedades mecánicas de probetas de tracción de tubos obtenidos por extrusión directa con tratamiento térmico.....	47



Nomenclatura

ANIR :	Asociación Nacional de la Industria del Reciclaje
EDS :	<i>Energy-dispersive spectroscopy</i> (espectroscopia de dispersión de energía)
°C :	Grados Celsius
gr	Gramos
K :	Kelvin
kg :	Kilógramos
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
Al-MMC :	Material compuesto matriz de aluminio
MPa :	Mega Pascales
MJ	Mega Joule
m :	Metros
µm :	Micrones
mm :	Milímetros
min	Minutos
nm :	Nanómetros
OCDE	Organización para la cooperación y el desarrollo económicos
REP	Ley de responsabilidad extendida del productor
rpm :	Revoluciones por minuto
SEM :	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (Microscopia electrónica de barrido)
Ton	Toneladas
W :	Watts

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El aluminio es uno de los materiales más reciclados y más reciclables debido a que no pierde sus propiedades al ser refundido y es un material que permite generar un producto de mayor valor. Es por esto que un tercio del aluminio producido en el mundo, viene de reciclaje.

Como resultado del desarrollo alcanzado por Chile en los últimos años, se ha visto un incremento demográfico significativo, lo que ha provocado un crecimiento importante en cuanto a consumo energético, emisión de gases contaminantes y generación de residuos que han ido saturando los vertederos y rellenos sanitarios. Con respecto a esto último, el país se ha visto en la obligación de implementar a nivel de municipios planes de control de residuos más estrictos, potenciando e inculcando en la sociedad el concepto de reciclaje.

En Chile, cerca del 95% de los residuos generados son depositados en rellenos sanitarios, lo que empeora cada vez más las problemáticas medioambientales. Motivados por la creciente preocupación respecto a problemáticas ambientales, tales como el aumento de residuos, el calentamiento global, y la escases de agua, es que el año 2010 el gobierno decidió crear el Ministerio del Medio Ambiente. Dentro de las tareas principales de este ministerio se encuentran la implementación de nuevas formas de manipular residuos y rellenos sanitarios, pues uno de los principales problemas ha sido la creación de vertederos ilegales. De esta manera, iniciativas como Santiago Recicla han surgido con el fin de minimizar la basura en vertederos y como opción al reciclaje. Sin embargo, si se compara cuanto recicla Chile con respecto a países desarrollados de la Unión Europea como Alemania que está cerca de 65%, este solo recicla el 1% de sus residuos. Basado en un estudio que sitúa las 34 economías más importantes del planeta, el país más cercano a Chile viene a ser México que recicla 5 veces más.

Con el objetivo de disminuir la extracción de recursos naturales y desaturar los vertederos, es que el año 2016 se promulgó la Ley REP (bajo el alero del Ministerio del Medio Ambiente). Esta ley busca reforzar y generar mecanismos formales de manejo de desechos similares a los existentes en Europa. Además, su implementación conlleva un beneficio directo a la calidad de vida de las personas y al medio ambiente. Con el objetivo de contribuir al cuidado del medio ambiente es que esta tesis se enfocará en el reciclaje de aluminio

Al reciclar aluminio no solo se está reduciendo la cantidad de basura en los vertederos, sino además se produce una disminución en los costos por traslado de basura dando un valor importante al trabajo realizado por los recolectores base, además de valorizar los residuos. Aquí radica la importancia de recuperar este material y evitar que termine en los rellenos sanitarios, los cuales están cada día más colapsados. Hay que tener en consideración que el uso de latas en nuestro país va mucho más allá de lo que se está recolectando, por lo que aún hay toneladas de estas que terminan en los vertederos.

Pensando en motivar el reciclaje, es que se ha desarrollado en los últimos años una investigación en el Departamento de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Concepción que ha buscado reutilizar las latas de aluminio. Como resultado se logró obtener un material compuesto base aluminio (Al-MMC) fabricado a partir de latas de bebida, las cuales han pasado por un proceso de fundición no convencional (rheocasting modificado) y posterior conformado en caliente (extrusión inversa), método por el cual se ha logrado obtener tubos con buenas propiedades mecánicas para uso estructural y con propiedades similares a las de la aleación A6063. Sin embargo, la complejidad de lograr una adecuada alineación de los componentes durante el proceso de extrusión inversa hace compleja su implementación a nivel industrial. A lo anterior se agrega la dificultad de lograr tubos de gran longitud debido al pandeo que puede sufrir el punzón.

En base a lo anterior, el objetivo de esta investigación es lograr un proceso de conformado aplicable a nivel industrial, fácil de implementar y de bajo costo de inversión. En los siguientes capítulos se desarrolla un método de obtención de tubos en base a latas de aluminio por fundición, aplicando un método de conformado en estado semisólido denominado thixoforming que considerará dentro del proceso, en primera instancia extrusión inversa y posteriormente extrusión directa en caliente, produciendo así tubos que posean buenas propiedades mecánicas, similares a las obtenidas por el proceso anterior y con ello obtener un importante avance para la industria nacional.



1.1 Hipótesis

Se puede conformar el Al-MMC para hacer tubos por un proceso fácilmente escalable, sin requerir grandes inversiones, fácil de implementar y obteniendo tubos con buenas propiedades mecánicas para aplicaciones estructurales.

1.2 Objetivos

Objetivo principal

Fabricar tubos de Al-MMC mediante thixoforming y extrusión directa en caliente con buenas propiedades mecánicas que permitan su uso estructural.

Objetivos específicos

- Obtener mediante thixoforming y extrusión inversa en caliente tubos de un material compuesto base aluminio a partir de latas de bebidas y confirmar los resultados obtenidos en estudios anteriores
- Obtener mediante thixoforming y extrusión directa en caliente tubos de un material compuesto base aluminio a partir de latas de bebidas
- Estudiar la zona de soldadura producida por extrusión directa
- Lograr que las propiedades mecánicas de dichos tubos estén dentro del rango establecido para una aleación estructural tipo A6063-T5
- Comparar tubos producidos por extrusión inversa y directa
- Diseñar un proceso de obtención de tubos que sea aplicable industrialmente

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Reciclaje de aluminio

El aluminio, como todos los metales, puede ser obtenido por medio de dos procesos: proceso primario (extracción de bauxita) y proceso secundario (reciclaje). El primero se basa en dos etapas: método Bayer, que es el principal método para producir alúmina a partir de la bauxita y método Hall-Héroult para la descomposición de la alúmina [1] y separación del aluminio metálico. El aluminio se recupera de la bauxita mediante un proceso de lixiviación conocido como proceso Bayer, a través del cual se eliminan las impurezas, luego se hace precipitar como hidróxido de aluminio, se seca y se calcina para producir alúmina purificada. Posteriormente la alúmina se disuelve en criolita y se electroliza para obtener aluminio fundido.

Producir aluminio mediante este método tiene un costo energético muy elevado, de hecho se habla de 186.262 MJ (52.000 kWh) [2] para producir una tonelada de aluminio (consumo energético que corresponde principalmente al proceso de electrólisis).

Hoy en día se buscan procesos más amigables con el ambiente y que por lo tanto no requieran de excesivo consumo de energía. Es aquí donde nace la idea de reciclar, y específicamente producir aluminio por fuente secundaria, donde el costo energético se reduce a un promedio de 11.680 MJ (3300 kWh) de energía para producir una tonelada [2], es decir, se reduce cerca del 95% en comparación al método primario, lo cual es muy atractivo. En cuanto a los desechos generados en el proceso, en el reciclaje de aluminio mediante el método secundario se disminuye en un 85% la generación de residuos en comparación al proceso primario [3].

El aluminio se destaca por ser un metal 100% reciclable, es decir, no pierde sus propiedades al ser reutilizado, por lo que se habla de una reciclabilidad ilimitada;

es más, el aluminio que se extrajo para hacer una lata de bebida hace 50 años, sigue estando presente en las latas de hoy. En Chile las cifras de reciclaje giran en torno a las 30.000 toneladas anuales y en lo que a envases se refiere, el más habitual es el de las latas de bebida. Dentro de las empresas más importantes que se dedican a la recolección de latas de bebida destacan Sudtrade, Midas Chile y Metalum S.A. Éstas procesan cerca de 7000 toneladas anuales [4]. Esta cantidad aún es muy baja, teniendo en consideración que las latas en circulación siguen estando por sobre las cifras de reciclaje. El principal problema es que las latas recolectadas se llevan a empresas fuera del país, desde donde posteriormente vuelven convertidas nuevamente en envases.

Actualmente un tercio del aluminio producido a nivel mundial proviene de fuentes secundarias e incluso la razón puede ser mucho mas alta en los países mas desarrollados pertenecientes a la OCDE, como Alemania, Corea del Sur y Austria, donde mas del 50% de sus residuos son reutilizados. Para el caso de Estados Unidos, el 55% del aluminio circulante proviene de reciclaje.

En Chile no existía una normativa que promoviera el reciclaje por lo tanto tampoco existía una cultura con respecto a este tema. Para revertir esto, es que en el año 2010 se creó el Ministerio del Medio Ambiente con programas como “Santiago Recicla” [6], programa que tiene como uno de sus objetivos minimizar los residuos que llegan a los vertederos. Dado el importante crecimiento demográfico, los espacios destinados a la manipulación de residuos se han visto colapsados, por lo que una forma de enfrentar esta problemática ha sido potenciar el reciclaje. Es así como en el año 2016 nace una ley que establece el marco para la gestión de residuos, ley 20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor y el Fomento al Reciclaje (REP)[6]. Esta ley busca disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, con la finalidad de proteger el ambiente y la salud de las personas. Por medio de esta ley se busca que los residuos se incorporen a la cadena de producción como materia prima o energía, y con esto fomentar el emprendimiento

y la generación de empleos verdes. Es en esta ley, donde se incorpora además un tema no menor, como lo es el aspecto económico del reciclaje, específicamente en lo que compete a los recolectores base, reconociéndolos formalmente como gestores de residuos, lo cual le da un valor agregado a su trabajo.

De esta forma se ha intentado ordenar la recolección en Chile, pero no se ha abordado un tema aún más importante, que es buscar qué hacer con los productos recolectados. En lo que compete a latas de bebidas, estas se recolectan y se exportan fuera del país, sin obtener en Chile un producto que pueda ser comercializado y que genere un beneficio.

Un motivo importante por el cual no se le ha dado un uso distinto a las latas de bebida es su variación composicional; no tiene una composición química estrictamente definida, solo cumplen con los estándares para ser usadas como envases de bebida por lo que se cree que no podrían emplearse en otro uso. Es por esto que una vez recicladas están destinadas a convertirse nuevamente en latas. Así su valor en el mercado nacional no es muy elevado, siendo los recolectores base quienes se ven más afectados.

