



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE
FUNDICIÓN PARA LA MANUFACTURA DE
LINGOTES DE ALUMINIO**

TESIS

Que para obtener el Título de

INGENIERO INDUSTRIAL

P r e s e n t a

DAVID CRUZ CASTRO

**Asesor: Dr. Héctor Herrera Hernández
(Profesor-Investigador SNI-1)**

Co-asesor: Dr. J. Guadalupe Miranda H.
(Profesor-Investigador SNI-1)



Atizapán de Zaragoza, Edo. de Méx. Octubre 2024

RESUMEN

Actualmente la fundición es considerada como un proceso decisivo de gran importancia para la industria porque es ideal para la producción en serie de productos metálicos con distintas formas y con geometrías complejas, que resultarían difíciles y costosas de fabricar mediante otros métodos de manufactura. Esta tecnología puede procesar una amplia variedad de metales y aleaciones, el cual consiste en fundir metales a partir de mineral o chatarra, y después verterse en moldes construidos de arena sílica en verde o en moldes permanentes para obtener componentes que, después de solidificarse, adoptan la forma deseada. En este sentido, la fundición es esencial por su capacidad de fabricar piezas de manera eficiente, económica y sostenible, contribuyendo así al desarrollo de la tecnología, que prácticamente se aplica en todos los sectores industriales como la automotriz, aeroespacial, maquinaria pesada, metal-mecánica, petrolera, construcción, química y energía, y donde se requieren componentes metálicos robustos y duraderos. Incluir la Unidad de Aprendizaje de Procesos de Fundición en los planes de estudio de ingeniería industrial es fundamental para preparar a los estudiantes-futuros ingenieros en aspectos relevantes como la manufactura, optimización de procesos y sostenibilidad. Además, proporciona un enfoque integral para resolver problemas de carácter industrial, mejorando la eficiencia y calidad en la producción de componentes que forman parte de innumerables sectores productivos, este proceso se interrelaciona con la logística, gestión de la cadena de suministros y control de calidad, áreas fundamentales en ingeniería industrial para la gestión de plantas de producción.

Finalmente, esta tesis de licenciatura se enfoca principalmente en el diseño, construcción y puesto en marcha de un horno de fusión de crisol removible para la manufactura de lingotes de aluminio a través del vaciado de metal fundido en un molde. Este proyecto contempla los aspectos teóricos fundamentales y la experiencia práctica sobre el proceso de fusión y vaciado en molde permanente, que involucra desde la selección de los materiales primarios, carga del horno, proceso de fusión, procesos de vaciado, solidificación y desmolde de la misma pieza final, hasta su maquinado, así mismo la inspección de defectos y caracterización de los materiales fundidos. Así mismo, mediante el presente trabajo se busca generar un conocimiento integral basado en la teoría y la práctica experimental en los estudiantes de Ingeniería Industrial del CU UAEM Valle de MÉXICO para contribuir de manera efectiva en el campo laboral de la producción industrial.

ABSTRACT

Casting process is actually considered a decisive process of a great importance for industry because is ideal for mass production of metal products with different shapes and complex geometries, which would be difficult and expensive to manufacture using other manufacturing methods. This technology can process a wide variety of metals and alloys, which consists of melting metals from ore or scrap, and then poured the liquid material into molds constructed of green sand or permanent molds to obtain components that, after solidifying, take the desired shape. In this sense, casting is essential for its ability to manufacture parts efficiently, economically and sustainably, thus contributing to the development of technology, which is practically applied in all industrial sectors such as automotive, aerospace, heavy machinery, metal-mechanics, construction and energy, and where robust and durable metal components are required. Including the casting process as a Learning Unit in industrial engineering curricula is critical to prepare engineering students in relevant aspects such as manufacturing, process optimization and sustainability. In addition, it provides a comprehensive approach to solve industrial problems, improving efficiency and quality in the production of components that are part of countless productive sectors, this process interacts with logistics, supply chain management and quality control, fundamental areas for the management of production plants.

