



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL UNIDAD SALTILLO**

**“Efecto del tratamiento térmico de homogenizado sobre el
comportamiento en conformado mecánico de aleaciones Al-Zn-Mg-Mn
obtenidas por reducción aluminotérmica de mezclas de polvos de
electrodos de baterías alcalinas descargadas”**

Tesis que presenta
Ing. Juan Carlos Rodríguez Tovar

Para obtener Grado de:
Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica

Asesor:
Dr. Jesús Torres Torres

Co-Asesor:
Dr. Alfredo Flores Valdez

Ramos Arizpe, Coahuila. 2021.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

El trabajo, esfuerzo y dedicación se ven reflejados en el triunfo anhelado durante estos dos años, todo esto se lo debo principalmente a dios, por darme el don de la perseverancia, sabiduría y entendimiento, guiándome por el buen camino y ayudándome en cualquier adversidad que se me presento.

De esta manera puedo agradecerle a mi familia, padres y hermanos que me enseñaron el verdadero sentido de la superación personal y profesional, gracias por todo familia, la mayor parte de este triunfo es gracias a ustedes, que siempre confiaron y pusieron cualquier esperanza en mí.

A los doctores del centro de investigación que día a día nos motivaron para seguir adelante y buscar siempre el éxito tanto personal como profesional, nunca me dieron la espalda y siempre estuvieron a disposición a cualquier duda presentada.

Compañeros y amigos, que a pesar de las adversidades logramos permanecer unidos, estando en los momentos de éxito y en momentos de fracaso, gracias por el apoyo, paciencia y entendimiento mostrado hacia mí.

AGRADECIMIENTOS OFICIALES

Agradecer al centro de investigación y estudios avanzados del instituto politécnico nacional CINVESTAV unidad saltillo, departamento de posgrado en metalurgia y a todo el personal que integra toda esta institución.

Agradezco a la dirección general del CINVESTAV por el apoyo brindado para la realización de esta tesis, la cual forma parte del proyecto FidSC2018/227 del fondo de investigación SEP-CINVESTAV.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis amigos y tutores de tesis, doctor Jesus Torres Torres y al doctor Alfredo Flores, por el apoyo brindado durante el proyecto de tesis y hacer posible el mismo.

A la dirección general y doctor Francisco García Pastor, por todo el apoyo durante el programa de la maestría, así como el apoyo para la gestión de la beca Conacyt.

A todos los doctores que durante el programa de la maestría nos brindaron el estudio necesario para poder realizar este proceso y tener crecimiento profesional que hoy en día me siento capaz de ir más allá en mi ahora trabajo como ingeniero de calidad y manufactura acería en la empresa DeAcero.

Al consejo Nacional de ciencia y tecnología (CONACyT-México) le agradezco la beca recibida durante la maestría.

Al resto de los miembros del jurado de corrección de tesis y examen de grado, Dr. Escobedo, Dra. Rocío Saldaña, les agradezco profundamente su tiempo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
INTRODUCCIÓN	vii
OBJETIVO.....	1
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
JUSTIFICACIÓN	2
I. ANTECEDENTES.....	3
1.1 Reciclaje del aluminio.....	3
1.2 Reciclaje de latas de aluminio.....	3
1.3 Aluminio.....	5
1.3.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio.....	5
1.4 . Solidificación en aleaciones de aluminio.....	7
1.4.1 Efecto de los elementos aleantes.....	8
1.5 Baterías alcalinas.....	10
1.5.1 Tecnologías aplicadas para el manejo de pilas y baterías.....	11
1.6 . Reducción aluminotérmica.....	14
1.7 Tratamientos térmicos de aleaciones de aluminio.....	16
1.7.1 Homogenización.....	17
1.7.2 Temple.....	17
1.7.3 Envejecimiento por precipitación.....	18
1.8 Aleaciones Al-Zn-Mg-Mn.....	19
1.9 Tratamiento térmico de aleaciones Al-Zn-Mg-Mn.....	20
1.10 Conformado mecánico de aleaciones Al-Zn-Mg-Mn.....	21
1.10.1 Carga de laminación.....	23
1.10.2 Velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$	25
1.10.3 Efecto de la velocidad de deformación en la laminación en caliente.....	25
II. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	27
2.1 Material y equipo.....	27
2.2 Diseño experimental.....	28

2.3	. Metodología experimental.....	30
2.3.1	Fusión de aluminio reciclado (latas para bebidas).	31
2.3.2	Obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn por reducción aluminotérmica.....	31
2.3.3	Tratamiento térmico de homogenizado.	32
2.4	. Técnicas experimentales.	32
2.4.1	Espectrofotometría de emisión por chispa.	32
2.4.2	Microscopio óptico.....	33
2.4.3	Microscopio electrónico de barrido.....	33
2.4.4	Ensayo de dureza Brinell.....	33
2.4.5	Ensayo de tensión.....	34
2.5	. Conformado mecánico.	34
2.5.1	Carga de laminación para obtención de solera.	36
III.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
3.1	Caracterización de masa negra.....	37
3.2	Obtención de aleación a partir de aluminio reciclado.	38
3.3	. Obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.....	39
3.3.1	Microestructura y morfología de la aleación Al-Zn-Mn en estado de colada.	39
3.4	Tratamiento térmico de homogenizado.....	41
3.4.1	Caracterización de muestras mediante microscopio óptico.....	41
3.4.2	Caracterización de muestras mediante microscopio electrónico de barrido.....	43
3.5	. Ensayo de dureza Brinell.....	45
3.6	Ensayo de tensión.....	46
3.7	Carga de laminación.....	49
3.8	Conformado mecánico.	50
3.9	. Caracterización de microestructura de muestras obtenidas por laminación en caliente mediante microscopio óptico.	52
3.10	Velocidad de deformación.	54
IV.	CONCLUSIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de vida de una lata de aluminio. El proceso de extracción se produce en tres pasos: la extracción de la bauxita, la refinación de alúmina, y la fundición primaria. Los demás pasos se aplican tanto al aluminio extraído como al reciclado. [4]	5
Figura 2. Diseño de una pila alcalina	11
Figura 3. Diagrama del mecanismo de reducción aluminotérmica del óxido de zinc por aluminio fundido.	15
Figura 4. Diagrama del mecanismo de reducción aluminotérmica del trióxido de Mn por aluminio fundido.	16
Figura 5. Fuerza perpendicular del rodillo. [23]	22
Figura 6. Longitud de contacto del rodillo con la lámina, indicada del punto "A" al "B" y "R" siendo el radio del rodillo.	24
Figura 7. Evolución de la microestructura durante el proceso de laminación.	26
Figura 8. Microestructura de aleación Al-Zn-Mn en estado de colada mediante microscopio óptico a 1000x a) y 500x b). 1: β-Al₆(Mn,Fe), 2: Al(Fe,Mn)Si	40
Figura 9. Microestructura tomada en MEB de aleación Al-Zn-Mn en estado de colada. 1: β-Al₆(Mn,Fe), 2: Al(FeMn)Si, 3: Al-Zn-Mg	41
Figura 10. Evolución de la microestructura de tratamiento de homogenizado a 530°C con tiempos de 4, 6 y 8hr a 500x	42
Figura 11. Evolución de la microestructura de tratamiento de homogenizado a 550°C con tiempos de 4, 6 y 8hr a 500x	42
Figura 12. Evolución de la microestructura de tratamiento de homogenizado a 570°C con tiempos de 4, 6 y 8hr a 500x	43
Figura 13. Evolución de la microestructura con tratamiento térmico de homogenizado mediante MEB. a) 530°C a 8hr, b) 550°C a 8hr y c) 570°C a 8hr	44
Figura 14. Espectros EDS de las fases que se encuentran presentes en la figura 15, a) 530°C a 8hr b) 550°C a 8hr c) 570°C a 8hr.	44
Figura 15. Curva esfuerzo-deformación de la aleación Al-Zn-Mn a 530°C de homogenizado a 4, 8hr de permanencia y estado de colada	47
Figura 16. Grafica esfuerzo-deformación de la aleación Al-Zn-Mn a 550°C de homogenizado a 4, 6, 8hr y estado de colada	48
Figura 17. Grafica esfuerzo-deformación de la aleación Al-Zn-Mn a 570°C de homogenizado a 4, 6, 8hr y estado de colada	49
Figura 18. Esquema del proceso de obtención de una probeta laminada	52
Figura 19. Evolución del límite de grano de la aleación Al-Zn-Mn en el proceso de laminación en caliente. a) Pieza sin deformar b) pieza laminada a 395°C, 8rpm, 30% de deformación, longitudinal	53
Figura 20. a) Probeta laminada a 395°C, 30% reducción a 12rpm. b) probeta laminada a 395°C, 30% de reducción a 5rpm. 1000x	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química (%en peso) de las diferentes aleaciones en una lata de aluminio.....	4
Tabla 2. Composición en (%wt) aproximado de la pila alcalina.	11
Tabla 3. Parámetros de tratamientos térmicos "T" para aleaciones de aluminio.	19
Tabla 4. Composición química, wt% de la aleación 707.0.....	20
Tabla 5. Rangos de deformación real y velocidades de deformación en procesos de conformado.	25
Tabla 6. Niveles de diseño experimental.	28
Tabla 7. Diseño de experimentos.	29
Tabla 8. Niveles de diseño experimental, segunda etapa	29
Tabla 9. Diseño de experimentos, segunda etapa.	30
Tabla 10. Dimensiones de probeta rectangular para ensayo de tensión para 1/4in.[26]	34
Tabla 11. Análisis químico cuantitativo de la masa negra.	37
Tabla 12. Composición química de aleación obtenida a partir de latas de aluminio.	38
Tabla 13. Composición química de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.	39
Tabla 14. Resultados de dureza después del tratamiento térmico de homogenizado.	45
Tabla 15. Resultados del ensayo de tensión de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.....	46
Tabla 16. Carga de laminación.	50
Tabla 17. Resultados de la reducción final de probetas de laminación.....	51
Tabla 18. Velocidad de deformación.	55

RESUMEN

La reserva de metales en el mundo es limitada y aunando que la producción de aluminio requiere gran consumo de energía y genera desechos contaminantes, una gran opción para resolver este problema es el proceso de reciclaje, que consiste en volver a fundir los componentes fabricados de aluminio y sus aleaciones una vez que hayan cumplido su función. Para este caso de estudio, los procesos de reciclaje utilizados son los envases de aluminio y pilas alcalinas descargadas, en donde, a partir de los componentes de los electrodos (ZnO y Mn_2O_3) se pueden incorporar tanto Zn como Mn metálico, utilizando el proceso de reducción aluminotérmica, con el fin de producir aleaciones Al-Zn-Mg-Mn. Posteriormente esta aleación se somete a tratamiento térmico de homogenización con el fin de obtener fases dúctiles, ya que en la estructura de colada se precipitan fases que provocan fragilidad del material. Se determina el tratamiento térmico de homogenización ($570^{\circ}C$), el cual influye tanto en la resistencia a la tensión como en la ductilidad, con el fin de llevar a cabo deformación de la aleación mediante laminación en caliente para evaluar la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas al final del proceso. Para tal efecto, también se llevan a cabo ensayos de tensión y de dureza.

ABSTRACT

The reserve of metals in the world is limited and even though aluminum production requires high energy consumption and generates polluting waste, a great option to solve this problem is the recycling process, which consists in re-melting the components made of aluminum and its alloys once they have completed their function. For this case of study, the recycling processes used are the aluminum containers and discharged alkaline batteries, where Zn and Mn can be incorporated from the electrode components (ZnO and Mn_2O_3), using the process of aluminothermic reduction, in order to produce Al-Zn-Mn alloys. Subsequently, this alloy will be evaluated applying heat treatment (750°C) and mechanical tests to relate its microstructure to the mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

En 1886, Paul Heroult y Charles Hall desarrollaron un proceso electrolítico para la extracción del aluminio, descubrieron que cuando pasa una corriente a través de una criolita fundida que contiene Al_2O_3 disuelto a 1000°C , el aluminio se deposita en un cátodo y el dióxido de carbono que se libera en un ánodo de carbono. Con el desarrollo de este proceso junto con el proceso de Josef Bayer, que produjo alúmina mediante la reducción de AlCl_3 con sodio, lo cual dio como resultado el proceso para la producción moderna del aluminio.

El aluminio, metal no ferroso, se extrae de la bauxita, se puede encontrar en el 8% de compuestos que contengan aluminio sobre la corteza terrestre, este metal posee propiedades como alta resistencia a la corrosión y baja densidad, que lo hacen aplicable tanto en la industria como en la vida diaria. Este metal posee una combinación de propiedades muy útil mediante aleaciones adecuadas. La reserva de metales en el mundo es limitada y aunando que la producción de extracción del aluminio requiere energía y genera desechos contaminantes, una gran opción para resolver este problema es el proceso de reciclaje, que consiste en volver a fundir los componentes fabricados de aluminio y sus aleaciones una vez que hayan cumplido su función y sean convertidos en chatarra.

Para este caso de estudio, se llevara a cabo el reciclaje latas de aluminio, que se aprovechará para la fabricación de aleaciones Al-Zn-Mg-Mn. En este proceso se requiere el ajuste de composición química, el cual puede lograrse gracias a otro proceso sustentable, el reciclaje de pilas alcalinas descargadas que, gracias a los componentes de estas, se puede incorporar Zn y Mn metálico a la aleación líquida (obtenida de la fusión de las latas para bebida), a partir de los electrodos (ZnO y MnO_2), utilizando el proceso de reducción aluminotérmica de óxidos. Aplicando la combinación de ambos procesos se logra el mayor ahorro posible, tanto en costos de producción, como disminución en contaminación, ya que actualmente el proceso de reciclaje de las baterías alcalinas descargadas es muy poco usual y ocasionaría mejor impacto en la sociedad y menor deterioro del medio ambiente.

En este proyecto se estudia el comportamiento de la masa negra (combinación de ambos polvos, ZnO y Mn_2O_3) durante la reducción aluminotérmica para producir aleaciones Al-Zn-Mn y posteriormente deformar mediante el proceso de laminación en caliente para

evaluar la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas al final del proceso de laminación.

OBJETIVO

Llevar a cabo el análisis de la relación que existe entre la microestructura y las propiedades mecánicas de aleaciones Al-Zn-Mg-Mn, obtenidas por reducción aluminotérmica de polvos de ZnO y Mn₂O₃ (ánodo y cátodo de baterías alcalinas descargadas), en estado de colada y después de tratamiento térmico, con el fin de evaluar su efecto sobre el comportamiento de la aleación durante su deformación en laminación en caliente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener una aleación de Al-Zn-Mg-Mn por el método de reducción aluminotérmica a partir de material reciclado de latas de aluminio y polvos de masa negra (ZnO y Mn₂O₃) obtenida de baterías alcalinas descargadas.
- Determinar el efecto de la temperatura y el tiempo de homogenizado, en la microestructura de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.
- Determinar el efecto del tratamiento de homogenizado y envejecido sobre la microestructura y propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción, resistencia a la cedencia, porcentaje de elongación y dureza, con el fin de relacionar estas propiedades mecánicas con el comportamiento en el conformado mecánico.

JUSTIFICACIÓN

El aluminio es el tercer elemento y el metal más abundante en la corteza terrestre, cuesta más extraerlo que algunos metales menos abundantes debido al costo de extraer el metal de los depósitos naturales. Debido a sus propiedades mecánicas como la alta resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y térmica, ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones, tanto domésticas como automotrices e industriales, todo esto siendo factible con las diferentes aleaciones que se obtienen al alear el aluminio. Un impacto que está tomando forma estos últimos años es el reciclaje del aluminio, además de que ayuda al medio ambiente, es un proceso que resulta ser mucho menos costoso que la extracción del metal desde el depósito natural, el cual ahorra un 95% de energía requerida, reciclar 1 kg de Al resulta en el ahorro de 8 kg de bauxita, 4 kg de productos químicos y 14 kWh de electricidad.

Este proceso de reciclaje también ayuda a la producción de aleaciones para ahorrar energía y costos, por ejemplo, uno de los usos más comunes del aluminio y sus aleaciones es fabricar envases de bebidas, los cuales son altamente reciclables. La producción de nuevas aleaciones puede ser factible con este tipo de envases y agregando elementos de aleación que provengan de otro proceso de reciclaje, lo cual dará como resultado un proceso sustentable y disminuirá los costos de producción.

El proceso de reciclaje de baterías alcalinas descargadas, las cuales tienen aproximadamente un 25% de ZnO y un 40% de Mn₂O₃ en peso, utiliza la reducción aluminotérmica o metalotérmica (el aluminio líquido de las latas para bebida se usa como agente reductor), incorporando Zn y Mn metálico en la aleación líquida.

I. ANTECEDENTES.

1.1 Reciclaje del aluminio.

El reciclaje de aluminio implica la recolección de chatarra, la separación de otros materiales como plásticos u otros metales, para luego fundirla y vaciarla en una forma que pueda servir como insumo en procesos subsecuentes. Las fuentes de reciclaje de aluminio vienen generadas de dos sectores inmersos en el reciclaje del aluminio, la chatarra generada por las plantas industriales (fundiciones, conformado mecánico, maquinado, etc.) y la chatarra reciclada de procesos de recolección [1].