Al momento de analizar el impacto que genera producir aluminio por proceso secundario, no se puede dejar de mencionar dentro de los beneficios el hecho de que se reduzca la cantidad de basura en los vertederos, dando un uso importante a la gran cantidad de aluminio que hoy termina en dichos lugares, teniendo en cuenta que éstos se ven saturados tanto por el crecimiento demográfico como por la reducción de espacios para la manipulación de residuos. También es necesario tener en cuenta el impacto ambiental que genera a nivel local el hecho de reducir la cantidad de basura y el impacto social para el caso de los recolectores base que reciben una baja remuneración por recolectar las latas.

2.2 Fabricación de un Al-MMC a partir de chatarra de aluminio

En los últimos años se han realizado algunas investigaciones en torno a encontrar nuevas aplicaciones para las latas de aluminio. Un problema mencionado anteriormente, hacía referencia a la composición química no definida que poseen las latas, que sólo cumple con los estándares para ser usadas en la fabricación de latas. La variación composicional que poseen limita darles un uso distinto, considerando que el cuerpo es de la familia 5XXX y las tapas de la familia 3XXX. En base a este problema nace la idea de fabricar un material compuesto de matriz metálica base aluminio, mediante la fusión de latas de bebida y usando como refuerzo la escoria que se produce durante la fusión, la cual está compuesta de espineles de $Al_xMg_yO_z$ dispersos en una matriz que contiene principalmente aluminio y magnesio [8].

El proceso que se ha realizado para lograr producir este nuevo material comienza decapando las latas, llevándolas a 580°C por 15 min con el objetivo de quemar la pintura que tiene en su superficie, además de eliminar la humedad del material, para posteriormente pasar a la etapa de fusión. Cuando el material se encuentra en la etapa de fusión, a una temperatura cercana a los 700°C , se procede a introducir un agitador con el objetivo de revolver el baño fundido, produciendo una velocidad de corte de 650 s^{-1} [9]. Paralelamente, se hace descender la temperatura del baño para lograr un estado semisólido; mientras esto ocurre, el material en estado semisólido es agitado por un tiempo de 5 min. Luego se extrae el agitador y se lleva el crisol con el material a una prensa hidráulica donde, en estado pastoso, el Al-MMC es compactado para evitar la porosidad, obteniéndose así un material cilíndrico.

La composición química del material obtenido, determinada mediante espectroscopía de emisión óptica, demuestra lo antes mencionado con respecto a la alta variabilidad en los porcentajes de los componentes que poseen las latas,

tal como se muestra en la tabla 2.1, estableciendo rangos máximos y mínimos. Esta variación se debe al uso de un material distinto en las tapas y en el cuerpo de la lata. Esto da como resultado una composición final entre las familias 5XXX y 6XXX.

	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Ni	%Zn
Máximo	3.28	5.0	0.75	0.86	5.65	0.35	0.49
Mínimo	0.25	0.33	0.12	0.6	1.06	0.08	0.06
	%Sn	%Ti	%Sr	%Li	%Pb	%Co	
Máximo	0.64	0.4	0.45	1.84	0.39	0.11	
Mínimo	0	0	0	0	0.02	0	

Tabla 2.1. Composición química de las latas de aluminio [10]

Las propiedades mecánicas de este material son bastante bajas en comparación a las aleaciones comerciales de las familias antes mencionadas. Se presumió que esta situación se debía a la cantidad, morfología y tamaño de los intermetálicos de hierro presentes en él. Es por esto, que se decidió someter muestras del material a un proceso de conformado en frío y posterior tratamiento térmico con diferentes condiciones de proceso [10].

A las muestras se les realizó un tratamiento de homogenización para luego ser templadas y posteriormente deformadas en frío con diferentes reducciones. Posterior a ello se sometieron a un tratamiento térmico de envejecimiento artificial a diferentes tiempos, dejándolas enfriar en aire hasta alcanzar temperatura ambiente. A esto se le conoce como tratamiento térmico de tipo T8.

Mediante microscopía óptica se pudo observar la distribución de la escoria dentro de la matriz y la presencia de intermetálicos, los cuales se fueron fracturando debido a la deformación en frío, pasando de intermetálicos poliédricos de cantos

rectos a tener una morfología redondeada debido al tratamiento térmico, actuando como refuerzo de la matriz, lo cual mejoró las propiedades mecánicas al reducir los posibles concentradores de esfuerzo [10].

Mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS), se logró caracterizar de mejor forma los intermetálicos obtenidos posterior a la deformación y tratamiento térmico, confirmando así la presencia de una matriz Al-Mg con la aparición de intermetálicos metaestables del tipo $Al_6(Fe,Mn)$ (Figura 2.1 denotado por el punto 2) [8]. Se comprobó, además, mediante imágenes obtenidas por SEM con electrones retrodispersados, que posterior al tratamiento térmico precipita una nueva fase en los bordes de las partículas la cual correspondería a la fase transformada $Al_x(Fe,Mn)_ySi$ (Figura 2.1 denotada por el punto 4). Mediante EDS a los puntos señalados en la figura 2.1 se pudo identificar las fases presentes, las cuales se detallan en la tabla 2.2 [10].

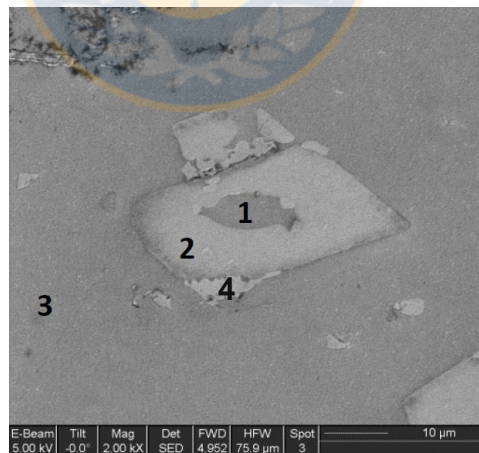


Figura 2.1. Imagen SEM de partícula fracturada debido al proceso de conformado y redondeada por efecto del tratamiento térmico [10]

Punto	Fase
1	Matriz Al-Mg-Si
2	$Al_6(Fe,Mn)$
3	Matriz Al-Mg
4	$Al_x(Fe,Mn)_ySi$

Tabla 2.2. Fases relacionadas con los puntos señalados en la figura 2.1 [10]

Luego de los análisis de SEM se concluyó que para una muestra deformada en frío y sometida a un tratamiento térmico de 8 horas a 175°C las propiedades mecánicas obtenidas (Tabla 2.3) son prometedoras, similares a las establecidas para una aleación estructural común del tipo AA6063-T6.

Muestra	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
AA6063 (T4-T6)	90-170	150-220
Al-MMC T8	173	273

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas del AA6063 (T4-T6) y Al-MMC T8 [10]

El problema principal del proceso detallado anteriormente, se encuentra en el conformado en frío, dado que se produce un endurecimiento por deformación, lo que hace aumentar la resistencia mecánica, provocando disminución en la ductilidad del material e incrementa los costos asociados al procesamiento.

En razón de lo anterior, surge la idea de explorar un método de conformado en caliente para procesar el material.

2.3 Fabricación de tubos por extrusión inversa en caliente

Basándose en los resultados obtenidos en la investigación anterior, se ha demostrado la factibilidad de usar el material compuesto base aluminio para la fabricación de tubos mediante extrusión inversa, teniendo como materia prima las latas de bebida [11].

Siguiendo el procedimiento desarrollado en la investigación previa, se funde la materia prima a 700°C y luego se agita el baño fundido produciendo una velocidad de deformación de 650 s⁻¹ para lograr mezclar la escoria dentro del baño y permitir que se destruya la estructura dendrítica produciendo una estructura globular tipo roseta, estructura característica del método de rheocasting [12]. Luego de un enfriamiento continuo, llegando el baño a 620°C, se lleva el crisol con el material en estado semisólido a una prensa hidráulica y se aplica extrusión inversa para obtener un tubo, según el esquema que se muestra en la figura 2.2.

Para aplicar extrusión inversa se debió ajustar cada elemento montado sobre la prensa. Se necesitó hacer un ajuste de nivelación tanto del crisol con el portacrisol como de la matriz con el punzón. Esta etapa del proceso tiene gran importancia, dado que cualquier desviación mínima del punzón va a generar que el tubo pierda su concetricidad.

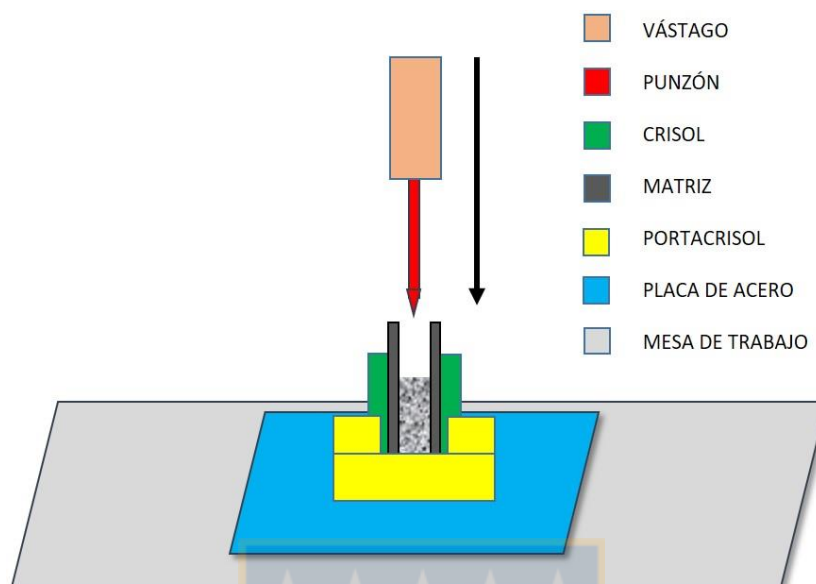


Figura 2.2. Esquema del método usado para extrusión inversa de tubos [11]

Mediante este procedimiento, se logró obtener tubos de hasta 191 mm de longitud y 21 mm y 29 mm de diámetro interno y externo, respectivamente. Considerando la aplicación de lubricante base níquel y grafito se logró realizar el proceso de conformado a 20 Ton. La fuerza real aplicada para obtener los tubos antes mencionados sólo alcanzó 20 Ton debido a que el lubricante empleado en el proceso permitió que las presiones disminuyeran y por lo tanto el material fluyó con mayor facilidad.

Posterior al proceso de conformado en caliente, se procedió a realizar un tratamiento térmico de envejecimiento artificial por 5 horas a 150°C [11], lo que se conoce como tratamiento tipo T5.

Uno de los puntos que se abordaba en esta investigación se enfocó en comprobar si al hacer conformado en caliente los intermetálicos se fracturarían, como ocurrió en el conformado en frío, dado que al aumentar la plasticidad por efecto de la temperatura los intermetálicos no presentarían un comportamiento frágil [11].

Se comprobó que debido a que los intermetálicos se forman antes de la solidificación del Al-MMC, éstos se encuentran presentes al momento de hacer el conformado y siguen fracturándose una vez aplicada la fuerza de extrusión debido a que su esfuerzo de fluencia es bajo, redondeándose por efecto de la precipitación de la nueva fase en la periferia del intermetálico $Al_6(Fe,Mn)$ una vez realizado el tratamiento térmico. Mediante estudios en SEM se logró comprobar la morfología redondeada de los intermetálicos de hierro, tal como se observa en la figura 2.3.