Therefore, this bachelor thesis focuses mainly on the design, construction and operating of a removable crucible melting furnace for the manufacture of aluminum ingots through the pouring of liquid metal into a mold. This project considers all the fundamental aspects such as the process of melting and emptying in permanent mold, which involves from the selection of materials, load of the crucible, melting process, pouring processes, solidification and demolding of the final piece, to its machining, also the inspection of defects and characterization of the molten materials. As well, through the present work it seeks to generate a comprehensive knowledge based on theory and practice in the students of Industrial Engineering in order to contribute effectively in the labor field of industrial production.

CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	4
3. Justificación.....	7
4. Antecedentes Teóricos	9
4.1. Fundamentos históricos de la metalurgia y la fusión en hornos de crisol	9
4.2. Importancia del proceso de fundición en la industria.....	10
4.3. Fundamentos del proceso de fusión	12
4.4. Definición, tipos y clasificación de hornos para fundición	14
4.4.1. Hornos de crisol.....	15
4.4.2. Hornos de reverbero	16
4.4.3. Alto horno	17
4.4.4. Horno de cubilote	20
4.4.5. Hornos eléctricos.....	22
4.4.5.1. Hornos rotativos	22
4.4.5.2. Hornos de arco eléctrico.....	23
4.4.5.3. Hornos eléctricos de inducción	26
4.4.5.4. Hornos eléctricos de resistencia	28
4.5. Fusión de materiales ferrosos	29
4.6. Fusión de materiales no ferrosos	31
4.7. Materiales refractarios para hornos de fusión	32
4.8. Sistema de suministro de energía calorífica quemadores de combustión	32
4.9. Crisol y sus funciones	33
4.10. Construcción, mantenimiento y seguridad de los hornos.....	34
4.11. Aspectos teóricos fundamentales del aluminio y sus aleaciones.....	35
4.11.1. Generalidades del aluminio y del cobre	35
4.11.2. Introducción a las aleaciones de aluminio.....	37
4.11.3. Clasificación y aplicaciones de las aleaciones de aluminio	40
4.11.4. Efectos de los elementos aleantes en la formación de las fases de la aleación.....	45
4.12. Diagramas de fase de Al-Cu.....	48
5. Objetivos	54
5.1 Objetivo general	54
5.2 Objetivos específicos.....	54

6. Hipótesis.....	55
7. Metodología y desarrollo experimental.....	56
7.1. Lista de materiales y equipos de caracterización	56
7.2. Descripción del proceso de construcción del horno de fusión	57
7.3. Diseño de un horno de crisol removible.....	58
7.4. Construcción del horno y del crisol.....	60
7.5. Integración de los componentes del horno	60
7.5.1. Sistema de transporte de combustible para la fusión.....	62
7.6. Diseño de molde permanentes.....	62
7.7. Requerimientos energéticos para llevar a cabo la fusión	63
7.7.1. Fusión de aluminio de 96% de pureza, y fusión de la aleación Al-Cu, con 10, 20, 30, 40 y 60%Cu.....	63
7.7.2. Solidificación y maquinado de los productos de fusión	66
7.8. Análisis de los productos fundidos de aluminio.....	67
7.8.1. Supervisión visual de los lingotes fundidos	67
7.8.2. Análisis de la composición química por fluorescencia de Rayos-X (FRX).....	67
7.8.3. Análisis de la composición química por espectroscopía de chispa	68
7.8.4. Determinación de dureza por la prueba Brinell, HB	68
7.8.5. Análisis de dureza por micro-dureza Vickers	69
7.8.6. Análisis de la microestructura por microscopía óptica.....	69
8. Resultados y discusión de resultados	71
8.1. Manufactura de un horno de crisol removible.....	71
8.2. Puesto en marcha de horno de crisol removible.....	73
8.3. Fusión del aluminio y sus aleaciones	74
8.3.1. Cálculo del calor de fusión.....	75
8.4. Maquinado de los lingotes de Al y de la aleación de Al-Cu	78
8.5. Composición química elemental por chispa.....	80
8.6. Composición química por Fluorescencia de Rayos-X, FRA	82
8.7. Pruebas de dureza, propiedades mecánicas.....	84
8.7.1. Prueba estática de dureza BRINELL.....	84
8.7.2. Prueba estática de micro-dureza VICKERS.....	86
8.8. Determinación de las propiedades microestructurales, asociados a la estructura atómica.....	88
8.8.1. Detalles de la estructura atómica.....	88
8.8.2. Solidificación y detalles microestructurales.....	90
9. Conclusiones y Recomendaciones	102