Al igual que ocurre con el acero, el reciclado del aluminio necesita de recolección y separación selectiva de chatarra, lo cual se lleva a cabo en una planta de clasificación. Aquí es separado del resto de materiales mediante un separador de Foucault, sistema que utiliza campos magnéticos y desvía el aluminio aparte, separándolo de los otros tipos de envases. A partir de aquí, el aluminio se empaqueta y es transportado a un centro de reciclado. Se realizan una serie de procesos destinados a conseguir que el aluminio pueda ser devuelto al ciclo del mercado [2, 3]:

1. Triturado y eliminación de impurezas del aluminio
2. Lavado y secado para eliminar restos orgánicos y humedad
3. Se introducen las virutas de aluminio en un horno de reverbero donde se funde y se forman lingotes o láminas.
4. Fabricación de nuevos productos.

1.2 Reciclaje de latas de aluminio.

Las latas de aluminio han incrementado su tendencia de uso, ya sea por sus diferentes cualidades y características en materia de seguridad, durabilidad y protección de los productos o por la elevada conciencia ambiental que conlleva a los usuarios hacia una más rápida adopción y preferencia de estos envases. Las latas de aluminio son consideradas como los envases ecológicos por excelencia, gracias a que es 100 por ciento reciclable indefinidamente sin perder sus características. A pesar de que la producción de envases metálicos ha experimentado avances significativos en la reducción del uso de materias primas y energía (lo que ha disminuido su impacto sobre el medio ambiente y producción

de residuos), aún genera unos costos ambientales importantes derivados de todas las etapas del proceso productivo: extracción de materias primas, procesamiento, fabricación de envases, proceso de envasado o llenado y distribución y venta, como se representa en la Figura 1[4].

Las latas de aluminio se reciben de los centros de recolección en grandes cantidades, se trituran para garantizar que ningún líquido atrapado o material extraño llegue a la fundición y cause daños graves. Desde la trituradora, el material pasa a través de un separador magnético que elimina los contaminantes ferrosos y a través de una cuchilla de aire que separa los materiales ferrosos, no ferrosos y materiales no magnéticos más densos, como el plomo, el zinc, el acero inoxidable y el hierro con alto contenido de níquel.

Cuando llegan de la industria recicladora y las latas se encuentran trituradas, se funden, vacían y se someten a conformado mecánico para obtener una nueva lámina con la que se hacen nuevas latas de aluminio. Más del 95% de las latas de aluminio recicladas vuelven a este proceso, formando un producto de material reciclado de circuito cerrado (Figura 1).

Las latas se fabrican a partir de tres aleaciones, las cuales se ubican en el cuerpo (3004), el anillo de apertura (5182) y la tapa del envase (5052). La diferencia entre estas aleaciones, cuya composición química está definida por la norma ASTM B209, radica en su contenido de elementos aleantes en donde la 3004 cuenta con alto contenido de manganeso y bajo contenido de magnesio, a comparación de la 5052 y 5182 que poseen altos niveles de magnesio (Tabla 1) [5].

Tabla 1. Composición química (%en peso) de las diferentes aleaciones en una lata de aluminio.

Lata	Aleación	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Otros	Al
Cuerpo	3004	0.8-1.3	0.20	1.0-1.5	0.7	0.25	0.25	...	resto
Anillo	5182	4-5	0.20	0.10	0.10	0.2-0.5	0.35	0.15	0.25	...	resto
Tapa	5052	2.2-2.8	0.25	...	0.15-0.35	0.10	0.4	0.10	0.10	...	resto



Figura 1. Ciclo de vida de una lata de aluminio. El proceso de extracción se produce en tres pasos: la extracción de la bauxita, la refinación de alúmina, y la fundición primaria. Los demás pasos se aplican tanto al aluminio extraído como al reciclado [4].

1.3 Aluminio.

En la naturaleza, el aluminio no se encuentra como metal debido a la alta afinidad química por el oxígeno. Los compuestos de aluminio, principalmente el óxido, que presenta diversas purzas e hidratación, están ampliamente distribuidos en la naturaleza. Aunque el aluminio es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre, cualquier depósito de mineral utilizable debe ser fácilmente beneficioso, de modo que se pueda obtener un óxido de aluminio puro. Las propiedades únicas del aluminio son, su peso ligero, alta resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, lo convierten en un material ideal para su uso en aplicaciones convencionales y novedosas [6].

1.3.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio

Se han desarrollado nomenclaturas de aleaciones fundidas y forjadas. El sistema de la Asociación de Aluminio es el más ampliamente reconocido en los Estados Unidos. Su sistema de identificación de aleaciones emplea diferentes nomenclaturas para aleaciones forjadas y fundidas. Para aleaciones forjadas se utiliza un sistema de cuatro dígitos para producir una lista de familias de composiciones, de la siguiente manera [7]:

- 1xxx Composiciones sin mezcla controladas (puras)
- 2xxx Aleaciones en las que el cobre es el principal elemento de aleación, aunque se pueden especificar otros elementos, especialmente el magnesio

- 3xxx Aleaciones en las que el manganeso es el principal elemento de aleación
- 4xxx Aleaciones en las cuales el silicio es el principal elemento de aleación.
- 5xxx Aleaciones en las que el magnesio es el principal elemento de aleación
- 6xxx Aleaciones en las que el magnesio y el silicio son los principales elementos de aleación.
- 7xxx Aleaciones en las que el zinc es el principal elemento de aleación, pero se pueden especificar otros elementos como cobre, magnesio, cromo y circonio
- 8xxx Aleaciones que incluyen estaño y algunas composiciones de litio que caracterizan composiciones diversas
- 9xxx Reservado para uso futuro.

Por otro lado, las aleaciones vaciadas se describen mediante un sistema de tres dígitos seguido de un valor decimal. El decimal .0 en todos los casos corresponde a los límites de aleación de fundición. Los decimales .1, y .2 se refieren a composiciones de lingotes, que después de la fusión y el procesamiento deben dar lugar a productos químicos que se ajusten a los requisitos de la especificación de colada. Las familias de aleaciones vaciadas son [7]:

- 1xx.x Composiciones sin mezcla controladas (puras), especialmente para la fabricación de rotores
- 2xx.x Aleaciones en las que el cobre es el principal elemento de aleación, pero se pueden especificar otros elementos de aleación
- 3xx.x Aleaciones en las que el silicio es el principal elemento de aleación, pero se especifican otros elementos de aleación como el cobre y el magnesio
- 4xx.x Aleaciones en las que el principal elemento de aleación es el silicio.
- 5xx.x Aleaciones en las que el magnesio es el principal elemento de aleación
- 6xx.x sin usar
- 7xx.x Aleaciones en las que el zinc es el principal elemento de aleación, pero se pueden especificar otros elementos de aleación como el cobre y el magnesio
- 8xx.x Aleaciones en las cuales el estaño es el principal elemento de aleación
- 9xx.x sin usar

1.4 Solidificación en aleaciones de aluminio

La nucleación y el crecimiento de las dendritas primarias de aluminio, es algo fundamental en la mayoría de las propiedades de interés práctico de las aleaciones de aluminio. El refinamiento de la estructura dendrítica se obtiene mediante la nucleación heterogénea de la fase de aluminio α . En la práctica de fundición de metales esto se realiza principalmente mediante la adición de refinadores de grano, lo cual proporciona núcleos estables a la temperatura líquida de la aleación. Los refinadores de grano más comunes son elementos como titanio y boro. Cuando se agrega más de 0.15% de titanio a la aleación de aluminio, se forma Al_3Ti y sirve como sitio de nucleación heterogénea. Si también se agrega boro, los boruros complejos $(Al, Ti) B_2$, también sirven como núcleos [8].

Un rasgo característico del proceso de fusión de lingotes de aluminio y sus aleaciones mediante un método semi-continuo, es que los parámetros de solidificación que influyen en la microestructura final, no son constantes en todo el espesor del lingote o pieza fundida, es decir, cada volumen elemental del metal fundido se solidifica con diferente velocidad. Su magnitud depende de los parámetros utilizados en el proceso de fusión, por ejemplo, la temperatura del metal líquido, la velocidad de vaciado, velocidad de enfriamiento, dimensiones y espesor de la pieza, etc. Lo anterior significa que este fenómeno es crítico en el caso de la fusión y vaciado de lingotes en grandes secciones transversales rectangulares, que se utilizan como materia prima para fabricar productos laminados [9].

La adición de elementos aleantes en la fusión de Al y sus aleaciones influyen en el comportamiento durante la solidificación, precipitación de fases y la microestructura. Un problema que puede originarse de las adiciones al aluminio líquido, es la precipitación de partículas perjudiciales o no deseada durante la solidificación o tan pronto como la temperatura comience a disminuir. Por ejemplo, Mn tiene solubilidad en estado sólido limitada de Al de 1.8% en peso, y esta solubilidad disminuye cuando se agregan otros elementos de aleación como Fe, Si y Cu. Esto normalmente da como resultado la precipitación de compuestos intermetálicos complejos con diferentes morfologías y tamaños.

1.4.1 Efecto de los elementos aleantes.

Silicio.

El efecto más notable del silicio en el aluminio es mejorar las características del metal líquido mejorando la fluidez, la resistencia al agrietamiento en caliente y las características de la alimentación de las piezas fundidas. Las adiciones de silicio disminuyen la densidad y el coeficiente de expansión térmica. Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica, ya que forma el intermetálico Mg_2Si .

Cobre.

El cobre mejora sustancialmente la resistencia y la dureza en las condiciones de tratamiento térmico. Las aleaciones que contienen 4 a 5.5% de Cu responden con mayor fuerza al tratamiento térmico y muestran propiedades de colada relativamente mejoradas. El cobre generalmente reduce la resistencia a la corrosión. Por el contrario, bajas concentraciones de cobre en las aleaciones de aluminio y zinc inhiben la corrosión por estrés. El cobre reduce la resistencia a la fragilidad en caliente y aumenta el potencial de contracción interdendrítica.

Hierro.

La adición de este elemento mejora la resistencia a la fragilidad en caliente y disminuye la tendencia a la adhesión o troquelado en la fundición a presión. Los aumentos en el contenido de hierro están acompañados por una ductilidad sustancialmente disminuida. El hierro reacciona para formar una serie de fases intermetálicas, las más comunes son AlFe, AlFeMn y AlFeSi. Estas fases esencialmente insolubles son responsables de las mejoras en la resistencia, especialmente a temperatura elevada, pero también de la fragilidad de la microestructura.

Durante el reciclado de aleaciones de aluminio se presenta un incremento del contenido de Fe a un nivel de 0.4 a 0.8% en peso. Esta concentración es suficiente para permitir la formación de placas altamente facetadas de las fases $\beta-Al_5FeSi$ o $\alpha-Al_6(Fe,Mn)$, las cuales pueden degradar gravemente las propiedades mecánicas (por ejemplo, resistencia a la fatiga y la ductilidad). Dichos compuestos incluyen $Al_6(Mn, Fe)$ y $\alpha-Al_{15}(Mn, Fe)_3Si_2$ [10].

Magnesio.

El magnesio es la base para el desarrollo de la dureza y la resistencia en aleaciones de aluminio y silicio tratadas térmicamente y se utiliza comúnmente en aleaciones de aluminio-silicio más complejas que contienen cobre y níquel con el mismo propósito. El Mg_2Si provoca endurecimiento hasta un límite útil correspondiente a aproximadamente 0.70% de Mg, más allá del cual no se produce un endurecimiento adicional o se produce un ablandamiento de la matriz. Las aleaciones binarias de aluminio y magnesio son ampliamente utilizadas en aplicaciones que requieren un acabado superficial brillante, excelente respuesta al acabado químico, resistencia a la corrosión y atractivas combinaciones de resistencia y ductilidad. Las composiciones comunes varían de 4 a 10% de Mg, las composiciones que contienen más de 7% de Mg son tratables térmicamente. La inestabilidad y el envejecimiento a temperatura ambiente a largo plazo a concentraciones más altas de magnesio pueden evitarse mediante tratamiento térmico.

Manganeso.

Incrementa la resistencia mecánica sea por solución sólida o por finos precipitados intermetálicos. No altera la resistencia a la corrosión. Se usa en la fundición para corregir la forma acicular de los precipitados ricos en hierro y disminuir su efecto fragilizante, aunque promueve una estructura fibrosa en los lingotes. En forma de precipitados finos previene el crecimiento del grano en la recristalización. Incrementa la sensibilidad al agrietamiento de las aleaciones tratables térmicamente.

Zinc.

La adición de este elemento acompañado de cobre y/o magnesio, resulta en aleaciones tratables térmicamente o que envejecen naturalmente. Varias de estas aleaciones son de uso común. La adición de cobre al sistema de aluminio-zinc-magnesio, junto con pequeñas pero importantes cantidades de cromo y manganeso, produce las aleaciones base aluminio de mayor resistencia disponibles comercialmente [13].

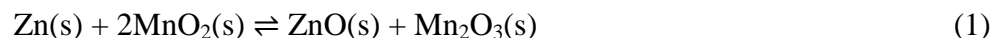
1.5 Baterías alcalinas.

Es un dispositivo que convierte energía química en energía eléctrica por un proceso químico transitorio, Figura 2. Para producir una corriente eléctrica a partir de una reacción química, es necesario tener un oxidante y un reductor. Dicha reacción química es la resultante de 2 reacciones parciales, en las cuales un elemento químico es elevado a un estado de oxidación superior, a la vez que otro elemento es reducido a un estado de oxidación inferior, dando resultado la ecuación 1 [11].

Las baterías alcalinas están formadas por tres componentes principales:

1. El ánodo o electrodo negativo: Zn(s)
2. El cátodo o el electrodo positivo: MnO₂(s)
3. El electrolito, básico, contiene KOH

La reacción global que se presenta está dada por:



Se fundamenta en la reacción de oxidación-reducción que se da entre el zinc metálico y el dióxido de manganeso en medio básico (de ahí el nombre de “alcalina”). Como electrolito se utiliza hidróxido de potasio, KOH que es el que aporta el medio básico requerido por la reacción y cuya migración evita la polarización de la pila. En el ánodo, es decir, en el electrodo de polaridad negativa, se produce la oxidación del Zn pulverizado, mientras que, en el cátodo, es decir, en el electrodo de polaridad positiva, se produce la reducción del óxido de manganeso (IV), MnO₂, (que actúa como oxidante) para dar óxido de manganeso (III), Mn₂O₃. [11]

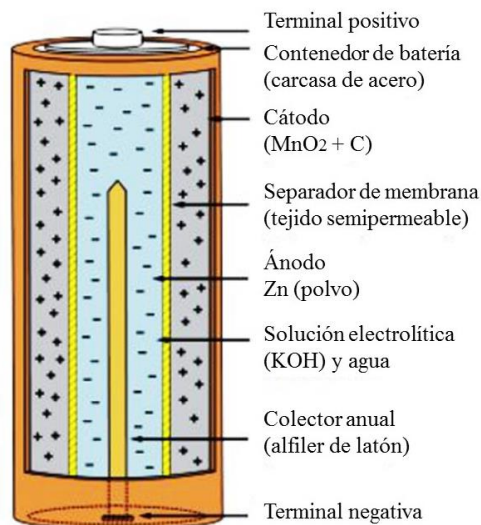


Figura 2. Diseño de una pila alcalina.

Tabla 2. Composición aproximada de la pila alcalina en (%e.p.).

Pila	Zn	MnO ₂	Hg	Ag	C	Fe	Ni	Pb	KOH/NaOH	Papel+Plast.	H ₂ O
Zn/Mn	13 a 15	23	<0.025%	-	3	35 a 37	-	0.05	5	4	8

1.5.1 Tecnologías aplicadas para el manejo de pilas y baterías.

Se han desarrollado diversas tecnologías aplicadas al manejo de este tipo de residuos, con el fin de establecer las más adecuadas disposiciones de las pilas eléctricas descargadas. Son muchas las alternativas que se pueden aplicar, entre las cuales destacan:

- Recolección.
- Estabilización y Confinamiento.
- Vitricado y Ceramización.
- Reciclado de Componentes.

1.5.1.1 Recolección.

La recolección de pilas se puede hacer empezando por la orientación de los usuarios sobre los tipos de pilas y cómo se desechan, recoger las pilas que necesiten un tratamiento específico para llevarlas al lugar adecuado. Se debe llevar a cabo mediante un programa de información a los usuarios sobre la peligrosidad que representan estos desechos que se consideran residuos tóxicos. El grado de toxicidad depende del tipo de pila y de sus

componentes, por lo que se recomienda que la recolección se lleve a cabo clasificándolas, inicialmente por fabricante (marca) y posteriormente por tipo (alcalina, seca, botón, Ni-Cd, etc.).

Es necesario instalar depósitos especiales en los cuales se reciban las pilas descargadas, los cuales deben ser capaces de no reaccionar con las mismas y permanecer inertes hasta su total llenado. Es preciso señalar, que en la mayoría de los países en los cuales ya se tiene un programa de tratamiento de las pilas descargadas, éstas son recolectadas y regresadas al fabricante para que sean ellos los que decidan qué hacer con ellas.

1.5.1.2 Estabilización y Confinamiento.

De acuerdo con estudios [12] se han encontrado tres agentes estabilizantes para neutralizar pilas descargadas:

Sulfuro de sodio: que actúa como neutralizador para los elementos como plomo y mercurio.

Hidróxido de sodio: se emplea como neutralizador del ácido sulfúrico.

Carbonato de sodio: se emplea como estabilizador de cadmio.