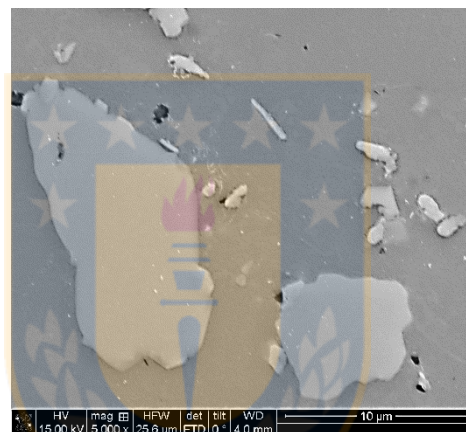


Figura 2.3. Imagen SEM de partícula fracturada y redondeada. Muestra de tubo con tratamiento térmico a 150°C por 5 horas [11]

Realizando el respectivo análisis metalográfico se verificó lo desarrollado en investigaciones anteriores en lo que respecta a la distribución de la escoria dentro de la matriz y la caracterización de los intermetálicos.

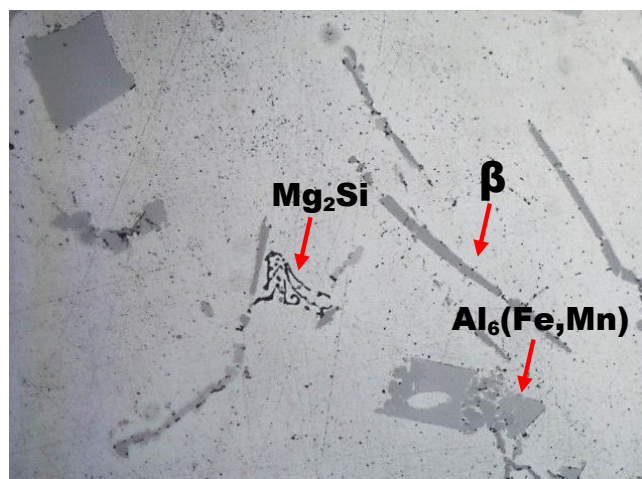


Figura 2.4. Metalografía de fases presentes en Al-MMC sin tratamiento térmico, 1000x [11]

Las propiedades mecánicas de los tubos por extrusión inversa arrojaron los resultados que se muestran en la Tabla 2.4. Si se comparan las propiedades obtenidas en ambos estudios con una aleación de aluminio A6063-T6 se puede observar que se superan tanto el esfuerzo de fluencia como la resistencia a la tracción, por lo que se comprueba que en el conformado en caliente se cumple con la modificación de los intermetálicos tal como ocurrió en el conformado en frío.

Muestra	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
A6063 (T4-T6)	90-170	150-220
Tubo Al-MMC T5 (100% latas)	187	254

Tabla 2.4. Resultados ensayo de tracción de tubos obtenidos por extrusión inversa [11]

Este tipo de conformado requiere controlar algunas variables como fuerza de extrusión, velocidad del punzón y la fricción que existe tanto entre el punzón y el

material como entre la matriz y el material. Otra variable a considerar es el pandeo del punzón, lo cual impedirá obtener tubos largos.

El problema de la extrusión inversa es el hecho de tener que alinear todo el sistema (punzón, matriz, crisol, porta-crisol), después de cada extrusión realizada, además, de considerar que solo se pueden obtener tubos cortos debido al pandeo del punzón. A nivel de laboratorio se puede realizar, aunque no exenta de complejidades, sin embargo, a nivel industrial se hace más compleja su implementación dado que la etapa de nivelación se debe hacer exhaustivamente, empleándose mucho tiempo en ello por lo que a nivel económico no es rentable [13] y no permite tener un proceso continuo.

A raíz de esto, nace la idea de modificar el proceso de conformado a un proceso extrusión directa, tal que se pueda aplicar fácilmente a nivel industrial.

El objetivo de esta investigación será diseñar un proceso que permita la producción de tubos en menor tiempo y a mayor cantidad para que sea atractivo y rentable industrialmente.

2.4 Thixoforming

El conformado en estado semisólido tiene algunas ventajas por sobre los métodos de fundición tradicionales, considerando que estos generan ciertas estructuras no deseadas como son las dendritas, además de problemas de macro segregación y porosidad, inconvenientes que se ven superados al realizar el proceso en estado semisólido. Otro aspecto a considerar, es que este tipo de conformado reduce significativamente la fuerza requerida para la forja o extrusión, facilitando la producción de componentes con geometrías complejas que no se pueden realizar por forja tradicional e incluso evitando el posterior mecanizado [14].

Cabe señalar que dentro de los métodos de conformado en estado semisólido existen métodos como el rheocasting, conformado luego de un enfriamiento continuo del baño fundido agitado; thixocasting, obtención de un tocho luego de agitar el baño fundido y posterior inyección en un molde; thixoforming, conformado en estado semisólido de un tocho obtenido por thixocasting. Para el caso de esta investigación se trabajará con el proceso de thixoforming.

Se sabe que al colar directamente aleaciones de aluminio, si no se controla correctamente, se genera una alta segregación y porosidad macroscópica y microscópica inherentes al proceso [12] y que evidentemente reducen de manera considerable las propiedades finales del material, no olvidando además la estructura dendrítica que afecta considerablemente las propiedades mecánicas.

Los tres principales fenómenos que ayudan a la evolución de esta estructura son la fragmentación de la estructura primarias, el crecimiento de esta hasta una estructura tipo roseta y la posterior aglomeración (Figura 2.5) [15].



Figura 2.5. Evolución microestructural de dendrita a roseta debido a la agitación del baño fundido [15]

Mediante rheocasting se puede obtener un tocho con estructura tipo roseta, para luego ser conformado en caliente, estableciendo el concepto de thixoforming, el cual se atribuye al proceso que consiste en calentar un tocho metálico con estructura globular hasta la temperatura de estado semisólido (pastoso) para luego ser conformado.

Las etapas del proceso son: la obtención de un tocho con estructura no dendrítica producida por efecto de la agitación en estado semisólido, luego este tocho de material solidificado es calentado hasta la temperatura de semisólido, para posteriormente pasar por algún proceso de conformado [16], que para el caso de esta investigación será extrusión inversa y posteriormente extrusión directa. Llevando el tocho a la temperatura de estado semisólido se logra mantener la estructura globular, y por lo tanto se aseguran las propiedades mecánicas, teniendo en cuenta que no se afecta la facilidad de conformado, debido a la alta temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso.

2.5 Extrusión directa

Para el caso de esta investigación, se abordará la extrusión directa de tubos, para lo cual se introduce un concepto que no se ha desarrollado en investigaciones anteriores, esto es la soldadura del material.

En la extrusión directa de tubos, el material a extruir pasa por una matriz que separa el material en 3 o 4 flujos (dependiendo del diseño), tal como se muestra en la figura 2.6, existiendo un mandril suspendido dentro de la matriz para poder generar un diámetro interno y uno externo [17], por lo que al producirse la deformación plástica al aplicar fuerza en el tocho, este se separa en flujos y luego vuelve a unirse dentro de la matriz bajo condiciones de presión, deformación y temperatura, produciéndose un proceso de unión en estado sólido.

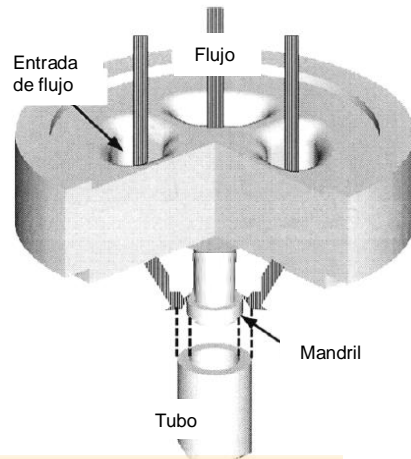


Figura 2.6. Esquema en 3D de matriz para extrusión de tubos [18]

Cabe señalar, que un factor importante en el proceso es el acabado superficial que posee la matriz, dado que cualquier imperfección presente en la superficie generará problemas en el producto final, afectando la calidad superficial, impidiendo el flujo uniforme del material o alterando la distribución de presiones dentro de ella.

Metalografías revelan que al analizar la zona de soldadura del material, se debe evidenciar una línea más oscura por efecto de la acumulación de intermetálicos, tal como se muestra en la figura 2.7.

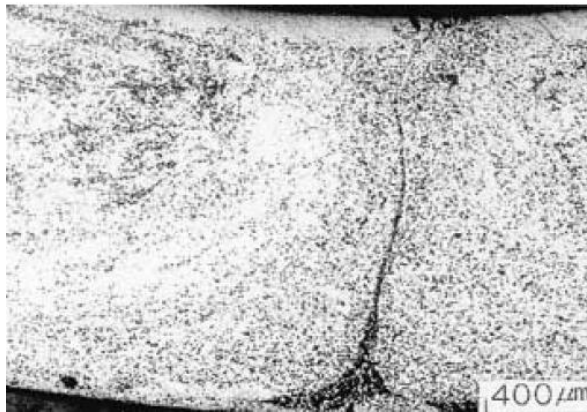


Figura 2.7. Metalografía de zona de soldadura de un tubo obtenido por extrusión directa [18]



CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Esta memoria de título se basó en obtener tubos mediante thixoforming, usando como método de conformado en primera instancia, extrusión inversa, para verificar que el proceso funciona y luego con el respectivo diseño del equipamiento necesario se aplicará extrusión directa.

3.1 Preparación de materia prima

El proceso inició con la recolección y preparación de latas. La preparación consistió en llevarlas a un proceso de decapado en un horno mufla a 580°C por 15 minutos, para eliminar por completo la humedad y quemar todos los restos orgánicos y resinas que pudieran contener por efecto de la pintura exterior. Posteriormente las latas fueron compactadas y cortadas en trozos más pequeños para poder introducirlas de forma fácil dentro del crisol (esto queda sujeto al tamaño del crisol).

3.2 Alineación de la prensa

La alineación del equipo es una etapa fundamental para el éxito tanto de la extrusión inversa como de la extrusión directa, dado que al mínimo desajuste de una de las piezas se tendrá un tubo descentrado o las presiones podrían no distribuirse adecuadamente, lo que puede provocar que el punzón se deforme y que evidentemente no se logren los resultados esperados o que los tubos se curven al salir de la matriz de extrusión directa.

Para el caso de extrusión inversa se debe ajustar el crisol con la matriz y este conjunto alineado con un punzón cónico. Para el caso de la extrusión directa, se debe ajustar el punzón con el contenedor, lo que debe estar perpendicular a la

matriz. Por lo tanto, se debió realizar alineación frontal y lateral de la prensa con todo el conjunto, tal como se muestra en la figura 3.1, verificando la perpendicularidad del punzón desde todos los ángulos, para lograr obtener tubos con espesor de pared uniforme.