10. Experiencia práctica de moldeo en arena en verde	103
Referencias bibliográficas	108
Glosario	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de los municipios del Noroeste del Estado de México y que colindan con Atizapán de Zaragoza, de acuerdo con el instituto nacional de estadística y geografía [INEGI 2020].....	4
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de fundición en arena en verde (Beeley, 2001).....	11
Figura 3. Diagrama representativo que ilustra un corte transversal de un horno tradicional con crisol-removible para la fusión de metales (Chastain,2004).....	15
Figura 4. Vista transversal que ilustra un horno comercial de reverbero utilizado en la industria.....	17
Figura 5. Vista esquemática de un corte transversal de alto horno que indica sus partes principales (Malishev, et.al, 1983).....	18
Figura 6. Representación gráfica de las partes principales de un Horno de Cubilote para fusión de hierro.	20
Figura 7. Ilustración representativa de un horno rotativo muy usado en la industria (Hormesa. 2019).	23
Figura 8. Ilustración representativa de un horno de arco eléctrico industrial para fabricar acero.....	24
Figura 9. Ilustración representativa de un horno de inducción muy usado en la industria (Coronel y Sangucho, 2019).....	27
Figura 10. Vista esquemática de un Horno industrial de Resistencias fabricado por la industria Tokai Konetsu Kogyo, Co., Ltd. (Interempresas, 2024).	29
Figura 11. Proceso de manufactura del acero aleado en alto horno por colada continua.....	30
Figura 12. Principales elementos de aleación que se pueden combinar con el aluminio para formar las aleaciones de aluminio que actualmente se aplican en la sociedad.....	45
Figura 13. Energía libre de la formación de una solución ideal de componentes líquidos en el estado estándar del material puro. También se ilustran las tangentes para determinar las energías libres molares parciales de solución.	49
Figura 14. Diagramas de fase que representa de relación entre la composición de la energía libre (a) y la composición con la temperatura para el equilibrio entre una solución líquida y una solución sólida primaria α y β energías (b)..	50
Figura 15. Diagramas de equilibrio Al-Cu, que muestran las fases presentes en la aleación a diferente temperatura y concentración de Cu en el Al.....	52
Figura 16. Reacción eutéctica del diagrama de equilibrio Al-Cu, mostrando sus fases en equilibrio (Hatch, 1984) y (Román, 2019).....	53
Figura 17. Diagrama de flujo de las etapas del diseño, manufactura y puesto en marcha de un horno de fundición de crisol removible.....	58
Figura 18. Representación del diseño de horno de crisol removible para su uso industrial, diagrama que muestra el diseño interior y exterior, cotas en cm, se observan las capas que componen el recubrimiento.	59
Figura 19. Representación del crisol removible para su uso en el horno, diagrama que muestra el diseño con sus medidas en cm.	60

