



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Obtención de aleaciones de Al-Zn con reciclado de
arillo de lata de aluminio para su potencial aplicación a
soldaduras por método blando”**

T E S I S

Para obtener el título de:

INGENIERO EN MATERIALES

Presenta:

EDER MARCELO MORA GENIS

Director de tesis

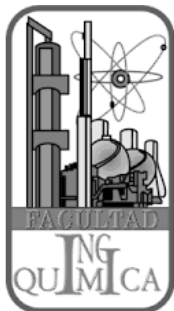
DR. MARCO ANTONIO MORALES SÁNCHEZ

Co-Director de tesis

DR. JOSÉ ISRAEL RODRÍGUEZ MORA

Fecha de examen profesional

02/03/26





Oficio No. FIQ/AC/193/2025
Asunto: Prórroga de Registro de Tema de Tesis.

C. EDER MARCELO MORA GENIS
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA EN MATERIALES
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación de la prórroga del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales cuyo título es el siguiente:

“Obtención de aleaciones de Al-Zn con reciclado de arillo de lata de aluminio para su potencial aplicación a soldaduras por método blando”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Marco Antonio Morales Sánchez.
Co-Director de Tesis: Dr. José Israel Rodríguez Mora.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será por **SEIS MESES A PARTIR DEL 30 DE AGOSTO DEL 2025 AL 02 DE MARZO DEL 2026.**

Atentamente
“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”
H. Puebla de Z., a 4 de noviembre de 2025

Dr. Rubén Jonatan Aranda García
Secretario Académico



C.c.p. Director de Tesis: Dr. Marco Antonio Morales Sánchez.
C.c.p. Co-Director de Tesis: Dr. José Israel Rodríguez Mora.
C.c.p. Archivo.

Título: Obtención de aleaciones de Al-Zn con reciclado de arillo de lata de aluminio para su potencial aplicación a soldaduras por método blando

Estudiante: Eder Marcelo Mora Genis

Comité

Dr. Crescencio Octavio Olivares Xomelt
Presidente

Dr. José Humberto Camacho García
Secretario

Dr. Marco Antonio Morales Sánchez
Vocal

Asesores

Dr. Marco Antonio Morales Sánchez y Dr. José Isrrael Rodríguez Mora

Agradecimientos.

A mi familia, por su apoyo incondicional y motivación constante a lo largo de mi formación académica.

A mis amigos, por el ánimo, la comprensión y el acompañamiento durante este proceso.

Y a mis maestros, por compartir sus conocimientos, orientación y dedicación, los cuales fueron fundamentales para mi desarrollo académico.

Índice general.

Contenido

Objetivo general	¡Error! Marcador no definido.
Objetivos específicos	¡Error! Marcador no definido.
Índice general	5
Índice de tablas	7
Índice de figuras	8
I. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Antecedentes	¡Error! Marcador no definido.
1.2 Reactores tipo Batch para fundición de aluminio.	¡Error! Marcador no definido.
1.3 Aluminio en soldaduras.	¡Error! Marcador no definido.
1.4 Aleaciones de aluminio reciclado.....	¡Error! Marcador no definido.
1.5 Aleaciones Al-Zn con aluminio reciclado.	¡Error! Marcador no definido.
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Hornos de crisol.	14
2.2 Aluminio.	17
2.3 Fundición.....	20
2.4 Técnicas de caracterización.	22
2.5 Propiedades mecánicas.	24
III. METODOLOGÍA	27
3.1 Construcción de reactor tipo batch.	28
3.2 Pruebas de caracterización previas a la fundición.	33
3.3 Obtención de aleaciones.	34
3.4 Caracterización de pruebas mecánicas de aleaciones de aluminio.	37
3.5 Preparación de muestras para Difracción de Rayos X (DRX).	38
3.6 Preparación de muestras para metalografías.	39
3.7 Proceso de soldadura.....	42
IV. RESULTADOS	44
4.1 Construcción de reactor tipo Bacht.	44
4.2 Caracterizaciones previas a las fundiciones.	46
4.2.1 Prueba de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) a electrodo Durafix.	46

4.2.2 Prueba de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) a partes de lata de aluminio.	47
4.3 Obtención de aleaciones.....	52
4.4 Caracterización de pruebas mecánicas de aleaciones de aluminio.	57
4.5 Difracción de Rayos X.	59
4.6 Metalografías.....	65
4.7 Proceso de soldadura.....	68
Conclusiones.	74
V. BIBLIOGRAFÍA	78

Índice de tablas.

Tabla 1. Composición de aleaciones Al-Zn.	36
Tabla 2. Obtención de aleaciones.	38
Tabla 3. Porcentaje de materiales del electrodo Durafix.	48
Tabla 4. Porcentajes de composición de la base de la lata de aluminio.	49
Tabla 5. Porcentajes de caracterización de la parte interna de la lata de aluminio.	50
Tabla 6. Porcentajes de caracterización de la parte interna de la lata de aluminio.	52
Tabla 7. porcentajes de caracterización del arillo de la lata de aluminio.	53
Tabla 8. Tabla actualizada de obtención de aleaciones.	53
Tabla 9. Eficiencia de fundición de las diferentes aleaciones.	57
Tabla 10 Tabla 10 Resultados de dureza de aleaciones.	59
Tabla 11. Aleaciones con su fase predominante, fase secundaria y fichas cristalográficas.	65
Tabla 12. Resumen de metalografías.	69

Índice de figuras.

Figura 1. Horno de crisol.....	16
Figura 2 crisol: a) Crisol móvil, b) Crisol estacionario o fijo, y c) Crisol basculante	16
Figura 3 Crisol y hornos de crisol diversos.....	17
Figura 4 Construcción de horno a) corte de tapa b) perforación de base c) corte de componentes y d) unión de componentes.....	30
Figura 5 Construcción interna del horno a) colocación de malla b) colocación de mezcla en la basa c) colocación de malla en el cuerpo d) colocación de mezcla en el cuerpo.....	32
Figura 6 a) construcción de tapa b) montado de tapa al reactor.....	33
Figura 7 Construcción de sistema de aire a) fabricación de codo de 90° b) montaje de codo a caja metálica c) montaje de sistema de aire al reactor y d) prueba de fundición...	34
Figura 8 Bloque de Zinc de la marca Hikvison	35
Figura 9 Proceso de obtención de aleaciones Al-Zn	37
Figura 10 Sección obtenida de aleación Al-Zn 5050.	40
Figura 11 Muestras obtenidas después del curado de la resina.	41
Figura 12 Muestras obtenidas después del proceso de desbaste.	41
Figura 13 Ácido nítrico utilizado para revelación de microestructura.	42
Figura 14 Microscopio Velab Industrial VE-407.....	43
Figura 15 Perfil de aluminio utilizado para pruebas de soldadura.	44
Figura 16 Componentes del reactor a) fuente de aire b) entrada al sistema de aire c) cuerpo del reactor d) crisol e) cámara de combustión f) sistema de aire y g) tapa del reactor.	46
Figura 17 a) División de 5 espectros 500 micras de electrodo Durafix b) Caracterización de electrodo y c) porcentaje de materiales de electrodo.	47
Figura 18 a) División de 3 espectros con imagen a 600 micras de la base de la lata del aluminio b)) Caracterización de la base de la lata del aluminio y c) Porcentajes de materiales de la base de la lata del aluminio.	49
Figura 19 a) División de 3 espectros con imagen a 600 micras de la parte interior del cuerpo de la lata del aluminio b) Caracterización de la parte interior del cuerpo de la lata del aluminio y c) Porcentajes de materiales de la parte interior del cuerpo de la lata del aluminio.	50
Figura 20 a) División de 3 espectros con imagen a 600 micras de la parte exterior del cuerpo de la lata del aluminio b) Caracterización de la parte exterior del cuerpo de la lata del aluminio y c) Porcentajes de materiales de la parte exterior del cuerpo de la lata del aluminio.	51
figura 21 a) división de 3 espectros con imagen a 600 micras del arillo de la lata del aluminio b) caracterización del arillo de la lata del aluminio y c) porcentajes de materiales del arillo de la lata del aluminio.	52

Figura 22 Aleaciones obtenidas mediante el proceso de fundición.	54
Figura 23 Durómetro digital portátil YHT-500.....	58
Figura 24 Toma de dureza Leeb a probetas.....	59
Figura 25 a) Espectro de rayos x correspondiente al arillo de lata de aluminio y b) espectro correspondiente al zinc.	61
Figura 26 Espectros correspondientes a las aleaciones obtenidas.	64
Figura 27 Diagrama de fases del sistema Al-Zn.....	66
Figura 28 Metalografía correspondiente a la aleación 5050.	67
Figura 29 Metalografía correspondiente a la aleación 4060.	68
Figura 30 Metalografía correspondiente a la aleación 3070.	68
Figura 31 Metalografía correspondiente a la aleación 2080.	69
Figura 32 Metalografía correspondiente a la aleación 1090.	68
Figura 33 Pieza de aluminio deformada debido a la exposición prolongada de calor.	70
Figura 34 Pieza unida y separada correspondiente a la aleación 3070.....	71
Figura 35 Piezas de aluminio unidas correspondientes a la aleación 2080.	71
Figura 36 Piezas de aluminios soldadas correspondientes a la aleación 1090.	72
Figura 37 Gráfica evolución de tiempo de fusión vs contenido de Zn.....	73

Capítulo 1.

I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes

El aluminio es uno de los metales de mayor desarrollo industrial en las últimas décadas y actualmente es el segundo metal más producido después del hierro [1]. Debido a su amplio uso, ha surgido la necesidad de implementar procesos de reciclaje eficientes, convirtiéndolo en uno de los metales más reciclados a nivel mundial [2]. Desde 1950, la demanda global de aluminio se ha incrementado de forma significativa, alcanzando aproximadamente 45 millones de toneladas anuales, y se prevé que esta tendencia continúe hasta 2050 [3].

La producción de aluminio primario tiene un alto impacto ambiental, ya que consume alrededor del 3.5% de la electricidad mundial y contribuye aproximadamente con el 1% de las emisiones globales de CO₂ [3]. Además, la extracción de bauxita requiere remover grandes volúmenes de roca, lo que genera deforestación y degradación del suelo [4]. En contraste, la fundición de aluminio reciclado reduce considerablemente este impacto, ya que genera solo alrededor del 5% de las

emisiones asociadas al proceso convencional de producción de aluminio primario [5].

El reciclaje de aluminio permite disminuir la huella de carbono, mejorar la eficiencia energética y reducir la presión sobre los recursos naturales [6], [7]. La calidad del aluminio reciclado es comparable a la del aluminio primario, siempre que se mantenga un adecuado control del material durante el proceso [8]. Este material se utiliza ampliamente en la fabricación de latas, envases, componentes automotrices y estructuras para la construcción [9].

El reciclaje de latas de aluminio es especialmente relevante, ya que permite un ahorro energético de hasta el 95% en comparación con la producción de aluminio primario, además de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero [10]. Asimismo, este proceso genera beneficios económicos y sociales, como la reducción de costos de producción y la generación de empleos [11], [12].

En México, se estima que se recicla aproximadamente el 70% de las latas de aluminio consumidas [13]. Este proceso es impulsado por empresas y organizaciones que promueven la reutilización del aluminio y el desarrollo de políticas de reciclaje más eficientes [14], [15]. No obstante, el reciclaje de aluminio en el país aún enfrenta desafíos importantes, como la falta de infraestructura adecuada y la necesidad de concientizar a la población sobre la importancia del reciclaje [17].

1.2 Reactores tipo batch para fundición de aluminio

La fundición de aluminio es un proceso fundamental en la industria metalúrgica debido a las propiedades del aluminio, como su baja densidad, alta conductividad térmica y resistencia a la corrosión. En los últimos años, la construcción de hornos o reactores tipo batch de fabricación casera ha ganado interés como alternativa para reciclar aluminio y reducir costos [18].

Estos sistemas suelen estar compuestos por un recipiente refractario, un crisol y una fuente de calor capaz de alcanzar temperaturas cercanas a los 660 °C, necesarias para la fusión del aluminio. Entre los combustibles más utilizados se

encuentran el gas propano y el carbón, frecuentemente asistidos por aire forzado para mejorar la eficiencia térmica [18], [19].

Uno de los principales retos en el diseño de estos hornos es la selección adecuada de materiales refractarios, ya que deben soportar altas temperaturas sin degradarse. Materiales como ladrillos refractarios, cementos resistentes al calor y mezclas con perlita o vermiculita son comúnmente utilizados para mejorar el aislamiento térmico y la durabilidad del sistema [20].

El uso de reactores tipo batch permite trabajar con cantidades controladas de aluminio reciclado, facilitando la elaboración de aleaciones y el control del proceso de fundición. Además, estos sistemas promueven el aprovechamiento de materiales reciclados y contribuyen a la sostenibilidad del proceso [18]. No obstante, el manejo de altas temperaturas requiere medidas de seguridad adecuadas, como el uso de equipo de protección personal y una correcta ventilación del área de trabajo [19].

1.3 Aluminio en soldaduras

El aluminio y sus aleaciones pueden unirse principalmente mediante procesos de soldadura por fusión, aunque su soldabilidad depende del contenido de elementos de aleación [21]. Para este fin, se utilizan materiales de aporte compatibles con el material base, siendo comunes las aleaciones Al-Si, Al-Mg y Al-Zn, cada una con aplicaciones específicas en función de sus propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión [22]–[24].

Uno de los principales problemas en la soldadura de aluminio es la formación de grietas en caliente, fenómeno que puede mitigarse mediante la selección adecuada del material de aporte y el control de los parámetros del proceso [25]. Existen productos comerciales, como varillas de soldadura a base de Al-Zn, ampliamente utilizadas para reparaciones y aplicaciones industriales ligeras [26]–[28].

1.4 Aleaciones de aluminio reciclado

Las aleaciones de aluminio fabricadas con material reciclado se han vuelto cada vez más comunes debido a su menor costo e impacto ambiental. El aluminio reciclado

proviene principalmente de residuos post-consumo y residuos industriales, los cuales pueden reprocesarse sin una pérdida significativa de propiedades [29], [30].

Este material se utiliza ampliamente en la producción de aleaciones Al-Si, Al-Mg y Al-Zn, con aplicaciones en las industrias automotriz, aeroespacial y de envases [31], [32]. Grandes empresas del sector han desarrollado tecnologías para aumentar el contenido de aluminio reciclado en sus productos, contribuyendo a una reducción significativa del consumo energético y de las emisiones de CO₂ [33], [34].

El reciclaje de aluminio consume únicamente alrededor del 5% de la energía requerida para producir aluminio primario, lo que representa una ventaja ambiental considerable [35], [36]. Además, el aluminio puede reciclarse múltiples veces sin perder sus propiedades, lo que lo convierte en un material clave para la economía circular [37].

1.5 Aleaciones Al-Zn con aluminio reciclado

Las aleaciones Al-Zn son ampliamente reconocidas por su alta resistencia mecánica y baja densidad, lo que las hace adecuadas para aplicaciones estructurales en sectores como el automotriz, aeroespacial y de construcción [38], [41]. El uso de aluminio reciclado en estas aleaciones sigue procesos similares a los del aluminio primario, pero con una ventaja significativa en términos de sostenibilidad [39].

El proceso de fabricación incluye la recolección, fundición, aleación, refinación y solidificación del material, garantizando una calidad adecuada para aplicaciones industriales [40]. A pesar de los beneficios ambientales y económicos, el principal desafío en estas aleaciones es el control de impurezas, las cuales pueden afectar las propiedades mecánicas y la soldabilidad [48], [63].

Diversos estudios han demostrado que las aleaciones Al-Zn recicladas mantienen propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión comparables a las de materiales primarios, especialmente cuando se emplean procesos de refinación adecuados [59][62]. Esto confirma su viabilidad para aplicaciones estructurales y de soldadura, contribuyendo al desarrollo de procesos más sostenibles dentro de la industria metalúrgica.

Capítulo 2.

II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Hornos de crisol.

Los hornos de crisol, como se muestra en la figura 1, son usados mayormente para la fundición en lotes de aleaciones no ferrosas como aquellas de aluminio, cobre, zinc y magnesio. En un horno de crisol, el metal fundido es mantenido en una estructura denominada crisol. Los calentadores generalmente a combustible fuera de esta estructura generan el calor que pasa a través del crisol hasta el metal fundido. En muchas operaciones de fundición, se acumula escoria en el revestimiento de la superficie metálica, mientras que en el fondo se acumulan lodo pesado no fundido. Ambos reducen la vida útil del crisol y deben ser retirados para ser reciclados o tratados como residuos. El proceso de fundir los metales en crisol

es uno de los más antiguos y sencillos. Se emplea todavía mucho en las fundiciones modernas, y probablemente se seguirá usando porque el costo inicial es barato y el metal se funde fuera del contacto con el combustible [65].

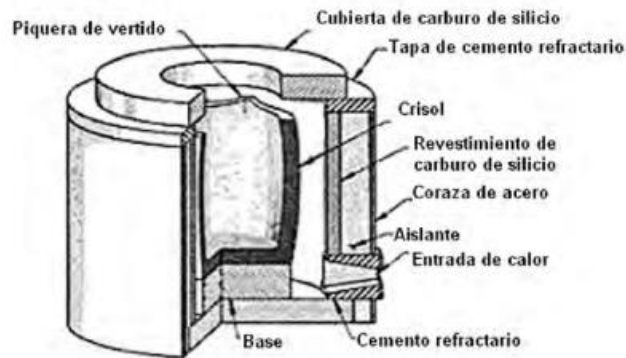


Figura 1 Horno de crisol

Los hornos de crisol suelen dividirse en tres clases, según el procedimiento empleado para colar el caldo contenido en los crisoles como se muestra en la figura 2. En los hornos de crisol propiamente dichos, los crisoles están totalmente dentro de la cámara del horno y se extraen de ella para tratar el metal. (a) En los hornos de crisol fijo no basculantes (hornos estáticos de crisol fijo) existe un solo crisol fijo al horno que sobresale de la cámara de calefacción, (b) por lo que los gases de combustión no pueden tener ningún contacto con el caldo y como no es posible bascularlos para colar, su contenido de caldo solo puede pasarse a los moldes sacándolo del crisol del horno con una cuchara. Por otro lado, los hornos basculantes de crisol fijo son análogos a los anteriores, pero toda la estructura del horno puede inclinarse para colar el caldo por vertido en cucharas o directamente a los moldes; el eje de rotación del horno puede ser central o transversal a la piqueta

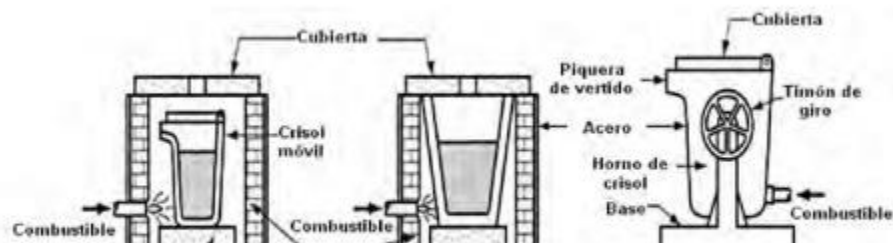


Figura 2 crisol: a) Crisol móvil, b) Crisol estacionario o fijo, y c) Crisol basculante

de colada y situado precisamente en la piquera; en este último caso el contenido del crisol del horno se vierte íntegramente en la cuchara [65].