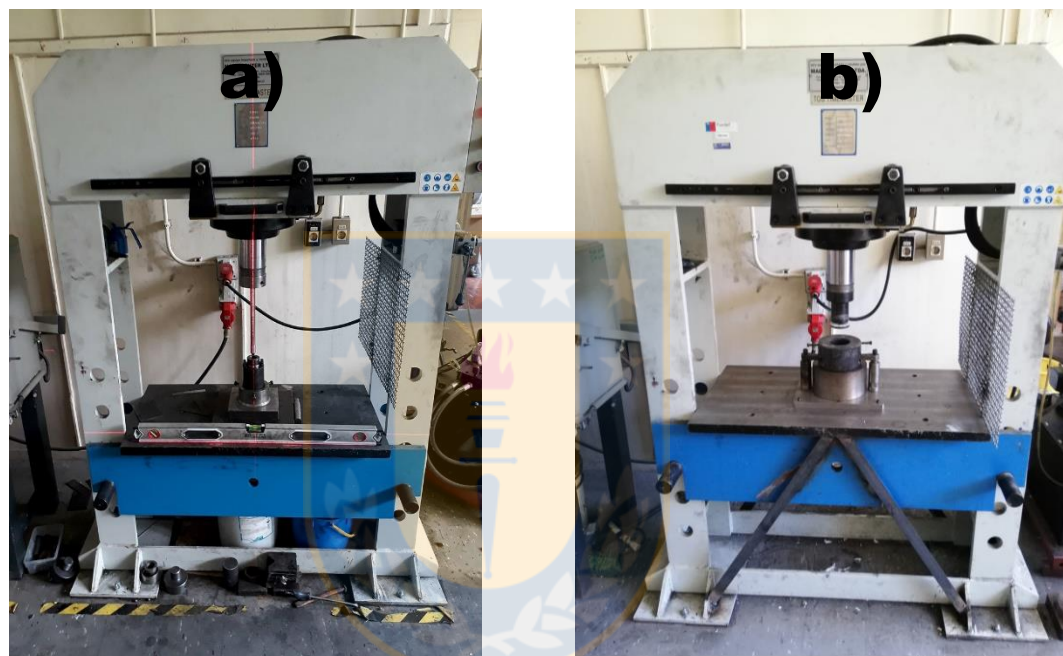


Figura 3.1. a) Perfil frontal de prensa hidráulica, con sistema de extrusión inversa, b) Perfil frontal de prensa hidráulica, con sistema de extrusión directa

3.3 Obtención del tocho

Para extrusión inversa, se fabricó un tocho de 29 mm de diámetro y 65 mm de largo, lo que equivale a 500 gr de latas, es decir, 35 latas; considerando que cada lata pesa aproximadamente 14 gr.

Para el caso de extrusión directa, se fabricó un tocho de 68 mm de diámetro y 80 mm de largo, lo cual implicó considerar 1800 gr de materia prima, lo que equivale a 130 latas aproximadamente.

Una vez preparada la materia prima, esta se depositó dentro de un horno de inducción INDUCTOTHERM de 20 kW de potencia (figura 3.2), y se llevó a una temperatura promedio de 700°C, temperatura que se fue midiendo con una termocupla tipo-K introducida en la pared del crisol.



Figura 3.2. Horno de fusión y agitador para proceso de rheocasting.

Una vez fundido todo el material se introdujo un agitador cilíndrico de acero inoxidable, que se hizo girar a una velocidad de 250 rpm, para producir una velocidad de deformación de 650 s^{-1} . El baño fue agitado por 5 minutos, lo cual permitió que la escoria se mezclara con el material fundido, logrando reforzar la matriz y además destruir la estructura dendrítica que se produce al solidificar, transformándola en una estructura de tipo globular o tipo roseta. Mientras el baño fundido estuvo bajo agitación se procedió a calentar el molde permanente en el cual se hizo el vaciado, usando un soplete a gas.

Cuando ya se agitó el baño fundido se procedió a sacar el agitador y se vació el material dentro de un molde permanente de acero 4340. Para estas experiencias

se usaron moldes permanentes, uno de diámetro interno 29 mm para obtener un tocho para extrusión inversa y otro de 68 mm de diámetro para obtener un tocho para extrusión directa. Una vez fríos, se extraen los tochos de 30 mm de diámetro y 88 mm de largo para extrusión inversa (figura 3.3) y 68 mm de diámetro por 80 mm de largo para extrusión directa (figura 3.4).



Figura 3.3. Tocho obtenido por rheocasting para extrusión inversa.



Figura 3.4. Tocho obtenido por rheocasting para extrusión directa.

3.4 Thixoforming con extrusión inversa

El tocho obtenido por fundición se preparó para realizar la extrusión. Para esto, se lubrica el tocho, la matriz y el punzón con antiadherente base níquel y polvo de grafito, para que el material fluya fácilmente y el proceso no falle. Preparado el conjunto (crisol, matriz, tocho), éste se llevó a un horno tipo mufla a 580°C por 50 min, ya que como se mencionó, la extrusión se realizó en caliente. Transcurrido el tiempo a la temperatura señalada, se sacó del horno y se montó

en la prensa hidráulica TOS-TIMEMASTER modelo YLM100Z para aplicar la fuerza y llevar a cabo la extrusión.

Una vez obtenido el tubo, este se limpió para extraer los restos de lubricante adheridos y se cortaron los extremos del tubo, que suelen estar más deformados por efecto del proceso; luego se verificaron las dimensiones y se registró todo el proceso en planillas diseñadas para controlar las variables e ir mejorando el proceso en cada experiencia (Ver Anexo n°1).

3.5 Thixoforming con extrusión directa

Para realizar extrusión directa fue necesario diseñar un sistema de extrusión que soportara las presiones de trabajo. El diseño consideró una matriz, un contenedor un punzón o pistón y un porta-matriz, todo fabricado en acero H13, acero que cumple con los requerimiento para soportar esfuerzos y temperatura necesarios para el proceso de conformado. Las diferentes piezas correspondientes al sistema de extrusión se muestran en la figura 3.5.

Antes de comenzar el proceso de extrusión, una vez alineado el sistema, se debió proceder a lubricar el tocho, la matriz, el contenedor y el punzón, para disminuir la fricción entre los materiales y además facilitar el desmontaje del sistema. Los lubricantes utilizados fueron nitruro de boro para el tocho y antiadherente base níquel para el resto de las piezas.

Para el éxito del proceso, la matriz y todo el sistema de extrusión debe encontrarse a una temperatura suficiente que permita que el tocho de aluminio que está a alta temperatura no se enfríe. Por esto, fue necesario llevar la matriz y el contenedor a un horno mufla a 550°C por una hora, para además lograr una temperatura homogénea en todo el sistema.

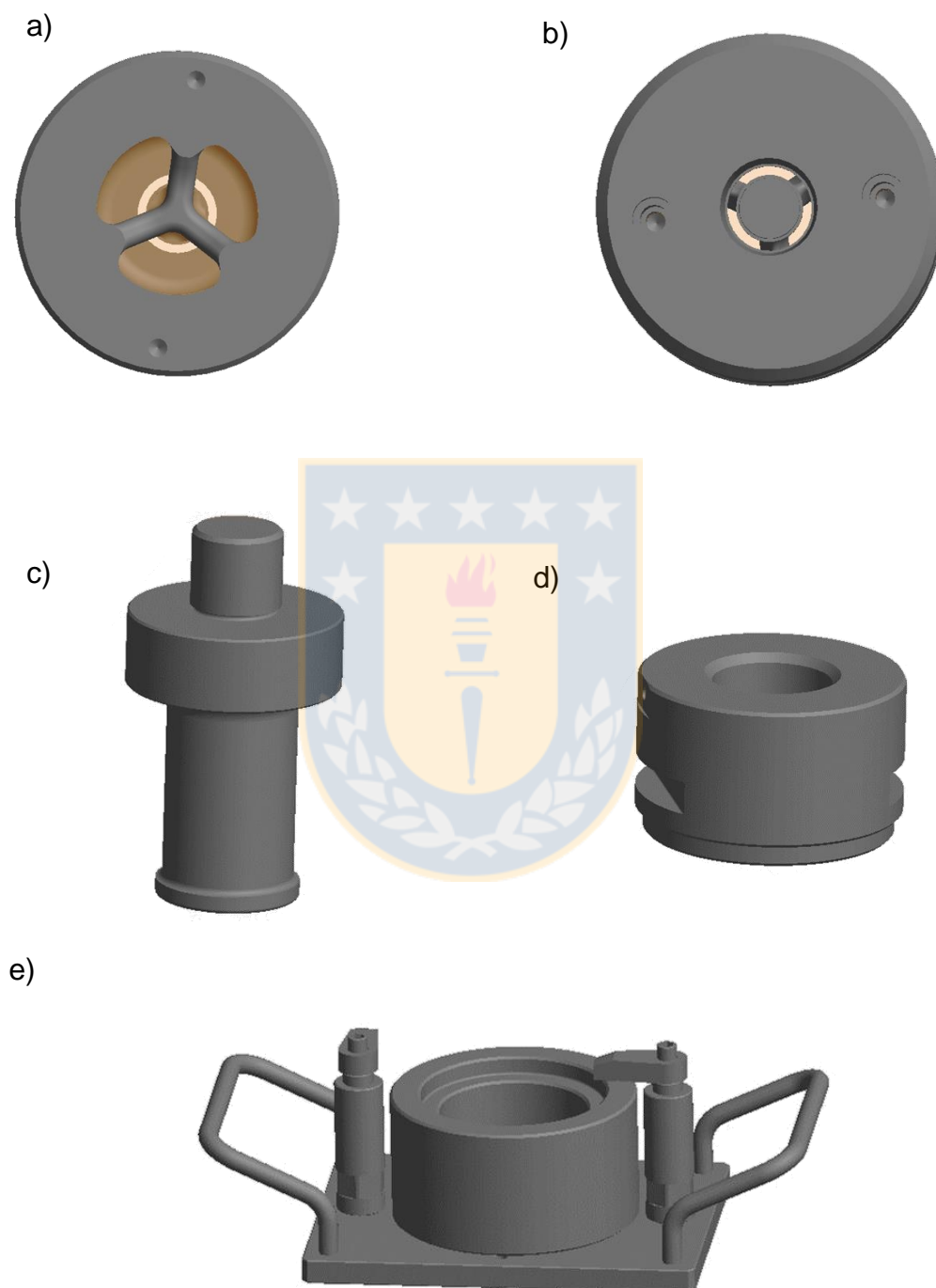


Figura 3.5. a) Matriz, cara frontal, b) Matriz, cara posterior, c) Punzón, d) Contenedor y e) Porta-matriz montado sobre placa anclada a la prensa.

Una vez establecida la temperatura del sistema de extrusión, se procedió a variar la temperatura del tocho para establecer el rango en el cual se puede trabajar con el material, sin que el proceso de conformado se vea afectado. Para esto, se eligieron tres temperaturas para el tocho: 580°C, 600°C y 630°C y una velocidad de extrusión de 2.2 mm/s, velocidad recomendada por el fabricante de las matrices. Para los tres casos de temperatura antes mencionadas, se obtuvieron resultados distintos, los cuales se describen en el capítulo siguiente.