Figura 20. Representación del diseño de la instalación de un horno de crisol para uso industrial. 1) Contenedor cilíndrico almacenamiento de combustible, 2) base de soporte, 3) tubería galvanizada de ½” de diámetro, 4) turbina generadora de aire a presión, 5) horno con coraza de acero, 6) crisol removible de acero.	61
Figura 21. Moldes cilíndricos de acero, que son los (moldes permanentes) para formar los lingotes de aluminio.....	62
Figura 22. Fusión y solidificación de lingotes fundidos de aluminio. Procesamiento mecánico de los lingotes de aluminio para la extracción de muestras representativas para su estudio de caracterización de propiedades.	67
Figura 23. Microscopio metalográfico invertido de la marca Olympus –GXS1 utilizado para el análisis de la microestructura.	70
Figura 24. Colocado del ladrillo refractario en el interior del horno y revestimiento interior del tambor de acero con mezcla de concreto resistente a alta temperatura.	72
Figura 25. Ilustración del horno de crisol removible terminado, vista lateral y vista superior.	72
Figura 26. Puesto en marcha de un horno de crisol removible para la fusión del aluminio.....	73
Figura 27. Proceso de fusión del aluminio, y de la aleación Al-Cu, chatarra fundida en un horno de crisol removible, visión del colado en moldes permanentes de acero.	75
Figura 28. Apariencia de los lingotes de aluminio- Al y Al-Cu obtenidos por fusión.	77
Figura 29. Forma y dimensiones de los lingotes de Al y Al-Cu, fundidos en un horno de crisol removible.	79
Figura 30. Corte y maquinado de los lingotes de Al y Al-Cu, fundida en un horno de crisol removible.	80
Figura 31. Ilustración de un espectrómetro de Emisión óptica por Chispa, modelo Q4 TASMÁN para determinar la composición química elemental en metales.	81
Figura 32. Interacción electrónica de un fotón que es adsorbido por un electrón de la subcapa K, y este sale expulsado con una energía igual al del fotón generando Rayos-X característico, equipo emisor.83	
Figura 33. Ilustración representativa de un espectro de Fluorescencia de Rayos-X (FTR) característicos para algunas de las aleaciones de Al-Cu. a) Identificación de elementos para Aluminio de reciclado b) elementos presentes en el lingote fundido AlCu20 y c) identificación de elementos de la aleación en el AlCu40.	82
Figura 34. Durómetro para prueba de dureza BRINELL con indentador de bola de acero de 5 mm de diámetro; a) indentador de acero, b) durómetro y c) prueba en una aleación de aluminio.	85
Figura 35. Equipo durómetro para prueba de dureza BRINELL con indentador de bola de acero de 5 mm de diámetro; a) indentador de acero, b) durómetro y c) prueba en una aleación de aluminio.	87
Figura 36. Ilustración del diagrama de fases Al-Cu, donde se muestran fases y compuestos intermetálicos (Franco, 2017).	91
Figura 37. Ilustración del diagrama de fases Al-Cu, se muestran fases y compuestos intermetálicos.	92
Figura 38. Configuración electrónica y su estructura atómica centrada en la cara, (fcc), del aluminio y del cobre.	94

Figura 39. Diagrama de fase Al-Cu que muestra la solidificación de una aleación 90Al-10Cu, simulando la microestructura a varias temperaturas.	97
Figura 40. Diagrama de fase Al-Cu que muestra la simulación experimental de la solidificación de la aleación 90Al-10Cu, simulando la microestructura a varias temperaturas, para las diferentes aleaciones estudiadas.	99
Figura 41. Imágenes de microscopio óptico a 500 y 400x aumentos para la aleación a1 , a2 y a3 , para varias concentraciones de cobre.	100
Figura 42. Imágenes de microscopio óptico a 500 y 400x aumentos para la aleación a1 , a2 y a3 , para varias concentraciones de cobre.	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperaturas de fusión de algunos metales y aleaciones de importancia industrial.....	12
Tabla 2. Clasificación de los hornos industriales para la de fusión de metales.....	14
Tabla 3. Clasificación de las formas más comunes de los crisoles de grafito usados para la fusión de metales.....	33
Tabla 4. Características atómicas, físicas y químicas del aluminio (Al) y del cobre (Cu).	36
Tabla 5. Aleaciones típicas de aluminio y su designación, obtenidos por fusión.	38,39
Tabla 6. Tratamiento térmico y nomenclatura de temple para las aleaciones de aluminio.	39
Tabla 7. Composición química de las aleaciones de aluminio para moldeo y fusión.	40
Tabla 8. Medidas y peso de los lingotes de Al y Al-Cu obtenidos por fusión.	78
Tabla 9. Composición química elemental de las fundiciones obtenida por emisión atómica por chispa [%wt].....	81
Tabla 10. Composición química elemental de las fundiciones obtenida por fluorescencia de Rayos-X XRF [%wt].....	82
Tabla 11. Resultados de la prueba de dureza BRINELL HB para cada lingote fundido de aluminio fundido.	86
Tabla 12. Resultados de prueba de dureza VICKERS HV para cada lingote fundido de aluminio fundido.	87
Tabla 13. Cálculo del porcentaje de las fases presentes para cada temperatura, para la aleación α_2 (Al-10%Cu) obtenido por la regla de la palanca.....	98