Posteriormente se continúa con su confinamiento en un relleno de seguridad. Esta es la más cercana a las posibilidades actuales, pero se halla limitada por la escasa cantidad disponible de tales rellenos. Una variante del confinamiento es el encapsular las pilas descargadas junto con los tres agentes químicos estabilizantes (para evitar una clasificación previa del tipo de pila) en una bolsa de plástico de un espesor de 100 micrones. Estas a su vez son colocadas en pequeños bloques del tamaño de seis ladrillos cada uno, a los cuales se les agrega cemento. De esta manera se evita la posible filtración y contaminación del medio ambiente.

1.5.1.3 Ceramización – Vitrificación.

La ceramización-vitrificación es una fusión de sílice, carbonato de sodio, óxido de calcio y fundentes, combinados con los óxidos metálicos de las pilas descargadas (B, Li, Pb, Mg, Ba, etc.), que atrapa en forma permanente los químicos nocivos en un bloque sólido de material similar al vidrio y así impide que los mismos escapen al medio ambiente.

El material vitrificado tiene baja conductividad eléctrica y térmica, es relativamente impermeable a los gases y es inerte a prácticamente todos los agentes químicos, excepto ácido fluorhídrico y soluciones fuertemente alcalinas en caliente. Para el desarrollo de la vitrificación, la temperatura del horno debe ser superior a los 1200°C. Primero se carga la mezcla vitrificante y fundente, luego se funde, junto con las cenizas incorporadas que pasan a formar parte de su estructura química, para finalmente ser descargadas en moldes y enfriadas.

1.5.1.4 Reciclado de componentes.

Una evaluación de riesgos para la salud y el ambiente por la exposición a los contaminantes de las pilas alcalinas es difícil, ya que el ámbito geográfico donde se depositan las pilas es muy amplio, así como su distribución temporal y poblacional. Sin embargo, aunque no se pueda cuantificar, es seguro que los componentes tóxicos de las pilas y baterías, así como los compuestos a que dan origen cuando son desechadas, se pueden encontrar en cantidades mínimas en los tejidos de los organismos que integran los diferentes ecosistemas, incluido el organismo humano, además de los contaminantes procedentes de otras fuentes. En términos generales, las pilas, al ser desechadas se oxidan con el paso del tiempo por la descomposición de sus elementos y de la materia orgánica que las circunda, lo que provoca daños a la carcasa o envoltura y, por consiguiente, la liberación al ambiente de sus componentes tóxicos a los suelos cercanos y a los cuerpos de agua superficiales o subterráneos [12].

Existen a nivel mundial tecnologías para el reciclaje de todo tipo de pilas y baterías. Una vez recogidas, las pilas se llevan a una planta de reciclaje donde se separa el mercurio de otros metales y del resto de materiales que constituyen la pila. El proceso requiere la trituración de la pila, excepto en el caso de las pilas botón y se introducen en un destilador que se calienta hasta la temperatura adecuada.

En trabajos reportados con anterioridad, se encontró que de cada pila alcalina descargada se obtiene el 30% e. p. de ZnO y 40% e. p. de MnO₂ de alta pureza [2]. Estos óxidos ya tienen diversas aplicaciones: el ZnO es usado en fertilizantes, pinturas anticorrosivas, cosméticos, lubricantes y colorantes, mientras que el MnO₂ se utiliza para la obtención de ferromanganeso, silico-manganeso, aleaciones de aluminio, en la elaboración de pinturas y

en la decoloración del vidrio. Sin embargo, el proceso de reducción aluminotérmica ofrece la posibilidad de utilizar los ánodos y cátodos de las baterías alcalinas descargadas en la fabricación de aleaciones de aluminio.

El proceso de reciclaje de baterías alcalinas descargadas comienza en un molino de martillos donde se trituran, el material triturado se transfiere a un horno rotativo evaporando la humedad residual. El material seco se coloca sobre una criba vibratoria (malla 30) para separar la fracción fina de la fracción gruesa. La fracción fina consiste en polvo del ánodo (ZnO), polvo de cátodo (Mn_2O_3) y polvo de KOH. Es posible separar estos polvos en base a su densidad utilizando un separador. La fracción gruesa consiste en envolturas de acero, papel, plástico, latón y una pequeña cantidad de polvos de fracción fina aglomerada. La fracción gruesa se envía mediante una cinta transportadora, la cual pasa por debajo de un separador magnético que separa el acero de los materiales no ferrosos [13].

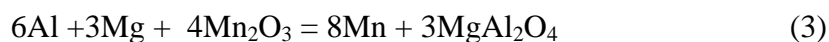
Uno de los métodos más usados en muchos países para el reciclado consiste en confinarlas en un envase de plástico, en el cual también se coloca aserrín seco que cumplirá la misión de colchón absorbente y posteriormente se tapará el recipiente. Después son introducidas dentro de un molde que será llenado con cemento, a fin de encriptar las pilas dentro del material. En otras palabras, lo que se hace es aislar el elemento, pero el compuesto peligroso sigue presente, por lo que se convierte en un “pasivo ambiental” [14].

Por otro lado, cuando la tecnología para el reciclado de componentes no está disponible o involucra costos muy elevados, se utilizan procesos fisicoquímicos para disminuir significativamente la movilidad de los metales pesados. Estas técnicas incluyen: estabilización por agregado de agentes químicos que forman compuestos insolubles con los metales, confinamiento en envases herméticos, vitrificación a altas temperaturas, entre otras.

1.6 Reducción aluminotérmica.

El proceso de reducción aluminotérmica se refiere a la extracción de metales mediante la reducción de sus óxidos metálicos mediante aluminio. La reducción aluminotérmica depende de las propiedades de la superficie (mojabilidad), porque este proceso implica la

interacción entre el óxido sólido y el metal fundido en una interfaz específica, como se muestran en las Figuras 3 y 4, donde el ZnO y el Mn₂O₃ interaccionan con el aluminio fundido y se da la reacción (2 y 3) debido a la buena mojabilidad entre las partículas ocasionando la reducción del ZnO y Mn₂O₃. Estas condiciones indican que, sin una buena mojabilidad, la velocidad de reacción química y transporte se reducen en gran medida. En un caso extremo donde no existe la mojabilidad entre el óxido sólido y el metal fundido, la reacción simplemente no ocurrirá [15].



El proceso de reducción metalotérmica se relaciona con la producción de metales y aleaciones al reducir sus óxidos o haluros con metales. En general, estas reacciones se pueden expresar mediante la ecuación 4.



Donde X es oxígeno, cloro o flúor, y A y B representan los dos metales. La principal característica de este proceso es que el metal que se reduce se convierte en un sólido o líquido, que se disuelve en el metal fundido [2].



Figura 3. Diagrama del mecanismo de reducción aluminotérmica del óxido de zinc por aluminio fundido.



Figura 4. Diagrama del mecanismo de reducción aluminotérmica del trióxido de Mn por aluminio fundido.

1.7 Tratamientos térmicos de aleaciones de aluminio.

El tratamiento térmico, se refiere a cualquiera de las operaciones de calentamiento y enfriamiento que se realizan con el propósito de cambiar las propiedades mecánicas, la microestructura, o el estado de tensión residual de un producto metálico. La diversidad de las exigencias en las propiedades mecánicas de las piezas semi-acabadas de aleaciones a base aluminio predetermina la elección del tipo de tratamiento térmico. En algunos casos se requieren elevados valores de resistencia mecánica y altos niveles de ductilidad, en otros se necesita la máxima ductilidad para asegurar buena deformación en frío al fabricar piezas. La elección correcta de los tipos de tratamiento térmico permite producir productos cuyas propiedades mecánicas sean óptimas.

El tratamiento de recocido de homogenización elimina la segregación química y cristalina producida por una solidificación defectuosa. Se obtienen granos gruesos, por lo que es necesario un recocido completo posterior. Además, el recocido de homogenización sirve, con frecuencia, para conseguir una disgregación regular de elementos disueltos en estado sobresaturado, especialmente Mn y Fe, que influyen sobre el comportamiento en la recristalización y en el conformado en caliente.

Las aleaciones de aluminio tratables térmicamente están experimentando actualmente un aumento significativo en su demanda debido a la creciente aplicación en el área aeroespacial y automotriz [6].

1.7.1 Homogenización.

Este tratamiento consiste en un calentamiento prolongado a elevada temperatura, en los rangos de temperatura de 520°C y 590°C y tiene por objeto provocar una modificación de la estructura de colada, igualando la composición química a niveles microscópicos por difusión y redisolución de las fases segregadas y precipitando los elementos que, como el manganeso, hayan quedado en solución sobresaturada en el proceso de solidificación. Es decir, llevar el material a un estado lo más próximo al de equilibrio.

El tratamiento térmico de homogenización se aplica a lingotes en estado de colada o a tochos ligeramente forjados y proporciona diversas ventajas en los procesos de fabricación posteriores, tales como: mejorar la plasticidad en caliente, haciendo más fácil la laminación, extrusión y forja. Al someter estas aleaciones a tratamientos térmicos, se mejora la maleabilidad y capacidad de conformación en frío, las propiedades mecánicas y la resistencia a la fatiga, así como mayor control de la recristalización y tamaño de grano, etc.

Las temperaturas empleadas suelen ser lo más elevadas posibles, sin llegar a la fusión de eutécticos. Los tiempos de homogenización están en función de las heterogeneidades o segregaciones a homogenizar. Pueden variar de 5 a 48 horas, según el tipo de aleación, dimensiones de las piezas, forma, carga del horno, etc.

1.7.2 Temple.

Hay dos tipos de enfriamiento comúnmente utilizados para el tratamiento térmico de aluminio comercial: inmersión directa y enfriamiento por aspersion. El temple por inmersión directa requiere que la zona de trabajo esté completamente sumergida en un baño de temple. En enfriamiento por aspersion, la transferencia de calor avanza primero por una capa de vapor extendida, luego de una ebullición, seguida por la transferencia de calor por convección [6].

Los medios que se utilizan para templar son los siguientes:

Aceites: se emplean casi exclusivamente aceites minerales. Fundamentalmente se utilizan dos tipos: para temple en frío, entre 30°C y 60°C, y para temple en caliente, entre 100°C y 130°C.

Agua: Cuando se emplea para el temple, es preferible que los constituyentes gaseosos hayan sido ya expulsados en su mayor parte, o hayan precipitado las sales que endurecen el agua.

Sales: Las temperaturas de los baños se encuentran generalmente entre los 200 y 600°C. Para temperaturas hasta 500 a 550°C, se emplean mezclas de nitratos y nitritos alcalinos. Para más de 550°C, se utilizan mezclas de sales exentas de nitratos (Na o K) [16].

1.7.3 Envejecimiento por precipitación.

El endurecimiento por precipitación (envejecimiento) implica calentar la aleación de aluminio a una temperatura en el rango de 97°C - 232°C. A esta temperatura, la solución sólida sobresaturada, creada al enfriarse a partir de la temperatura de tratamiento térmico de homogenizado, comienza a descomponerse. Inicialmente hay un agrupamiento de átomos de soluto cerca de las vacancias. Una vez que han difundido suficientes átomos a estos grupos de vacancias iniciales, se forman precipitados no-coherentes. Debido a que los grupos de átomos de soluto no coinciden con la matriz de aluminio, un campo de tensión rodea a los grupos de solutos. A medida que más soluto difunde a los grupos, finalmente la matriz ya no puede acomodar la falta de coincidencia de la matriz [6].

Los tratamientos térmicos, se clasifican de acuerdo con las características de calentamiento y enfriamiento a los cuales se someten, por ejemplo, los estados de tratamiento "T" se pueden subdividir en T1 a T10 y estas designaciones se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de tratamientos térmicos "T" para aleaciones de aluminio.

Estado de tratamiento	Definición
T1	Enfriamiento a partir de un proceso de conformado a alta temperatura y envejecido natural.
T2	Trabajado en frío después del enfriamiento a partir de un proceso de conformado a alta temperatura y luego envejecido naturalmente.
T3	Tratamiento térmico de solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
T4	Tratamiento térmico de solución y naturalmente envejecida.
T5	Envejecido artificialmente después de enfriarse a partir de un proceso de conformado a temperatura elevada.
T6	Tratamiento térmico por solución y envejecida artificialmente.
T7	Tratamiento térmico por solución y estabilizado.
T8	Tratamiento térmico por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
T9	Tratamiento térmico por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío.
T10	Se trabaja en frío después de enfriarse a partir de un proceso de conformado a temperatura elevada y luego se envejece artificialmente.

1.8 Aleaciones Al-Zn-Mg-Mn.

La combinación única de propiedades que presentan el aluminio y sus aleaciones, hacen de este material uno de los más versátiles, económicos y atractivos para una amplia gama de usos y aplicaciones. Como todos los metales puros, el aluminio, tiene una baja resistencia y no se puede usar fácilmente en aplicaciones donde la resistencia a la deformación y la fractura es esencial. En aleaciones de la serie 7xxx y 7xx.x, el zinc, es el principal elemento de aleación en cantidades de 1 a 8%, estas aleaciones tienen baja densidad, alta resistencia mecánica, resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión, resistencia a la fractura y a la corrosión por exfoliación [6, 7].

También se ha agregado manganeso, generalmente junto con Cr, para formar dispersoides en aleaciones 7xxx [6]. Esta aleación presenta una similitud en composición química a la aleación vaciada, 707.0. En la tabla 4 se muestra la composición química de esta aleación, este tipo de aleaciones tienen aplicaciones en estructuras tubulares para bicicletas o los rieles para automóviles y armaduras militares. También es usada para fabricar piezas que forman parte de estructuras automotrices que requieren buena resistencia y estabilidad dimensional [17].

Tabla 4. Composición química, % e. p. de la aleación 707.0.

Composición % en peso											
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti	Otros elementos	Al
0.20	0.80	0.20	0.40- 0.6	1.8- 2.4	0.20- 0.40	...	4.0- 4.5	...	0.25	0.20	Balan.

1.9 Tratamiento térmico de aleaciones Al-Zn-Mg-Mn.

Las aleaciones de aluminio de la serie 7000 son aleaciones que contienen zinc como el elemento de aleación, estas aleaciones tienen al menos 2.0% y hasta 10% de Zn. Un proceso convencional para producir productos de aleación de aluminio de la serie 7000 en forma laminada incluye fusión y vaciado de una pre-forma, después de lo cual se homogeniza y luego se lamina en caliente hasta un espesor determinado. El tratamiento de homogenizado elimina la segregación química y cristalina producida por una mala solidificación, además de conseguir una disgregación de elementos disueltos en estado sobresaturado, como Mn y Fe, que influyen sobre el comportamiento de la recristalización y en el conformado en caliente [18].

El tratamiento térmico de homogenizado, generalmente referido como "de solución", consiste en calentar la aleación de aluminio a una temperatura adecuada, generalmente por encima de la temperatura de "solvus", manteniéndose a esa temperatura el tiempo suficiente para permitir que los elementos aleantes formen una solución sólida supersaturada y enfriar lo suficientemente rápido como para mantener estos elementos en la solución sólida. La temperatura adecuada depende de la aleación y comúnmente está en un rango de 430°C a 570°C [18].

Mientras el metal se mantiene a la temperatura de homogenización, los componentes de la aleación que están en forma de intermetálicos dispersos se disuelven para formar una solución sólida homogénea. La adición de elementos aleantes, tiene una fuerte influencia sobre el comportamiento de la precipitación, el Fe y el Si disminuyen la solubilidad del Mn en la solución sólida, mientras que el Fe favorece la precipitación de $\beta\text{-Al}_6(\text{Mn,Fe})$ y el Si favorece la precipitación de la fase $\alpha\text{-Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ o $\text{Al}_{12}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}$ en la aleación. Las partículas de fases intermetálicas tienen influencia sobre la formabilidad de la aleación, y se

ha encontrado que durante el tratamiento térmico de homogenizado, las partículas de β - $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ se transforman en α - $\text{Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$.

En el envejecimiento natural o artificial, la aleación se encuentra en un estado metaestable, lo que significa que su estructura evoluciona con el tiempo, culminando en una reorganización estable en la que los elementos de aleación son rechazados de la solución sólida en forma de precipitados dispersos muy finos. Esta precipitación aumenta la dureza del metal. Este fenómeno se conoce como endurecimiento por precipitación. Puede tener lugar a temperatura ambiente, en cuyo caso se conoce como envejecimiento natural. Con algunas aleaciones, el proceso puede acelerarse manteniendo el metal a temperaturas más altas (150 a 190°C), lo que aumenta su dureza como resultado. Este tratamiento térmico se realiza en un horno y se conoce como envejecimiento artificial. Estos tratamientos térmicos deben llevarse a cabo bajo condiciones rigurosas de temperatura, tiempo y velocidad de enfriamiento, de lo contrario las propiedades mecánicas finales del metal y su resistencia a la corrosión pueden verse afectadas [19].

1.10 Conformado mecánico de aleaciones Al-Zn-Mg-Mn.

Existen diversas formas de clasificar los procesos de conformado mecánico de los metales, ésta se puede realizar en función del endurecimiento, nivel de deformación, materia prima, etapa del proceso, entre otras. Si se toma en cuenta la materia prima se pueden referir a procesos de deformación volumétrica y procesos de trabajo en chapa, estos se caracterizan por deformaciones significativas y cambios de forma, todo lo cual corresponde con los procesos primarios de deformación. Las operaciones básicas en deformación volumétrica se pueden clasificar en: laminación, forja, extrusión y estirado [20].