3.6 Tratamiento térmico

El tratamiento térmico se realizó para verificar el cambio en la morfología de los intermetálicos, si varían de una forma poliédrica a una forma redondeada disminuyendo los concentradores de esfuerzo y por lo tanto aumentando las propiedades mecánicas del material. De esta forma, justificar la realización del tratamiento térmico.

Los tubos obtenidos fueron sometidos a tratamiento térmico de envejecimiento artificial, el cual se realizó por 8 horas a 175°C, para posteriormente evaluar las propiedades en ambas condiciones.

3.7 Caracterización mecánica y microestructural

Para obtener información respecto de las propiedades y características obtenidas en el material producido, es que se recurre a diferentes ensayos para identificar propiedades mecánicas, distribución y morfología de los intermetálicos y recristalización. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Análisis metalográfico

El procedimiento para realizar las metalografías comenzó montando las muestras de aluminio en resina (Bakelita) para posteriormente proceder a lijarlas en lijas de SiC número 400, 600 y 800. Luego se procedió a pulir las muestras con suspensión de pasta de diamante de 3 micrones y luego de 1 micrón, lo que permite dar un mejor acabado a la muestra. Finalmente, ésta se llevó al microscopio óptico Olympus GX51, para realizar el análisis. Se realizaron muestra metalográficas con y sin ataque químico.

- Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Mediante esta técnica se logró observar en mayor detalle la morfología de los intermetálicos, comprobando sus bordes redondeados, y mediante el uso del análisis EDS se pudo obtener un análisis químico cualitativo, lo que permitió estimar la composición química de las fases presentes.

- Ensayo de tracción

Mediante este ensayo se determinó el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo del material, y con ello se comprendió la influencia que tiene el método de fabricación de los tubos sobre las propiedades mecánicas, además de justificar la aplicación del tratamiento térmico. Para esto, se fabricaron probetas de tracción como las indicadas en la figura 3.6, las cuales se llevaron a una máquina de ensayos Instron a una velocidad de deformación de 10^{-3} s^{-1} .

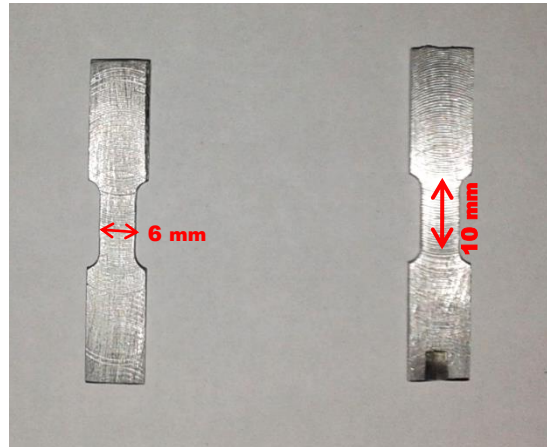


Figura 3.6. Probetas de tracción con sus dimensiones



CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Tubos obtenidos por extrusión inversa

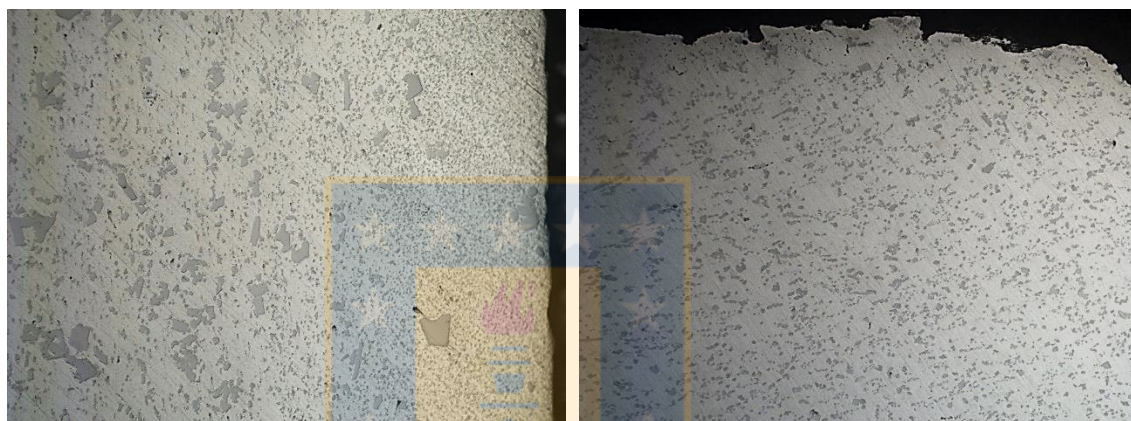
Basando el procedimiento en lo realizado en investigaciones anteriores [10,11], se llevó a cabo el proceso de extrusión inversa considerando los valores óptimos para las variables más relevantes del proceso. Estas variables son temperatura, fuerza de extrusión, velocidad de extrusión y aplicación de lubricante. Los valores óptimos se eligieron basados en las investigaciones antes mencionadas. Con ello se obtuvieron tubos de hasta 78 mm de largo. Una vez obtenidos los tubos, se realizó un análisis exhaustivo del material obtenido, con el fin de analizar las propiedades mecánicas y características metalográficas del material. A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados.

4.1.1 Análisis metalográfico

Dentro de los aspectos metalográficos importantes que se han estudiado en este material durante investigaciones anteriores, destacan los intermetálicos de hierro y la escoria. La microscopía óptica ofrece la posibilidad de observar claramente estos dos aspectos, por lo que se muestran a continuación los resultados obtenidos mediante este método.

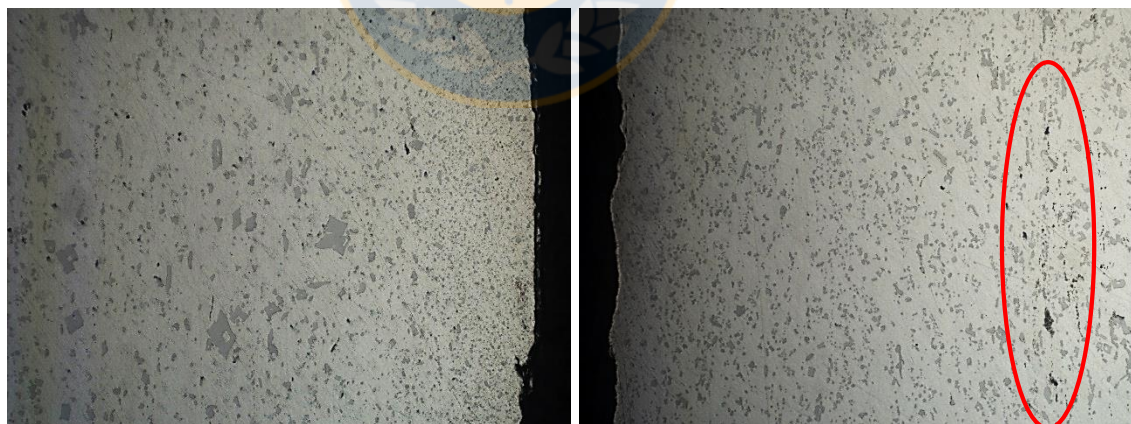
En primera instancia, en la figura 4.1 se analizan probetas extraídas de los tubos producidos por extrusión inversa. Como primer análisis se consideraron metalografías sin ataque químico, enfocando la observación en las zonas externas e internas, dado que se presentan diferencias en la distribución de fases. Cabe señalar que solo se comparan dos tubos producidos, dada la similitud en lo que a microestructura se refiere.

En las metalografías presentadas en la figura 4.1a, 4.1b y 4.1c se puede diferenciar claramente los intermetálicos de hierro de forma poliédrica, dado que poseen un color gris más oscuro en comparación con la matriz. Además, se puede observar zonas de mayor densidad de intermetálicos de diferentes tamaños.



a) Tubo 1, zona interna 200x

b) Tubo 1, zona externa 200x



c) Tubo 2, zona interna 200x

d) Tubo 2, zona externa 200x

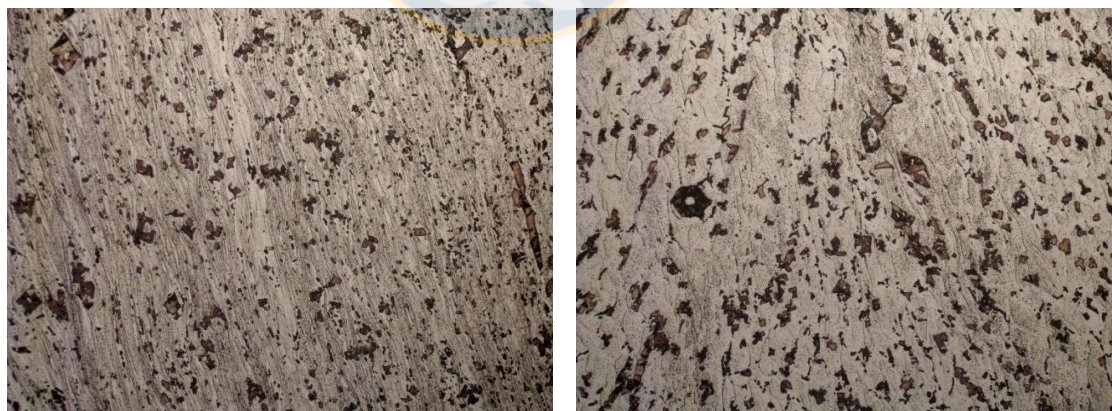
Figura 4.1. Metalografías sin ataque químico de tubos obtenidos por extrusión inversa, sin tratamiento térmico

En la figura 4.1 d), se puede observar, más claramente, la presencia de escoria como puntos más oscuros, distribuidos en la matriz, por efecto netamente de la agitación del baño fundido, tal como se comprobó en investigaciones previas [11], lo que indica que el proceso de rheocasting cumplió con uno de sus objetivos.

Se comprobó que los intermetálicos se ubican preferentemente en los límites de grano, lo cual era de esperarse, pues su formación ocurre previo a la solidificación del metal, en el proceso de agitación durante el rheocasting, por lo que se segregan en dicha zona.

Con el proceso de conformado se esperaba fracturar estos intermetálicos, es por esta razón que se observan muchos intermetálicos pequeños distribuidos en la matriz.

La morfología predominante de intermetálicos es de tipo poliédrico, concentrados mayormente en la zona interna del tubo, tal como se compara en la figura 4.1, dado que hay mayor deformación plástica en la zona donde se introduce el punzón. Para profundizar en esto, se realizó un ataque químico con ácido fluorhídrico al 3% a las muestras, las cuales se presentan en la figura 4.2.



a) Tubo 1, zona interna 200x

b) Tubo 1, zona externa 200x

Figura 4.2. Metalografías con ataque químico de tubos obtenidos por extrusión inversa, sin tratamiento térmico

Como era de esperarse, se tienen zonas de alta deformación plástica, evidenciada por la forma de los granos (alargados), debido a que el proceso de extrusión es de los procesos que más planos de deslizamiento logran activar, en comparación a otros procesos como forja o laminación.