Los hornos de crisol pueden ser hornos de foso, hornos a nivel del suelo o bien hornos levantados respecto al suelo mostrados en la figura 3. El tipo de foso suele calentarse por coque que se carga alrededor y por encima de los crisoles (que se sierran con una tapa de refractario) para producir la fusión y el sobrecalentamiento sin necesidad de cargar más coque. El combustible descansa sobre una parrilla bajo la cual hay un cenicero y foso de cenizas. El tiro puede ser natural o forzado, es decir, producido por una chimenea o mediante un pequeño ventilador que trabaja a presiones de 50 a 75 mm H₂O. El último método es preferible para controlar mejor el calor y la atmósfera del horno. Los hornos calentados por gas o petróleo diésel o residual, son más fáciles de controlar y funden más rápidamente que los otros, pero imponen condiciones más duras a los crisoles y los refractarios. Los crisoles son de capacidad variable, pueden contener hasta aproximadamente 160 Kg. de acero, aunque son más corrientes las capacidades de 49 a 90 Kg. para latones, la capacidad suele ser de 70 Kg. Los crisoles grandes exigen algún mecanismo de elevación que permita sacarlos del horno, mientras los más pequeños pueden ser manejados con tenazas por uno o dos hombres. En algunos casos se han usado en estos hornos crisoles de hasta 180 Kg. de capacidad; la ventaja que se les admite

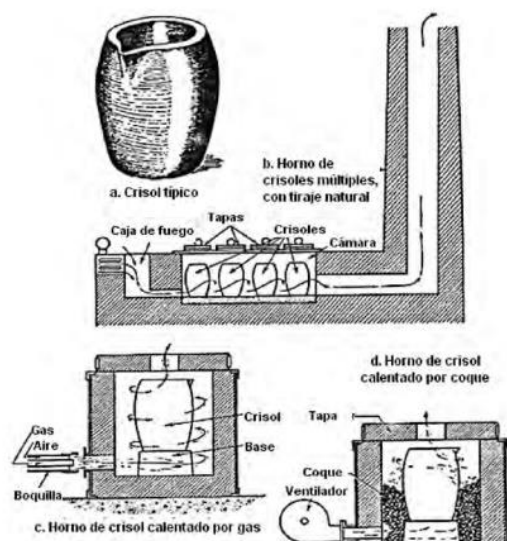


Figura 3 Crisol y hornos de crisol diversos.

es que hay menos perturbaciones y menos salpicaduras del caldo cuando se le transfiere desde la unidad de fusión hasta los moldes [65].

Cuando se encienden los hornos de crisol basculantes se calienta el crisol vacío, al principio suavemente, con la menor llama posible que puedan dar los quemadores durante los primeros 10 min. Después se aumenta por etapas la velocidad de calentamiento hasta, que el crisol se ponga al rojo, en cuyo momento se le carga y se pone el quemador al máximo. El tiempo necesario para llevar los crisoles al rojo debe ser de, aproximadamente 30 min. para capacidades de hasta 300 Kg. de latón, 45 min. para 450 a 700 Kg. de latón o 225 Kg. de aluminio y de 75 min. para 450 Kg. de aluminio. Los crisoles⁴ deben cargarse con el horno vertical, empleando tenazas suficientemente largas para que puedan llegar al fondo del crisol [65].

2.2 Aluminio.

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre, representando aproximadamente el 8% de su peso. A pesar de su abundancia, no fue hasta el siglo XIX cuando el aluminio comenzó a producirse en cantidades significativas. En 1825, el físico danés Hans Christian Ørsted fue el primero en obtener aluminio en forma impura, pero fue el químico alemán Friedrich Wöhler quien aisló el aluminio puro por primera vez en 1827 [66].

El desarrollo del proceso Hall-Héroult en 1886 marcó un hito en la historia del aluminio. Este proceso revolucionario permitió la producción en masa de aluminio mediante la electrólisis de la alúmina (óxido de aluminio) disuelta en criolita fundida. Gracias a este avance, el aluminio se volvió más accesible y pasó de ser un metal precioso a un material industrial de uso cotidiano [67].

El aluminio tiene una densidad de aproximadamente 2.7 g/cm^3 , que es alrededor de un tercio de la del acero, lo que lo convierte en un material ideal para aplicaciones donde el peso es un factor crítico, como en la industria aeroespacial y automotriz. El aluminio es un excelente conductor tanto de calor como de electricidad, lo que lo hace útil en aplicaciones eléctricas y de transferencia de calor, como radiadores y cables eléctricos. Una capa de óxido de aluminio que se forma de manera natural

en su superficie lo protege de la oxidación y la corrosión. Esta característica es particularmente útil en aplicaciones en ambientes húmedos o marinos [68].

El aluminio no se encuentra en estado puro en la naturaleza, sino que se extrae principalmente de la bauxita, una roca que contiene entre un 30 y 60% de alúmina (Al_2O_3). El proceso metalúrgico de obtención de aluminio a partir de la bauxita se realiza en dos etapas principales:

1. Proceso Bayer: Se utiliza para extraer alúmina de la bauxita. Este proceso implica la disolución de la alúmina en una solución de hidróxido de sodio, seguido de la precipitación de alúmina pura.
2. Proceso Hall-Hérault: Después de obtener la alúmina, esta se somete al proceso de electrólisis, donde se disuelve en criolita fundida y se pasa una corriente eléctrica para separar el aluminio de la alúmina [66].

El aluminio puede ser aleado con otros elementos como el magnesio, silicio, cobre y zinc para mejorar sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y su capacidad de ser trabajado. Las aleaciones de aluminio se clasifican en dos grandes grupos: las aleaciones de fundición y las aleaciones de forja. Las de fundición son aquellas que se utilizan para piezas moldeadas, mientras que las de forja son más adecuadas para productos laminados, extruidos o forjados [67].

El reciclaje del aluminio es una práctica fundamental dentro de la industria moderna debido a sus beneficios económicos y medioambientales. La producción de aluminio reciclado requiere solo un 5% de la energía necesaria para producir aluminio primario a partir de bauxita. Además, el reciclaje reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de extraer nuevas materias primas.

Cerca del 75% del aluminio producido en la historia sigue en uso hoy en día, gracias a su capacidad para ser reciclado sin perder sus propiedades. Gran parte del aluminio reciclado proviene de productos de desecho, como latas de bebidas y piezas de automóviles [69].

El zinc ha sido conocido desde la antigüedad, aunque su identificación como un metal distinto se produjo en el siglo XIII. Los antiguos egipcios y griegos utilizaban

compuestos de zinc en diferentes aplicaciones, pero no fue hasta el siglo XVIII que se comenzaron a establecer métodos para su producción en estado puro. En 1746, el químico alemán Andreas Marggraf fue uno de los primeros en aislar el zinc puro, y más tarde, el químico suizo William Cruickshank desarrolló un proceso de destilación para la obtención del zinc [70].

El zinc se convirtió en un metal comercialmente importante en el siglo XIX, especialmente después de la invención de procesos como la galvanización, que mejoraron su resistencia a la corrosión. Hoy en día, el zinc es un elemento esencial en la industria moderna, utilizado principalmente para recubrimientos y aleaciones [70].

Tiene una densidad de aproximadamente 7.14 g/cm^3 , lo que lo hace más pesado que el aluminio, pero más ligero que el cobre. El zinc tiene un punto de fusión relativamente bajo de aproximadamente $419.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($787.1 \text{ }^\circ\text{F}$), lo que facilita su procesamiento en forma líquida para aplicaciones como la fundición y la galvanización. Una de las propiedades más valiosas del zinc es su capacidad para resistir la corrosión. Esto se debe a la formación de una capa de óxido de zinc en su superficie, que protege el metal subyacente de la oxidación y el deterioro, lo que lo hace ideal para recubrimientos de acero y otros metales [71].

La producción de zinc generalmente comienza con la extracción de minerales de zinc, siendo la esfalerita (ZnS) el más común. El proceso de producción incluye la concentración que es cuando se trituran y muelen los minerales para separar el zinc de otros minerales no deseados. El concentrado se somete a un proceso de tostación, donde se oxida el sulfuro de zinc a óxido de zinc, liberando dióxido de azufre. Finalmente, el óxido de zinc se reduce a zinc metálico mediante la reacción con carbón o con otros reductores, como el hidrógeno. La galvanización es una de las aplicaciones más comunes del zinc, donde se recubre acero y hierro con una capa de zinc para protegerlos de la corrosión. Este proceso se realiza a menudo mediante inmersión en caliente, donde el metal base se sumerge en zinc fundido [70].

El zinc tiene una amplia variedad de aplicaciones industriales.

- Galvanización: La aplicación más común del zinc es en la galvanización de metales, especialmente en la industria de la construcción y automotriz, para prevenir la corrosión.
- Aleaciones: El zinc se utiliza en diversas aleaciones, como el latón (una aleación de cobre y zinc) y el zamak (aleaciones de zinc con aluminio, magnesio y cobre), que se utilizan en la fabricación de componentes mecánicos y de precisión.
- Industria química: El zinc también es un componente clave en la producción de productos químicos, como el óxido de zinc, que se utiliza en neumáticos, productos farmacéuticos y cosméticos [72].

El reciclaje del zinc es un proceso importante en la gestión de residuos. Se estima que hasta el 80% del zinc utilizado en la galvanización puede ser reciclado, lo que no solo ahorra recursos, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción primaria de zinc. La implementación de técnicas de reciclaje efectivo es crucial para la sostenibilidad de la industria del zinc [71].

2.3 Fundición.

La fundición es un proceso metalúrgico que implica la conversión de metales y aleaciones en formas útiles mediante la solidificación de materiales en estado líquido. Este proceso ha sido fundamental en la evolución de la industria y la fabricación de componentes, desde herramientas simples hasta complejas estructuras industriales. La historia de la fundición se remonta a miles de años atrás, cuando los humanos comenzaron a utilizar metales como el cobre y el bronce. Las civilizaciones antiguas desarrollaron técnicas rudimentarias para fundir y moldear metales, estableciendo las bases para la metalurgia moderna. Con el tiempo, el hierro se convirtió en el metal predominante debido a su abundancia y versatilidad, lo que llevó a la Revolución Industrial y a un aumento significativo en la producción de metales fundidos [73].

Existen diferentes métodos de fundición que se utilizan en la actualidad, adaptándose a las propiedades del material y a las necesidades de producción. Los métodos más comunes incluyen la fundición en arena, la fundición a presión, la fundición por cera perdida y la fundición centrífuga. La fundición en arena es la técnica más antigua y versátil, adecuada para la producción de piezas grandes y complejas a un costo relativamente bajo. En este método, se crea un molde a partir de arena y un aglutinante, donde se vierte el metal fundido. Sin embargo, la fundición a presión se ha vuelto cada vez más popular, especialmente para la producción de piezas pequeñas y de alta precisión. En este proceso, el metal fundido se inyecta a alta presión en un molde metálico, permitiendo un acabado superficial superior y dimensiones más precisas [73].

La fundición de aluminio es uno de los sectores más significativos dentro de la industria de fundición, dada la ligereza, resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas del aluminio. Las aleaciones de aluminio son ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales, desde componentes de automóviles hasta estructuras aeronáuticas. Las aleaciones de aluminio-silicio son particularmente valoradas por su buena fluidez durante el proceso de fundición y su resistencia a la corrosión, lo que las convierte en una opción preferida para la industria automotriz. Estas aleaciones también se utilizan en la fabricación de componentes que requieren un alto grado de integridad estructural, como en las aplicaciones aeroespaciales [74]. Por otro lado, las aleaciones de aluminio-magnesio son elegidas por su resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes marinos. La fundición de aluminio se puede realizar mediante varios métodos, siendo la fundición en arena y la fundición a presión las más comunes. Además, el reciclaje de aluminio es una práctica fundamental en este sector, ya que permite la reutilización del metal sin pérdida de propiedades mecánicas, contribuyendo así a la sostenibilidad y a la reducción de residuos en la industria [75].

En el caso del zinc, la fundición de este metal es crucial debido a sus propiedades anticorrosivas y mecánicas. Las aleaciones de zinc se utilizan principalmente en la industria automotriz y en la fabricación de electrodomésticos. La técnica más

utilizada para la fundición de zinc es la fundición a presión, que permite obtener componentes de alta precisión y un excelente acabado superficial. Las aleaciones de zinc-aluminio, por ejemplo, son muy valoradas por su buena resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, siendo adecuadas para aplicaciones en ambientes desafiantes. Este tipo de aleación se encuentra comúnmente en componentes que requieren un equilibrio entre resistencia y peso [73].

La fundición de magnesio ha ganado relevancia en los últimos años debido a la búsqueda de materiales más ligeros en diversas industrias, especialmente en la automotriz y la aeroespacial. Las aleaciones de magnesio, como AZ91D y AM60, son populares por su baja densidad y alta resistencia, lo que permite la fabricación de piezas que requieren un balance entre ligereza y robustez. Sin embargo, la fundición de magnesio presenta ciertos desafíos, como su alta susceptibilidad a la corrosión y la necesidad de un manejo cuidadoso durante el proceso de fundición para evitar defectos. La fundición a presión es el método más utilizado para el magnesio, y se han desarrollado técnicas específicas para optimizar la calidad del producto final y minimizar la oxidación del metal durante el proceso [74].

Además de las características y propiedades de los metales fundidos, es fundamental considerar los impactos ambientales de la fundición. La producción de metales a partir de minerales requiere grandes cantidades de energía y puede generar emisiones contaminantes si no se manejan adecuadamente. Por ello, el reciclaje de metales ha cobrado importancia no solo desde el punto de vista económico, sino también por su contribución a la sostenibilidad. En la actualidad, muchas plantas de fundición están implementando prácticas más limpias y eficientes, como la utilización de hornos eléctricos y la recuperación de calor, para reducir su huella de carbono y mejorar la eficiencia energética [74].

2.4 Técnicas de caracterización.

Las técnicas de caracterización son métodos utilizados para analizar y comprender las propiedades y la estructura de materiales a nivel macro y micro. Estas técnicas son esenciales en la ciencia de materiales, ya que permiten determinar la composición química, la estructura cristalina, la morfología y otras propiedades

físicas y mecánicas de los materiales. La caracterización es fundamental para el desarrollo de nuevas aleaciones y para optimizar procesos de fabricación, asegurando que los materiales cumplan con los requisitos específicos de las aplicaciones industriales [75].

La microscopía electrónica es una de las herramientas más utilizadas en la caracterización de materiales. Esta técnica se basa en la interacción de un haz de electrones con la muestra, proporcionando imágenes de alta resolución que permiten observar la morfología y la microestructura de los materiales. En la microscopía electrónica de barrido (SEM), el haz de electrones escanea la superficie de la muestra, generando electrones secundarios que se utilizan para formar imágenes. Además de su capacidad para observar la topografía, el SEM se puede acoplar a la espectroscopia por dispersión de energía (EDS) para determinar la composición química de las fases presentes en la muestra. La preparación de la muestra para SEM incluye el corte, pulido y, en ocasiones, un recubrimiento conductor para mejorar la calidad de la imagen [76].

La microscopía electrónica de transmisión (TEM), por su parte, utiliza un haz de electrones transmitido a través de la muestra, permitiendo un análisis a nivel atómico. Esta técnica es particularmente útil para estudiar la cristalización y las fases en aleaciones, ofreciendo información detallada sobre su comportamiento mecánico [77].

La difracción de rayos X (XRD) es otra técnica clave que se utiliza para identificar las fases cristalinas de un material. Al exponer una muestra a un haz de rayos X, se generan patrones de difracción que son específicos de la estructura atómica de la muestra. La técnica se realiza utilizando un difractómetro, donde la muestra se coloca en un soporte y se rota mientras se registra la intensidad de los rayos X difractados. Los patrones obtenidos permiten calcular parámetros de red y determinar la composición cristalina de la muestra. La XRD es esencial para evaluar la estabilidad de las aleaciones y su comportamiento bajo condiciones de servicio [78]. Además, esta técnica puede usarse para estudiar la textura de las aleaciones,

proporcionando información sobre la orientación cristalina de los granos, lo que impacta directamente en sus propiedades mecánicas.

La espectroscopia por dispersión de energía (EDS) se utiliza junto con SEM para analizar la composición elemental de una muestra. Durante el análisis, los electrones del haz excitan electrones de los átomos en la muestra, resultando en la emisión de rayos X característicos de cada elemento presente. Estos rayos X son capturados y analizados, permitiendo identificar los elementos y cuantificar su concentración. Este método es fundamental para estudiar la homogeneidad y distribución de elementos en aleaciones, correlacionando la composición con las propiedades mecánicas de los materiales [79].

La metalografía es una técnica que implica el estudio de la microestructura de los metales. Su proceso incluye la preparación de la muestra mediante corte, pulido y ataque químico para revelar la microestructura. La observación se realiza mediante un microscopio óptico o electrónico, lo que permite analizar características como el tamaño, forma y distribución de los granos, así como identificar defectos como poros o inclusiones. Esta técnica es esencial para entender cómo las propiedades microestructurales afectan el rendimiento de las aleaciones [80].

2.5 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas son características de los materiales que determinan su comportamiento bajo cargas o esfuerzos aplicados. Estas propiedades son fundamentales para el diseño y la selección de materiales en diversas aplicaciones ingenieriles. Dentro de las propiedades mecánicas, la tensión y la flexión son dos de los parámetros más importantes que se evalúan para determinar la idoneidad de un material en condiciones de uso específicas. La tensión se refiere a la fuerza que se aplica a un material por unidad de área, y se puede definir como el esfuerzo que produce una deformación elástica o plástica en el material. Se mide en pascales (Pa) o en megapascals (MPa). Para determinar la resistencia a la tensión de un material, se utilizan ensayos de tracción, que permiten evaluar cómo se comporta el material al ser estirado. El equipo comúnmente utilizado en estos ensayos es una máquina de tracción, que consiste en dos mordazas que sostienen el material a

prueba, estirándolo gradualmente hasta que se rompe. Durante la prueba, se registra la carga aplicada y el alargamiento del material, permitiendo así obtener la curva esfuerzo-deformación [81].