La laminación es un proceso utilizado para reducir el espesor de una lámina, o en general, de la misma manera, alterar las medidas del área transversal de una pieza larga mediante fuerzas de compresión, las cuales son generadas por el paso entre un juego de rodillos, como se muestra en la Figura 5. Esta disminución de espesor se da gracias a que los rodillos tiran el material hacia dentro del espacio de laminación a través de una fuerza de fricción neta sobre el material. Existen principalmente dos tipos de laminado a considerar: laminación en caliente y laminación en frío. [21]

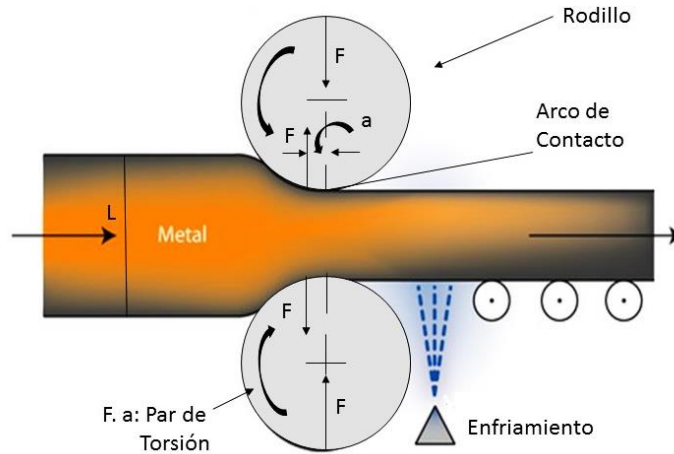


Figura 5. Fuerza perpendicular del rodillo [23].

Laminación en frío, es el formado de metal que se realiza por debajo de la temperatura de recristalización del material. La deformación no uniforme del material en el espacio de laminación puede ocasionar que se desarrollen esfuerzos residuales en placas y hojas laminadas, es común que las tolerancias de planicidad se encuentren dentro de ± 15 mm/m ($\pm 3/16$ pulgada/pie) para laminado en frío. El laminado en frío hace más resistente el metal y permite unas tolerancias más estrechas del espesor. Además, la superficie del material laminado en frío está libre de incrustaciones o de capas de óxido. Estas características hacen de las láminas, tiras y rollos laminados en frío el material ideal para estampados, paneles exteriores y otros productos que van desde automóviles hasta utensilios y muebles de oficina [21, 22].

El proceso de laminado en caliente es aquel que se realiza por encima de la temperatura de recristalización del material, se manejan temperaturas entre 0.3 y 0.5 veces la temperatura de fusión, lo que corresponde a la temperatura de recristalización. La mayoría del laminado se realiza en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida. Los metales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Las desventajas del laminado en caliente son que el producto no puede mantenerse dentro de tolerancias adecuadas, y la superficie presenta una capa de óxido característica, las tolerancias de planicidad se encuentren dentro ± 55 mm/m ($5/8$ pulgada/pie) para laminado en caliente. El laminado en caliente se caracteriza

frecuentemente por una condición llamada adherencia, en la cual la superficie caliente del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. El proceso de laminado en caliente se lleva a cabo comúnmente para aleaciones de aluminio y para aceros aleados [21, 22].

1.10.1 Carga de laminación.

Los rodillos aplican presión sobre el material para poder reducir el espesor, por lo cual se necesita una fuerza perpendicular al arco de contacto, o perpendicular al plano de la lámina, ya que el arco es muy pequeño en relación con el tamaño del rodillo. La fuerza que debe generar el rodillo laminador en el laminado plano está dada por la ecuación 5 [21, 22]:

$$C. L = L * W * \sigma_0 \quad (5)$$

En donde:

W= Ancho de la lámina (pulg).

\bar{Y}_F = Esfuerzo de fluencia promedio de la lámina en el espacio de laminación (lb/pulg).

L= Longitud de contacto entre el rodillo y la lámina (pulgadas), la cual se muestra en la figura 6, y se calcula con la siguiente ecuación 6 [23]:

$$L = \sqrt{R(H_0 - H_F)} \quad (6)$$

Dónde:

R= radio del rodillo, pulg. (mm).

H₀= espesor inicial, pulg. (mm).

H_F= espesor final, pulg. (mm).

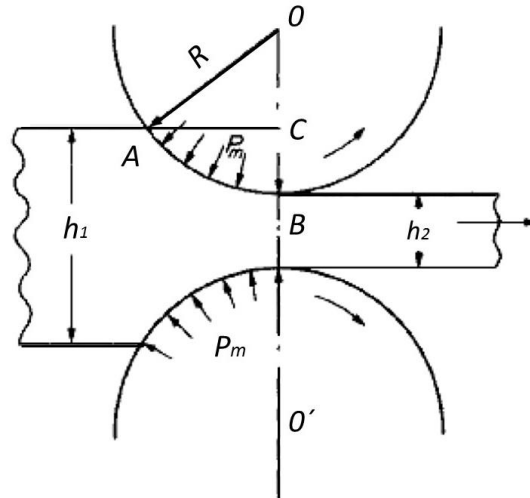


Figura 6. Longitud de contacto del rodillo con la lámina, indicada del punto "A" al "B" y "R" siendo el radio del rodillo.

Para calcular la potencia requerida en cada rodillo, se hace referencia a la Figura 5, en la cual se puede considerar $a = L/2$, donde la potencia está representada por la ecuación 7:

$$\text{Potencia} = \text{torque} * \text{vel. Angular} \quad (P = T * w) \quad (7)$$

Donde torque se representa por la ecuación 8:

$T = a * F$, sustituyendo a en T y T en P se tiene:

$$P = L/2 * F * 2\pi N \quad (8)$$

Para los dos rodillos, o sea el tren de laminación completo (figura 6), la potencia será calculada por la ecuación 9 [21, 22]:

$$P = 2\pi NFL \quad (9)$$

Dónde:

P= Potencia, pulg-lb/min (w).

N= Velocidad de giro del rodillo, RPM.

F= Fuerza perpendicular del rodillo, lb (N).

L= Longitud de contacto, pulg (m).

1.10.2 Velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$.

La deformación a altas temperaturas involucra un reacomodo sustancial de los átomos. Este proceso de reacomodo toma tiempo así que las propiedades del material son función de la velocidad de aplicación de la carga o velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$. Puesto que la deformación es adimensional, las unidades de la velocidad de deformación son el recíproco del tiempo. Para tensión y compresión, la velocidad de deformación se obtiene la ecuación 10:

$$\dot{\epsilon} = v / l \quad (10)$$

Donde v es la velocidad del cabezal y l es la longitud instantánea de deformación. La Tabla 5 muestra los valores típicos de velocidades de deformación para diferentes procesos de deformación volumétrica [24].

Tabla 5. Rangos de deformación real y velocidades de deformación en procesos de conformado.

Proceso	Deformación real	Velocidad de deformación, s^{-1}
Trabajo en frío		
Forja, laminación	0.10 – 0.50	$1.0 \cdot 10^3$
Conformado por explosión	0.05 – 0.20	$10.0 \cdot 10^5$
Trabajo en caliente		
Forja, laminación	0.1 – 0.5	$1.0 \cdot 10^3$
Extrusión	2.0 – 5.0	$0.1 \cdot 10^2$

1.10.3 Efecto de la velocidad de deformación en la laminación en caliente.

La deformación en caliente o el conformado en caliente, se realiza llevando el material a elevadas temperaturas, a fin de obtener deformaciones importantes aplicando esfuerzos relativamente limitados. Además, los procesos de conformado en caliente permiten la modificación de la microestructura y el tamaño de grano. La Figura 7 muestra esquemáticamente el caso del conformado en caliente por laminación, en la que se ponen en evidencia las modificaciones estructurales relacionadas con el ciclo térmico y la modalidad de la deformación.

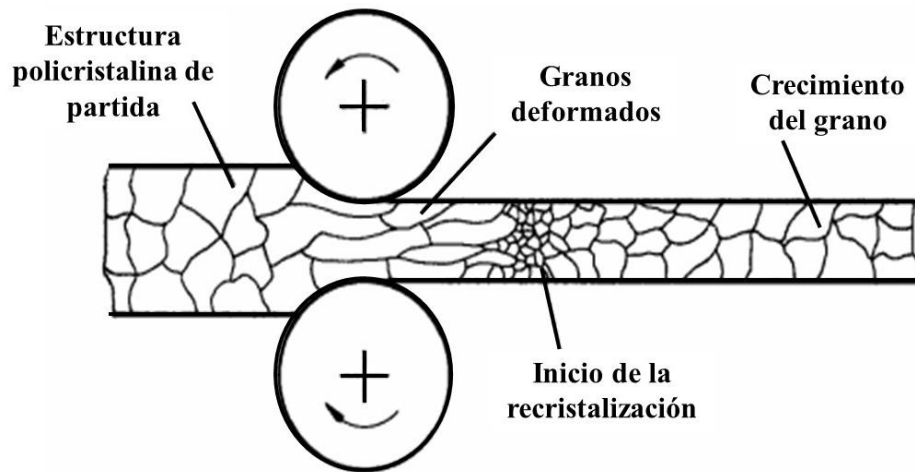


Figura 7. Evolución de la microestructura durante el proceso de laminación.

Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación, disminuyendo la ductilidad. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación desempeña un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia. Esto es importante en el trabajo en caliente, puesto que muchos materiales tienen una velocidad de deformación unitaria muy sensible a las altas temperaturas.

La velocidad de deformación influye en la ductilidad de un metal. Una mayor velocidad de deformación provoca una menor ductilidad y un incremento en los esfuerzos necesarios para producir cierta deformación. A bajos valores de velocidad de deformación ocurre un crecimiento de grano, mientras, que el afinamiento de grano se presenta a altos valores de deformación.

Para calcular la velocidad de deformación se utilizará la siguiente ecuación (11):

$$\dot{\epsilon} = \frac{2v\sqrt{\frac{h_0 - h_f}{R}}}{h_f + h_0} \quad (11)$$

Dónde:

v : Velocidad lineal

h_0 : Espesor inicial

h_f : Espesor final

R : radio de rodillo

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

2.1 Material y equipo.

En esta sección se describe el diseño experimental, así como también las técnicas experimentales a utilizar para llevar a cabo el análisis del efecto del tratamiento térmico de homogenización, sobre el comportamiento mecánico de la aleación Al-Zn-Mn previo al conformado mecánico mediante el proceso de laminación en caliente.

Para la obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn se requiere lo siguiente:

- Horno de gas con crisol de carburo de silicio, capacidad de 50kg, para la fusión de las latas de aluminio y obtención de lingotes.
- Aluminio reciclado.
- Masa negra (polvos de $ZnO-Mn_2O_3$).
- Horno de inducción marca INDUCTO-THERM.

- Lanza de grafito usada para la desgasificación del metal.
- Argón ultra alta pureza (UAP).
- Molde metálico.
- Horno de resistencias.
- Molino de laminación marca (IRM).

Para la caracterización de las probetas, se requiere lo siguiente:

- Análisis químico (espectroscopía de emisión por chispa).
- Microscopio óptico.
- Máquina universal electromecánica marca MTS (pruebas de tensión).
- Durómetro Brinell

2.2 Diseño experimental

El desarrollo de experimentos está constituido por dos fases, la primera es el diseño de experimentos para el tratamiento térmico, analizando las siguientes variables: temperatura de tratamiento térmico y tiempo. El diseño es factorial con el propósito de reducir errores experimentales, los factores A y B representan las variables independientes como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Niveles de diseño experimental.

Factores \ Niveles	1	2	3
A) Temperatura de tratamiento térmico de homogenizado (°C)	530	550	570
B) Tiempo de tratamiento térmico (horas)	4	6	8

Haciendo referencia a la tabla 6, el número de experimentos a realizar esta dada por la siguiente ecuación (12):

$$(12)$$

$$N = a * b * n$$

Dónde:

N = 9 (experimentos).

a = 3 (nivel del factor A).

b = 3 (nivel de factor B).

n = 1 (número de réplicas).

A = Temperatura de tratamiento térmico.

B = Tiempo de tratamiento.

Dando como resultado un total de 9 experimentos, los cuales pueden ser observados en la tabla 7, la cual muestra el resultado de combinar cada uno de los factores con los respectivos niveles.

Tabla 7. Diseño de experimentos.

Experimentos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	530°C	530°C	530°C	550°C	550°C	550°C	570°C	570°C	570°C
tiempo (hr)	4hr.	6hr.	8hr.	4hr.	6hr.	8hr.	4hr.	6hr.	8hr.

En la segunda etapa, se analiza el efecto de las siguientes variables: porcentaje de reducción, temperatura de laminado y velocidad de los rodillos. El desarrollo experimental es factorial, cuyo objetivo es de reducir errores experimentales. Los factores A, B y C representan las variables como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Niveles de diseño experimental, segunda etapa

Factores \ Niveles	1	2	3
Porcentaje de reducción (%)	15	30	50
Temperatura de laminado (°C)	365	395	425
Velocidad de rodillos (rpm)	5	8	12

De acuerdo con la tabla 8, el número de experimentación se obtiene mediante la ecuación

13: (13)

$$N = a * b * c * n$$

Los datos para utilizar son los siguientes:

a = 3 (nivel del factor A).

b = 3 (nivel de factor B).

c = 3 (nivel de factor C).

n = 1 (número de réplicas).

N = 27 (experimentos).

El número de experimentos es de 27, y esto se obtuvo mediante la combinación de los factores con sus respectivos niveles como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Diseño de experimentos, segunda etapa. P. R. (Porcentaje de reducción (%)), T°C (temperatura) y V. de R. (velocidad de rodillo (rpm))

Experimentos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
% P. R.	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
T°C	365°C	365°C	365°C	395°C	395°C	395°C	425°C	425°C	425°C
V. de R.	5rpm	8rpm	12rpm	5rpm	8rpm	12rpm	5rpm	8rpm	12rpm
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
% P. R.	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
T°C	365°C	365°C	365°C	395°C	395°C	395°C	425°C	425°C	425°C
V. de R.	5rpm	8rpm	12rpm	5rpm	8rpm	12rpm	5rpm	8rpm	12rpm
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
% P. R.	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
T°C	365°C	365°C	365°C	395°C	395°C	395°C	425°C	425°C	425°C
V. de R.	5rpm	8rpm	12rpm	5rpm	8rpm	12rpm	5rpm	8rpm	12rpm

2.3. Metodología experimental.

En la Figura 8 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento que se utiliza para la obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn a partir de aluminio reciclado y con el proceso de reducción aluminotérmica de masa negra, así como también las técnicas aplicadas para la caracterización de las probetas obtenidas en cada experimento.

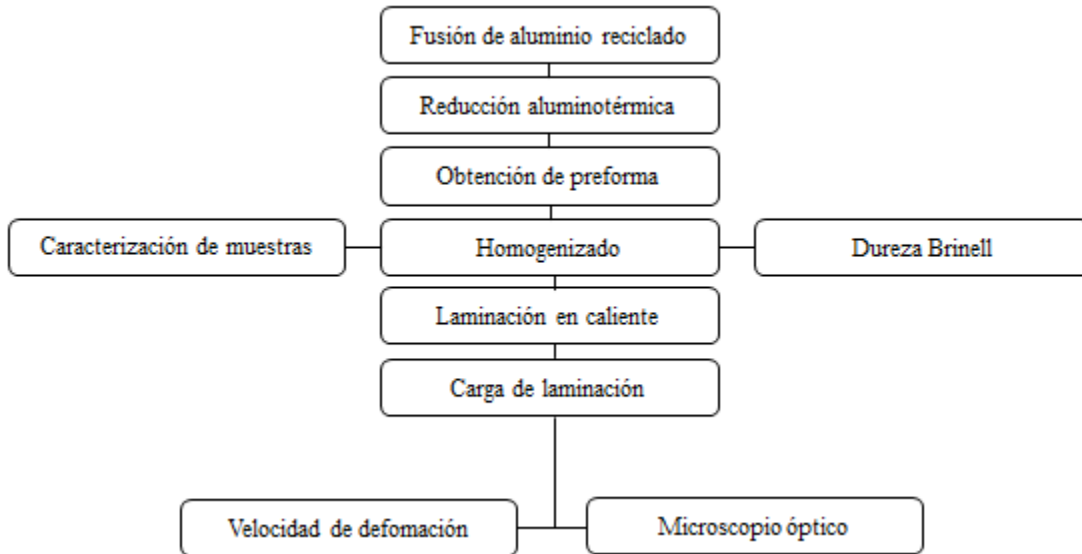


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología experimental.

2.3.1 Fusión de aluminio reciclado (latas para bebidas).

La fusión de aluminio reciclado se llevó a cabo con las siguientes condiciones: carga gradual de 150 kg de latas aluminio en un horno de gas con capacidad de 60 kg, adicionando de 60kg hasta consumir los 150kg. El aluminio se agrega gradualmente hasta llenar el crisol, para posteriormente elevar la temperatura a 750°C, después se procede a añadir fundente y a retirar la escoria, para vaciar el metal líquido en lingoteras de alrededor de 5, 10 y 12kg de capacidad, estos lingotes se utilizarán como materia prima para la obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.