INTRODUCCIÓN

1. Introducción

La fundición de metales es una tecnología de manufactura aplicada desde tiempos ancestrales de acuerdo con los registros bibliográficos y antecedentes, esta tecnología se fundamenta en el mecanismo de fusión que es el proceso físico que se encarga de llevar a cabo la transformación de fase del estado de la materia (carga metálica en chatarra o mineral), es decir de la estructura sólida al líquido mediante la ignición de un combustible que genera energía calorífica para alcanzar la temperatura de fusión del metal; siendo así una de las grandes actividades de manufactura de materiales metálicos que forjan el desarrollo de una sociedad (Tylecote, 1992). Hasta ahora, la fundición de metales en particular la producción de acero (por ejemplo, la siderurgia) es fundamental para el crecimiento y progreso de una nación, ya que es un indicador que aporta directamente al Producto Interno Bruto (PIB), que además favorece a la generación de empleo y exportaciones de acero. Se puede afirmar con gran certeza que la producción de acero es un indicador de la fortaleza industrial de un país y que caracteriza su capacidad para exportar productos manufacturados, y que derivado de sus reversas puede considerarse un país económicamente competitivo en diferentes mercados internacionales.

Actualmente, la industria de la transformación y manufactura de metales, es decir, la fundición es considerada muy importante por el uso que se les da a sus productos elaborados; como por ejemplo en la construcción de máquinas, en gran diversidad de herramientas, en utensilios de uso común de distintos tamaños y formas, así como en componentes para maquinaria y en equipos que son esenciales y que requiere la sociedad para su trabajo cotidiano (Beeley, 2001).

Sin embargo, las nuevas tecnologías digitales, que incluyen la robótica, la automatización industrial, la impresión 3D, y la inteligencia artificial, están potencializando substancialmente las demandas de la sociedad en el mercado industrial, así mismo la industria de la transformación de materiales presenta la necesidad de fortalecer la fundición de metales para ser más competentes en el mercado global, ya que es considerada muy significativa para el abastecimiento económico del país. Por estas razones, se requiere que los estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad Autónoma del Estado de México en su derivado Campus Centro Universitario *UAEM Valle de México* tengan en su formación académica conocimientos sólidos de los aspectos fundamentales que ha este proceso de manufactura por fusión conllevan, así como sus características principales, parámetros de operación, conceptos fundamentales basados en la teoría, y su aplicación industrial. Este conocimiento integral proporcionara al estudiante la capacidad de conocimiento para contribuir de manera efectiva al campo laboral de la producción industrial.

Por lo que los estudiantes de ingeniería industrial del *CU UAEM Valle de México* deben de comprender que el fabricar una pieza metálica por el proceso de fundición, se requiere de disciplina, responsabilidad, decisión, capacidad de análisis, modelación, habilidades, conocimiento de pruebas experimentales y el estudio de la materia, así como trabajar en equipo, con el objetivo de producir piezas fundidas que cumplan con las especificaciones técnicas solicitadas por el cliente, tanto en geometría, composición química, homogeneidad del material, dimensiones y características estructurales del metal. Lo anterior garantiza que el producto fabricado, permita ser utilizado con rendimiento y durabilidad durante la aplicación de los materiales metálicos producidos por el proceso de fundición. Por lo que, el presente trabajo tiene la intención de instruir al estudiante a comprender los fundamentos teóricos tales como, termodinámica, cinética de reacción, mecanismo de fusión, equilibrio de fases, propiedades físicas y químicas de los metales, además de realizar los experimentos prácticos para entender los procesos de fusión, distinguir los diferentes tipos de hornos y equipos utilizados en la producción de metales, así como aplicar las técnicas modernas de control de procesos y entender las normativas y estándares de la producción.

Por esta razón, este proyecto de tesis se enfoca principalmente en el diseño, construcción y puesta en marcha de un horno de fusión de crisol removible para la manufactura de lingotes de aluminio a través del vaciado de metal fundido en un molde. Este proyecto contempla todos los aspectos fundamentales como lo es el proceso de fusión y vaciado en molde permanente, que involucra desde la selección de los materiales, carga del horno, proceso de fusión, procesos de vaciado, solidificación y desmolde de la misma pieza final, hasta su maquinado, así mismo la inspección de defectos y caracterización de los materiales fundidos. El proceso se extiende hasta su posible aplicación por manufactura de productos en arena sílica en verde con métodos de moldeo manual.