Tal como se mencionó para el caso de muestras sin ataque químico de la figura 4.1, acá se comprueba la diferencia entre la deformación que se produce en la zona interna y la zona externa del tubo, teniéndose una alta inhomogeneidad de la deformación, con granos más deformados en la zona interna. Cuando el ángulo del punzón y/o el coeficiente de fricción son pequeños, las presiones internas y externas durante el proceso de extrusión son similares. Sin embargo, a medida que el proceso se aleja de estas condiciones y se aumenta el ángulo del punzón, la presión interna supera a la presión externa, por lo que la deformación será mayor en la zona interna [17].

Era de esperarse que al realizar el tratamiento térmico a las muestras, éstas presentaran una variación en la estructura de los intermetálicos, cambiando de una forma poliédrica a una forma más redondeada, debido a la precipitación de una nueva fase en los borde de estos [10].

En la figura 4.3 se presentan los mismos tubos analizados previamente pero ahora con su respectivo tratamiento térmico de 8 horas a 175°C.



a) Tubo 1, zona externa 500x

b) Tubo 2, zona interna 500x

Figura 4.3. Metalografías con ataque químico de tubos obtenidos por extrusión inversa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas.

Al comparar la figura 4.1 con la figura 4.3, puede observarse que, los intermetálicos al verse sometidos al envejecimiento cambian de una forma poliédrica a una forma más redondeada, lo cual debería verse reflejado al momento de medir las propiedades mecánicas.

De igual forma, en la figura 4.4 se observa que el tratamiento térmico realizado favoreció la recristalización, permitiendo la formación de granos equiaxiales, aunque se mantienen los límites de granos iniciales (alargados) debido a que en ellos se encuentran los intermetálicos, los cuales limitan en parte la reorganización de estos.



Figura 4.4. Metalografía de Tubo a 200x, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas y ataque químico. 200x

4.1.2 Ensayo de tracción

Con el objetivo de comparar el material obtenido con una aleación estructural A6063 (T4-T6), se realizaron ensayos de tracción. Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Muestras		Esfuerzo de fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
A6063 (T4-T6)		90-170	150-220
Tubo 1	Sin tratamiento térmico	140	190
	Con tratamiento térmico	150	225
Tubo 2	Sin tratamiento térmico	130	202
	Con tratamiento térmico	170	213

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas de probetas de tracción de tubos obtenidos por extrusión inversa

Los resultados presentados en la tabla anterior, permiten comprobar que tanto el esfuerzo de fluencia como la resistencia a la tracción máxima están dentro de los rangos establecidos para una aleación A6063 con tratamiento térmico tipo T5. Por lo tanto, se puede concluir que el material cumple con los estándares para emplearse como un aluminio de tipo estructural. Los gráficos de tracción se presentan en el Anexo n°2.

4.2 Tubos obtenidos por extrusión directa

Para el proceso de extrusión directa se establecieron tres temperaturas de tocho, tal como se mencionó en el capítulo anterior.

A 580°C el material pasó por la matriz, separándose en tres flujos y logró llenar la cámara de soldadura, pero no se consiguió que el material se soldara, (tal como se muestra en la figura 4.5a, dado que la presión en el interior no fue suficiente, aunque se llegó a la máxima capacidad de la prensa (100 ton).

En la experiencia a 600°C, se esperaba tener mayor fluidez del material y necesitar menor presión para que ocurriera la soldadura. Efectivamente, se logró pasar el material por la matriz y se alcanzó la soldadura de los flujos metálicos, obteniendo un tubo de 200 mm de largo (figura 4.5b), pero el punzón no logró extruir todo el material, dado que se llegó a un punto donde el tocho de Al-MMC se enfrió completamente y la prensa no tuvo la capacidad de continuar.

Finalmente, se optó por aumentar la temperatura a 630°C, llegando a un estado semisólido, y repetir el procedimiento. Fue así como esta vez, el material logró pasar por completo a través de la matriz, consiguiendo que el material soldara sus flujos y se obtuviera un tubo de 350 mm de largo, tal como se observa en la figura 4.5c.

El análisis de este método de conformado se basa en comprobar el tamaño y distribución de los intermetálicos de hierro y verificar la zona de la soldadura de los flujos generados por este proceso.

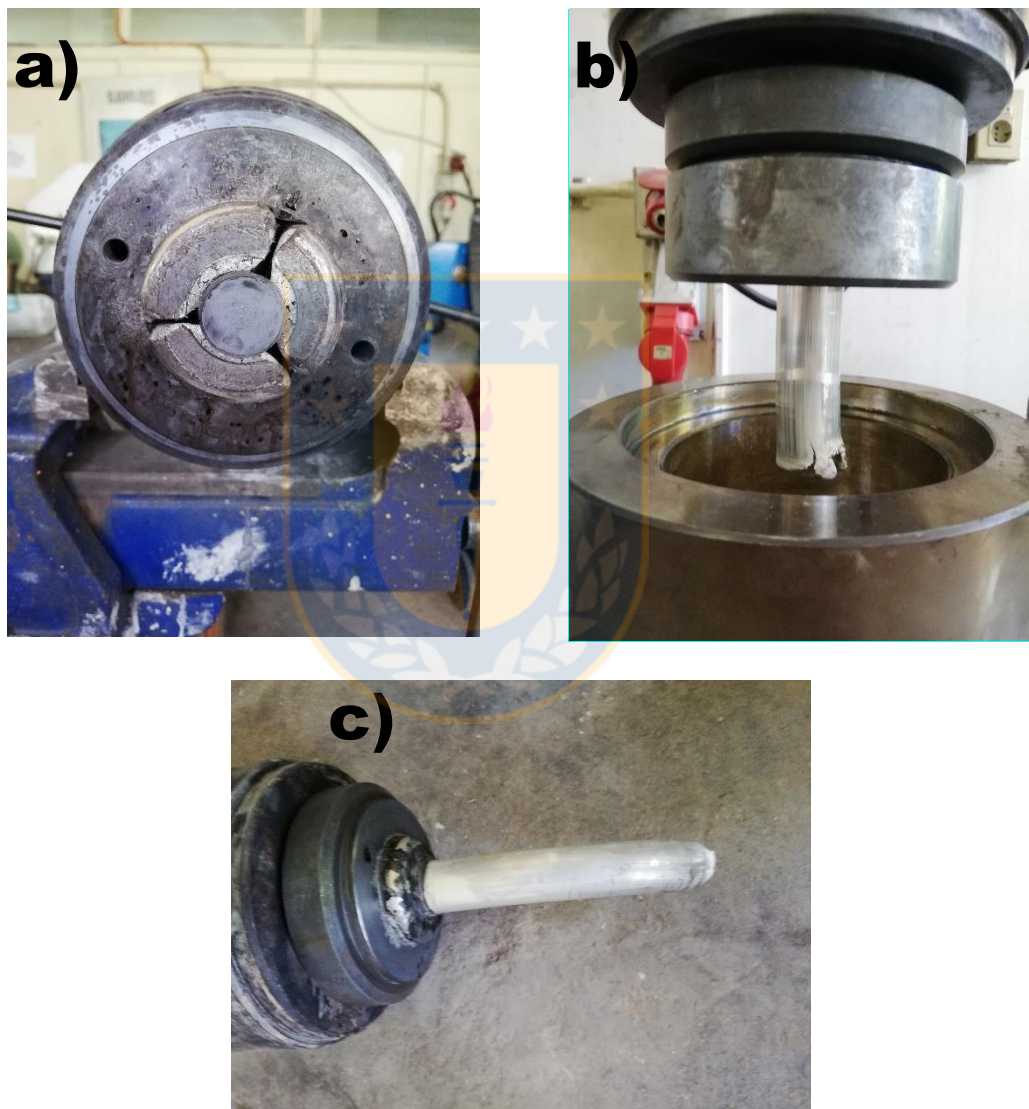


Figura 4.5. Resultado de extrusión a: a) 580°C, b) 600°C y c) 630°C

Por extrusión directa, fue posible obtener tubos de 200 mm y 350 mm de largo, con diámetros de 21 y 29 mm interno y externo, respectivamente, tal como se muestra en la figura 4.6.

Cabe señalar, que por efecto de la desalineación de la prensa (efecto inevitable en el proceso) al momento de ejercer la presión máxima, los tubos terminaron curvándose a medida que ocurría la extrusión, problema que podría solucionarse a futuro fijando la prensa al suelo con un sistema de anclaje mas estable.



Figura 4.6. a) Tubos de 200 mm de largo y b) tubo concéntrico con diámetro interno 21 mm y externo 29 mm producidos por extrusión directa

4.2.1 Análisis metalográfico

Como ya se comprobó para el caso de extrusión inversa, los intermetálicos sin tratamiento térmico poseen una forma poliédrica pero que al ser sometidos a envejecimiento estos cambian a una forma más redondeada, es por esta razón, que para este caso de extrusión se analizaran solo muestras con tratamiento

térmico, a igual temperatura y tiempo que el aplicado en el caso de extrusión inversa.

En la figura 4.7 se observa que los intermetálicos son muy pequeños, incluso más pequeños que los obtenidos por extrusión inversa, lo cual ya es una buena proyección, pensando en que mientras menor es el tamaño y con una distribución más homogénea, mejoraran considerablemente las propiedades mecánicas.



Figura 4.7. Metalografía sin ataque químico de tubos obtenidos por extrusión directa con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas. 200x

En la figura 4.8 se pueden apreciar los intermetálicos distribuidos en la muestra, en la cual se observan en un mayor tamaño y mayor densidad en la zona interna y más pequeños y en menor cantidad en la zona externa, situación similar a la ocurrida en el caso de extrusión inversa, por lo que se puede inferir mayor deformación en la zona interna, razón por la cual, los granos también presentan una forma más alargada en dicha zona.



a) Borde interno. 100x

b) Borde externo. 100x

Figura 4.8. Metalografías de tubos obtenidos por extrusión directa con ataque químico y tratamiento térmico de 175°C por 8 horas.

Además, se observa muy poca recristalización en ambas zonas, situación que puede ser debido a que el proceso de conformado se realizó en estado semisólido (630°C), en comparación a proceso de extrusión inversa que se realizó a 580°C; por lo que la deformación efectiva del material, una vez enfriado, fue menor.

Tal como en el caso de extrusión inversa, al realizar el tratamiento térmico, los intermetálicos tienen a redondearse, situación que se repite en extrusión directa, tal como puede observarse en la figura 4.9.