2.3.2 Obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn por reducción aluminotérmica

Con una carga de 26% (respecto al peso a fundir) de masa negra, se lleva a cabo el proceso de reducción aluminotérmica a 800°C, durante 90 minutos con una agitación de 300 rpm del baño metálico, con 10 kilogramos de la aleación obtenida de la fusión de aluminio reciclado, en un horno de inducción con capacidad de 13 kg. Se desgasifica inyectando gas argón (UAP) con una lanza de grafito durante 10 minutos y se procede a vaciar en un molde metálico precalentado y obtener la preforma. En la figura 9, se muestra el esquema de la preforma.

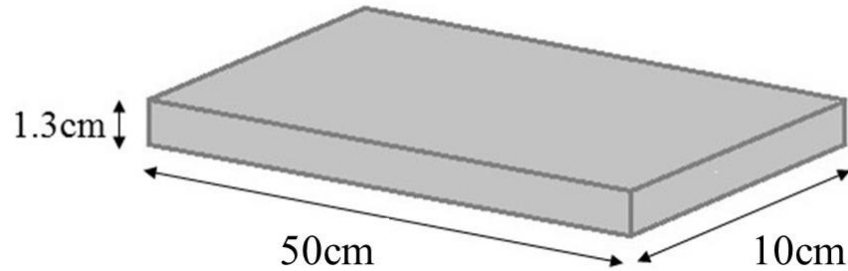


Figura 9. Esquema de la pre-forma obtenida por vaciado en la reducción aluminotérmica de polvos de masa negra.

2.3.3 Tratamiento térmico de homogenizado.

De la preforma vaciada se seccionan muestras de 15x5cm, en donde por cada preforma se obtienen cuatro muestras, las cuales servirán para el diseño de experimentos mencionado en la tabla 7. La secuencia será la siguiente:

Se colocan 3 muestras en el horno de tratamiento térmico de homogenizado, donde se programa el calentamiento a 530°C, una vez estabilizada la temperatura se inicia el conteo de 4hr para la primera muestra, una vez pasando este tiempo, se saca la muestra y se enfría en agua agitando la muestra para lograr un enfriamiento homogéneo. Para las muestras de 6hr y 8hr se repite el proceso, de acuerdo a la tabla 7.

De igual manera para las temperaturas de 550°C y 570°C, con tres muestras para cada una ellas.

2.4. Técnicas experimentales.

2.4.1 Espectrofotometría de emisión por chispa.

Este análisis determina los porcentajes de cada uno de los elementos químicos de que está compuesta la muestra. Consiste en detectar las longitudes de onda características de cada uno de estos elementos cuando sus electrones son excitados mediante chispa. Se toman muestras de la aleación cada 30 minutos de tratamiento y se lleva a cabo el análisis químico por esta técnica.

2.4.2 Microscopio óptico.

Permite hacer visible la microestructura final de una muestra a una escala que no es apreciable a simple vista. El microscopio óptico contiene unos o varios lentes montados sobre una base tubular que permite obtener una imagen aumentada del objeto, este tipo de instrumento funciona mediante refracción. Por medio de esta técnica experimental se observa la microestructura tanto de colada, así como también con tratamiento térmico de homogenizado y para diferentes porcentajes de deformación mecánica para la aleación a utilizar en el presente trabajo.

2.4.3 Microscopio electrónico de barrido.

Este instrumento, a diferencia del óptico, cuenta con la posibilidad de observar la microestructura a más de 2000x. Cuenta con haz de electrones en lugar de uno de luz blanca. Una de las ventajas de este instrumento es que tiene una gran profundidad de campo, lo que permite un enfoque de gran calidad y a la misma vez de una gran zona de la muestra. Otra de las ventajas de este instrumento es que cuenta con un espectrómetro de dispersión de energía (EDS) de rayos x, el cual permite cuantificar la distribución cualitativa de los elementos químicos presentes en la muestra a analizar, mostrando imágenes y gráficas relacionadas con la distribución.

2.4.4 Ensayo de dureza Brinell.

Según con la norma ASTM E-10 [25], el ensayo de dureza Brinell es una técnica de dureza mediante una indentación. Los ensayos de dureza Brinell proporcionan información útil acerca de los metales, esta información puede correlacionar la resistencia a la tracción, resistencia al desgaste, la ductilidad u otras características físicas de los materiales metálicos ya que pueden ser útiles en el control de calidad y la selección de materiales.

Para la determinación de dureza de las muestras se utiliza un probador de dureza Brinell marca Wilson con 500kg de carga, realizando 9 indentaciones para cada una de las muestras, obteniendo un promedio para el valor final.

2.4.5 Ensayo de tensión.

La finalidad es obtener información de parámetros de un material tales como resistencia a la fractura, límite elástico, porcentaje de alargamiento y el módulo de Young. El ensayo de tensión se lleva a cabo mediante la aplicación de una carga axial hasta la fractura, según la norma ASTM E8-04 [26] que trata de especificaciones de los ensayos de tensión para aleaciones de aluminio. Las dimensiones rectangulares de tamaño de ¼ in, como se muestra en la tabla 10 y figura 10.

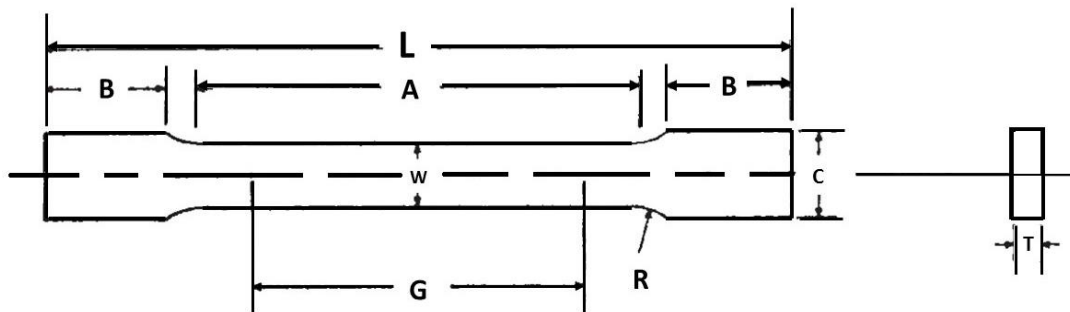


Figura 10. Esquema de probeta para ensayo de tensión rectangular [26].

Tabla 10. Dimensiones de probeta rectangular para ensayo de tensión para ¼ in [26].

DIMENSIONES	
NOMENCLATURA	Probeta ¼ in. Amplio
G—Longitud calibrada	1.000 ± 0.003
W—Ancho	0.250 ± 0.005
T—Espesor	Espesor de material
R—Radio de filete, min.	¼
L—Longitud total	4
A—Longitud de la sección reducida, min.	1 ¼
B—Longitud de la sección de agarre	1 ¼
C—Ancho de la sección de agarre, aproximada	3/8

2.5 Conformado mecánico.

El conformado mecánico es el procesamiento de metales sólidos por medio de fuerzas mecánicas y se realiza bajo algunas condiciones para que el metal obtenga la forma deseada.

La laminación es un proceso utilizado para reducir el espesor de una lámina, cambiar las medidas del área transversal de una pieza larga mediante fuerzas de compresión, las cuales son generadas por el paso entre un sistema de rodillos. Esta disminución de espesor se da gracias a que los rodillos atraen el material hacia el espacio entre ellos

El proceso de laminado en caliente es aquel que se realiza por encima de la temperatura de recristalización del material. La temperatura de recristalización es aquella a la cual los granos de la microestructura comienzan a transformarse en nuevos granos sin dislocaciones. El resultado son granos dúctiles que pueden ser laminados cualquier número de veces. El proceso de laminado en caliente se utiliza para estructuras de colada, o fundición comúnmente dendrítica. Se lleva a cabo comúnmente para aleaciones de aluminio y para aceros aleados.

Generalmente el laminado en caliente se utiliza para deformar volúmenes grandes de material, y su intención es transformar dichos volúmenes en preformas que luego puedan ser procesadas de otro modo (por ejemplo, extrusión o laminado en frío).

Obtenida la preforma vaciada, se seccionan y cortan probetas como se muestra en la figura 11 para, previo al proceso de laminación en caliente, darle tratamiento térmico de homogenizado, con las condiciones que dieron los mejores de resultados en los ensayos de tensión y dureza. Posteriormente se lleva a cabo la deformación con las condiciones descritas en el diseño de experimentos de la segunda etapa donde se evaluará el porcentaje de reducción (15, 30 y 50%) variando temperatura y velocidad de rodillos.

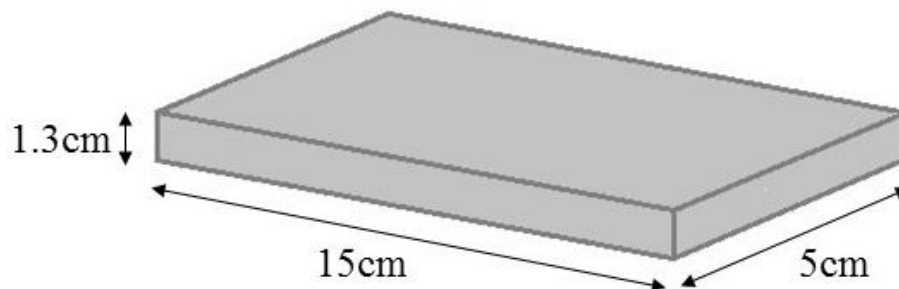


Figura 11. Esquema de probeta de laminación de la aleación Al-Zn-Mn fabricada por reducción aluminotérmica.

2.4.6 Carga de laminación para obtención de solera.

La carga de laminación es la que se aplica al material mediante los rodillos para su deformación plástica y así poder obtener una reducción en su espesor. Esta carga está en función del radio de los rodillos, ancho de la placa, límite elástico y porcentaje de reducción. Para el cálculo de la carga de laminación se utiliza la ecuación 5 [22].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En esta sección se analizan y discuten los resultados obtenidos de la fase experimental.

3.1 Caracterización de masa negra

La masa negra utilizada en la experimentación fue proporcionada por la empresa española Envirobat. El lote suministrado incluye tres diferentes muestras, con diferentes orígenes: Envirobat, Alemania y U.K. Se realizó análisis cuantitativo de la masa negra por ICP, AA e ignición Leco. Los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Análisis químico cuantitativo de la masa negra (mg/L).

Elementos País	Zn	Mn	Cl	K	C
Alemania	19.23	27.28	1.020	3.964	6.02
Envirobat	17.07	30.47	0.918	3.798	6.88
U.K.	19.69	26.62	1.054	3.736	6.57

Las tres muestras se observa similitud en composición, tanto en Zn como en Mn, pero se optó por usar la de la empresa Envirobat debido a que fue utilizada anteriormente por Jurado 2018 [27], aunque los polvos son de diferente lote, se realizó una cuantificación para obtener la relación a utilizar con un nuevo porcentaje que determine la carga necesaria, a la aleación de las latas en estado líquido, para hacer el ajuste en Zn y Mn metálico que se incorpora.

Anteriormente el contenido de Zn en la masa negra era de 22% [27], ahora el nuevo contenido de zinc es de 17%; con un 22% de zinc se utilizaba una carga de masa negra de 20% para llegar a la composición deseada [27], entonces con la diferencia de porcentajes que existe en el contenido de Zn se busca un nuevo porcentaje de carga de masa negra.

Para calcular este nuevo porcentaje de carga, se hace una relación de los porcentajes de contenido de zinc, $17\%/22\%$, que da 0.77 como media, para conocer la nueva carga se divide la carga anterior [27] entre la media de los contenidos de zinc, $20\%/0.77$ dando como resultado un 26% de carga de masa negra respecto al peso a fundir, que es la que se utilizó para llegar a la composición deseada para esta aleación.

Con el fin de conocer los compuestos presentes en la masa negra se procedió a realizar análisis por DRX. El patrón de difracción se muestra en la figura 12.

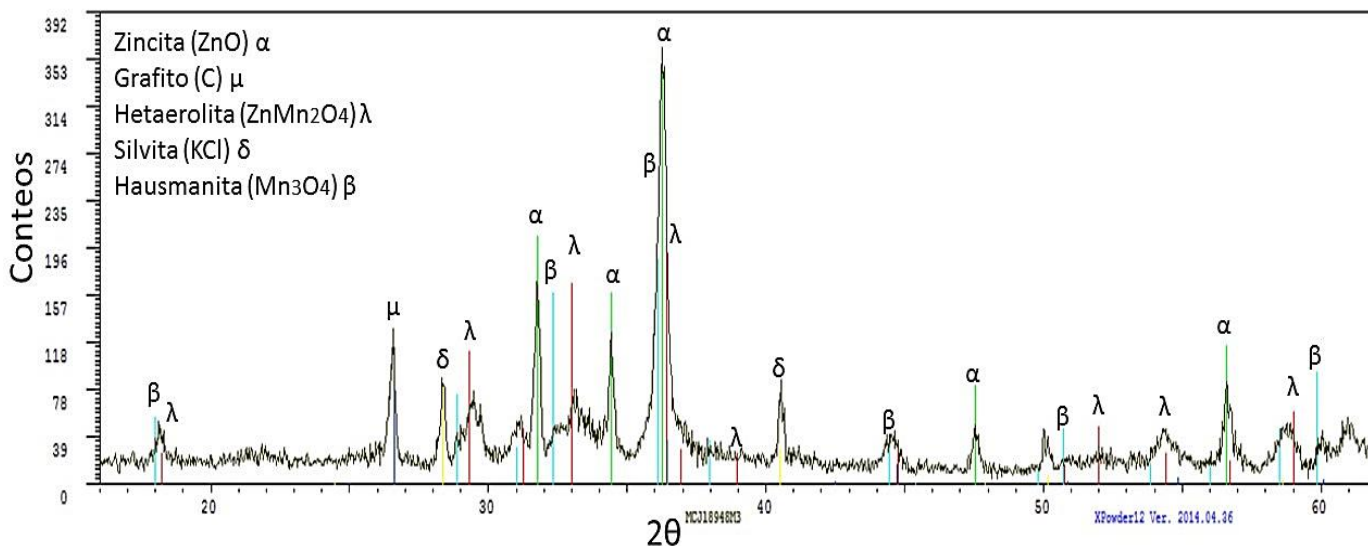


Figura 12. Patrón de difracción de masa negra.

Se observan picos característicos de ZnO (α) y Mn₃O₄ (β), que corresponden al ánodo y al cátodo de la batería descargada, el ZnO (cátodo) y el Mn₃O₄ es el producto de la reacción entre el zinc metálico en el cátodo y el Mn₂O₃ del ánodo de la pila. También se observan picos característicos del compuesto de espinela ZnMn₂O₄ (λ), que es el producto de la reacción que se da entre el ánodo y cátodo de la batería descargada al momento de que son desmontadas mecánicamente. También se tenía presencia de cloruro de potasio (δ), que corresponde al electrolito y de grafito (μ), usado como conductor de electrones.

3.2 Obtención de la aleación a partir de aluminio reciclado.

La tabla 12 muestra los resultados obtenidos del análisis químico de la aleación fabricada a partir de envases de aluminio reciclado. Como se mencionó anteriormente, la lata de aluminio está constituida por 3 diferentes aleaciones, por lo que al fundirla completamente se mezcla la composición, lo que da como resultado una composición diferente a las aleaciones de partida.

Tabla 12. Composición química de la aleación obtenida a partir de latas de aluminio.

Composición %e. p.									
Si	Ti	Zn	Ni	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Al
0.28	0.02	0.065	0.01	0.022	0.9	0.7	0.2	0.6	97.2

Se obtuvo un total de 115kg de lingotes de aleación de aluminio, la cual fue utilizada como materia prima para la obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.

3.3. Obtención de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.

Con las condiciones mencionadas en el apartado de metodología, 2.3.2, se elaboró la aleación Al-Zn-Mg-Mn. En la tabla 13 se muestra su composición química.

Tabla 13. Composición química de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.

Composición % en peso									
Si	Ti	Zn	Ni	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Al
0.24	0.2	4.1	0.01	0.02	1.94	0.8	0.23	0.7	resto

De acuerdo a Jurado [27], la concentración de Mg (0.9%) en la materia prima de partida (aleación resultante de la fusión de las latas para bebida), se debe de incrementar durante la reducción aluminotérmica (se adiciona hasta 4% de este elemento). Lo anterior, debido a que la adición de este elemento disminuye la tensión superficial del metal líquido mejorando la mojabilidad, por lo que el proceso de reducción aluminotérmica de los sólidos de la masa negra es más efectivo. Por lo que de acuerdo a la tabla 13, en la aleación Al-Zn-Mn se tiene 1.94% de Mg, lo que indica que el Mg participa en la reducción de los óxidos de la masa negra, de acuerdo a las reacciones 3 y 4. Adicionalmente, se ajusta el contenido de Ti, con el fin de que la composición sea similar a la de la aleación 707.0. Sin embargo, tiene variaciones tanto en la concentración de Mn como de Mg. Esta aleación es muy similar a la de la aleación 707 (tabla 4) en donde el contenido de Mn aumentó debido a las reacciones con la reducción aluminotérmica de Mn_2O_3 .