La curva de esfuerzo-deformación resultante proporciona información sobre el comportamiento del material. La resistencia a la tracción se define como el punto máximo en la curva, donde el material puede soportar la mayor carga antes de fallar. La ductilidad, que se mide como el alargamiento porcentual del material en el punto de fractura, es también un parámetro importante que indica la capacidad del material para deformarse antes de romperse. En aplicaciones donde se requiere una alta ductilidad, se prefiere el uso de aleaciones que puedan absorber energía sin fracturarse abruptamente, lo que es crítico en sectores como la construcción y la fabricación de componentes mecánicos [82].

La flexión es la respuesta de un material al ser sometido a una carga perpendicular a su longitud. Los ensayos de flexión son fundamentales para evaluar la resistencia de los materiales a la deformación bajo cargas laterales. Durante un ensayo de flexión, un material se apoya en dos extremos y se aplica una carga en el centro o en varios puntos a lo largo de su longitud. Esto se realiza utilizando una máquina de ensayo de flexión, que mide la carga aplicada y la deformación del material. A partir de estos datos, se pueden calcular las propiedades mecánicas relevantes, como el módulo de elasticidad en flexión y la resistencia a la flexión [83].

La resistencia a la flexión se refiere a la cantidad de carga que un material puede soportar antes de fallar bajo flexión. Este parámetro es crucial en aplicaciones donde los materiales estarán sujetos a cargas de flexión, como en vigas y soportes estructurales. El módulo de elasticidad en flexión describe la rigidez de un material y se calcula a partir de la pendiente de la curva de carga-deformación en la región elástica. Un módulo de elasticidad alto indica que el material es más rígido y resiste mejor la deformación bajo carga [84].

Los ensayos de tracción y flexión se realizan según normas específicas establecidas por organizaciones como la ASTM (American Society for Testing and Materials). Para los ensayos de tracción, se puede emplear la norma ASTM E8, que

proporciona un método estandarizado para determinar las propiedades mecánicas de los materiales metálicos. Por otro lado, para los ensayos de flexión, la norma ASTM D198 es utilizada para determinar la resistencia a la flexión de maderas y otros materiales [85].

Capítulo 3

III. METODOLOGÍA.

En el presente trabajo se llevó a cabo el diseño y construcción de un reactor de fundición de aluminio de baja escala, con el objetivo de obtener aleaciones de aluminio utilizando material reciclado y de bajo costo. Este reactor de tipo discontinuo fue pensado y fabricado para lograr reutilizar aluminio en un contexto sustentable, optimizando los recursos mediante el uso de materiales reciclados y accesibles. La estructura del reactor fue ensamblada a partir de diversos materiales reciclados, como una boya de flotación, placas de acero y perfiles de aluminio, materiales que aportan características de resistencia. Posteriormente se realizaron las primeras pruebas de fundición.

Durante el proceso de construcción, se emplearon varias técnicas de fabricación, combinando métodos manuales y avanzados para asegurar la estructura y funcionalidad del reactor. El corte de materiales fue realizado tanto manualmente como con herramientas de corte asistido, mientras que la unión de componentes

requirió soldadura de micro alambre. También se realizó lijado de piezas, con el fin de mejorar la precisión de los ensamblajes.

Posteriormente, se llevó a cabo una fase inicial de caracterización de los materiales empleados en el proceso de fundición. En primer lugar, se evaluaron las propiedades de las latas de aluminio recolectadas, considerando su pureza y composición elemental mediante técnicas de análisis químico y espectroscopia de energía dispersiva (EDS). De igual manera se analizó la soldadura Durafix, una aleación comercial de aluminio-zinc.

La fase de fundición incluyó la obtención de diferentes aleaciones de aluminio-zinc, variando los porcentajes de cada elemento para analizar la influencia de estas proporciones en las propiedades mecánicas y de soldabilidad de las aleaciones resultantes. Tras la fundición, se procedió a la caracterización de las aleaciones obtenidas, mediante técnicas como el análisis de composición por espectroscopía y metalografía. El proceso de preparación de muestras incluye un lijado progresivo, con el objetivo de obtener un acabado de “termino espejo” que facilite la observación de la microestructura.

Finalmente, se realizaron pruebas de campo para evaluar el desempeño de las aleaciones seleccionadas en condiciones prácticas de fundición y soldadura. Estas pruebas lograron identificar las aleaciones con mayor potencial, calculando en su resistencia y calidad de las uniones soldadas.

3.1 Construcción de reactor tipo batch.

Para la construcción del cuerpo del reactor se utilizó una boya reciclada de acero debido a sus características estructurales y la resistencia necesaria para soportar condiciones de calor, corrosión y compresión intensas. Este componente se seleccionó considerando su buen estado previo. Como se muestra en la Figura 4a, se realizó un corte en la parte superior de la boya para adaptarla como tapa del reactor. Esta sección permitiría el acceso para realizar el mantenimiento y manipulación del material durante la fundición, asegurando una adecuada contención del calor.

Para establecer un flujo de aire constante dentro del reactor, se perforaron orificios en la parte inferior utilizando una máquina hidráulica. Los orificios se distribuyeron de manera simétrica, optimizando la entrada y distribución del aire en la base del reactor, lo cual es esencial para mantener una combustión uniforme (Figura 4b). Este diseño de ventilación asegura que el aire circule de forma equilibrada dentro de todo el reactor.

Se integraron elementos adicionales como láminas de aluminio para cerrar orificios adicionales y tubos de acero para construir canales de conducción de aire. Estos tubos funcionan como entradas de aire y ayudan a dirigir el flujo de forma controlada, mientras que los perfiles de aluminio, que fueron reutilizados, sirvieron como soporte estructural. Estos componentes fueron montados y se muestran en la Figura 4c, antes de proceder a su unión mediante soldadura de micro alambre.

Finalmente, tras el proceso de soldadura y ensamblaje de todos los elementos, el reactor fue completado, adquiriendo la configuración final como se presenta en la Figura 4d.

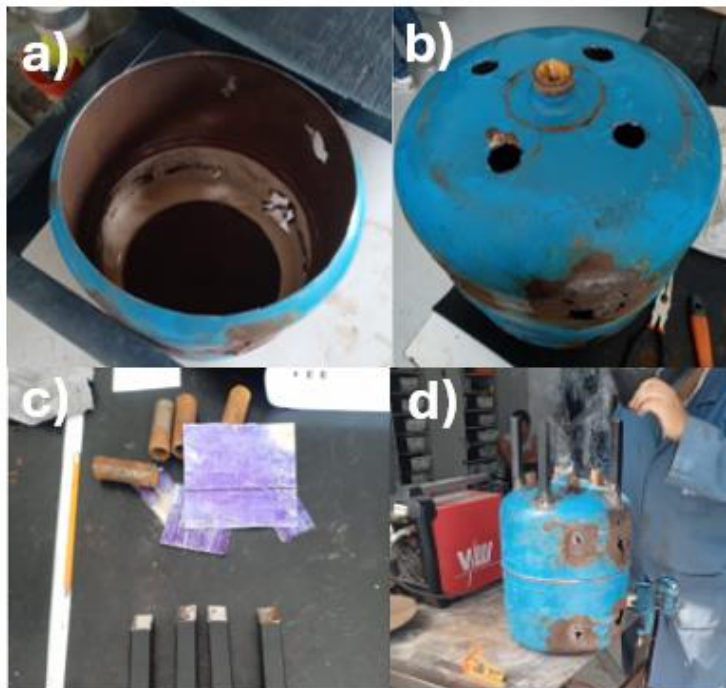


Figura 4 Construcción de horno a) corte de tapa b) perforación de base
c) corte de componentes y d) unión de componentes

Para la construcción interna del horno, se utilizó malla de gallinero como refuerzo estructural, lo que permitió mejorar la resistencia mecánica de la capa refractaria debido a que el horno sería sometido a altas temperaturas durante las fundiciones, por lo que el refuerzo adicional ayuda a la durabilidad del material interno. La malla de gallinero se selecciona debido a su bajo costo, disponibilidad y adaptabilidad para ajustarse al espacio.

El proceso comenzó con el corte de la malla de gallinero para adaptarla al tamaño y forma del fondo del reactor, como se muestra en la figura 5a. Una vez instalada la malla en el fondo, se procedió a verter una mezcla compuesta de cemento, yeso y agua. Esta combinación de materiales fue elegida por sus propiedades refractarias, ya que el cemento y el yeso, al solidificarse, crean una barrera capaz de soportar y aislar parcialmente el calor. La mezcla fue aplicada de forma uniforme sobre la malla, asegurando una buena adhesión y cobertura, como se observa en la figura 5b.

Una vez cubierto el fondo con la mezcla refractaria, se colocó en el centro del reactor una cubeta a medida para crear el espacio necesario donde se ubicará el crisol. Este paso es importante, ya que el crisol necesita espacio libre alrededor para permitir una distribución uniforme del calor y facilitar el proceso de fundición. Alrededor de la cubeta, se colocó también malla de gallinero adicional (figura 5c), reforzando toda la estructura interna del reactor y asegurando que la mezcla se adhiriera adecuadamente.

Finalmente, se agregó la mezcla de cemento, yeso y agua en todo el cuerpo del reactor, cubriendo la malla y formando una capa continua y resistente en toda la estructura interna. Este paso ayuda a que el horno mantenga su estructura y propiedades refractarias durante múltiples ciclos de calentamiento y enfriamiento, minimizando deformaciones o agrietamientos. Esto también permite un mantenimiento sencillo y, en caso de daños, una reparación accesible, ya que solo se necesitaría aplicar una capa adicional de la mezcla en las áreas afectadas.

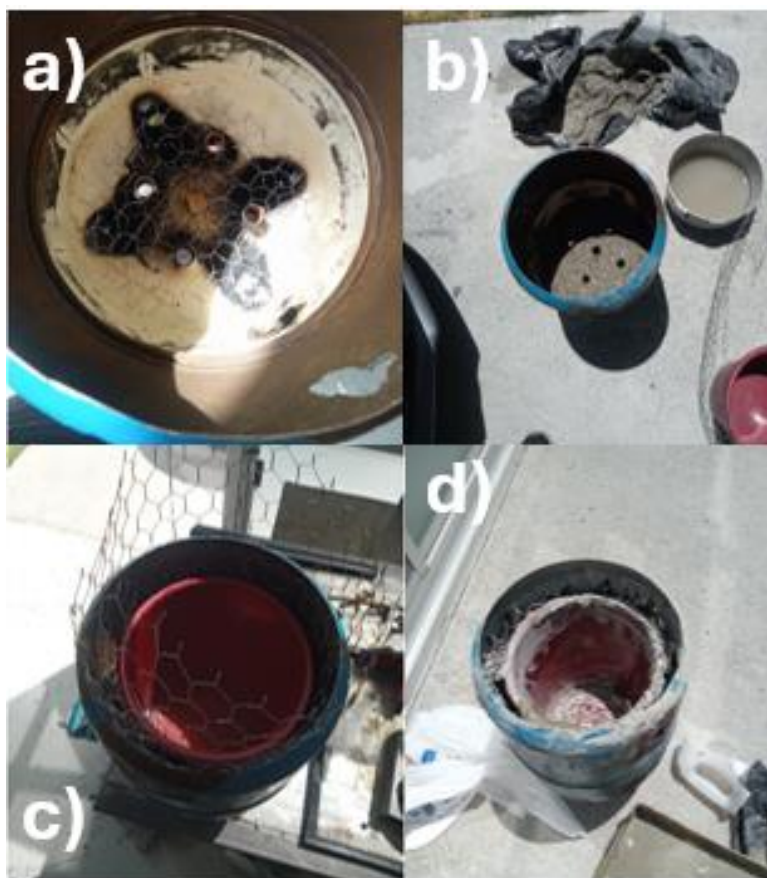


Figura 5 Construcción interna del horno a) colocación de malla b) colocación de mezcla en la basa c) colocación de malla en el cuerpo d) colocación de mezcla en el cuerpo.

Finalmente, se construyó la tapa del reactor utilizando la misma mezcla de cemento y yeso que se empleó para el cuerpo del horno, como se muestra en la figura 6a. Esto realizó garantizar la temperatura dentro del horno durante el proceso de fundición. La tapa, al ser un material refractario, contribuye significativamente a la retención del calor.

Una vez que la mezcla fraguó y alcanzó la resistencia adecuada, se montó la tapa al reactor (figura 6b). La tapa facilita la manipulación y el acceso al interior durante las operaciones de carga y descarga del crisol. El diseño de la tapa incluye un sistema de fijación que garantiza que permanecerá en su lugar durante el proceso de fundición, evitando cualquier escape de calor y gases que puedan comprometer la seguridad del operador.

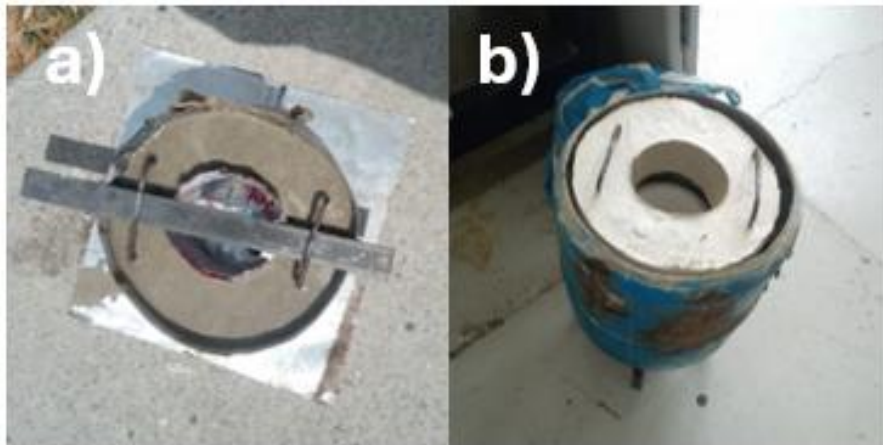


Figura 6 a) construcción de tapa b) montaje de tapa al reactor

Para la construcción del sistema de aire del reactor, se utilizó una caja de registro de acero, seleccionada por su capacidad para resistir las altas temperaturas que se generan durante el proceso de fundición. Este material asegura funcionalidad del sistema a lo largo del tiempo. Inicialmente, se fabricó un codo de 90° de acero, como se muestra en la figura 7a, que tiene la función de dirigir el flujo de aire hacia el interior del reactor.

El aire es un factor importante para el proceso de combustión, ya que permite mantener la temperatura necesaria para la fusión del aluminio. En este caso, se utilizó una fuente de aire, que fue una secadora, para suministrar el aire suficiente y necesario para realizar una fundición.

Posteriormente, se adaptó y soldó el codo de 90° a la caja metálica (figura 7b). Esta unión se realizó con cuidado para garantizar que no hubiera fugas de aire y que el flujo fuera eficiente. Una vez ensamblada la caja de registro y el codo, se montó y soldó toda la estructura en la parte inferior del reactor.

Para lograr una distribución eficaz del aire, se adaptaron previamente cinco tubos y agujeros en la base del reactor. Estos elementos permiten que el aire se distribuya de manera homogénea a lo largo del interior del reactor, favoreciendo una combustión más completa y eficiente. Se obtuvo una circulación adecuada del aire,

lo que es visible en la figura 7c. Esta configuración optimiza las condiciones del proceso de fundición, asegurando que el horno funcione de manera eficaz y mantenga las temperaturas necesarias para el proceso.

Finalmente, se realizó la primera prueba de fundición, como se muestra en la figura 7d, para evaluar la efectividad del reactor y de la tapa en la retención del calor y la uniformidad de la temperatura interna, durante la prueba se monitoreó el rendimiento del horno, tiempo de fundición y temperatura máxima y mínima alcanzada.

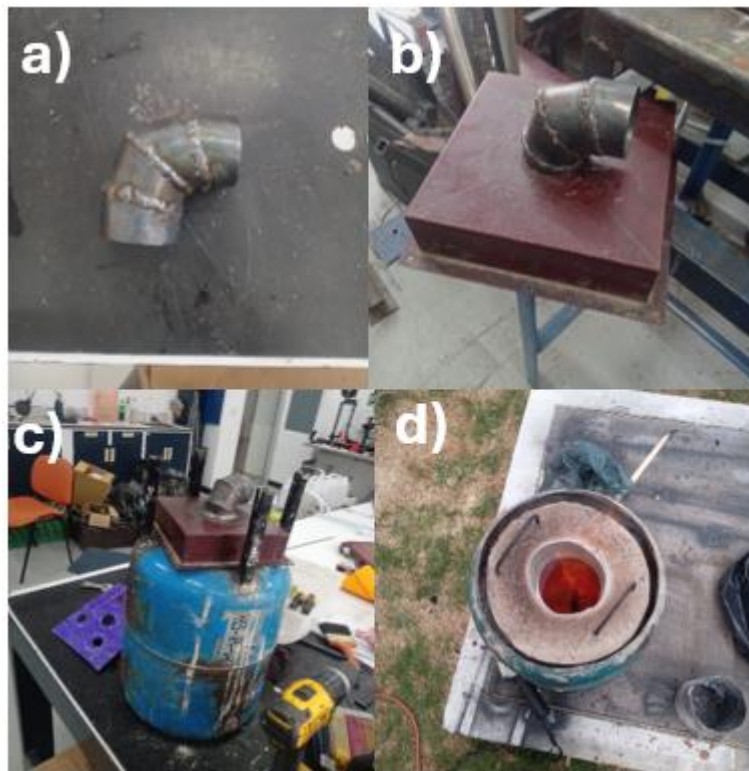


Figura 7 Construcción de sistema de aire a) fabricación de codo de 90° b) montaje de codo a caja metálica c) montaje de sistema de aire al reactor y d) prueba de fundición.