En este sentido, en el trabajo experimental de este proyecto de tesis dirigida por el Dr. Héctor Herrera Hernández, se exponen las etapas conceptuales de planificación de diseño, construcción de un horno cilíndrico, construcción de un crisol de acero, logística de instalación y establecer las operaciones principales del proceso de fabricación de productos metálicos por fundición, además de entender las consideraciones fundamentales del proceso que se basan en los aspectos teóricos y de la experiencia, así como también el análisis y la evaluación de alternativas y la toma de decisión del proceso de diseño y fabricación del prototipo final. También se presenta la metodología para realizar pruebas de puesta en marcha para verificar que el horno opere adecuadamente según lo diseñado y que cumpla con los requisitos del proceso. Para este caso se realiza la secuencia de manufactura como ejemplo práctico de la aplicación de la fusión de lingotes de Al-aluminio con adición de Cu-cobre con 10, 20, 30, 40 y 60% en peso, para aspectos de investigación del presente trabajo de tesis.

Por consiguiente, es necesario notar que uno de los motivos del uso de la fundición en la industria es la capacidad de transformar metales en formas complejas y únicas que no serían factibles mediante otros métodos de fabricación y que además de ser considerado como un proceso de producción con menor recurso invertido y sea aplicado extensamente para la manufactura de productos en serie con diferente forma, tamaño y cualquier metal, ya sea en su naturaleza pura o aleado para producir desde tornillos hasta cabezales para motores de combustión interna. Para lograr este objetivo debe tomarse en cuenta también las normas y regulaciones que aplican para el cuidado del medio ambiente, así como la gestión de la disposición de los residuos de fusión para práctica sostenible y responsable. Por lo que este trabajo tiene la intención de apoyar al conocimiento de los ingenieros industriales en el área de la fundición de metales y tolerancias que ha este proceso se le aplican, durante la enseñanza aprendizaje de PROCESOS DE FUNDICIÓN.

Por consiguiente, en esta tesis se abordan temas selectos de ingeniería como; i) Fundamentos históricos de la metalurgia y la fusión en hornos de crisol, ii) Importancia del proceso de fundición en la industria, iii) Fundamentos del proceso de fusión, iv) Tipos y clasificación de hornos, v) Fusión de materiales ferrosos y no ferrosos, vi) Materiales refractarios para hornos de fusión, vii) Sistemas de suministro de energía calorífica, viii) Crisol y sus funciones, ix) Construcción, mantenimiento y seguridad de hornos, y por último x) Aspectos teóricos fundamentales del aluminio y sus aleaciones. Además de presentar la metodología del análisis de defectos y de las propiedades microestructurales, mecánicas (dureza), físicas y químicas de un caso práctico como el sistema 2xxx (Al-Cu) para aplicación industrial.

Finalmente, se espera que este trabajo sea una aportación de conocimientos a la ingeniería aplicada enfocada a los PROCESOS DE MANUFACTURA como es la Unidad de Aprendizaje de PROCESOS DE FUNDICIÓN, que se enseña en el plan de estudios de Ingeniería Industrial del CU UAEM Valle de México. Y este trabajo sea motivo de lectura para aprender el conocimiento aplicado a la manufactura por el proceso convencional de fusión.

The image features a white background with two large, diagonal, semi-transparent sections. The top-left section is black with a subtle leaf vein pattern. The bottom-right section is red with a similar leaf vein pattern. Two parallel diagonal lines, one red and one black, run from the top-left towards the bottom-right, crossing the white background. The text 'PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA' is centered in the white area.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2. Planteamiento del problema

Como resultado del proyecto de desconcentración de la Universidad Autónoma del Estado de México en 1984 (UAEM, 2021), que originalmente las actividades educativas y administrativas estaban concentradas en Lerdo de Toluca, Estado de México. El proyecto asumió el objetivo de crear unidades académicas regionales para acercar la educación superior a más comunidades locales para evitar el desplazamiento hasta la capital del Estado, así mismo contribuir al desarrollo económico y social de las regiones y fortalecimiento de la identidad regional.