3.3.1 Microestructura y morfología de la aleación Al-Zn-Mn en estado de colada.

En la figura 12 se muestran micrografías de la aleación Al-Zn-Mg-Mn en estado de colada, obtenida por reducción aluminotérmica de polvos de masa negra tomadas a 1000x (a) y 500x (b) por microscopía óptica. Se observan precipitados con morfología de agujas alargadas de gran tamaño (10micras) y algunos con forma rectangular o triangular de menor tamaño (5micras). También se observan intermetálicos muy delgados de color negro, distribuidos de manera equiaxial sobre toda la matriz. De acuerdo a [28], las agujas alargadas y las formas rectangulares y triangulares pertenecen a morfologías de la fase β -

$\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$, típicas en estas aleaciones y los intermetálicos de color negro corresponden a $\text{Al}(\text{Fe,Mg})\text{Si}$.

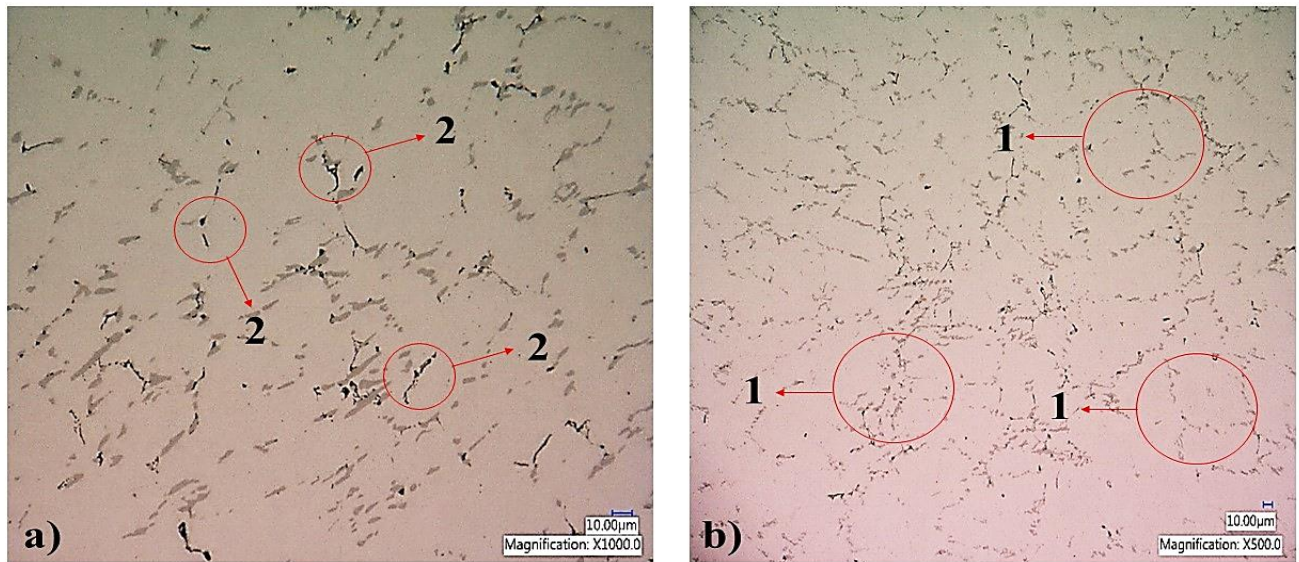


Figura 8. Microestructura de aleación Al-Zn-Mg-Mn en estado de colada mediante microscopio óptico a 1000x a) y 500x b). 1: $\beta\text{-Al}_6(\text{Mn,Fe})$, 2: $\text{Al}(\text{Fe,Mg})\text{Si}$

Adicionalmente, las microestructuras se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido. En la figura 9 se muestra una micrografía en donde se observan partículas con tamaño de 10 a 50 micras, con morfologías de agujas aciculares y tetragonales, la morfología es la misma que se observa en microscopía óptica (agujas delgadas y forma rectangular o triangular) correspondientes a la fase $\beta\text{-Al}_6(\text{Mn,Fe})$. También se observan partículas correspondientes a una fase rica en Mg y Si. Todo esto sobre una solución sólida Al-Zn-Mg correspondiente a la fase continua o matriz.



Figura 9. Microestructura tomada en MEB de la aleación Al-Zn-Mn en estado de colada. 1: β -Al₆(Mn,Fe), 2: Al(FeMn)Si, 3: Al-Zn-Mg.

3.4 Tratamiento térmico de homogenizado.

En esta etapa las preformas fueron cortadas en secciones de 15 x 1.3 x 5cm y se introdujeron en una mufla de resistencias eléctricas a temperaturas de 530°C, 550°C y 570°C a 4hr, 6hr y 8hr como se muestra en la tabla 7. Finalizado el calentamiento y el tiempo, cada pieza se templó en agua.

3.4.1 Caracterización de muestras mediante microscopio óptico.

En la figura 10 se muestra la evolución de la microestructura de la aleación Al-Zn-Mg-Mn con el tratamiento térmico de homogenizado, a 530°C con tiempo de permanencia de 4, 6 y 8 horas. A 4 horas, se observan intermetálicos con morfología de agujas alargadas que corresponden a la fase β -Al₆(MnFe). A 6 horas de tratamiento se observa la fase β -Al₆(MnFe) en menor cantidad y tamaño, también se pueden observar precipitados más pequeños con morfología de escritura china y otros más pequeños con forma cuboidal, los cuales, de acuerdo a la literatura son típicas de la fase α -Al(Fe,Mn)Si. A 8 horas de permanencia, se observa que la fase α -Al(Fe,Mn)Si con morfología de escritura china es la fase predominante y se encuentra distribuida homogéneamente en la matriz. También se detecta la fase β -Al₆(MnFe) en menor cantidad.

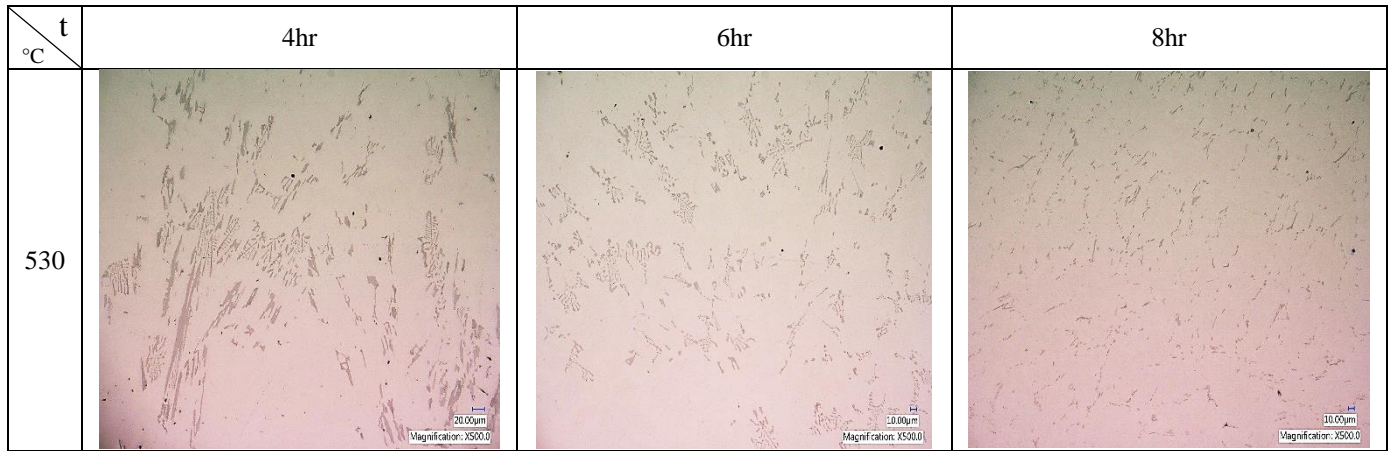


Figura 10. Evolución de la microestructura de tratamiento de homogenizado a 530°C con tiempos de 4, 6 y 8hr a 500x.

En la figura 11, se muestra la evolución de la microestructura del tratamiento de homogenizado a temperatura de 550°C. Con 4hr de permanencia, se observan morfologías de escritura china e intermetálicos en forma cuboidal y acicular, con menor cantidad de agujas, distribuidos en la matriz, esta escritura china pertenece a la fase α -Al(Fe,Mn)Si. Para el tratamiento de homogenizado a un tiempo de 8 horas, la morfología cambia, se muestra en mayor cantidad y tamaño la escritura china, en contraste, las barras aciculares β -Al₆(MnFe) disminuyeron en tamaño y cantidad. A diferencia del tratamiento anterior ya no se observa en mayor cantidad las agujas aciculares debido a que el aumento de temperatura favorece la transformación de la fase β -Al₆(MnFe) a la fase α -Al(Fe,Mn)Si.

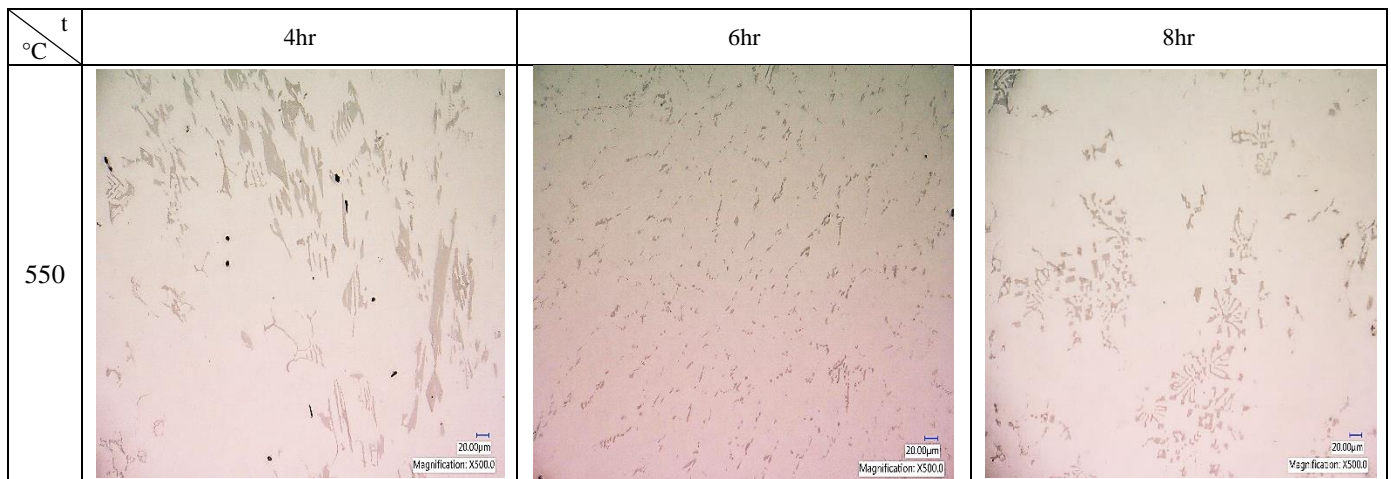


Figura 11. Evolución de la microestructura de tratamiento de homogenizado a 550°C con tiempos de 4, 6 y 8hr a 500x.

La figura 12 muestra la evolución de la microestructura de tratamiento de homogenizado a 570°C. A 4 horas de tratamiento se observa, en mayor cantidad, la fase α -Al(Fe,Mn)Si en

forma de escritura china y, en menor cantidad, pequeñas barras aciculares de fase β - $\text{Al}_6(\text{MnFe})$. A 8 horas ambas fases disminuyen de tamaño.

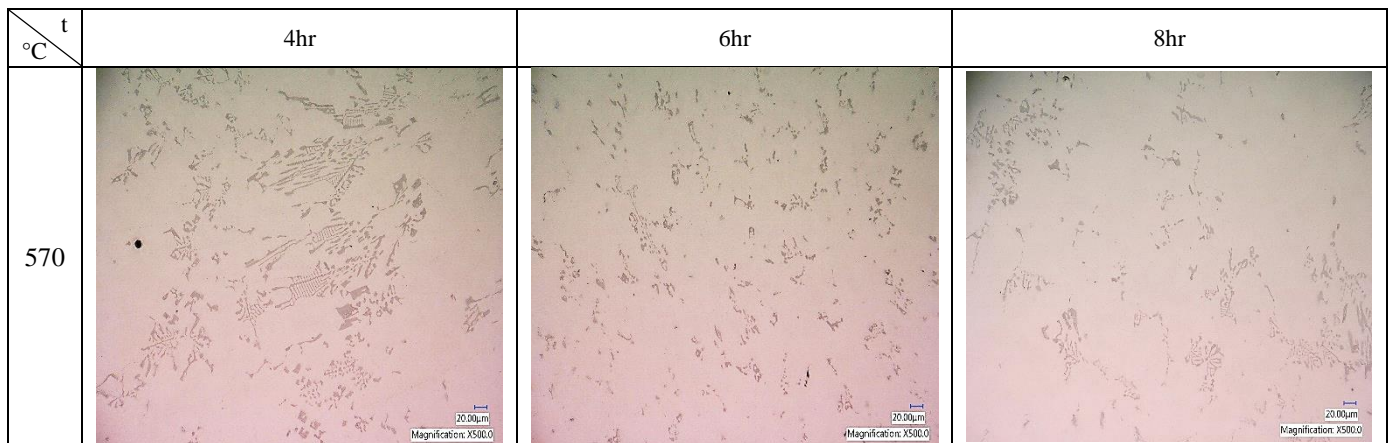


Figura 12. Evolución de la microestructura de tratamiento de homogenizado a 570°C con tiempos de 4, 6 y 8hr a 500x.

Por lo anterior, es evidente que, a mayor temperatura, la transformación de la fase dura (β) a la fase dúctil (α) es más factible. Con respecto al tamaño de la fase dúctil (α), disminuye a medida que se incrementa el tiempo de permanencia. Adicionalmente, la cantidad de fase dura (β) también disminuye, tendiendo a desaparecer. Por lo que se puede establecer que la transformación $\beta \rightarrow \alpha$ se lleva a cabo.

3.4.2 Caracterización de muestras mediante microscopio electrónico de barrido.

El tratamiento de reducción aluminotérmica se lleva a cabo para reducir la concentración de manganeso en solución sólida ya que, en la solidificación el Mn y Fe reaccionan con Al para formar el intermetálico β - $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$, para dar resultado a la morfología mostrada en las micrografías de la figura 8 para las tres temperaturas con diferente tiempo. Las partículas de β - $\text{Al}_6(\text{Fe, Mn})$ quedan en la masa fundida debido a una transformación incompleta, estas se disuelven durante el tratamiento de homogenizado, dando como resultado una fase más estable α - $\text{Al}(\text{Fe,Mn})\text{Si}$. De acuerdo a los anteriormente expuesto, el silicio juega un papel importante en la precipitación de la fase α - $\text{Al}(\text{Fe,Mn})\text{Si}$.

En la figura 13 se observa el cambio en la morfología, de agujas aciculares en estado de colada a tetraedros que se forman durante el tratamiento. Como se mencionó, la fase β - $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ (señalada en la figura con un color gris oscuro) cambia a la fase α - $\text{Al}(\text{Fe,Mn})\text{Si}$ (de color más claro señalado en la figura 13), la cual se distribuye en la matriz. A

temperaturas mayores y tiempos largos, se observa la fase α -Al(Fe,Mn)Si en forma de escritura china. De acuerdo con los espectros de la figura 14 se demuestra que estas fases si corresponden a las antes mencionadas.