3.2 Pruebas de caracterización previas a la fundición.

Se realizaron pruebas del tipo EDS (Espectroscopia de rayos X por dispersión de energía), estas pruebas se realizaron en función de cada parte de las latas de aluminio, en este caso la base de la lata de aluminio, la tapa y el arillo, estas caracterizaciones se hicieron para analizar la diferencia de composición de las latas

de aluminio y los posibles componentes que se podrían encontrar después del proceso de fundición para poder verificar que parte de la lata presentaba mayor porcentaje de aluminio y mayor pureza para poder seleccionar adecuadamente el material que se utilizaría para las fundiciones. También se realizó una prueba EDS a una varilla para soldar de la marca Durafix para poder tener la composición que necesitan este tipo de varillas para poder soldar.

3.3 Obtención de aleaciones.

Para la obtención de las aleaciones se llevó a cabo la recolección de arillos de latas de aluminio, alcanzando un peso aproximado de 1.5 kilogramos, los cuales sirvieron como fuente de aluminio reciclado. Este material reciclado fue seleccionado por su disponibilidad y bajo costo. La elección de los anillos de latas fue particularmente adecuada debido a su alto contenido de aluminio en comparación con otras fuentes de desechos de pureza de aluminio.

Se adquirió un bloque de zinc de la marca Hikvision, modelo OEM, con una pureza de 99.995%, el cual se muestra en la Figura 8. Este nivel de pureza en el zinc puede garantizar la calidad de la aleación resultante, minimizando la presencia de impurezas y favoreciendo las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de la aleación de aluminio-zinc.



Figura 8 Bloque de Zinc de la marca Hikvision

Se propuso una serie de aleaciones, como se muestra en la Tabla 1, con el objetivo de analizar y seleccionar la composición más prometedora para aplicaciones de soldadura. Para facilitar la identificación y comparación entre las distintas aleaciones, se desarrolló un sistema de nomenclatura basado en la composición porcentual de cada material. Por ejemplo, una aleación con un 10% de aluminio y un 90% de zinc se nombró aleación 1090. Este sistema permitió una referencia clara y directa a la composición de cada muestra, facilitando la organización de los datos y la comparación entre las diferentes aleaciones en cuanto a su capacidad de soldabilidad, resistencia, etc.

Tabla 1. Composición de aleaciones Al-Zn.

Aleación	% Aluminio	% Zinc
9010	90	10
8020	80	20
7030	70	30
6040	60	40
5050	50	50
4060	40	60
3070	30	70
2080	20	80
1090	10	90

Todas las fundiciones se realizaron en un rango de temperatura entre 672°C y 704°C, esto para asegurar la fusión completa de todos los componentes, dado que el punto de fusión del aluminio es de 660°C y el punto de fusión del zinc es de 419°C. Se utilizó un crisol cerámico en todas las fundiciones debido a su alta resistencia a temperaturas elevadas, su estabilidad química (ya que no reacciona con la mezcla de aluminio-zinc) y su excelente aislamiento térmico. La cerámica, al reducir la transferencia de calor, ayuda a mantener una temperatura constante durante el proceso, minimiza la oxidación de los materiales y permite una fácil limpieza del crisol después de cada fundición.

Para comenzar, se realizó una fundición inicial de 100 gramos de anillos de aluminio, con el objetivo de caracterizar la composición resultante y establecer una base de comparación con las otras aleaciones de Al-Zn que se desarrollarían posteriormente. Previo al proceso de fundición, se efectuó una limpieza cuidadosa de todos los anillos recolectados, usando diluyente para eliminar cualquier suciedad, óxido o pintura presente. Luego, se enjuagaron con un paño húmedo. Posteriormente se realizaron los cortes del bloque con una sierra de cinta para metal marca KNOVA modelo KN SC-05P, posteriormente se realizó el pesado de del zinc y de los arillos de lata de aluminio, todas las mediciones de temperatura se realizaron con una pistola de medición de temperatura del tipo infrarrojo de la marca Trotec termómetro infrarrojo/ pirómetro TP7 Multipoint láser. Posteriormente se cargaba el Reactor con aproximadamente 1.5 kilogramos de carbón, con esta carga se tenía para 3 fundiciones, se dejaba calentar se coloca el crisol y se añade el aluminio y posteriormente el zinc debido a sus diferencias de punto de fusión, finalmente el producto resultante se vertió en moldes para cocina de acero, esto por su resistencia a la temperatura. Este proceso se muestra en la figura 9.



Figura 9 Proceso de obtención de aleaciones Al-Zn

Para todas las aleaciones se ocuparon 100 gramos de material inicial en la Tabla 2 se muestra los pesos utilizados de cada componente para todas las aleaciones, el tiempo de fundido y la temperatura.

Tabla 2. Obtención de aleaciones.

Aleación	Al (g)	Zn (g)	Peso total de entrada (g)	Temperatura de °C	Tiempo (Min)
9010	90	10	100	698	9
8020	80	20	100	703	8
7030	70	30	100	672	12
6040	60	40	100	681	10
5050	50	50	100	687	10
4060	40	60	100	676	11
3070	30	70	100	683	10
2080	20	80	100	696	9
1090	10	90	100	689	9

3.4 Caracterización de pruebas mecánicas de aleaciones de aluminio.

La medición de dureza se realizó utilizando un durómetro digital portátil YHT-500, basado en el método dinámico Leeb (HL). El equipo cuenta con un dispositivo de impacto tipo D, adecuado para la medición de materiales metálicos de dureza media, como las aleaciones de aluminio-zinc.

Las probetas que se utilizaron fueron las obtenidas después de la fundición. Las superficies de ensayo fueron lijadas con papel abrasivo de grano progresivo hasta obtener una superficie plana, limpia y libre de óxidos, escoria o contaminantes superficiales

Antes de realizar las mediciones, el durómetro YHT-500 fue calibrado utilizando un bloque patrón de dureza estándar. La calibración se verificó hasta obtener valores dentro del rango aceptable de error.

Las mediciones de dureza se realizaron colocando la sonda de impacto de manera perpendicular a la superficie de la probeta, asegurando un contacto firme. En cada probeta se realizaron tres impactos en diferentes zonas para posteriormente obtener un promedio de las tres lecturas. El durómetro registró los valores de dureza en la escala Leeb (HL), los cuales posteriormente fueron convertidos a escala Brinell (HB).

3.5 Preparación de muestras para Difracción de Rayos X (DRX).

Para llevar a cabo el análisis mediante Difracción de Rayos X (DRX), fue necesario preparar muestras en estado pulverizado, ya que esta técnica requiere una morfología de partículas finas y homogéneas para asegurar una correcta difracción de los rayos X.

Se realizó la molienda de cada una de las fundiciones obtenidas, junto con dos muestras adicionales: una correspondiente a un arillo de lata de aluminio y otra de zinc. La preparación de las muestras consistió en el desgaste mecánico de las placas de aleación mediante el uso de una lima metálica. Esta operación se realizó de forma controlada para obtener un polvo fino, lo más uniforme posible en tamaño y textura.

Cada muestra fue trabajada hasta alcanzar un peso aproximado de 10 gramos, cantidad suficiente para garantizar la repetibilidad y representatividad del análisis DRX. El material obtenido fue almacenado en recipientes limpios y rotulados para evitar contaminación cruzada y asegurar la trazabilidad de cada muestra durante las siguientes etapas del proceso analítico. Posteriormente se realizó el análisis.

3.6 Preparación de muestras para metalografías.

Con el objetivo de analizar la microestructura de las aleaciones, se realizó la preparación metalográfica de cinco composiciones específicas: Al-Zn 5050, 6040, 7030, 8020 y 9010. Estas composiciones fueron seleccionadas por presentar un porcentaje significativo de zinc, elemento que actúa como agente fundente en la formación de fases dentro de la aleación y que tiene una influencia directa en las características mecánicas y estructurales del material.

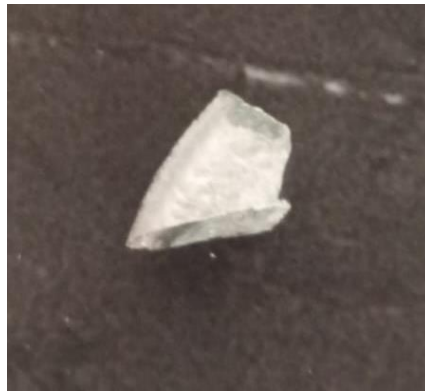


Figura 10 Sección obtenida de aleación Al-Zn 5050.

La primera etapa del proceso consistió en el encapsulado de pequeñas secciones de cada una de las aleaciones. Para ello, se cortaron fragmentos de aproximadamente 0.5 a 1 cm² de superficie, como se muestra en la figura 10. Estos fragmentos fueron fijados en coples plásticos que sirvieron como moldes cilíndricos utilizando resina epóxica de dos componentes. La mezcla de resina y catalizador fue realizada en proporciones iguales según las especificaciones del fabricante, asegurando una mezcla homogénea para evitar la formación de burbujas o zonas débiles. Una vez colocadas las muestras metálicas en los moldes, se dejó reposar la mezcla durante aproximadamente 24 horas a temperatura ambiente, hasta alcanzar el curado completo y lograr un encapsulado sólido y estable, como se muestra en la figura 11.



Figura 11 Muestras obtenidas después del curado de la resina.

Finalizado el proceso de encapsulado, se procedió a la preparación de la superficie para su análisis microestructural. Esta etapa incluyó un proceso de desbaste y pulido en varias fases. El lijado se realizó de manera progresiva, comenzando con lijas de carburo de silicio de grano 200, seguido por 400, 600, 1000 y finalmente 1200. Cada etapa de lijado se realizó con agua para minimizar el sobrecalentamiento y facilitar la eliminación de residuos abrasivos de la superficie.

Posteriormente, se llevó a cabo el pulido utilizando una suspensión de alúmina (óxido de aluminio) sobre un paño de microfibra. No obstante, debido a las características del material y a las limitaciones del proceso de preparación, no se logró obtener un acabado tipo espejo completamente definido en todas las probetas. En consecuencia, permanecieron ligeras marcas superficiales asociadas al pulido, las cuales influyeron en el contraste observado durante el análisis mediante microscopía óptica, el resultado se muestra en la figura 12.



Figura 12 Muestras obtenidas después del proceso de desbaste.

Posteriormente, se aplicó un ataque químico con ácido nítrico de la marca Meyer, mostrado en la figura 13, esta técnica se utilizó para revelar las microestructuras de aleaciones de aluminio de modo que se resaltaran adecuadamente las fases presentes sin causar sobre ataque ni deterioro de la superficie.

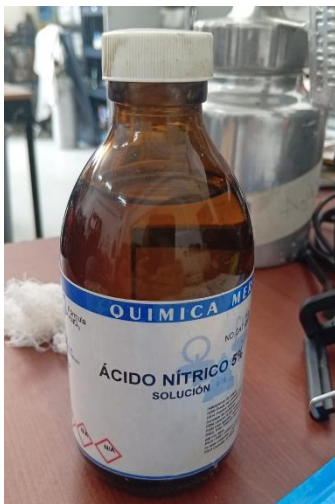


Figura 13 Ácido nítrico utilizado para revelación de microestructura.

El ácido reaccionó con las distintas fases metálicas y los límites de grano, generando un contraste que permite distinguir claramente las características microestructurales bajo el microscopio. Una vez reveladas las microestructuras, las muestras fueron observadas mediante microscopía óptica metalográfica utilizando un microscopio Velab Industrial VE-407 (figura 14). Se realizaron observaciones a diferentes niveles de aumento con el objetivo de identificar y comparar las morfologías, tamaño de grano, distribución de fases y presencia de segregaciones o porosidades.



Figura 14 Microscopio Velab
Industrial VE-407

3.7 Proceso de soldadura.

Para llevar a cabo el proceso de soldadura, se utilizó un perfil de aluminio con una longitud aproximada de 40 cm, como se observa en la figura 15. Este perfil fue recuperado de residuos de obra, por lo que se procedió a realizar una limpieza con el fin de eliminar cualquier resto de suciedad, polvo, óxido o contaminante que pudiera interferir con la calidad del proceso de soldadura.

Una vez finalizada la limpieza inicial, se lijó cuidadosamente la superficie destinada a ser soldada. Este paso se realizó para eliminar imperfecciones superficiales y asegurar una correcta adherencia entre las piezas, favoreciendo así una unión sólida y homogénea durante el proceso de soldado.

Posteriormente, el perfil fue seccionado en piezas de aproximadamente 2 cm de longitud, las cuales se utilizaron como muestras para el proceso de soldadura. Se prepararon un total de 18 segmentos, correspondientes a las 9 aleaciones experimentales evaluadas, con 2 piezas por cada tipo de aleación.



Figura 15 Perfil de aluminio utilizado para pruebas de soldadura.

A cada una de las aleaciones obtenidas se le extrajo un fragmento de aproximadamente 0.5 cm, el cual sería utilizado como material de aporte en el proceso de soldadura. El procedimiento consistió en calentar simultáneamente la pieza principal de aluminio y el pequeño segmento de aleación correspondiente, con el objetivo de elevar la temperatura de la superficie hasta un punto cercano a la fusión.

Este calentamiento localizado permitió que el material de aporte comenzara a fundirse y fluyera sobre la superficie base, facilitando así la unión entre ambas piezas mediante la fusión del metal fundido.

Este procedimiento se repitió para cada una de las nueve aleaciones desarrolladas, utilizando dos piezas de aluminio por aleación. Durante el calentamiento, se empleó una fuente de calor directa que fue un cartucho de gas butano con soplete, procurando mantener una temperatura lo suficientemente alta para fundir el material de aporte sin llegar a deformar la pieza base. Una vez alcanzada la fusión del fragmento de aleación, se dejó enfriar naturalmente el conjunto, permitiendo la solidificación del material fundido y la formación de la junta soldada. Estas uniones fueron posteriormente analizadas visualmente para identificar defectos superficiales y posteriormente una prueba de fuerza manual utilizando un martillo, esto para evaluar la calidad de la soldadura en función de la composición de cada aleación empleada como material de aporte.

Capítulo 4.

IV. RESULTADOS.

4.1 Construcción de reactor tipo Bacht.

El horno utilizado en las pruebas de fundición fue caracterizado mediante una pistola térmica, logrando temperaturas mínimas de 500°C y alcanzando un pico de temperatura de hasta 1200°C. Este amplio rango térmico permite la evaluación del rendimiento en diferentes condiciones al igual que su capacidad para fundir diferentes metales a distintas temperaturas. En general las pruebas de fundición realizadas en este horno alcanzaron resultados satisfactorios, logrando la fusión completa del aluminio reciclado.

El diseño del reactor funcionó gracias sistema de aire, el cual fue montado para asegurar una distribución uniforme de aire dentro de la cámara de combustión. Este flujo constante y bien distribuido de aire permitió mantener una combustión estable

y uniforme, teniendo una buena transferencia de calor homogénea dentro del reactor. Esto optimizó el consumo energético del horno y también garantizó que el aluminio alcanzara su punto de fusión en un tiempo controlado y repetible.

En la Figura 16 se muestra el reactor terminado, junto con sus componentes principales, entre ellos el sistema de inyección de aire y la parte interna que asegura una combustión eficiente. Las pruebas de fundición con latas de aluminio de 355 ml se realizaron a una temperatura controlada de 700°C, alcanzando una fusión completa en aproximadamente 10 minutos.

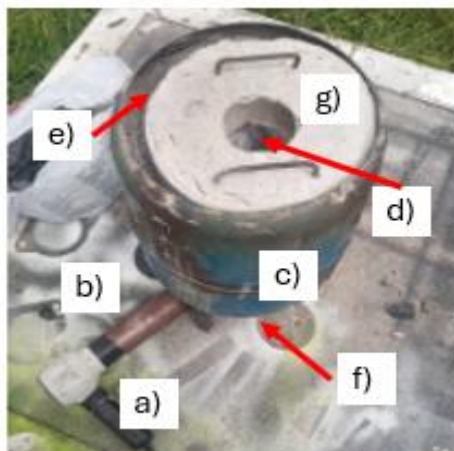


Figura 16 Componentes del reactor

a) fuente de aire b) entrada al sistema de aire c) cuerpo del reactor d) crisol e) cámara de combustión f) sistema de aire y g) tapa del reactor.

4.2 Caracterizaciones previas a las fundiciones.

4.2.1 Prueba de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) a electrodo Durafix.

En esta prueba de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS), se analizaron las composiciones elementales del electrodo de la marca Durafix, proporcionando datos clave para el desarrollo de una aleación de características similares. Los resultados revelaron que el elemento predominante es el zinc, que constituye aproximadamente el 73,37% de la composición. El oxígeno es el segundo componente en abundancia, con una concentración del 12,21%, seguida de un 10,26% de aluminio y en menor proporción se identifica cobre, magnesio, silicio y hierro, que podrían deberse a una posible contaminación de la varilla o de factores ambientales. Toda esta información, que se presenta de manera detallada en la imagen 17 y la tabla 3, proporciona una perspectiva más clara sobre la composición óptima y adecuada para crear una aleación adecuada para aplicaciones de soldadura. Al observar los porcentajes de los elementos presentes, especialmente el alto contenido de zinc y aluminio, también podemos inferir qué proporciones serán ideales para obtener una aleación de propiedades mecánicas y de resistencia térmica adecuadas para la soldadura.

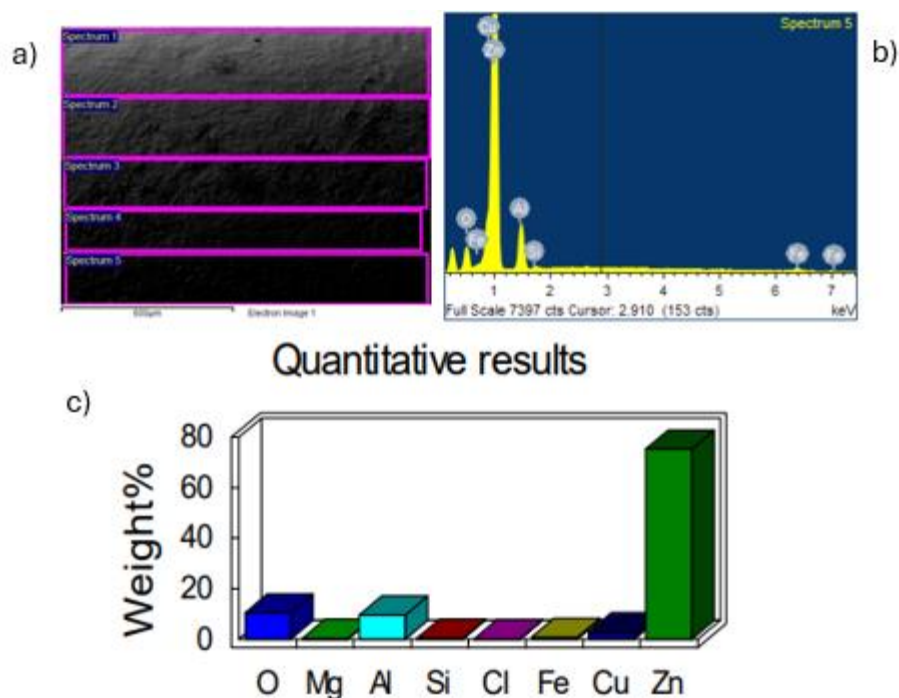


Figura 17 a) División de 5 espectros 500 micras de electrodo Durafix b) Caracterización de electrodo y c) porcentaje de materiales de electrodo.