A este resultado de ampliar las funciones de educación superior en varios municipios del Estado de México, derivado de ello surge la Unidad Académica Profesional Valle de México (UAP-VM) en el municipio de Atizapán de Zaragoza que inicia actividades educativas el 17 de septiembre de 1996 con una matrícula de 850 alumnos, y hasta marzo del 2006 se establece como Centro Universitario *UAEM Valle de México* (CU-UAEM-VM, 2023). Según la INEGI, este espacio académico se encuentra localizado geográficamente en Atizapán de Zaragoza y colinda alrededor con varios municipios al Noroeste del Estado de México, tal como se ilustra en la **Figura 1**, entre ellos se localiza Nicolás Romero, Cuautitlán Izcalli, Tlalnepantla de Baz, Naucalpan de Juárez, Jilotzingo, Isidro Fabela y Villa del Carbón, principalmente.



Figura 1. Ilustración de los municipios del Noroeste del Estado de México y que colindan con Atizapán de Zaragoza, de acuerdo con el instituto nacional de estadística y geografía [INEGI 2020].

Por lo que el CU UAEM Valle de México ofrece programas educativos a nivel superior, que despliega una importante iniciativa educativa a diversos municipios del Noroeste del Estado de México, uno de estos programas educativos es de oferta exclusiva de la región como es la Licenciatura en Ingeniería Industrial (IIN). El programa de Ingeniería Industrial proporciona una oportunidad competente para que los estudiantes de los municipios del Noroeste del Estado de México accedan a una formación académica de calidad en una disciplina crucial para la industria y atiende a una respuesta directa a las necesidades educativas y laborales de la región. En este sentido, de acuerdo con los resultados del estudio de impacto del Programa de Estudios de Ingeniería Industrial en el 2012 se tiene registro de la existencia de al menos 8,852 empresas manufactureras que representan la mayor cantidad de la industria en la zona de influencia geográfica y se tiene que la mayor proporción es de 3,569 industrias (40%) y son empresas dedicadas a la fabricación de productos metálicos (Castro, 2012).

Por tal razón, el currículo del Programa de Estudios de Ingeniería Industrial está estructurado por cuatro áreas fundamentales; estas son el i) Área de Ciencias Básicas y Matemáticas, ii) Área de Ciencias de la Ingeniería, iii) Área de Ingeniería Aplicada y iv) Área de Ciencias Sociales y Humanidades (CU UAEM VM, 2004). La INGENIERÍA APLICADA; es la aplicación de las ciencias básicas y ciencias de la ingeniería con la finalidad de satisfacer las necesidades de las organizaciones como en procesos de diseño, desarrollo e implementación de sistemas, procedimientos, etc., para este fin se requiere de los fundamentos de la materia de Procesos de Manufactura como es la Unidad de Aprendizaje de PROCESOS DE FUNDICIÓN (UA-L32237, 2023). Sin embargo, es necesario notar que no se contaba con la existencia de un horno de fundición en la institución (TALLER DE DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS) para integrar una enseñanza de calidad a los estudiantes del séptimo semestre de la licenciatura en Ingeniería Industrial, de este modo se integran tanto los conocimientos teóricos con los prácticos.

Es por esto, que el propósito de este proyecto es diseñar y construir un horno de fundición para manufacturar lingotes de aluminio y sus aleaciones a nivel laboratorio para brindar un conocimiento práctico en la **Unidad de Aprendizaje de Procesos de Fundición**, instruida por el **Dr. Héctor Herrera Hernández (DR.3H)** profesor reconocido como investigador por esta institución. Así mismo, se inicia la consolidación integral del Taller de Diseño y Desarrollo de Prototipos de Ingeniería Industrial para realizar investigación aplicada a la manufactura de productos metálicos. Así mismo se tiene un cuerpo académico consolidado con registro SEP titulado “INGENIERÍA INDUSTRIAL AVANZADA” que en su línea de generación de conocimiento se desarrolla la disciplina de manufactura y producción de materiales.