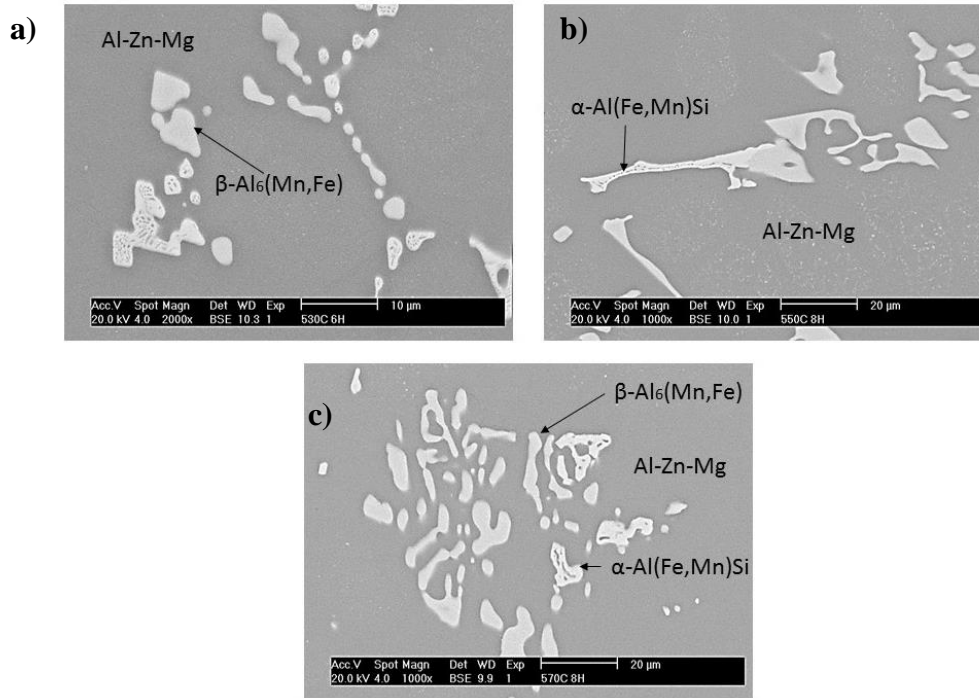


Figura 13. Evolución de la microestructura con tratamiento térmico de homogenizado mediante MEB. a) 530°C a 8hr, b) 550°C a 8hr y c) 570°C a 8hr

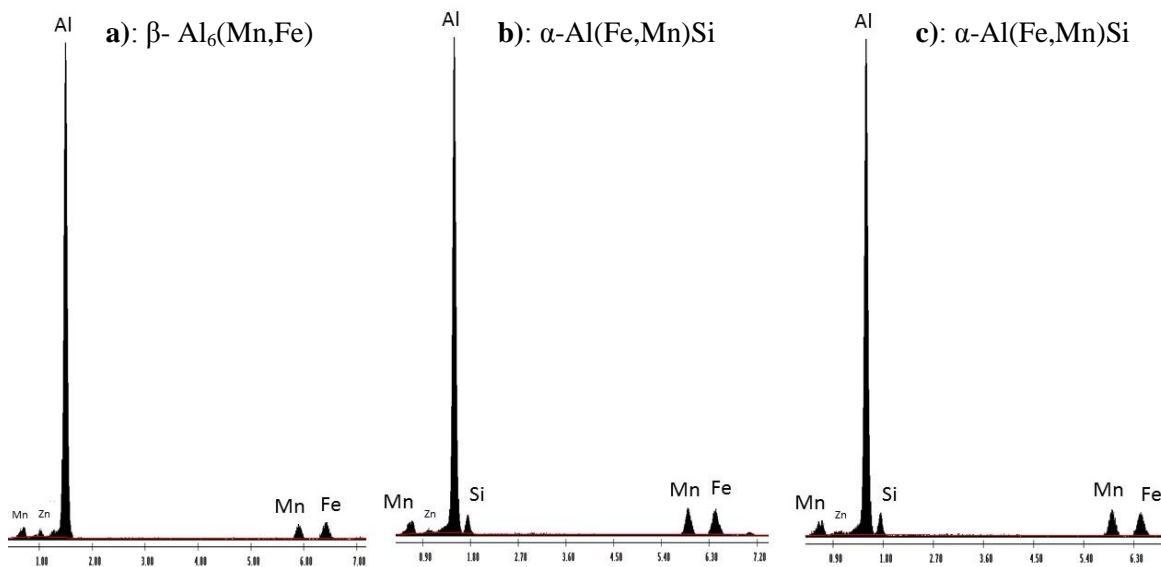


Figura 14. Espectros EDS de las fases que se encuentran presentes en la figura 15, a) 530°C a 8hr b) 550°C a 8hr c) 570°C a 8hr.

Durante el tratamiento térmico de homogenización, la solución sólida super-saturada se descompone y da paso a la precipitación de segundas fases. Se cambia la morfología de las fases en la estructura de colada, desde precipitados con forma de tetraedros, a simples partículas redondeadas con tamaño aproximado de 2 a 5 micras.

El tratamiento de homogenización transforma la microestructura de colada a un estado más cercano al equilibrio a través de dos importantes cambios en la microestructura. Primero, el crecimiento y transformación de partículas constituyentes por medio de difusión de largo alcance, entre los brazos dendríticos secundarios. Esta difusión de largo alcance transporta elementos de aleación (Fe,Mn,Si) a través de la matriz de la fase supersaturada primaria a la región interdendrítica y, dependiendo de la química en la región interdendrítica, puede facilitar la transformación del tipo β - α . Segundo, la precipitación de dispersoides en la región intergranular ocurre por la vía de nucleación, crecimiento y engrosamiento de pequeñas partículas de α -Al(Fe,Mn)Si [22].

3.5. Ensayo de dureza Brinell.

A cada muestra sometida a tratamiento térmico se le aplicó el ensayo de dureza. De acuerdo con la norma ASTM E10-15 [25], se aplica carga de 500kg con un balín de 10mm de diámetro como indentador. Se realizaron doce indentaciones en cada pieza determinando el valor promedio. Los resultados se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de dureza después del tratamiento térmico de homogenizado.

T ^o C	hr	HBW
570	8	80.8
570	6	82.7
570	4	82.8
550	8	84.2
550	6	85.9
550	4	89.6
530	8	92.6
530	6	93.0
530	4	93.2

Se observa que conforme aumenta la temperatura de tratamiento, la dureza disminuye, lo cual indica que a mayor temperatura y dependiendo del tiempo de permanencia habrá mayor transformación de la fase β -Al₆(Mn,Fe) a la fase α -Al(Fe,Mn)Si. La fase α -Al(Fe,Mn)Si presenta mayor ductilidad debido a su fina microestructura comparada con la fase β -Al₆(Mn,Fe), que presenta morfología más estrecha y que es típica de una aleación vaciada. Una de las propiedades de la fase β es su alta dureza debido a su morfología de tetraedros con bordes rectos los cuales son concentradores de esfuerzos, lo que conlleva a una fragilidad en el material. En cambio, la fase α presenta mayor ductilidad, ya que su forma es más redondeada (escritura china), la cual se obtiene en el tratamiento térmico de homogenizado.

3.6 Ensayo de tensión.

En este ensayo se determinan diversas propiedades de los materiales, tales como límite elástico, carga de fractura o resistencia a la tensión, y elongación. El ensayo de tensión se realizó de acuerdo con la norma ASTM E8-04 [26]. La tabla 15 muestra los resultados obtenidos para cada tratamiento térmico realizado, así como en estado de colada.

Tabla 15. Resultados del ensayo de tensión de la aleación Al-Zn-Mg-Mn.

MUESTRA		Aleación Al-Zn-Mn		
T °C	hr	UTS (MPa)	Deformación (%)	σ_0 (MPa)
Colada		243	2	111
570	8	325.6	6.42	74
570	6	354.18	6.22	87
570	4	333.53	6.16	112
550	8	335.5	4.3	100
550	6	323.6	4.5	108
550	4	314	3.9	115
530	8	302.78	3.4	110
530	6	306.58	3	127
530	4	310.78	2.6	149

En base a los resultados de la tabla 15, se observa que, conforme aumenta la temperatura de tratamiento de homogenizado y el tiempo de permanencia, el % de deformación aumenta. A 570°C a 8hr de permanencia se observa el mayor % deformación posible comparando

con la deformación obtenida en estado de colada, esto fue posible gracias a que los intermetálicos β -Al₆(Mn,Fe) transformaron a intermetálicos α -Al(Fe,Mn)Si, los cuales cambiaron de morfología ayudando a la formabilidad de esta aleación.

En la figura 15 se muestra la gráfica esfuerzo-deformación de las probetas con condiciones de 530°C con tiempos de 4, 8hr y estado de colada, donde se observa que no hubo una deformación significativa para el tratamiento de menor tiempo (a 4hr) comparado con el estado de colada, esto debido a que los intermetálicos β -Al₆(Mn,Fe) que causan fragilidad, aún no se transforman en intermetálico α -Al(Fe,Mn)Si que por su naturaleza incrementa la ductilidad del material.

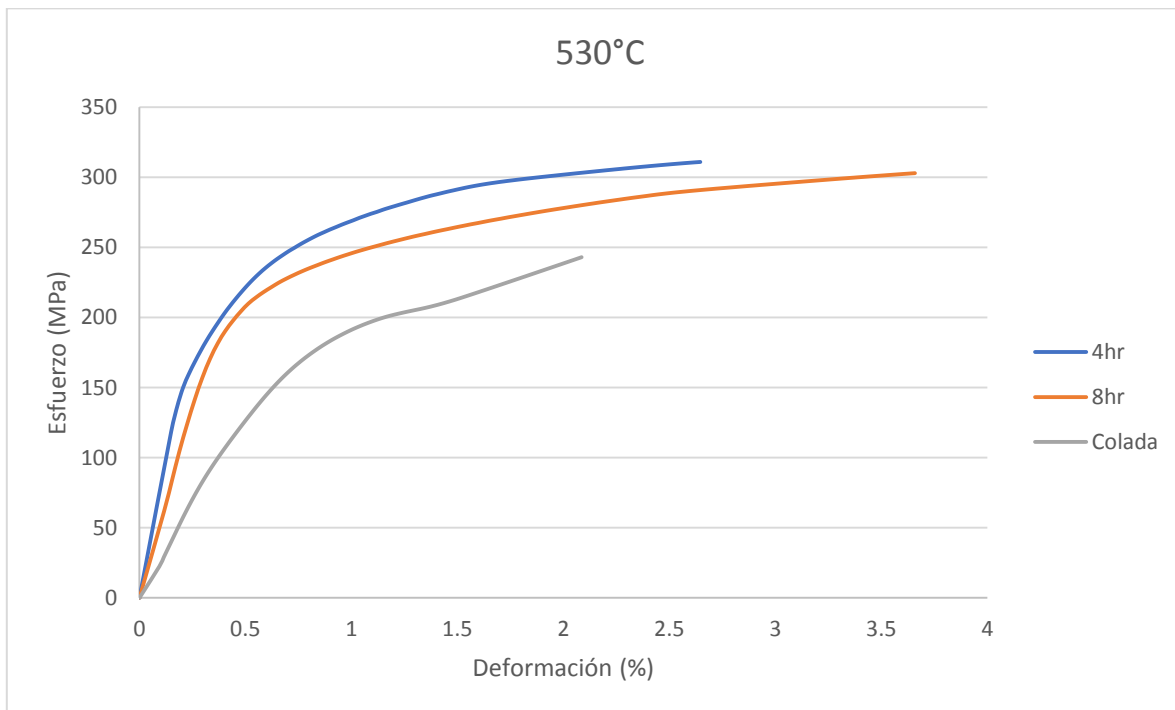


Figura 15. Curva esfuerzo-deformación de la aleación Al-Zn-Mn a 530°C de homogenizado a 4, 8hr de permanencia y estado de colada.

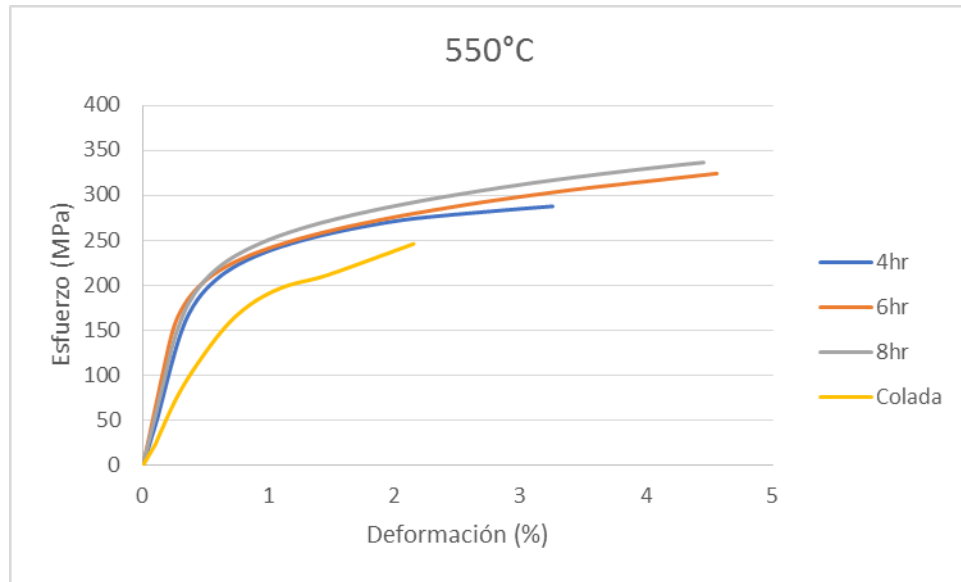


Figura 16. Gráfica esfuerzo-deformación de la aleación Al-Zn-Mn a 550°C de homogenizado a 4, 6, 8hr y estado de colada.

En la figura 16 se observan las curvas para el tratamiento térmico de homogenizado a 550°C de calentamiento con 4, 6 y 8hr de permanencia, se observa una mejora en el % de deformación a comparación de las curvas de la figura 15, donde a 550 con 4hr de permanencia muestra una similitud con la curva a 530 con 8hr de permanencia, pero aumentando el tiempo con 550°C la deformación y el *UTS* aumenta, esto debido a que por efecto temperatura y el tiempo de permanencia influye de forma significativa en la transformación de los intermetálicos $\beta \rightarrow \alpha$, lo cual incrementa la ductilidad.

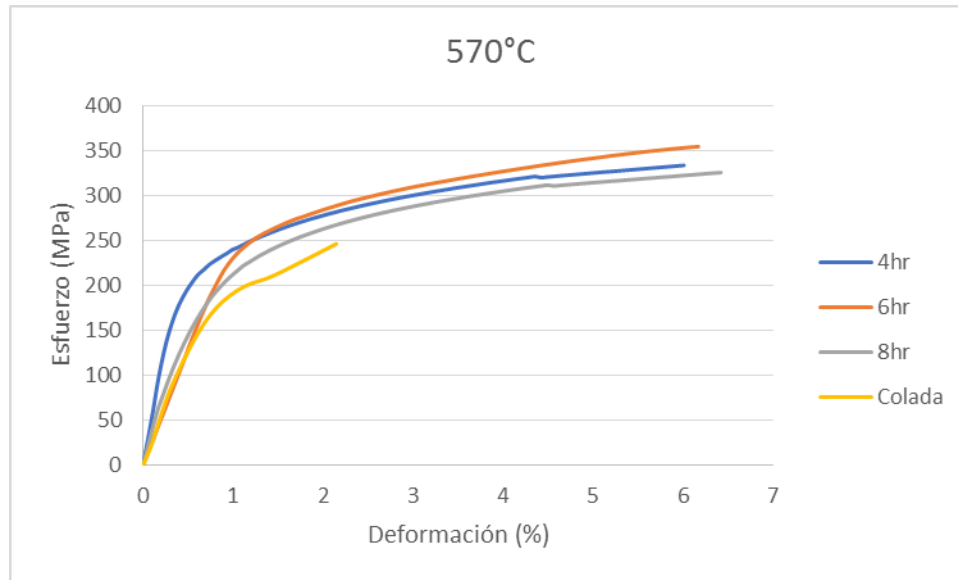


Figura 17. Gráfica esfuerzo-deformación de la aleación Al-Zn-Mn a 570°C de homogenizado a 4, 6, 8hr y estado de colada.

En la figura 17, se observan las curvas esfuerzo-deformación para el tratamiento térmico de homogenizado a 570°C a 4,6 y 8hr de permanencia, el % de deformación aumentó para cada tiempo de permanencia en comparación de las curvas anteriores de las figuras 15 y 16, siendo la curva de 8hr a 570°C en obtener un ligero aumento en su deformación, esto debido a que hubo mayor tiempo y temperatura para que ocurriera la transformación del intermetálico β -Al₆(Mn,Fe) a α -Al(Fe,Mn)Si, proporcionando el mejor comportamiento posible para esta aleación fabricada con reducción aluminotérmica.

3.7 Carga de laminación.

Para determinar la carga de laminación, se calcula primero el % de reducción, que está en función del radio del rodillo del molino de laminación (51mm)

Ahora de acuerdo con la ecuación 5, se sustituyen valores:

$$C.L. = L * W * \sigma_0$$

$$C.L. = (\sqrt{(51mm * 1.143mm)}) * 13mm * 74MPa = 7,344.86.73MPa \cdot mm^2$$

$$L = \sqrt{(51mm * 1.143mm)}$$

$$R \text{ rodillo} = 51mm$$

$$\Delta h \text{ máx.} = 1.143\text{mm}$$

$$W = 13\text{mm}$$

$$\sigma_0 = 74\text{MPa}$$

R rodillo	51mm
L	7.63498527mm
delta h máx	1.143mm
W	13mm
σ_0	74MPa

Cabe mencionar que el esfuerzo de fluencia (74MPa) se tomó de los resultados obtenidos del ensayo de tensión, que corresponde al mejor resultado del tratamiento de homogenizado, 570°C y 8hr de permanencia, donde hubo mayor deformación haciendo el material más dúctil.

Dando como resultado $7344.86\text{MPa} \cdot \text{mm}^2$, haciendo conversión de unidades a $\text{Pa} \cdot \text{m}^2$, donde Pa es igual a N/m^2 , dando como resultado 7,344.86N, ahora haciendo conversión de unidades a lb-f, da como resultado equivalente a **1651.19 lb-f**.

La carga de laminación se calculó para cada condición de tratamiento térmico obteniendo los siguientes resultados en la tabla 16:

Tabla 16. Carga de laminación.

T°C - t(hr)	σ_0 (Mpa)	C.L. (N)	lb-f
570-8hr	74	7344.86	1651.19
570-6hr	90	8932.93	2008.20
570-4hr	115	11414.30	2566.04
550-8hr	100	9925.48	2231.34
550-6hr	126	12506.11	2811.49
550-4hr	115	11414.30	2566.04
530-8hr	110	10918.03	2454.47
530-6hr	130	12903.13	2900.74
530-4hr	150	14888.22	3347.01

3.8 Conformado mecánico.

En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos en la segunda etapa de la fase experimental.

Tabla 17. Resultados de la reducción final de probetas de laminación.