Tabla 3. Porcentaje de materiales del electrodo Durafix.

Spectrum	In stats.	O	Mg	Al	Si	Cl	Fe	Cu	Zn	Total
Spectrum 1	Yes	11.64	0.43	11.59	0.40	0.25	0.10	2.79	72.79	100.00
Spectrum 2	Yes	12.37	0.29	10.85	0.38	0.33	0.01	2.78	73.00	100.00
Spectrum 3	Yes	15.46	0.44	9.59	0.36	0.44	0.14	2.76	70.82	100.00
Spectrum 4	Yes	11.21	0.43	9.57	0.40	0.16	0.34	2.96	74.93	100.00
Spectrum 5	Yes	10.38	0.34	9.69	0.43	0.16	0.78	2.90	75.32	100.00
Mean		12.21	0.39	10.26	0.40	0.27	0.27	2.84	73.37	100.00
Std. deviation		1.95	0.07	0.92	0.03	0.12	0.31	0.09	1.82	
Max.		15.46	0.44	11.59	0.43	0.44	0.78	2.96	75.32	
Min.		10.38	0.29	9.57	0.36	0.16	0.01	2.76	70.82	

4.2.2 Prueba de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) a partes de lata de aluminio.

En la Figura 18 y en la Tabla 4 se presentan los resultados de la composición elemental de la base de una lata de aluminio reciclada, donde se observan niveles elevados de impurezas y contaminantes. Los análisis muestran que el contenido de aluminio es de aproximadamente 14.8%, mientras que el carbono constituye alrededor del 73.3% de la composición total, seguido de un 9,9% de oxígeno.

Además, se encontraron pequeñas cantidades de magnesio, fósforo y cromo, en menor proporción.

La presencia significativa de carbono y oxígeno en la base de la hoja se debe a varios factores internos al uso y proceso de reciclado del aluminio. En primer lugar, el elevado contenido de carbono puede originarse de residuos orgánicos y compuestos carbonosos que quedan adheridos a la superficie de las latas,

especialmente en latas de bebidas o alimentos que, al entrar en contacto con residuos, generan capas de carbono. Durante el reciclaje, estas impurezas no siempre se eliminan completamente y pueden mezclarse con el aluminio, incrementando el contenido de carbono.

El oxígeno, es un elemento común en el aluminio reciclado debido a la oxidación natural del aluminio al estar expuesto al aire. Este proceso genera óxido de aluminio (Al_2O_3) en la superficie de la hoja, que es difícil de eliminar y se presenta como una fuente de oxígeno residual en el análisis.

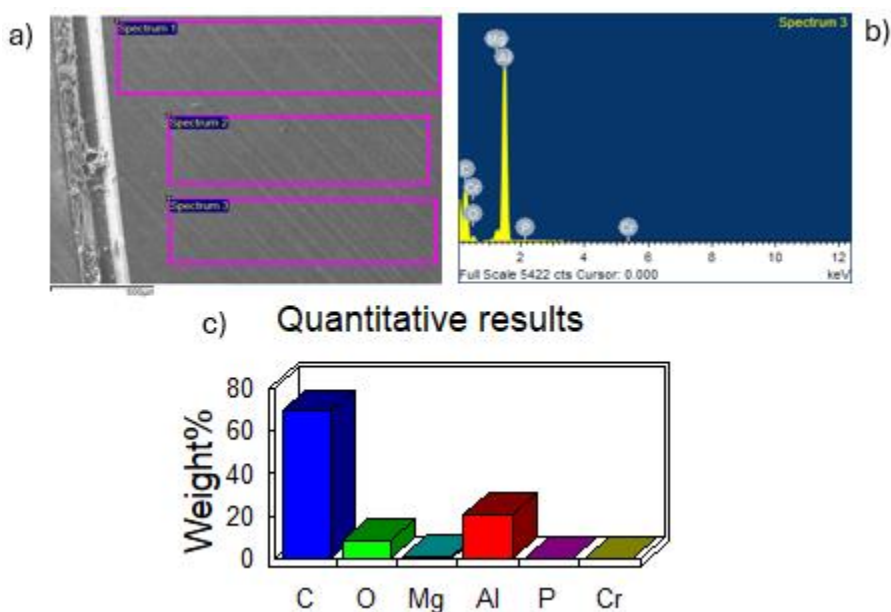


Figura 18 a) División de 3 espectros con imagen a 600 micras de la base de la lata del aluminio b)) Caracterización de la base de la lata del aluminio y c) Porcentajes de materiales de la base de la lata del aluminio.

Tabla 4. Porcentajes de composición de la base de la lata de aluminio.

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	P	Cr	Total
Spectrum 1	Yes	68.87	8.88	1.23	20.71	0.16	0.15	100.00
Spectrum 2	Yes	69.49	8.26	1.16	20.80	0.12	0.18	100.00
Spectrum 3	Yes	69.17	8.62	1.20	20.70	0.13	0.18	100.00
Mean		69.18	8.59	1.19	20.73	0.14	0.17	100.00
Std. Deviation		0.31	0.31	0.03	0.06	0.02	0.02	
Max.		69.49	8.88	1.23	20.80	0.16	0.18	
Min.		68.87	8.26	1.16	20.70	0.12	0.15	

El análisis de la parte interior del cuerpo de la lata, cuyos resultados se presentan en la Figura 19 y la Tabla 5, revela también un nivel considerable de contaminación. En esta área, el contenido de aluminio es de aproximadamente 16%, mientras que el carbono constituye cerca del 76% de la composición total, seguido de un 7,9% de oxígeno. En esta muestra solo se identifican estos tres componentes, lo cual indica una acumulación significativa de residuos carbonosos y óxidos.

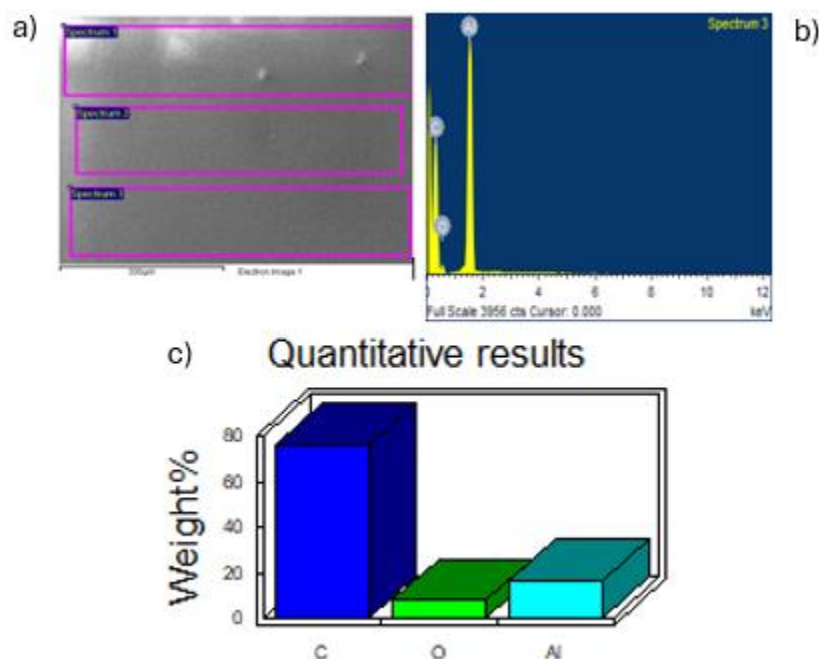


Figura 19 a) División de 3 espectros con imagen a 600 micras de la parte interior del cuerpo de la lata del aluminio b) Caracterización de la parte interior del cuerpo de la lata del aluminio y c) Porcentajes de materiales de la parte interior del cuerpo de la lata del aluminio.

Tabla 5. Porcentajes de caracterización de la parte interna de la lata de aluminio.

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Total
Spectrum 1	Yes	75.63	8.46	15.91	100.00
Spectrum 2	Yes	76.42	7.51	16.07	100.00
Spectrum 3	Yes	76.17	7.72	16.11	100.00
Mean		76.08	7.90	16.03	100.00
Std. Deviation		0.40	0.50	0.10	
Max.		76.42	8.46	16.11	
Min.		75.63	7.51	15.91	

El análisis de la parte exterior del cuerpo de la lata, cuyos resultados se presentan en la Figura 20 y la Tabla 6, revela un nivel significativamente alto de contaminación. En esta zona, el contenido de aluminio es aproximadamente de un 9,3%, mientras que el carbono alcanza el 71,2% de la composición total, seguido por un 17,4% de oxígeno. Además, se identificaron otros elementos en cantidades menores, tales como silicio, azufre, cloro y titanio, que podrían atribuirse a la presencia de pintura y recubrimientos aplicados en la parte externa.

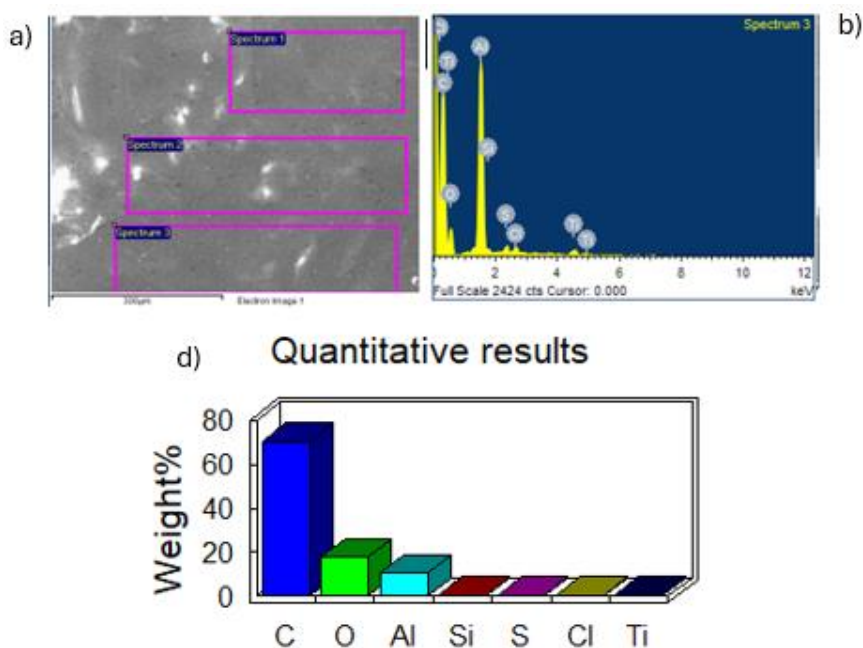


Figura 20 a) División de 3 espectros con imagen a 600 micras de la parte exterior del cuerpo de la lata del aluminio b) Caracterización de la parte exterior del cuerpo de la lata del aluminio y c) Porcentajes de materiales de la parte exterior del cuerpo de la lata del aluminio.

Tabla 6. Porcentajes de caracterización de la parte interna de la lata de aluminio.

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Si	S	Cl	Ti	Total
Spectrum 1	Yes	71.69	17.35	9.61	0.10	0.33	0.37	0.56	100.00
Spectrum 2	Yes	71.48	17.46	9.64	0.10	0.37	0.40	0.55	100.00
Spectrum 3	Yes	70.50	17.50	10.35	0.21	0.46	0.46	0.51	100.00
Mean		71.22	17.44	9.87	0.14	0.39	0.41	0.54	100.00
Std. Deviation		0.63	0.08	0.42	0.06	0.07	0.05	0.03	
Max.		71.69	17.50	10.35	0.21	0.46	0.46	0.56	
Min.		70.50	17.35	9.61	0.10	0.33	0.37	0.51	

Finalmente, el análisis del arillo de la lata, cuyos resultados se presentan en la Figura 21 y la Tabla 7, también hay un nivel significativamente alto de contaminación. En esta parte, el contenido de aluminio es el más de todas las partes analizadas con 20,7%, mientras que el carbono alcanza el 69,1% de la composición total, seguido por un 8,5% de oxígeno. Además, se identificaron otros elementos en cantidades menores, tales como magnesio, fosforo y cromo.

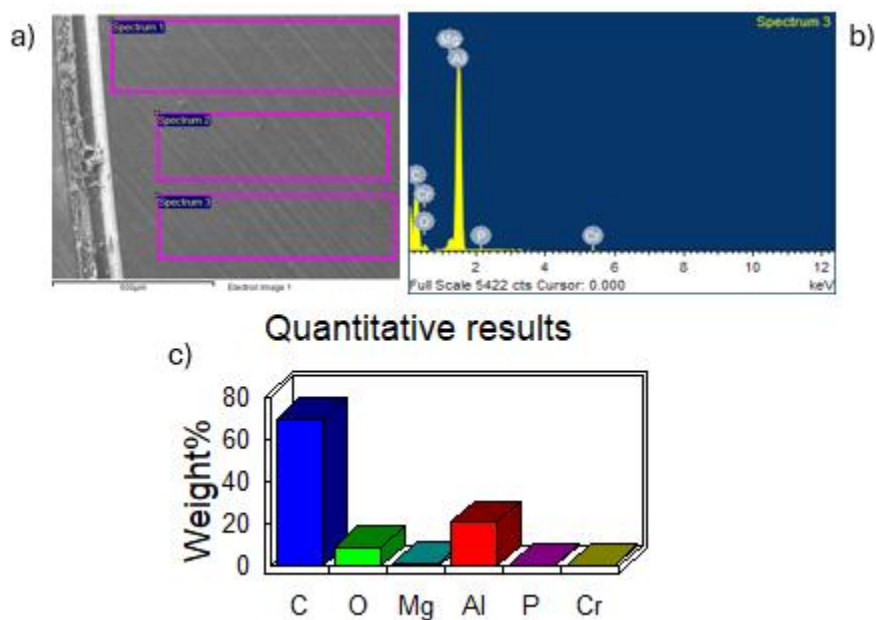


figura 21 a) división de 3 espectros con imagen a 600 micras del arillo de la lata del aluminio b) caracterización del arillo de la lata del aluminio y c) porcentajes de materiales del arillo de la lata del aluminio.

Tabla 7. porcentajes de caracterización del arillo de la lata de aluminio.

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	P	Cr	Total
Spectrum 1	Yes	68.87	8.88	1.23	20.71	0.16	0.15	100.00
Spectrum 2	Yes	69.49	8.26	1.16	20.80	0.12	0.18	100.00
Spectrum 3	Yes	69.17	8.62	1.20	20.70	0.13	0.18	100.00
Mean		69.18	8.59	1.19	20.73	0.14	0.17	100.00
Std. Deviation		0.31	0.31	0.03	0.06	0.02	0.02	
Max.		69.49	8.88	1.23	20.80	0.16	0.18	
Min.		68.87	8.26	1.16	20.70	0.12	0.15	

Los análisis realizados muestran que los elementos presentes en las latas incluyen principalmente aluminio (Al), carbono (C), oxígeno (O), magnesio (Mg), fósforo (P), cloro (Cl), titanio (Ti), silicio (Si), azufre (S) y cromo (Cr). De todas las secciones de la lata, los aros de las latas contienen la mayor concentración de aluminio, lo cual los hace potenciales para su uso en la obtención de aleaciones con zinc. Al seleccionar los aros como materia prima para la aleación, se busca aprovechar su mayor contenido de aluminio, reduciendo la presencia de otros elementos que podrían afectar las propiedades de la aleación final. Además, mediante un proceso adecuado de limpieza y refinamiento, se puede incrementar la pureza del aluminio, reduciendo elementos como el carbono y oxígeno.

4.3 Obtención de aleaciones.

Se obtuvo con éxito nueve aleaciones de aluminio-zinc, cada una con una composición específica. Tras finalizar el proceso de fundición, las muestras se almacenaron y etiquetaron siguiendo la nomenclatura propuesta en este proyecto, como se muestra en la figura 22, esto para identificar las muestras y para evitar una contaminación. En la Tabla 8 se muestra una actualización de los datos correspondientes a cada fundición mostrados en Tabla 2, que incluye el peso total del producto final y la cantidad de escoria generada en cada aleación. Esta información es importante para analizar la eficiencia del proceso de fundición. Al observar el peso total y la escoria en cada muestra, se puede evaluar la cantidad de material aprovechable y establecer la relación entre los parámetros de composición y la eficiencia de producción en cada aleación.

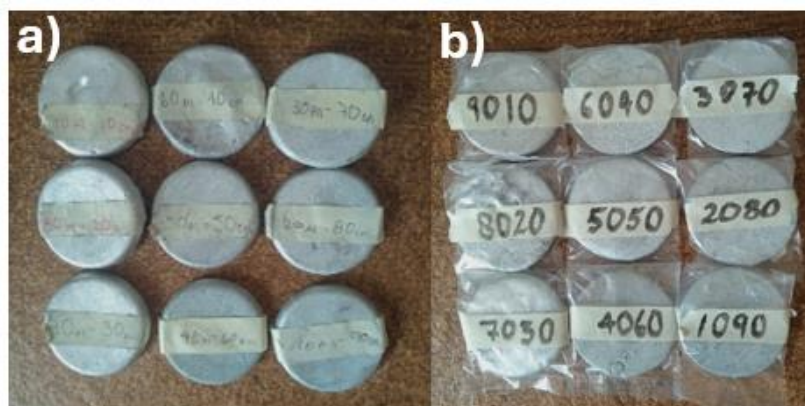


Figura 22 Aleaciones obtenidas mediante el proceso de fundición.

Tabla 8. Tabla actualizada de obtención de aleaciones.