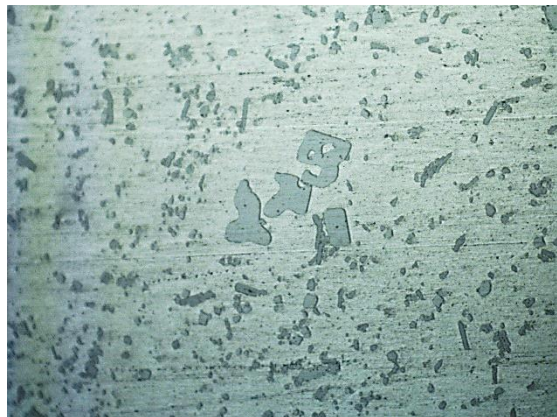


Figura 4.9. Metalografía de tubo obtenido por extrusión directa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas, sin ataque químico. 500x

Uno de los aspectos más importantes de la extrusión directa es la zona de soldadura. Para esto, hay que considerar que al unir dos superficies similares (del mismo material), estas se adhieren fuertemente. Lo anterior ocurre debido a que desde el punto de referencia de un átomo en el extremo del material, es imposible distinguir que los átomos que se están acercando están en una superficie distinta, por lo que la presión y temperatura favorecerán la difusión, generando una zona de alta densidad de intermetálicos (Richard Feynman), y por lo tanto, motivando la formación de granos equiaxiales, tal como se muestra en la figura 4.10.

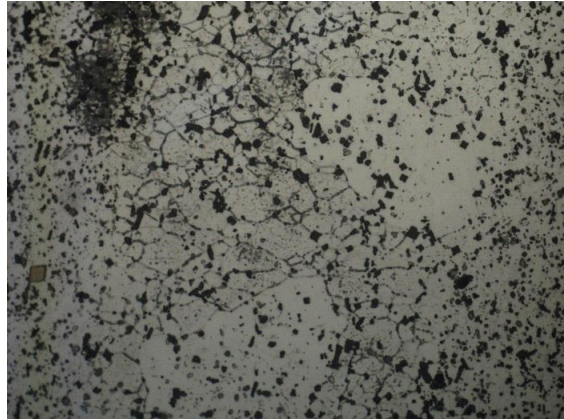


Figura 4.10. Metalografía de tubo obtenido por extrusión directa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas, con ataque químico, 500x

En la figura 4.11 se destaca la zona donde se observa que cercano a la soldadura existe una zona más clara, que permite inferir que se tiene una menor densidad de intermetálicos, lo que podría deberse a que por efecto de difusión, como se mencionó anteriormente, estos se acomodan en la zona de soldadura con el respectivo movimiento de átomos que permitirá obtener granos equiaxiales. Esta situación se puede analizar en mayor detalle al realizar el respectivo ataque químico.



Figura 4.11. Metalografía de zona de soldadura de tubo obtenido por extrusión directa, con tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas, con ataque químico, 50x

Tal como se observa en la figura 4.12, es evidente la existencia de la zona de soldadura marcada por un color más oscuro y rodeada de una zona más clara con menor concentración de intermetálicos. Esto se repite en las tres zonas de soldadura, generadas por los tres flujos de material. Además se puede observar la zona cercana a la soldadura, con un aumento de 500x, lo cual permite comprobar que efectivamente allí los granos tienen una forma poliédrica [19] debido a que es en esta zona donde hay un efecto de acomodamiento de los átomos por la temperatura y presión que se genera al unir los flujos en la cámara de soldadura.



Figura 4.12. Metalografía de tubo obtenido por extrusión directa, con ataque químico y tratamiento térmico de envejecido a 175°C por 8 horas. 100x.

4.2.2 Análisis SEM

Mediante microscopía electrónica de barrido con electrones retrodispersados, fue posible analizar en mayor detalle la zona de soldadura, identificando con mayor precisión su forma, además de la morfología y distribución de los intermetálicos presentes. Tal como se observa en la figura 4.13, la zona de soldadura se

evidencia en todo el espesor de la muestra. Es necesario identificar, además, qué fases se encuentran presentes en esta zona.



Figura 4.13. Imagen SEM de la zona de soldadura

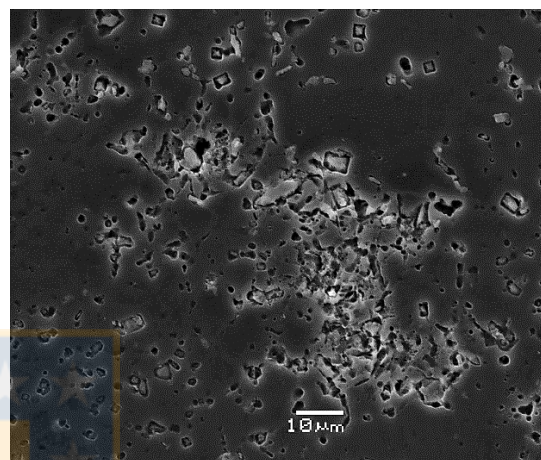


Figura 4.14. Intermetálicos y poros en zona de soldadura

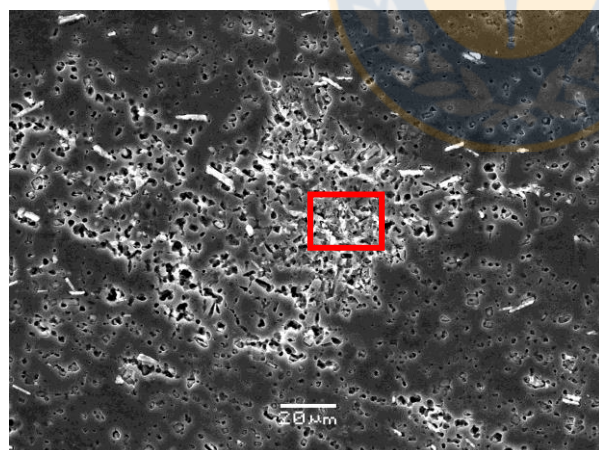
En la figura 4.14 se puede observar que los intermetálicos en la zona de soldadura están en una alta densidad. La morfología sugiere que efectivamente los intermetálicos cambiaron a una forma redondeada, tal como se planteó en las secciones anteriores, debido al tratamiento térmico aplicado. Esto último podría deberse a que antes de producirse la soldadura de dos flujos, los dos planos de contacto tienen una cierta distribución de intermetálicos en su interior y en la superficie. Entonces, al momento del contacto, por efecto de la compresión, en la zona de soldadura se tendrá la misma cantidad de intermetálicos pero distribuidos en una menor área, es decir, se produce un aumento en la concentración de intermetálicos en torno al plano de soldadura.

A pesar de esto, no se puede dejar de mencionar que la difusión atómica aumenta al incrementar la temperatura y la presión, lo que en este caso podría provocar la disolución de algunos precipitados y segundas fases, quedando el material en

un estado de equilibrio metaestable y explicando así la zona de baja concentración de intermetálicos cercana a la soldadura propiamente tal. Finalmente, no se descarta que dada la alta fragilidad de estos intermetálicos ricos en hierro [10], estos se fracturen durante la soldadura del material al interior de la matriz, dando origen a intermetálicos más pequeños.

Cabe señalar, que en la figura 4.15 se observan poros en la zona de soldadura, que probablemente, se formaron durante la preparación metalográfica de la muestra.

Se realizó un análisis químico a las fases presentes en la zona de soldadura (figura 4.14) mediante EDS, resultados presentados en la figura 4.15. Este método entrega una medición cualitativa de los elementos presentes, otorgando una aproximación de la composición química que poseen estas fases, lo que ayuda a comprobar que éstas corresponden a las establecidas en investigaciones anteriores [10,11].



%Al	%Si	%Fe	%Mg	%Ni
79,85	0,25	3,31	2,17	3,37

Figura 4.15. Análisis EDS en zona de soldadura, con composición química cualitativa en % en peso

Analizando una muestra mediante mapeo, se puede observar la distribución de los distintos elementos dentro de los intermetálicos y dentro de la matriz, tal como se observa en la figura 4.16.

En esta figura se puede observar que se tiene Al y Mg preferentemente en la matriz y que los intermetálicos presentes contienen Al, Fe y Mn. Esto da indicios de que las partículas corresponderían a la fase $Al_6(Fe,Mn)$. Cabe señalar, que el mapeo no alcanzó a captar el silicio presente en los bordes de los intermetálicos, debido a que el tiempo expuesto a esta lectura no fue lo suficiente, por lo que al agregar ese elemento se debería tener la fase $Al_x(Fe,Mn)_ySi$, debido a la precipitación por efecto del tratamiento térmico.

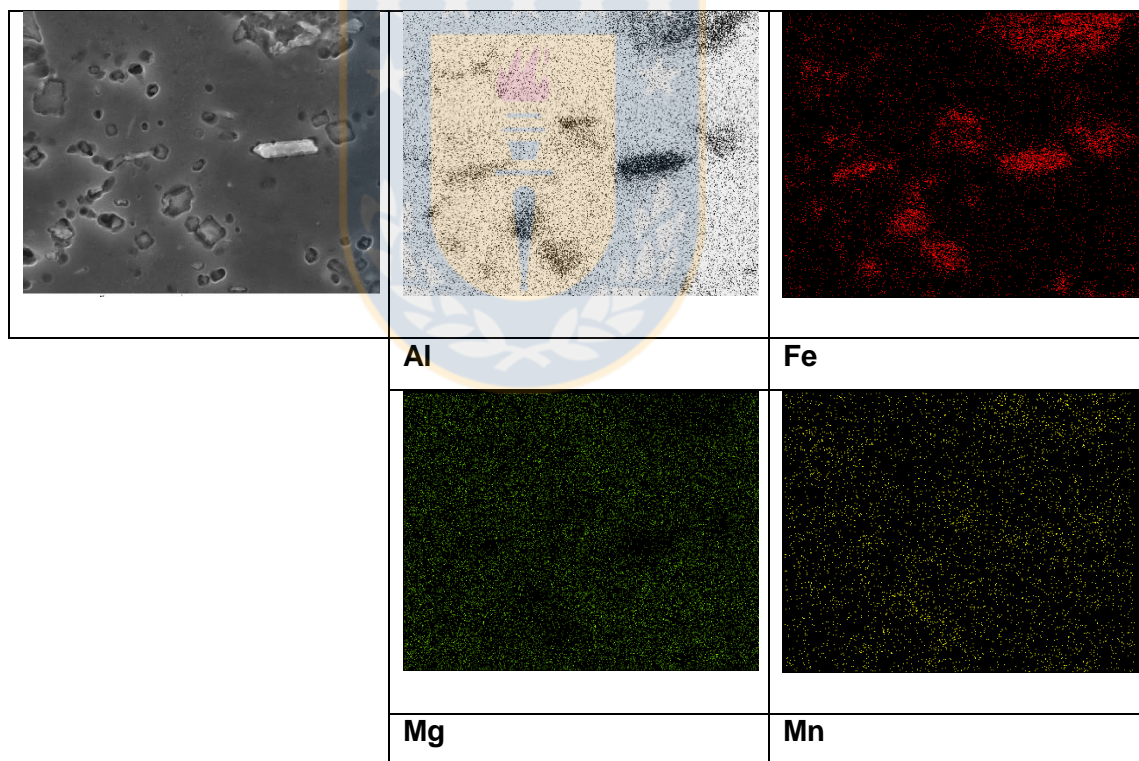


Figura 4.16. Distribución de elementos

4.2.3 Ensayo de tracción

Para asegurar que el proceso efectivamente produce un material con propiedades similares a las obtenidas en etapas previas, comparables con las de la aleación A6063 se realizó ensayo de tracción a dos tubos obtenidos por extrusión directa. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.2 y se comparan con la aleación A6063 (T4-T6) de tipo comercial. Cabe señalar que se obtuvo dos probetas por tubo, con resultados similares, por lo que el resultado presentado es un promedio de estas.