T °C	Velocidad de rodillo (rpm)	% de reducción	Espesor final (mm)
365	12	50	6.5
	8		6.7
	5		6.7
	12	30	9
	8		9.2
	5		9.4
	12	15	10.7
	8		11
	5		11.2
395	12	50	6.3
	8		6.5
	5		6.6
	12	30	9.1
	8		9
	5		9.2
	12	15	10.7
	8		10.9
	5		11.1
425	12	50	6.2
	8		6.5
	5		6.5
	12	30	9.1
	8		9.1
	5		9.2
	12	15	10.6
	8		10.8
	5		11.1

Se observa que con mayor velocidad de rodillos se logra llegar al porcentaje establecido más cercano, el número de pasadas en el molino para probetas de mayor velocidad de rodillo y temperatura fueron menos en comparación de las restantes, llegando así más rápido a la reducción sin pérdida significativa de temperatura durante la laminación. Se observó que, a bajas revoluciones, las probetas presentan mayor pérdida de temperatura, lo

que ocasiona que el número de pasadas aumente considerablemente hasta obtener el espesor deseado.

Por otro lado, las muestras sometidas a laminación a la temperatura más baja (365 °C) y a menor velocidad de rodillo, presentaron grietas en la parte lateral debido a la pérdida de calor que ocurre durante las pasadas a la que fueron sometidas, con el fin de lograr el % de reducción propuesto, lo cual trae como consecuencia disminución en la ductilidad del material.

3.9. Caracterización de microestructura de muestras obtenidas por laminación en caliente mediante microscopio óptico.

En el tratamiento térmico de homogenizado establece que los intermetálicos β de composición química $Al_6(MnFe)$, con morfología tipo agujas, se transforman a intermetálicos α de composición química $Al(MnFe)Si$, con forma poligonal o redondeada. En el proceso de laminación en caliente la probeta sufre cambios continuos en la temperatura como se muestra en la figura 18, estos cambios de temperatura son importantes debido a que provoca ductilidad a la probeta durante el proceso laminación.

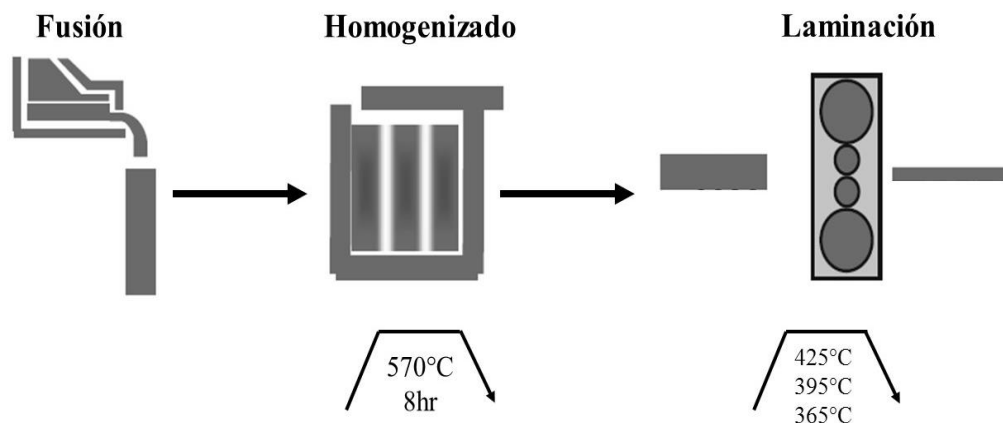


Figura 18. Esquema del proceso de obtención de una probeta laminada.

En la figura 19 se muestra una micrografía de una pieza sin deformación “a)” y una después del proceso de laminación “b)”, de la sección longitudinal para apreciar mejor cambio en el tamaño de grano. Para revelar la microestructura, las muestras se atacaron químicamente con el reactivo “Keller” mediante inmersión durante 40s [28].

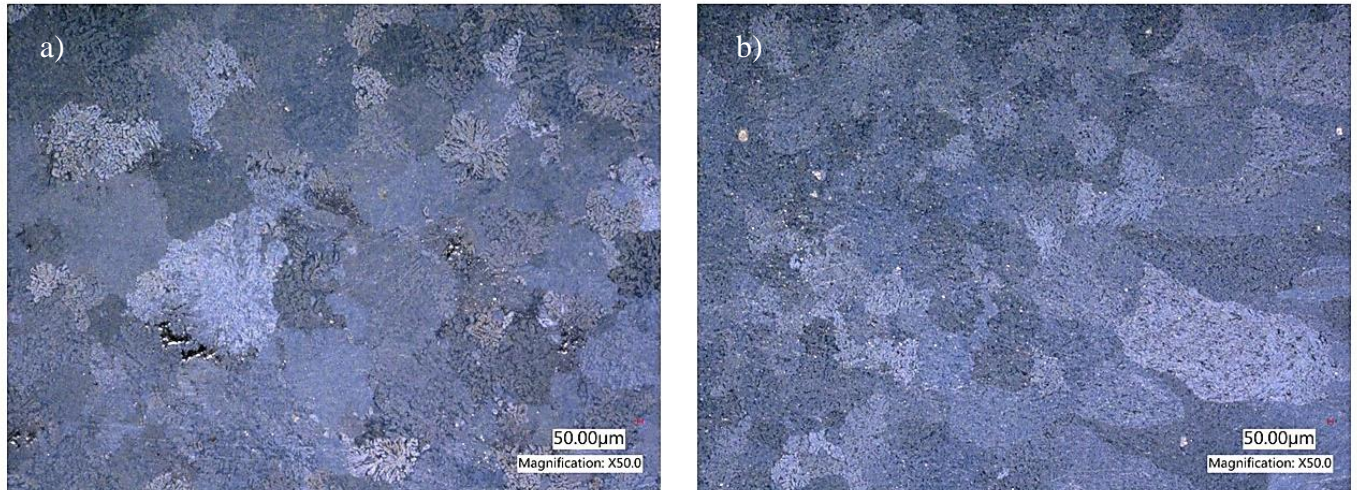


Figura 19. Evolución del tamaño de grano de la aleación Al-Zn-Mn en el proceso de laminación en caliente. a) Pieza sin deformar b) pieza laminada a 395°C, 8rpm, 30% de deformación, longitudinal.

En la figura 19, se observa que la pieza antes de deformar “a” tiene granos equiaxiales uniformes, resultado del tratamiento de homogenizado, mientras que en la pieza deformada “b” se observan granos de menor tamaño y algunos tienen la dirección de la laminación de forma alargada (granos deformados). Estos cambios en tamaño de grano son consecuencia de la recristalización, que ocurre cuando un material sufre deformación a altas temperaturas. La densidad de dislocaciones es reemplazada por la nucleación de nuevos granos en los límites de grano cuando aún se está deformando el material, pero la densidad de dislocaciones de los nuevos granos aumenta reduciendo el crecimiento de esto provocando un refinamiento en el material.

En la figura 20, se muestra la microestructura sin ataque, tomada a 1000x. Se observan intermetálicos (encerrados en círculos rojos) después del proceso de laminación a 395°C, 30 % de reducción, a 12rpm y 5rpm.

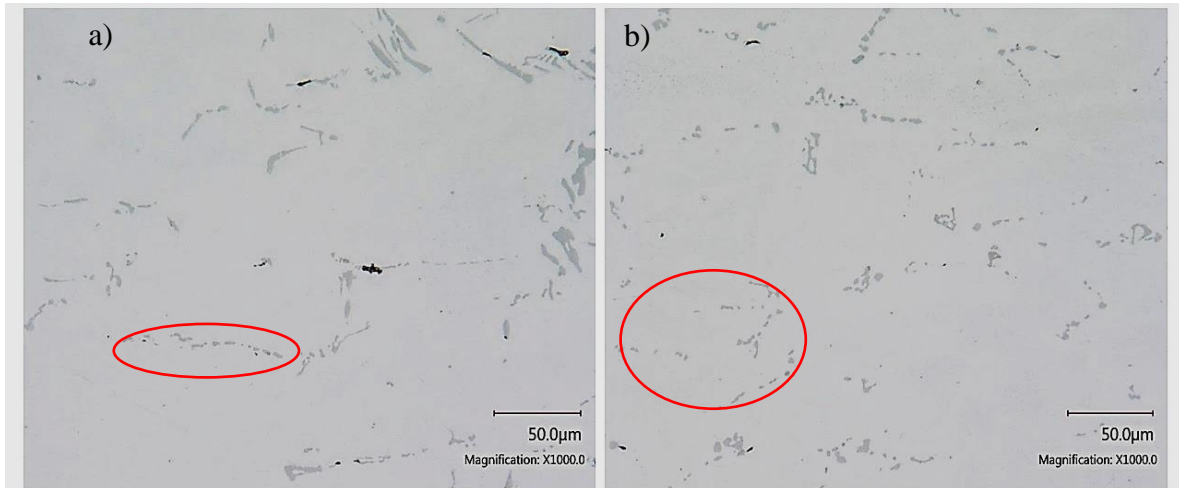


Figura 20. a) Probeta laminada a 395°C, 30% reducción a 12rpm. b) probeta laminada a 395°C, 30% de reducción a 5rpm. 1000x.

La mejora de la ductilidad en las aleaciones se debe a la transformación de los intermetálicos de β a α , en donde hubo un cambio en la estructura cristalina. El compuesto intermetálico β con estructura hexagonal transforma al intermetálico α con estructura cúbica centrada en las caras, lo que provoca que el material sea más dúctil.

Los intermetálicos se observan de menor tamaño y más globulizados, esto debido al calentamiento que ha llevado el proceso de laminación, los intermetálicos durante la deformación se sitúan sobre los límites de grano, como se muestra en la figura 20.

3.10 Velocidad de deformación.

Se calculó la velocidad de deformación para cada condición de tratamiento térmico, en base a la ecuación (11) así como para el conformado mecánico en base con los resultados de la deformación de las soleras, obteniendo los siguientes resultados de la tabla 18:

Tabla 18. Resultados de la velocidad de deformación.

T °C	Velocidad de rodillo (rpm)	% de reducción	Espesor final (mm)	Vel. Lineal (m/s)	Espesor final (m)	Vel. De deformación (s-1)
365	12	50	6.5	1.26	0.0065	46.01
	8		6.7	0.84	0.0067	29.89
	5		6.7	0.52	0.0067	18.68
	12	30	9	1.26	0.0090	31.99
	8		9.2	0.84	0.0092	20.60
	5		9.4	0.52	0.0094	12.42
	12	15	10.7	1.26	0.0107	22.52
	8		11	0.84	0.0110	13.83
	5		11.2	0.52	0.0112	8.13
395	12	50	6.3	1.26	0.0063	47.20
	8		6.5	0.84	0.0065	30.68
	5		6.6	0.52	0.0066	18.93
	12	30	9.1	1.26	0.0091	31.45
	8		9	0.84	0.0090	21.33
	5		9.2	0.52	0.0092	12.88
	12	15	10.7	1.26	0.0107	22.52
	8		10.9	0.84	0.0109	14.23
	5		11.1	0.52	0.0111	8.39
425	12	50	6.2	1.26	0.0062	47.80
	8		6.5	0.84	0.0065	30.68
	5		6.5	0.52	0.0065	19.17
	12	30	9.1	1.26	0.0091	31.45
	8		9.1	0.84	0.0091	20.97
	5		9.2	0.52	0.0092	12.88
	12	15	10.6	1.26	0.0106	23.10
	8		10.8	0.84	0.0108	14.62
	5		11.1	0.52	0.0111	8.39

Se observa que, a mayor velocidad de rodillo, la velocidad de deformación aumenta. Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación, disminuyendo la ductilidad. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación desempeña un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia. Esto es importante en el trabajo en caliente, puesto que muchos materiales tienen velocidad de deformación muy sensible a las altas temperaturas.

La velocidad de deformación influye en la ductilidad de un metal. Una mayor velocidad de deformación provoca una menor ductilidad y un incremento en los esfuerzos necesarios para producir cierta deformación. A bajos valores de velocidad de deformación ocurre un crecimiento de grano, mientras que el refinamiento de grano se presenta a altos valores de deformación.

IV. CONCLUSIONES

- Es posible fabricar aleaciones Al-Zn-Mg-Mn a partir de chatarra de envases de aluminio y masa negra (ZnO y Mn_3O_4) mediante reducción aluminotérmica.
- El tratamiento térmico de homogenizado a condiciones de 8h de permanencia y $570^{\circ}C$ de temperatura, transformó la microestructura de colada β , modificando composición y estructura cristalina de las partículas intermetálicas α . Los intermetálicos $\beta-Al_6(Mn,Fe)$ se transforman a intermetálicos $\alpha-Al(Fe,Mn)Si$ debido al aumento en la temperatura y tiempo de tratamiento térmico, cambiando su morfología.
- Conforme aumenta la temperatura del tratamiento térmico de homogenizado y el tiempo de permanencia disminuye la dureza (80.8 HBW) y ocurre una mayor deformación (6.42%) para esta aleación.
- Es posible llevar a cabo el proceso de laminación en caliente al 50% de reducción para aleaciones Al-Zn-Mg-Mn fabricadas con reducción aluminotérmica.
- El tamaño de los intermetálicos cambiaron de morfología de escritura china a cuboidal lo cual favoreció a la laminación en caliente para esta aleación a bajas y altas revoluciones de rodillo.
- Cuando la temperatura a la cual se lamina es constante, la velocidad de deformación aumentará al mismo tiempo que el porcentaje de deformación aumenta.

BIBLIOGRAFÍA

1. Párraga, J.A.M., *Estudio integral para la recuperación de chatarra de aluminio*, in *Dirección general de posgrados*. 2010, Universidad tecnológica Equinoccial: Quito, Ecuador.
2. Torres, J.T., A.F. Valdés, and J.M.A. Robles, *Elaboration of Al-Mn Alloys by Aluminothermic Reduction of Mn₂O₃*. *Materials Today: Proceedings*, 2015. **2**(10): p. 4963-4970.
3. International, A., *Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability*. 2007.
4. Jessica Castillo, M.M., Juan Rojas, *Factibilidad Tecno Económica De Un Planta Recicladora Para La Producción De Aluminio Secundario*. 2014, Instituto Politécnico Nacional: México, D.F.
5. Delgado, F.M., *Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado*, in *Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*. 2016, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá, Colombia.
6. George E. Tot ten, D.S.M., *Handbook of Aluminum*. Vol. Volume 7. 2003, New York, EUA.
7. International., A., *Properties and Selection Nonferrous Alloys*, in *ASM Metals Handbook*. 1990. p. 3470.
8. Stefanescu, D.M., *Science and Engineering of Casting Solidification*. Tercera ed. 2015, Columbus, OH, USA: Springer International
9. Jaradeh, M.M.R., *The Effect of Processing Parameters and Alloy Composition on the Microstructure Formation and Quality of DC Cast Aluminium Alloys* 2006, Stockholm, Sweden.
10. Razaz, G., *Problems in the Aluminium DC Casting Process Associated with Melt Treatment Operations*. 2019, Faculty of Science, Technology and Media.
11. Martinez, C.A.A., *Propuesta metodológica para la recuperación de las pilas alcalinas y Zinc-Carbono*. 2017, Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia: Colombia.
12. José Castro, M.L.D., *La contaminación por pilas y baterías en México*, in *Gaceta Ecológica*. 2004: Distrito Federal, México. p. 53-74.
13. Paul Gasper¹, J.H., Jean-Paul Miralda², Ricardo Bonhomme², Jerome Schaufeld², Diran Apelian¹ and Yan Wang^{1,*}, *Economic feasibility of a mechanical separation process for recycling alkaline batteries*. *New Materials for Electrochemical Systems*, 2013: p. 297-304.
14. Suárez, A.S.M., *Diseño de una metodología para el tratamiento de baterías domesticas desechadas, en calidad de residuos peligrosos*, in *Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias*. 2010, Universidad de Las Américas: Quito, Colombia.
15. Ochoa, R., et al., *Manufacture of Al-Zn-Mg Alloys Using Spent Alkaline Batteries and Cans*. *Materials Today: Proceedings*, 2015. **2**(10): p. 4971-4977.
16. industrial, F.i., *Tratamientos térmicos protocolo curso de materiales*. 2008-2 ed. 2008, Colombia. 22.
17. Mandal, N.R., *Aluminum welding*. 2002, Cambridge: Woodhead
18. Meyer, P., *Method of continuously heat-treating 7000-series aluminium alloy sheet material*. 2016.
19. marine, A., *Aluminium alloys in marine applications*, in *Aluminium and the sea*. 2015.
20. Armando Ortiz Prado, O.R.C., Juan Armando Ortiz Varela, *Conformado mecánico de los metales*, in *Modelado de procesos de manufactura*. 2013: México, D.F.
21. Groover, M.P., *Fundamentos de manufactura moderna*. 3rd ed. 2007.
22. S. Kalpakjian, S.R.S., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. quinta ed. 2008. 1328.
23. Harris, J.N., *Mechanical working of metals*. 1st ed. Vol. 36. 1983.

24. Guerrero, V.H.B., *Análisis de textura de aceros laminados*, in *Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica*. 2013, Universidad autónoma de Nuevo León: San Nicolás de los Garza. N.L.
25. International, A., *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, in *ASTM Standards*. 2015: United States.
26. International, A., *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, in *ASTM Standards*. 2015.
27. Jurado, G.B., *Estudio del proceso de elaboración de aleaciones Al-Zn-Mn mediante la reducción aluminotérmica de mezclas de ZnO y Mn₂O₃ obtenidos de pilas alcalinas descargadas*. 2018, Cinvestav: Ramos Arizpe, Coahuila, México.
28. International, A., *Metallography And Microstructures.*, in *ASM Handbook*. 2004: USA.