Aleación	Al (g)	Zn (g)	Peso total de entrada (g)	Temperatura °C	Tiempo (Min)	Peso total de salida (g)	Escoria (g)
9010	90	10	100	698	9	57.53	39.87
8020	80	20	100	703	8	61.64	28.40
7030	70	30	100	672	12	61.35	22.33
6040	60	40	100	681	10	47.91	41.29
5050	50	50	100	687	10	62.84	22.84
4060	40	60	100	676	11	69.72	29.24
3070	30	70	100	683	10	67.89	19.64
2080	20	80	100	696	9	78.37	21.18

1090	10	90	100	689	9	90.16	8.30
-------------	----	----	-----	-----	---	-------	------

La eficiencia de fundición se calculó como la relación entre el peso de metal recuperado y el peso inicial cargado al proceso, método comúnmente utilizado para evaluar el rendimiento en procesos de fundición y reciclaje de aluminio El ASM Handbook, Volume 15: Casting define la eficiencia de fundición como:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{\text{Peso final recuperado}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Para la aleación 9010 tenemos:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{57.53 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 57.5\%$$

Tenemos una eficiencia de 57.53 y una pérdida de material de 2.6 gramos.

Para la aleación 8020:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{61.64 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 61.6\%$$

Tenemos una eficiencia de 61.6% y una pérdida de material de 9.96 gramos.

Para la aleación 7030:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{61.35}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 61.3\%$$

Tenemos una eficiencia de 61.35 y una pérdida de material de 16.32 gramos.

Para la aleación 6040:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{47.91 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 47.9\%$$

Tenemos una eficiencia de 47,9% y una pérdida de material de 10.8 gramos.

Para la aleación 5050:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{62.84 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 62.8\%$$

Tenemos una eficiencia de 62.8% y una pérdida de material de 14.47 gramos.

Para la aleación 4060:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{69.72 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 69.7\%$$

Tenemos una eficiencia de 69.7% y una pérdida de material de 1.04 gramos.

Para la aleación 3070:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{67.89 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 67.8\%$$

Tenemos una eficiencia de 67.8% y una pérdida de material de 12.47 gramos.

Para la aleación 2080:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{78.37 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 78.3\%$$

Tenemos una eficiencia de 78.3% y una pérdida de material de 0.45 gramos.

Para la aleación 1090 tenemos:

$$\text{Eficiencia de fundición} = \left(\frac{90.16}{100 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fundición} = 90.16\%$$

Tenemos una eficiencia de 90.1% y una pérdida de material de 1.54 gramos.

Después de los cálculos podemos obtener los datos mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Eficiencia de fundición de las diferentes aleaciones.

Aleación	Eficiencia %	Pérdida de material (g)
9010	57.5	2.6
8020	61.6	9.96
7030	61.3	16.32
6040	47.9	10.8
5050	62.8	14.47
4060	69.7	1.04
3070	67.8	12.47
2080	78.3	0.45
1090	90.1	1.54

Durante el proceso de fundición, se alcanzó un promedio general de eficiencia de fundición del 66.3%. Sin embargo, se observaron variaciones significativas en la eficiencia entre las distintas aleaciones. La aleación que mostró la mayor eficiencia fue la aleación 1090, con un 90.1%, lo que indica una alta retención de material y una mínima pérdida durante el proceso de fusión. Esta alta indica que existieron condiciones de fundición óptimas para esta composición específica, permitiendo una buena homogeneización y fusión de los componentes con poca pérdida de material.

La aleación 6040 tuvo la menor eficiencia de fundición, registrando un 47.9%. Esta baja eficiencia sugiere que, para esta composición, hubo factores que aumentaron la pérdida de material durante el proceso, posiblemente debido a una menor

retención de zinc, que se evapora a temperaturas más bajas, o a una mayor formación de óxidos.

En términos de pérdida de material, la aleación 2080 fue la que mostró menor pérdida, con solo 0.45 gramos. Este resultado indica que esta composición fue la más estable y menos propensa a perder material en el proceso. Por otro lado, la aleación 7030 experimentó la mayor pérdida de material, con 16.32 gramos, lo cual impactó significativamente en su eficiencia.

4.4 Caracterización de pruebas mecánicas de aleaciones de aluminio.

Las mediciones de dureza realizadas mediante el durómetro digital portátil YHT-500, mostradas en las figuras 23 y 24, permitieron evaluar el comportamiento mecánico de las aleaciones aluminio-zinc obtenidas a partir de aluminio reciclado. Los valores de dureza fueron registrados en la escala Leeb (HL) y posteriormente convertidos a la escala Brinell (HB) para facilitar su comparación con datos reportados en la literatura.



Figura 23 Durómetro digital portátil YHT-500



Figura 24 Toma de dureza Leeb a probetas.

En la tabla 10 se presentan los valores promedio de dureza para cada composición, obtenidos a partir de cinco mediciones por muestra, junto con su desviación estándar.

Tabla 10 Resultados de dureza de aleaciones.

Aleación	Dureza Leeb (HL)	Dureza Brinell (HB)
9010	260	44
8020	285	52
7030	344	71
6040	248	40
5050	361	77
4060	310	59
3070	329	66

2080	351	73
1090	428	101

Se observa un incremento progresivo en la dureza conforme aumenta el contenido de zinc en la aleación. Este comportamiento puede atribuirse a la solución sólida del Zn en la matriz de aluminio, las cuales contribuyen al endurecimiento del material.

Al comparar los resultados obtenidos con valores reportados en la literatura para aleaciones Al–Zn producidos a partir de aluminio primario, se observa que las aleaciones fabricadas con aluminio reciclado presentan valores de dureza comparables, lo que demuestra el potencial del aluminio reciclado como materia prima para la obtención de aleaciones con propiedades mecánicas adecuadas.

4.5 Difracción de Rayos X.

En la figura 25 se puede observar los espectros correspondientes al arillo de lata de aluminio y el espectro correspondiente al zinc puro, en el inciso a) tenemos el espectro del arillo que corresponde con la ficha 85-1327 observamos un pico principal en 38.4° que corresponde al plano (111) del aluminio FCC, existe un segundo pico en 44.7° que corresponde al plano (200), observamos otros picos en 65.1° (220) y en 78.2° (311) que coinciden con la estructura cúbica centrada en las caras del aluminio, en el inciso b el espectro coincide con la ficha 65-3358 correspondiente al zinc, observamos 2 picos principales en 36.3° y 39.0° correspondientes a los planos (002) y (100), hay otro pico claro menos intenso en 43.2° correspondiente al plano (101), también un pico aun menos intenso en 54°

que corresponde al plano (102), todos estos valores concuerdan con la estructura hexagonal compacta del zinc metálico.

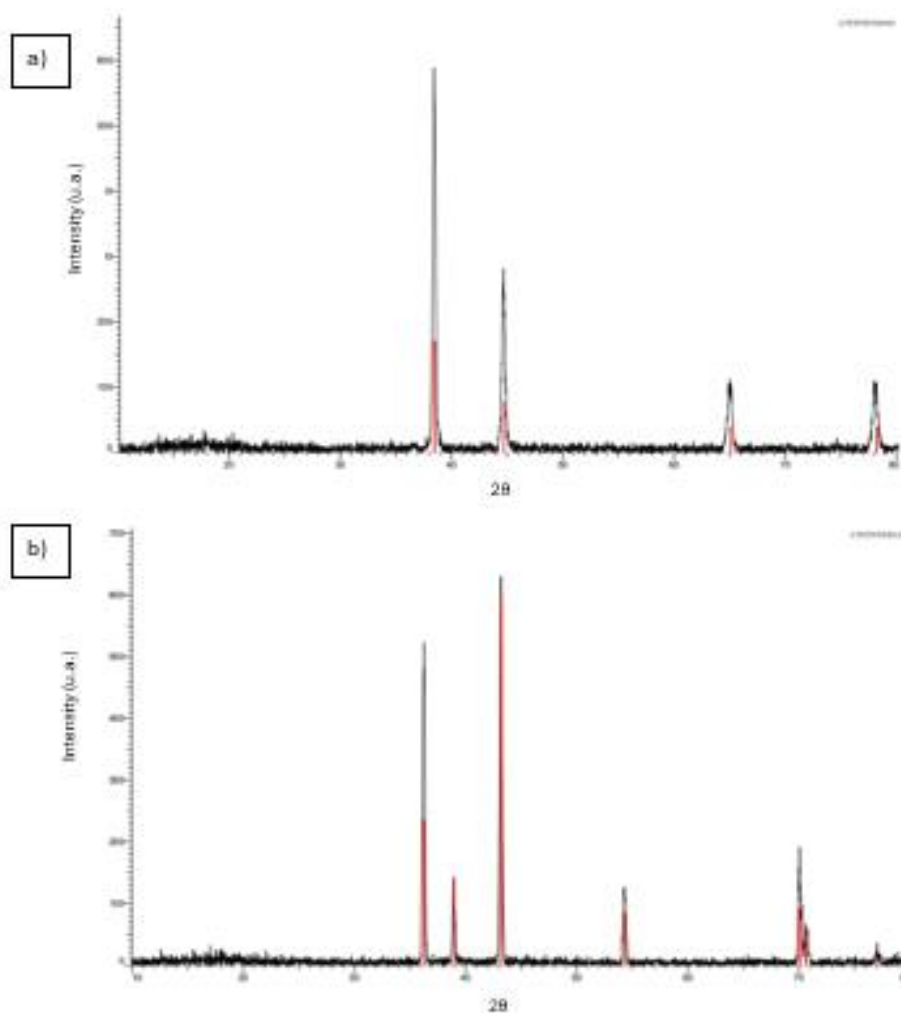


Figura 25 a) Espectro de rayos x correspondiente al arillo de lata de aluminio y b) espectro correspondiente al zinc.

En la Figura 26 se observan los espectros de difracción de rayos X correspondientes a la serie de aleaciones Al–Zn con composiciones desde 90Al–10Zn hasta 10Al–90Zn, donde se aprecia claramente la evolución estructural del sistema conforme varía la proporción de aluminio y zinc.

En la aleación 90Al–10Zn, el pico más intenso se localiza alrededor de 38–39°, característico del plano (111) del aluminio con estructura cúbica centrada en las caras (FCC). Otros picos notables aparecen cerca de 44°, 65° y 78°, correspondientes a los planos (200), (220) y (311), respectivamente, los cuales coinciden con la ficha PDF 85-1327. Debido al alto contenido de aluminio, la estructura FCC se conserva prácticamente intacta, con solo ligeras distorsiones atribuibles a la adición de zinc.

Para la aleación 80Al–20Zn, aún se conservan picos de alta intensidad en el rango de 38–39°, asociados al plano (111) del aluminio FCC, de acuerdo con la ficha PDF 85-1327, lo que indica que la fase de aluminio continúa siendo mayoritaria. Sin embargo, en el intervalo entre 35° y 45° se identifican picos secundarios de menor intensidad que no corresponden ni al aluminio ni al zinc puros. Estos picos coinciden con la fase intermetálica Al–Zn identificado en la ficha PDF 01-1180, lo que sugiere el inicio de una transformación estructural consistente con el diagrama de fases del sistema Al–Zn.

En la aleación 70Al–30Zn, se mantienen los picos predominantes del aluminio FCC, en particular los planos (111), (200) y (220) ubicados aproximadamente en 38.5°, 44.7° y 65°. No obstante, se observa un incremento significativo en la intensidad relativa de picos secundarios localizados en los rangos de 36°, 39°–43° y 54°–56°, los cuales se asocian a la formación de fases intermetálicas Al–Zn (PDF 01-1180) y a la aparición inicial de la estructura hexagonal compacta (HCP) del zinc.

Para la aleación 60Al–40Zn, se conservan los picos característicos del aluminio FCC en 38°, 44°, 65° y 78°, correspondientes a los planos (111), (200), (220) y (311). Sin embargo, se observa la aparición de múltiples picos adicionales entre 36° y 43°, con perfiles más anchos y en algunos casos solapados, lo cual indica la presencia de fases adicionales. Estos picos coinciden con la ficha PDF 65-3358, correspondiente al zinc metálico con estructura hexagonal compacta (HCP).

En la aleación 50Al–50Zn, se observa un comportamiento intermedio dentro de la evolución estructural del sistema Al–Zn. Aunque los picos del aluminio FCC siguen

siendo dominantes, se evidencia un aumento notable en picos ubicados alrededor de 33° , 50° , 55° y 70° , los cuales indican la presencia de una fase intermetálica emergente. Esto sugiere el desarrollo de una microestructura más compleja, donde coexisten fases metálicas puras y compuestos intermetálicos.

Para la aleación 40Al–60Zn, los picos correspondientes al zinc se intensifican de manera significativa, indicando que el Zn metálico comienza a ser la fase dominante. Aunque la fase de aluminio FCC sigue presente, sus picos son notablemente menos intensos. Además, se identifican picos bien definidos asociados a fases intermetálicas, como el pico en 41.4° correspondiente al plano (211) del compuesto Al_2Zn_3 , identificado mediante la ficha PDF 01-1180, lo que confirma una fuerte interacción entre el aluminio y el zinc.

En la aleación 30Al–70Zn, aún se detectan señales débiles del aluminio FCC alrededor de 38.5° y 44.7° , pero aparecen nuevos picos prominentes entre 35° – 45° y 55° – 75° , cuya alta intensidad indica que la fase dominante corresponde al zinc con estructura hexagonal compacta, de acuerdo con la ficha PDF 65-3358.

En la aleación 20Al–80Zn, se observa una evolución significativa en la composición de fases. El espectro presenta un pico de alta intensidad centrado en 43° , acompañado de varios picos bien definidos en los rangos de 36° – 45° y 55° – 75° . Los picos característicos del aluminio FCC, como el plano (111) en 38.5° , se encuentran fuertemente reducidos o prácticamente ausentes, lo que indica que el zinc es la fase cristalina dominante, mientras que el aluminio permanece solo como una fase secundaria o en solución sólida de baja solubilidad.

Finalmente, en la aleación 10Al–90Zn, se observan picos de difracción muy intensos en 36.3° , 39.0° , 43.3° , 54.3° , 70.0° y 76.7° , los cuales coinciden con los planos cristalográficos característicos del zinc con estructura hexagonal compacta (HCP). La alta intensidad de estos picos confirma que el Zn es la fase predominante, como era de esperarse debido a su alto contenido. Solo se identifica un pico de baja intensidad alrededor de 38.5° , correspondiente al plano (111) del aluminio FCC, lo

que indica que el aluminio se encuentra en proporciones mínimas, posiblemente disperso dentro de la matriz rica en zinc.

El análisis de difracción de rayos X de la serie de aleaciones Al–Zn revela una transición progresiva desde una estructura dominada por aluminio FCC en composiciones ricas en Al, pasando por una región intermedia con coexistencia de fases Al, AlZn y Zn, hasta una estructura completamente dominada por zinc HCP en composiciones ricas en Zn. En la Tabla 11 se presenta un resumen del análisis de fases identificado para cada aleación estudiada.

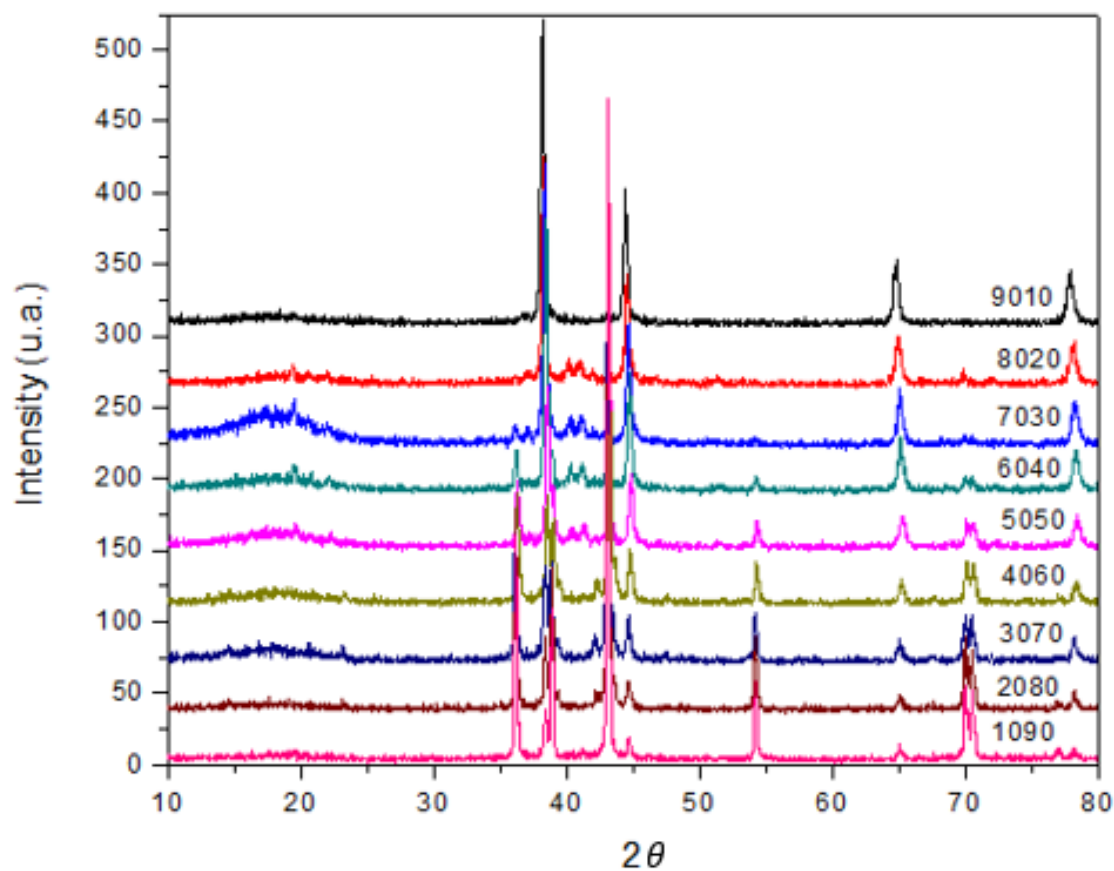


Figura 26 Espectros correspondientes a las aleaciones obtenidas.

Tabla 11. Aleaciones con su fase predominante, fase secundaria y fichas cristalográficas.

Composición	Fase predominante	Fase secundaria	Fichas PDF
9010	Al (FCC)	Zn	85-1327
8020	Al (FCC)	Zn	85-1327, 01-1180
7030	Al (FCC)	Zn	85-1327, 01-1180
6040	AlZn	AlZn	85-1327, 01-1180, 65-3358
5050	AlZn	zn	01-1180, 65-3358
4060	AlZn	Zn	01-1180, 65-3358
3070	Zinc (HCP)	Al	01-1180, 65-3358, 85-1327
2080	Zinc (HCP)	Al	65-3358, 85-1327
1090	Zinc (HCP)	Al	65-3358

4.6 Metalografías.

En la figura 27, se muestra el diagrama de fases del sistema Al–Zn se presenta como referencia para interpretar el comportamiento microestructural de las aleaciones estudiadas. En este diagrama se observa la relación entre la temperatura y la composición en porcentaje atómico y en peso de zinc, mostrando las regiones de estabilidad de las diferentes fases y las transiciones que ocurren durante la solidificación y el enfriamiento.