Muestras	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
A6063 (T4-T6)	90-170	150-220
Tubo 1	143	213
Tubo 2	150	233

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas de probetas de tracción de tubos obtenidos por extrusión directa con tratamiento térmico

Aquí se evidencia que tanto el esfuerzo de fluencia como la resistencia a la tracción del material permanece dentro del rango establecido para una aleación A6063, por lo tanto, el material cumple con los requerimientos necesarios y la zona de soldadura no afecta negativamente las propiedades del material. Los gráficos de tracción se presentan en el Anexo n°3.

CONCLUSIONES

A través de esta investigación, fue posible demostrar que al realizar extrusión inversa en caliente, considerando la fabricación del tocho mediante rheocasting y luego extrusión mediante thixoforming, se obtuvieron buenos resultados en cuanto a las propiedades mecánicas del material, similares a los obtenidos en investigaciones anteriores, por lo cual se observó que a nivel metalográfico, los intermetálicos logran fracturarse sin estar en estado semisólido y además, cambian a una morfología redondeada posterior al tratamiento térmico de envejecimiento, eliminando los concentradores de esfuerzo, causa por la cual los ensayos de tracción arrojaron resultados similares a los de la aleación de referencia AA6063.

De la misma forma, se logró demostrar que si se adapta el proceso para realizar extrusión directa con este Al-MMC, también se logra obtener resultados positivos y prometedores en comparación a investigaciones anteriores, por lo que se demostró que el proceso es factible para la fabricación de tubos, mediante thixoforming usando un sistema de extrusión a pequeña escala, obteniéndose tubos de hasta 350 mm.

A nivel microestructural, el material conserva las características descritas en trabajos anteriores, pero se analizó un concepto nuevo, la soldadura del material por efecto de los flujos en que se separa el tocho al momento de ser extruido. Dicha zona de soldadura, presentó una aglomeración de intermetálicos visibles en el microscopio óptico, pero sin afectar las propiedades del tubo obtenido.

Además, se logró diseñar un proceso de fácil implementación a nivel industrial, con un equipamiento básico y a pequeña escala, que no requiere gran inversión y con una complejidad mínima en la operación del proceso, por lo que puede ser atractivo para la industria.

Para lograr que el método sea totalmente aplicable a nivel industrial, sería ideal lograr un sistema de extrusión continuo, que permita introducir un tocho tras otro, permitiendo así producir tubos en grandes cantidades, empleando un menor tiempo.

Cabe señalar, que dentro de las complejidades que se enfrentaron, estuvo el hecho de que la capacidad de la prensa no fue suficiente, por lo que los rangos de temperatura de trabajo tuvieron que elevarse para lograr una adecuada soldadura del material. Una prensa de mayor tonelaje permitiría extruir en caliente en un rango de temperatura comúnmente usada en los procesos de extrusión de aluminio estructural, entre 450 y 580°C.



REFERENCIAS

- [1] Shackelford, J. and Güemes Gordo, A. (2007). Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Madrid: Pearson Educación, p.415.
- [2] After Green, J.A.S., Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability, ASM International, Inc., Materials Park, OH, 2007, p.35.
- [3] Schlesinger, M. (n.d.). Aluminum recycling; Cap:1 Introducción: Taylor & Francis Group (2007) Pág. 1-9.
- [4] Anir.cl. (2018). Metales | ANIR - Asociación Nacional de la Industria del Reciclaje A.G. [Online] Disponible en: <http://www.anir.cl/sector/metales> [Acceso 08 Julio. 2018]
- [5] World Economic Forum. (2016). We can recycle everything we use, including cigarette butts and toothbrushes. So why don't we?. [online] Available at: https://www.weforum.org/agenda/2016/10/we-can-recycle-everything-we-use-so-why-don-t-we?utm_content=bufferd3215&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer [Acceso: 24 Jul. 2018]
- [6] Oscar C. Vásquez. (2011). Gestión de residuos sólidos municipales en la ciudad del gran Santiago de Chile: Desafíos y oportunidades. Revista internacional de contaminación ambiental, 27(4), p.347-355.
- [7] Chilerecicla.gob.cl. (2018). La Ley – Chile Recicla. [online] Disponible en: http://chilerecicla.gob.cl/la_ley/ [Acceso 24 Octubre 2018].
- [8] C. Montalva. Obtención de un material compuesto de matriz metálica a partir de fusión de aluminio reciclado. Memoria de título Ing. civil de Materiales, Universidad de Concepción (2011).

- [9] Claudia Carrasco, Orlando Prat, Flavio Soldera, Sebastian Suárez. Study of the influence of operational variables in the microstructure and mechanical properties of an Al-MMC produced by a modified rheocasting process, Congreso Euromat, Sevilla, España (2013)
- [10] G. Inzunza (2013). Efecto del tratamiento térmico en la microestructura y propiedades mecánicas de un AL-MMC producido por fusión directa de latas de bebida (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [11] A. Candia. Diseño e implementación de un método para la fabricación de tubos de un material compuesto base aluminio obtenidos mediante rheocasting y extrusión inversa en caliente. Memoria de título Ing. civil de Materiales, Universidad de Concepción (2018).
- [12] M.C. Flemings, R.G. Riek, K.P. Young. Rheocasting, Materials science and engineering, 25 (1976) 103-117
- [13] B. Almeida, J. Miguel, E. Espinosa, D. Gustavo (2012). Diseño y construcción de un equipo para la extrusión directa, inversa y mixta, en frío de perfiles metálicos no ferrosos para el Laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM (Tesis de pregrado). Universidad de las fuerzas armadas, Ecuador.
- [14] Gerhard Hirt, Liudmila Khizhnyakova, Rene Baadjou, Frederik Knauf, and Reiner Kopp. Thixoforming: semi solid metal processing: Wiley-VCH, 2009 cap.1, semi solid forming of alluminium and Steel – introduction and overview, pag 2.
- [15] J. Valer, J.M. Rodriguez, J.J. Urcola. (1996). Conformado de aleaciones en estado semisólido. Aplicación a aleaciones hipereutécticas de Al-Si. Revista de metalurgia (Madrid), 32(4), pp.231-247
- [16] Fabiola Pineda, Oscar Bustos. (2010) Proceso de conformado metálico en estado semisólido. Revista Remetallica, 30(18), pp.46-53
- [17] Conformado de Metales. (1995). Concepción: Carlos Camurri, pp.53-83

[18] H.H. Jo, S.K. Lee, S.B. Lee, B.M. Kim. (2001) Prediction of welding pressure in the non-steady state porthole die extrusion of Al7003 tubes. International journal of machine tools & manufacture. 22(2002), pp. 753-759

[19] A.J. den Bakker, R.J. Werkhoven, W.H. Sillenkens, L. Katgermann. (2014). The origin of weld seam defects related to metal flow in the hot extrusion of aluminium alloys EN AW-6060 and EN AW-6082. Journal of materials processing technology. 214(2014), pp. 2349-2358.



Anexo n°1: Hoja de control utilizada en el proceso

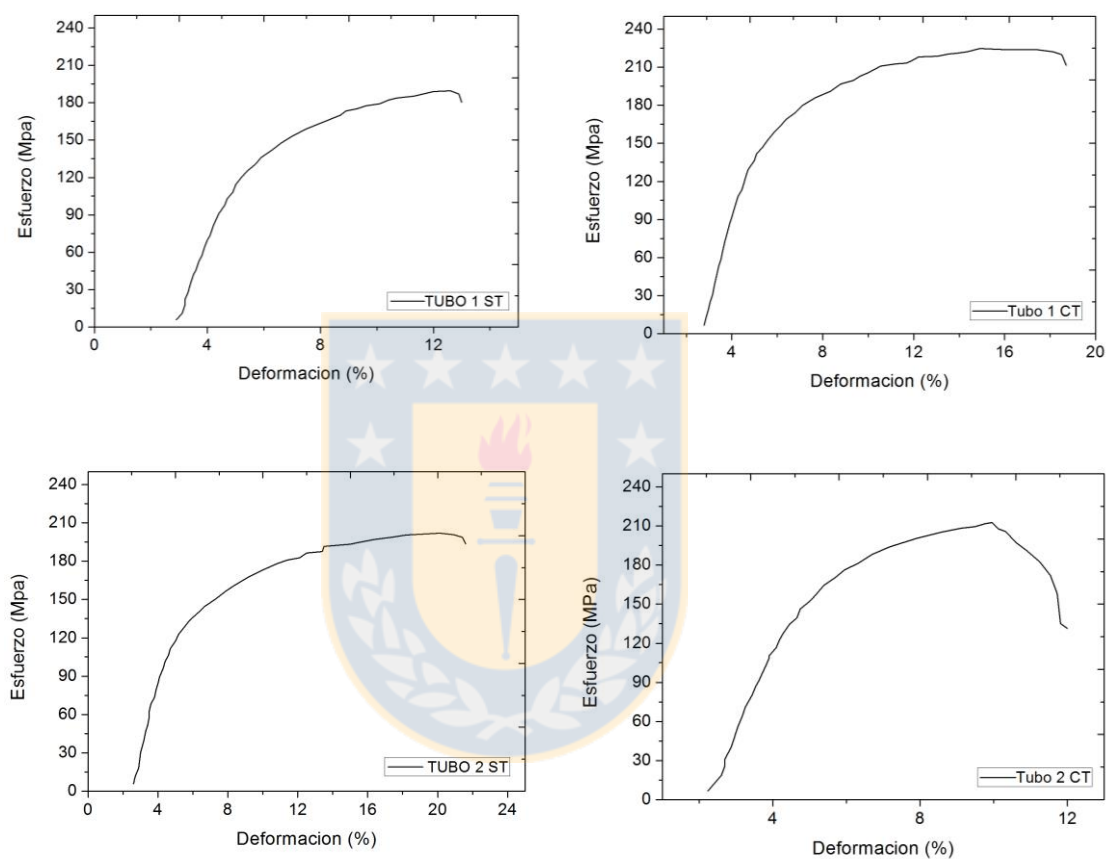
FICHA FUNDICIONES DE ALUMINIO			
N° Fundición			Fecha

FUSIÓN			
Tipo de crisol			Diámetro crisol
Peso a fundir			
T° Inicial agitador			T° Final agitador
Velocidad agitador			Tiempo
Hora inicio			Hora final
Altura tocho			Diámetro tocho

EXTRUSIÓN			
Temperatura			Largo
Fuerza			Diámetro
			Espesor

OBSERVACIONES			

Anexo n°2: Gráficos ensayo de tracción de tubos por extrusión inversa



Anexo n°3: Gráficos ensayo de tracción de tubos por extrusión directa