Para las composiciones evaluadas en este trabajo (10–90, 20–80, 30–70, 40–60 y 50–50 Al–Zn), el diagrama indica que, a temperaturas cercanas a la solidificación, el sistema atraviesa regiones bifásicas y transformaciones peritéticas y eutectoides, particularmente alrededor de la temperatura de 277 °C. Estas transformaciones sugieren la formación de microestructuras complejas durante el enfriamiento, especialmente cuando el proceso no se realiza bajo condiciones de equilibrio.

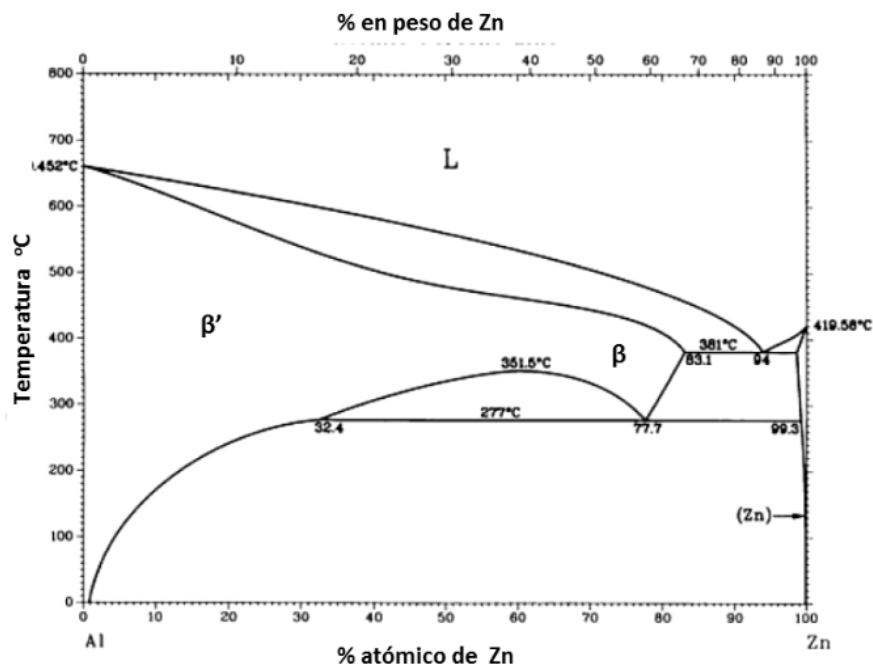


Figura 27 Diagrama de fases del sistema Al–Zn

La micrografía correspondiente a la aleación Al–Zn 50Al–50Zn, mostrada en la figura 28, no muestra una diferenciación clara de fases cristalinas, observándose principalmente defectos asociados al proceso de solidificación, tales como porosidad irregular y posibles microgrietas. Asimismo, se identifican bandas y líneas paralelas atribuidas a marcas de pulido, producto de la diferencia de dureza entre el aluminio, el zinc y las fases intermetálicas presentes. La ausencia de un contraste evidente entre fases puede atribuirse a la formación de microestructuras finas, a la falta de un ataque químico selectivo, a la predominancia de defectos de fundición y a que los acercamientos utilizados en la microscopía óptica no fueron suficientes para resolver adecuadamente la microestructura, lo cual limita la identificación precisa de las fases presentes. No obstante, la presencia de fases intermetálicas en esta composición fue confirmada mediante el análisis de difracción de rayos X

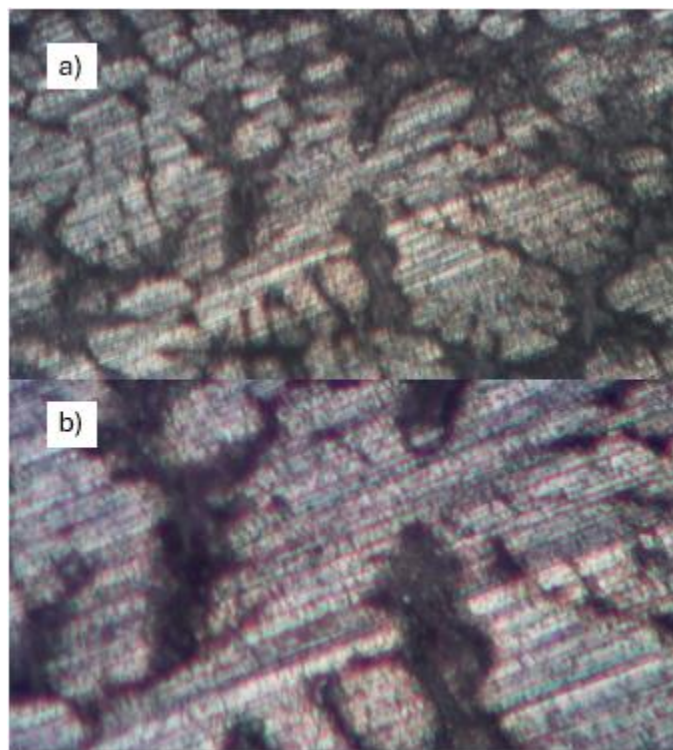


Figura 28 Metalografía correspondiente a la aleación 5050.

En la aleación 40Al–60Zn, mostrada en la figura 29, la micrografía presenta una distribución irregular de zonas claras y oscuras sin un patrón definido, lo cual impide establecer una separación clara entre fases. Para la aleación 30Al–70Zn, mostrada en la figura 30, las microgrietas se observan con mayor continuidad y extensión, indicando una mayor afectación por contracción durante la solidificación.

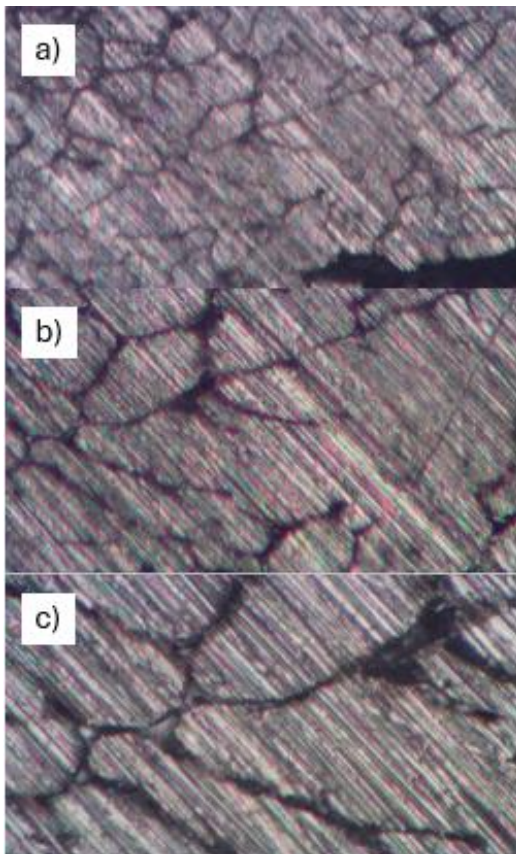


Figura 29 Metalografía correspondiente a la aleación 4060.

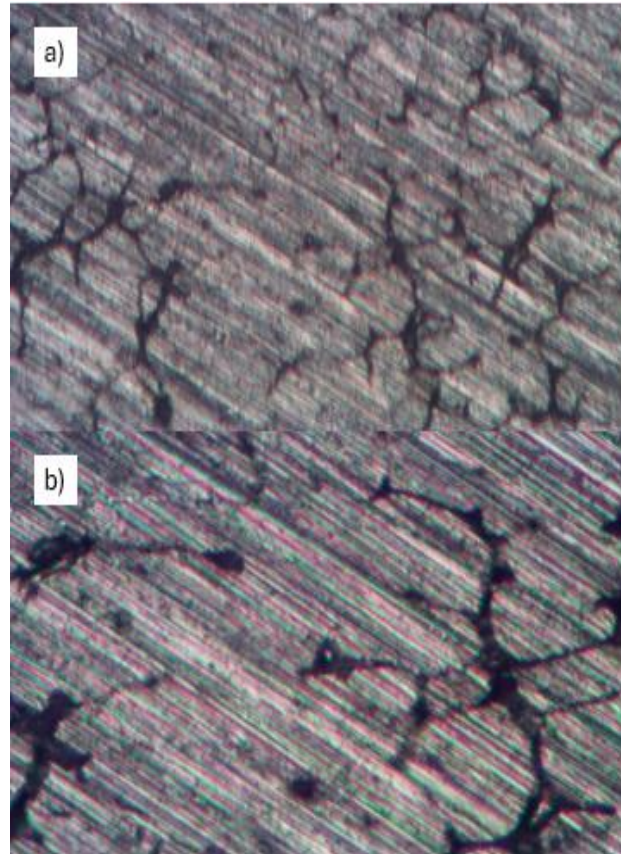


Figura 30 Metalografía correspondiente a la aleación 3070.

En las aleaciones 20Al–80Zn y 10Al–90Zn, mostradas en la figura 31 y 32 respectivamente, la microestructura continúa mostrando una alta concentración de defectos, los cuales dominan completamente la imagen metalográfica y dificultan aún más la identificación de características microestructurales propias del material.

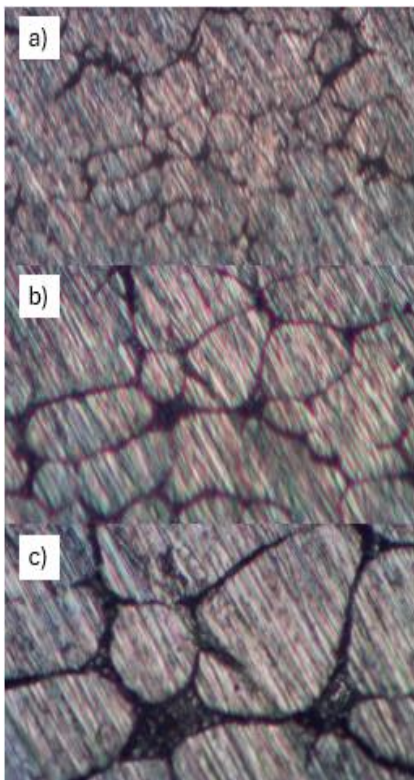


Figura 31 Metalografía correspondiente a la aleación 2080.

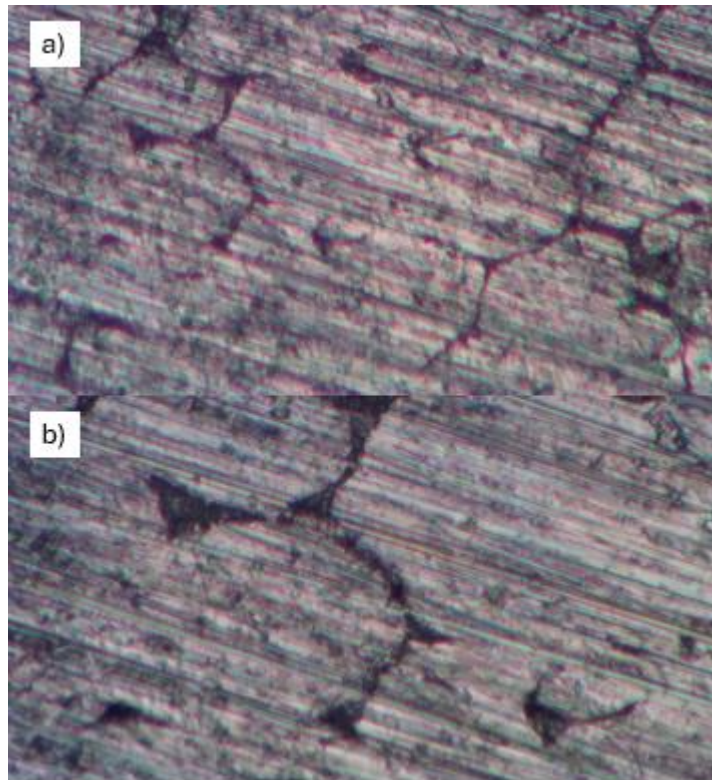


Figura 32 Metalografía correspondiente a la aleación 1090.

4.7 Proceso de soldadura.

Para presentar los resultados de esta sección se realizó la tabla 12 donde se muestra el comportamiento de cada una de las aleaciones al realizar el proceso de soldadura.

Tabla 12. Comportamiento de aleaciones.

Aleación (Al-Zn)	Fusión alcanzada	Tiempo de fusión (s)	Adherencia lograda	Observaciones.
9010	No	-	No	No fundió, la pieza base se deformó.
8020	No	-	No	No fundió, la pieza base se deformó.

7030	No	-	No	No fundió, la pieza base se deformó.
6040	No	-	No	No fundió, la pieza base se deformó.
5050	Parcial	103 s	No	Fundió mínimamente, sin adherencia.
4060	parcial	92 s	No	Fundió mínimamente, sin adherencia.
3070	Parcial	73 s	No	Fundió, pero no se adhirió
2080	Si	58 s	Temporal	Se adhirió brevemente, luego se desprendió
1090	Si	46 s	Si	Única aleación que logró soldadura efectiva

Durante la evaluación del comportamiento de las nueve aleaciones Al-Zn como material de aporte en el proceso de soldadura, se observaron diferencias en la capacidad de fusión, adherencia y formación de la unión. Las aleaciones 90Al-10Zn, 80Al-20Zn y 70Al-30Zn no lograron alcanzar el punto de fusión requerido para generar la unión entre las piezas. A pesar del calentamiento prolongado, el material no se fundió adecuadamente y la pieza base comenzó a deformarse por la exposición prolongada al calor sin lograr fundir el aporte, en la figura 33 se muestra el resultado de la prueba a la aleación 9010. Esto indica que estas aleaciones poseen puntos de fusión demasiado elevados para su uso como material soldador bajo estas condiciones.

En el caso de las aleaciones 50Al-50Zn, 60Al-40Zn y 40Al-60Zn, se observó cierto grado de fusión del material de aporte, sin embargo, la cantidad fundida fue mínima y no logró generar una unión efectiva entre las piezas. El material no fluyó ni se adhirió correctamente.



Figura 33 Pieza de aluminio deformada debido a la exposición prolongada de calor.

La aleación 30Al-70Zn logró fundirse de manera más eficiente en comparación con las anteriores, pero no logró adherirse a la pieza base esto por una rápida solidificación antes de establecer una unión o un ángulo de contacto desfavorable que impidió la dicha unión, el resultado se muestra en la figura 34.



Figura 34 Pieza unida y separada correspondiente a la aleación 3070.

En cuanto a la aleación 20Al-80Zn, cuyo resultado se muestra en la figura 35, se registró un tiempo de fusión de 58 segundos, y se observó una adherencia inicial al aluminio base. Sin embargo, la unión se separó poco después, lo que sugiere una resistencia mecánica insuficiente o una cohesión deficiente en la zona de fusión.



Figura 35 Piezas de aluminio unidas correspondientes a la aleación 2080.

Finalmente, en la figura 36 se muestra la aleación 10Al-90Zn, siendo la única que mostró un comportamiento adecuado para el proceso de soldadura. Esta aleación fundió de manera eficiente en un tiempo de 43 segundos, se adhirió correctamente a la superficie base y generó una unión sólida y estable, no obstante, se observaron deformaciones significativas en la pieza base y desprendimientos del material tras la solidificación al igual que un exceso de material, esto nos dice que, si hay una buena compatibilidad, pero se necesita tener un control más adecuado al momento de soldar. Después de realizar la soldadura, se procedió a evaluar de manera cualitativa la resistencia mecánica de la unión mediante una prueba manual de impacto. Para ello, se utilizó un martillo como herramienta de aplicación de carga. Inicialmente, se aplicó un golpe con fuerza mínima sobre la zona de unión, el cual fue resistido sin evidencia de desprendimiento o daño visible, lo que indicó una adhesión inicial aceptable. Sin embargo, al aplicar un segundo golpe con una fuerza moderada, la unión soldada se desprendió de forma inmediata, evidenciando una baja resistencia mecánica al impacto. Este comportamiento sugiere que, si bien la

aleación utilizada (10Al-90Zn) logró formar una unión efectiva en términos de fusión y adherencia, la resistencia estructural de la junta aún es limitada frente a esfuerzos dinámicos o de choque.



Figura 36 Piezas de aluminios soldadas correspondientes a la aleación 1090.

A una mayor proporción de zinc en la aleación mejora tanto la eficiencia térmica como la capacidad de adherencia durante el proceso de soldadura, siendo la aleación 10%Al-90%Zn la única completamente funcional bajo las condiciones evaluadas. A partir de las pruebas realizadas, se determinó que la eficacia de las aleaciones Al-Zn como material de aporte en procesos de soldadura blanda depende en gran medida de su contenido de zinc.

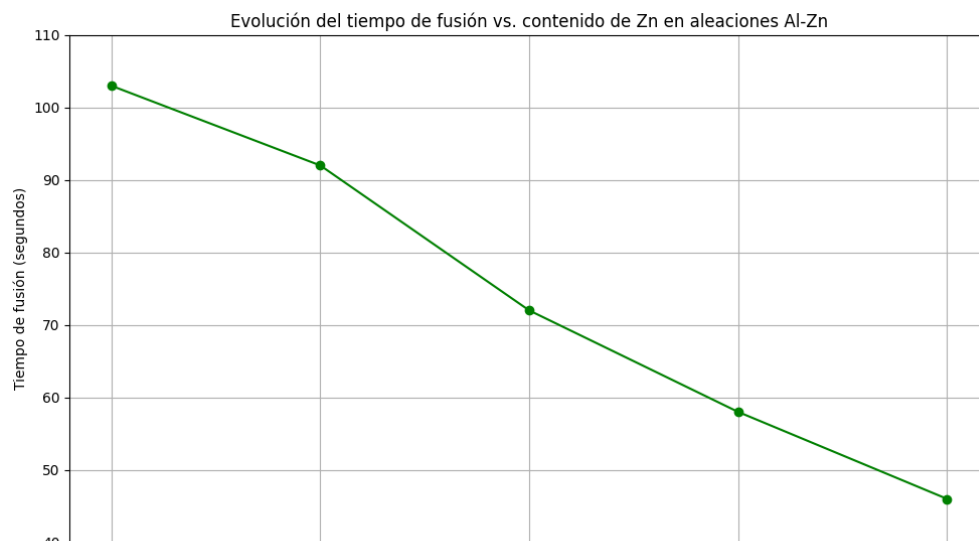


Figura 37 Gráfica evolución de tiempo de fusión vs contenido de Zn

En la figura 37 observamos una gráfica realizada mediante Phyton que muestra la relación entre el contenido de zinc en la aleación Al-Zn y el tiempo de fusión en segundos para las aleaciones que lograron fundirse. Como se observa, al incrementar el contenido de zinc, el tiempo de fusión disminuye significativamente, lo que afirma que un alto contenido de Zn mejora la eficiencia térmica del material de aporte.

Conclusiones.

Como parte fundamental de esta trabajó, se diseñó y construyó exitosamente un reactor tipo horno batch, capaz de alcanzar una temperatura máxima de 1200 °C, utilizando materiales reciclados en su fabricación. Este resultado demuestra la viabilidad de construir hornos funcionales y eficientes sin necesidad de recurrir a materiales de alto costo. El diseño propuesto puede ser útil en instituciones educativas, en talleres de fundición artesanal o pequeñas empresas que se dediquen al procesamiento de metales reciclados.

Durante las pruebas de fundición, el reactor mostró un promedio de eficiencia del 66.3 %, lo cual indica un rendimiento moderado, pero aceptable para un sistema de bajo costo. Cabe destacar que este reactor no solo es apto para fundir y aleaer aluminio, cuyo punto de fusión es 660.3 °C, sino que también puede emplearse en la obtención de otras aleaciones que requieran temperaturas superiores a los 1000 °C, ampliando así su aplicabilidad en diversos procesos metalúrgicos.

Uno de los principales objetivos del proyecto fue la obtención de al menos tres aleaciones de aluminio-cinc (Al-Zn) con diferentes proporciones. No obstante, se obtuvieron nueve aleaciones distintas, con composiciones que varían desde 90 % Al – 10 % Zn hasta 10 % Al – 90 % Zn. Todas las aleaciones fueron procesadas en tiempos relativamente cortos, no superiores a 15 minutos por fundición, demostrando un buen rendimiento térmico y operativo del reactor.

El análisis mediante difracción de rayos X (DRX) confirmó que las aleaciones formadas presentan fases intermetálicas, en particular la fase Al_3Zn , típica del sistema Al-Zn. Asimismo, se observó que la composición química influye directamente en la formación de fases, lo cual concuerda con las fichas cristalográficas utilizadas como referencia. Esto valida que los metales se alearon de manera efectiva y que la microestructura obtenida está en función de la proporción de los elementos constituyentes.

Se realizaron estudios metalográficos a cinco de las aleaciones (50-50, 40-60, 30-70, 20-80 y 10-90), seleccionadas con base en la literatura, que sugiere una mayor estabilidad microestructural en composiciones con alto contenido de zinc. Los resultados mostraron una evolución clara de la microestructura conforme aumentaba el contenido de Zn. Todas las aleaciones presentaron estructuras dendríticas con granos bien definidos, y se observó que a mayor contenido de Zn, los granos eran más marcados y definidos, lo que sugiere una influencia directa del zinc en la morfología de solidificación.

Como prueba final de funcionalidad, se realizó una prueba de soldadura de aluminio utilizando una de las aleaciones obtenidas como material de aporte. La aleación 10Al-90Zn, logró unir exitosamente dos segmentos de aluminio. No obstante, tras someterla a dos esfuerzos mecánicos, la unión falló. Esta baja resistencia puede atribuirse a diversos factores como una posible fundición incompleta, una mala solidificación, una estructura no homogénea observada en la micrografía, o deficiencias en el proceso de soldadura. A pesar de esto, se logró demostrar que es posible realizar uniones funcionales con aleaciones recicladas, lo que abre la puerta a su uso como materiales de bajo costo para soldar.

Adicionalmente, se observó que las aleaciones con alto contenido de zinc no lograron fundirse, necesitaron mucha más temperatura y el material base se empezaba a deformar. Las aleaciones con contenido intermedio de Zn (50-50, 60-40, 70-30) presentaron dificultades de fusión, mientras que las aleaciones con alta concentración de Zn (30-70, 20-80 y 10-90) lograron fundirse con éxito sin deformar las piezas base, en tiempos aceptables. Esto afirma que el zinc no solo actúa como material de aleación, sino también como agente soldante y reductor del punto de fusión.

Este trabajo representa una alternativa económicamente viable para la obtención de aleaciones metálicas funcionales a partir de residuos. La reutilización de aluminio reciclado reduce los costos de materia prima y energía, además de disminuir el impacto ambiental asociado a la producción de aluminio primario, que es altamente intensiva en electricidad. Al evitar la disposición final de residuos de aluminio, se

contribuye también a reducir la presión sobre los sistemas de gestión de residuos sólidos.

Es importante señalar que la eficacia podría mejorar significativamente si el proyecto se aborda con un enfoque más preciso y controlado. La implementación de un proceso estandarizado, que incluya variables bien definidas como tiempos de fusión, velocidades de enfriamiento, proporciones exactas de los componentes y control de atmósfera, permitiría obtener aleaciones con mayor uniformidad, reproducibilidad y eficiencia. Este tipo de control es esencial para optimizar tanto la calidad de la aleación como sus propiedades mecánicas y estructurales.

Asimismo, en proyectos futuros, se plantea el estudio de aleaciones con contenido de zinc superior al 90 %, o incluso modificaciones dentro del rango de aleaciones ricas en zinc ya producidas, con el objetivo de comparar su desempeño con respecto a la aleación 10Al–90Zn, que mostró resultados prometedores como material de aporte para soldadura. Este análisis comparativo permitiría determinar si existen composiciones aún más eficientes en términos de capacidad de unión y facilidad de aplicación.

V. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] MENENDEZ, EMILIO. La industria del Aluminio y sus refractarios. *BOL. SOC. ESP. CERAM. VIDR*, 1980, vol. 19, no 6.
- [2] Liu, G., Müller, D.B., 2012. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. *J. Clean. Prod.* 35, 108–117. doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.030
- [3] Cullen, J.M., Allwood, J.M., 2013. Mapping the global flow of aluminum: From liquid aluminum to end-use goods. *Environ. Sci. Technol.* 47, 3057–3064. doi:10.1021/es304256s.
- [4] T. Aizawa, T. Luangvaranunt, and K. Katsuyoshi, “Solid state recycling of recyclable aluminum wastes with in-process microstructure control,” *Mater. Trans.*, vol. 43, no. 3, pp. 315–321, 2002.
- [5] T. Li, M. Hassan, K. Kuwana, K. Saito, and P. King, “Performance of secondary aluminum melting thermodynamic analysis and plant-site experiments,” *Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1769–1779, Sep. 2006.
- [6] Evans, R. L., Martinez, A. M., & Keoleian, G. A. (2016). Global Aluminum Cycle: Current Reserves, Processing, and Flows. *Environ. Sci. Technol.*, 50(15), 8245-8254.
- [7] Ashby, M. A. (2015). The Environmental Footprint of Aluminum: Reducing the Impact of Aluminum Production and Use. *MRS Energy & Sustainability*, 2(1), 1-12.
- [8] Williams, J. C., & Starke, E. A. (2003). Progress in Structural Materials for Aerospace Applications. *Acta Materialia*, 51(19), 5775-5799.
- [9] International Aluminium Institute. (2020). Aluminium Recycling.
- [10] International Aluminium Institute. (2020). Aluminium Can Recycling.
- [11] Kumar, V., Singh, R., & Kumar, N. (2017). Optimization of Aluminum Recycling Process. *Journal of Cleaner Production*, 142, 174-183.
- [12] European Aluminium Association. (2020). Aluminium Can Recycling.

Asociación Mexicana de la Industria del Aluminio (AMIA). (2020). Reciclaje de latas de aluminio en México.

[13] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Informe sobre el reciclaje de latas de aluminio en México.

[14] Grupo Modelo. (2020). Programa de reciclaje de latas de aluminio.

[15] Asociación Mexicana de la Industria del Aluminio (AMIA). (2020). Programas de reciclaje de latas de aluminio.

[16] Gaines, L., Stodolsky, F., & Cuenca, R. (2012). Life Cycle Assessment of Aluminum Recycling. *Journal of Cleaner Production*, 25, 37-46.

[17] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Desafíos del reciclaje de latas de aluminio en México.

[18] T. Richards, "Homemade Aluminum Melting Furnace", *Journal of Amateur Metal Casting*, vol. 22, no. 4, pp. 25-30, 2020.

[19] J. Smith, "DIY Propane Furnace for Aluminum Casting", *Maker's Digest*, vol. 18, no. 2, pp. 34-40, 2019.

[20] A. Patel, "Small-Scale Foundry for Aluminum Recycling", *Sustainable Manufacturing Journal*, vol. 14, no. 6, pp. 50-55, 2021.

[21] Hufnagel, W. *Manual del aluminio*. Reverté, 1992.

[22] S. Kou, "Welding Metallurgy of Aluminum Alloys," *Welding Journal*, vol. 74, no. 5, pp. 129–134, 1995.

[23] E. R. Denney and R. G. Spears, "Friction Stir Welding of Aluminum: A Review," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 15, pp. 2313–2317, 2007.

[24] F. C. Campbell, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, 1st ed., Elsevier, 2004.

[25] Durafix, "Aluminum Welding Rods," Durafix Website. Disponible en: <https://www.durafix.com>. [Consultado: 26-ago-2024].

- [26] Alumiweld, "Aluminum Welding Products," Alumiweld Website. Disponible en: <https://www.alumiweld.com>. [Consultado: 26-ago-2024].
- [27] HTS-2000, "Advanced Welding Rods for Aluminum and Other Metals," HTS-2000 Website. Disponible en: <https://www.hts-2000.com>. [Consultado: 26-ago-2024].
- [28] Super Alloy 5, "Aluminum Welding Rods," Muggy Weld. Disponible en: <https://www.muggyweld.com/product/super-alloy-5/>. [Consultado: 26-ago-2024].
- [29] A. T. Tabereaux and R. D. Peterson, "Aluminum Production and Energy," *Journal of Metals*, vol. 69, no. 12, pp. 3044–3050, 2017.
- [30] B. K. Prasad et al., "Recycling of Aluminum Scrap for Industrial Applications," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 23, no. 6, pp. 800–805, 2008.
- [31] J. Hirsch, "Automotive Trends in Aluminium – The European Perspective," *Materials Forum*, vol. 28, pp. 190-198, 2004.
- [32] W. T. Choate and J. A. Green, "Aluminum Recycling: An Integrated, Industry-Wide Approach," *Journal of Metals*, vol. 56, no. 8, pp. 20-25, 2004.
- [33] Novelis, "Sustainability Report," Novelis Inc., 2021. [Online]. Available: <https://novelis.com>
- [34] Hydro Aluminium, "Circular Economy Strategy," Hydro, 2023. [Online]. Available: <https://hydro.com>
- [35] R. U. Ayres, L. W. Ayres, and V. Pokrovsky, "Energy and Materials Flows in the Production of Aluminum," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 22, no. 3, pp. 85-103, 2008.
- [36] K. A. Davis, "Aluminum's Sustainability Advantage," *Journal of Metals*, vol. 61, no. 4, pp. 40-44, 2009.
- [37] *Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development*, International Aluminium Institute (www.world-aluminium.org).
- [38] J. E. Hatch, *Aluminio: Propiedades y Metalurgia Física*, American Society for Metals, 1984, pp. 213-230.
- [39] W. T. Choate and J. A. Green, "Reciclaje de aluminio: Un enfoque para toda la industria," *Journal of Metals*, vol. 56, no. 2, pp. 20-28, 2004.
- [40] J. Hirsch, "Aleaciones de aluminio en la industria automotriz: Uso, aplicaciones

- y potencial," *Materials Transactions*, vol. 50, no. 12, pp. 290-295, 2009.
- [41] J. R. Davis, *Aluminio y Aleaciones de Aluminio*, ASM International, 1993, pp. 219-240.
- [42] K. A. Davis, "La ventaja de sostenibilidad del aluminio," *Journal of Metals*, vol. 61, no. 4, pp. 40-44, 2009.
- [43] R. U. Ayres et al., "Flujos de energía y materiales en la producción de aluminio," *Recursos, Conservación y Reciclaje*, vol. 22, no. 3, pp. 85-103, 2008.
- [44] J. Hirsch, "Sostenibilidad del aluminio en aplicaciones automotrices," *Materials Forum*, vol. 28, pp. 143-154, 2004.
- [45] B. S. Lee et al., "Aplicación de la aleación de aluminio 7075 en la construcción del fuselaje de aeronaves," *Journal of Aerospace Materials*, vol. 55, no. 2, pp. 34-42, 2021.
- [46] R. C. Jost and H. M. Lester, "El papel de las aleaciones de aluminio y zinc en el aligeramiento de automóviles," *Journal of Automotive Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 345-351, 2019.
- [47] D. A. Witte, "El papel de las aleaciones de aluminio en las prácticas de construcción sostenibles," *Journal of Architectural Materials*, vol. 40, no. 2, pp. 220-235, 2018.
- [48] Novelis Inc., "Informe sobre tendencias de mercado y sostenibilidad," *Informe Corporativo de Novelis*, 2023.
- [49] J. Hirsch, "El aluminio en el diseño innovador de automóviles ligeros," *Materials Transactions*, vol. 52, pp. 818-824, 2011.
- [50] K. A. Davis, "La ventaja de sostenibilidad del aluminio," *Journal of Metals*, vol. 61, no. 4, pp. 40-44, 2009.
- [51] Z. Ma and R. Mishra, "Soldadura por fricción y agitación y procesamiento," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 578, pp. 212-217, 2013.
- [52] D. R. Martin et al., "Soldadura láser de aleaciones de Al-Zn de alta resistencia," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, no. 6, pp. 34-40, 2014.
- [53] W. T. Choate y J. A. Green, "Reciclaje de aluminio: Un enfoque industrial integrado," *Journal of Metals*, vol. 56, no. 8, pp. 35-39, 2004.
- [54] J. Hirsch y T. Al-Samman, "Metales ligeros superiores mediante ingeniería de

- textura: Aleaciones de aluminio y magnesio optimizadas para aplicaciones automotrices," *Acta Materialia*, vol. 61, pp. 818-843, 2013.
- [55] R. U. Ayres et al., "Flujos de energía y materiales en la producción de aluminio," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 22, no. 3, pp. 85-103, 2008.
- [56] Asociación Internacional del Zinc, "Reciclaje de zinc: Cerrando el círculo," *Informe IZA*, 2020.
- [57] E. Aghion y B. Bronfin, "Nuevas aleaciones de magnesio para aplicaciones aeroespaciales," *Materials Transactions*, vol. 42, pp. 885-888, 2001.
- [58] J. Hirsch, "Tendencias automotrices en aluminio: La perspectiva europea," *Materials Forum*, vol. 28, pp. 190-198, 2004.
- [59] K. T. Kashyap y P. J. Singh, "Effect of Recycled Aluminum-Zinc Alloys on Friction Stir Welded Joints," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 245, pp. 110-117, 2017.
- [60] L. Chang et al., "Corrosion Resistance of Recycled Al-Zn Alloys for Welding Applications," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, pp. 6828-6834, 2010.
- [61] D. Zuo et al., "Weldability and Mechanical Properties of Recycled Al-Zn Alloys for MIG Welding Applications," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 139, no. 3, pp. 320-328, 2017.
- [62] Y. Ogawa y H. Nakamura, "Mechanical Properties of Recycled Aluminum-Zinc Alloys for TIG Welding Applications," *Welding Journal*, vol. 94, pp. 65-71, 2015.
- [63] A. Kumar et al., "Impact of Contaminants in Recycled Aluminum-Zinc Alloys on Welding Performance," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 57, pp. 124-132, 2011.
- [64] J. P. O'Neill, "Economic and Environmental Feasibility of Recycled Al-Zn Alloys for Welding," *Sustainability*, vol. 12, no. 4, pp. 1568-1577, 2020.
- [65] C. S. Calvo, "Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas," *Scientia*, vol. 17, no. 17, 2016.
- [66] F. Wöhler, "Über das Aluminium und einige seiner Verbindungen," *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 87, no. 2, pp. 629-640, 1827.
- [67] C. K. Gupta, *Extractive Metallurgy of Aluminium*, CRC Press, 2003.

- [68] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, 1993.
- [69] W. Choate and J. Green, "Aluminum Recycling: A Comprehensive Overview," *JOM*, vol. 56, no. 8, pp. 48-54, 2004.
- [70] B. A. L. D. Almeida, *Zinc: Properties and Applications*, 2nd ed. Woodhead Publishing, 2016.
- [71] P. J. D. B. de Sousa, "Zinc: A Material for the 21st Century," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, no. 5, pp. 2453-2465, 2013.
- [72] R. D. H. Lee, "The Zinc Industry: An Overview," *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 55, no. 4, pp. 18-25, 2003.
- [73] R. F. Bunshah, "Fundición y Moldeo de Metales," *Metalurgia y Materiales*, vol. 18, pp. 165-175, 2010.
- [74] D. M. Stefanescu, *Science and Engineering of Casting Solidification*, 2nd ed. New York: Springer, 2010.
- [75] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*, Materials Park, OH: ASM International, 1993
- [76] R. F. Bunshah, "Advanced Techniques in Material Characterization," *Journal of Materials Science*, vol. 45, no. 10, pp. 2512–2520, 2010.
- [2] D. M. Stefanescu, *Science and Engineering of Casting Solidification*, 2nd ed. New York: Springer, 2010.
- [77] J. M. Zavaleta, "Characterization of Metal Alloys by EDS," *Materials Characterization*, vol. 92, pp. 25–30, 2014.
- [78] S. H. Lee, "Metallography of Metals and Alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 610, pp. 1–11, 2014.
- [79] G. C. L. Wong, "Thermal Analysis Techniques in Material Science," *Materials Characterization*, vol. 60, no. 4, pp. 563–568, 2009.
- [80] E. R. Denney and R. G. Spears, "Friction Stir Welding of Aluminum: A Review," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 15, pp. 2313–2317, 2007.
- [81] A. F. Bower, *Applied Mechanics of Solids*, New York: CRC Press, 2004.
- [82] C. A. H. de Lima et al., "Experimental Analysis of the Tensile Strength of Al-Zn

- Alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 588, pp. 366-375, 2013.
- [83] D. F. Adams, "Flexural Properties of Composites: Review," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 3, pp. 411-420, 2003.
- [84] R. W. C. Leach, "Mechanical Testing of Materials," *Journal of Materials Science*, vol. 39, no. 3, pp. 651-658, 2004.
- [85] ASTM E8/E8M-16, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016.