Finalmente, considerando que, otra de las funciones de este espacio académico es la de brindar servicios a la industria y realizar sistemáticamente investigación aplicada que ayuden al desarrollo tecnológico, y que además sea de motivación para los alumnos de ingeniería industrial, a fin de contribuir a mejorar la calidad de la enseñanza-aprendizaje y el bienestar de la sociedad de la región. En este sentido el Dr. Herrera, realiza actividades de investigación aplicada al ámbito de la formación profesional de ingenieros industriales, y, por otro lado, el diseño y construcción de un horno de crisol resultará de gran beneficio para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación en la manufactura de aleaciones de metales para aplicación industrial como es la aleación Al-Si, Al-Cu, Al-Fe, y Al-Si-Cu-Fe, entre otros, investigación básica aplicada que se realiza en el taller de diseño y desarrollo de prototipos de Ingeniería Industrial.



JUSTIFICACIÓN

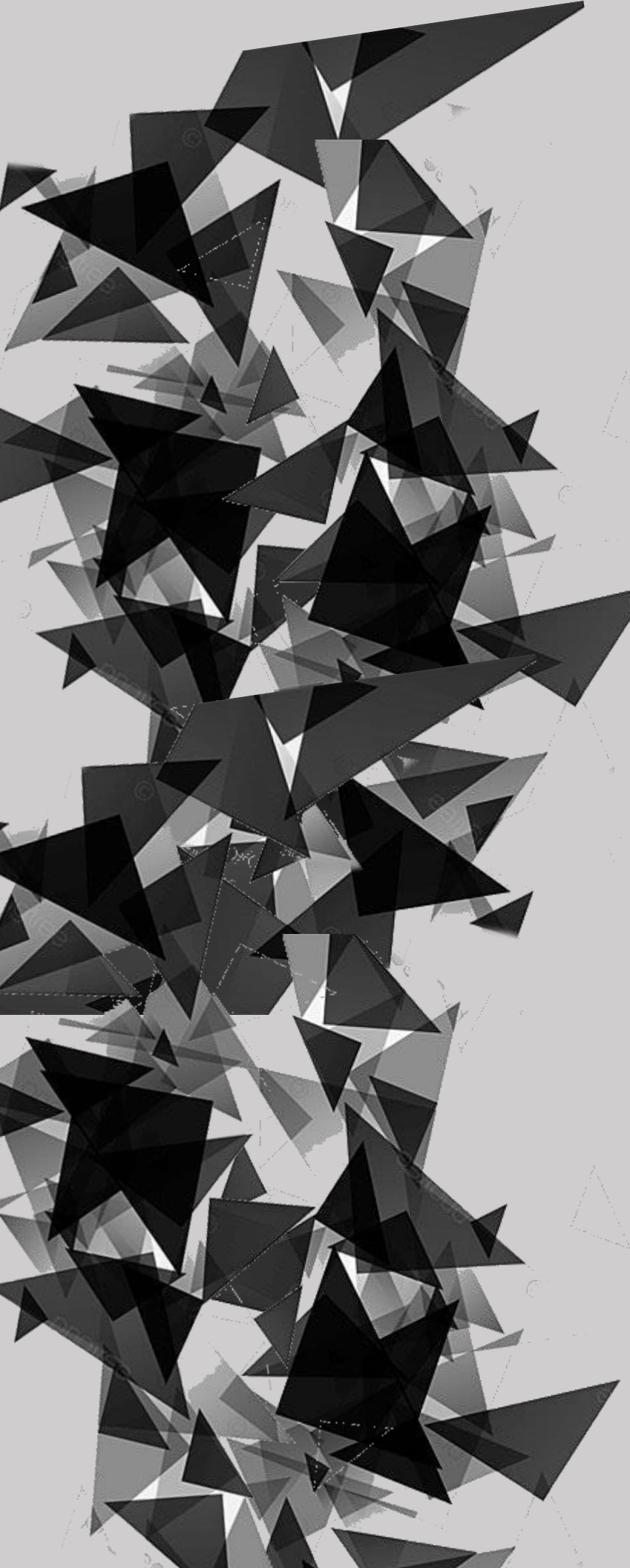
3. Justificación

En el centro Universitario UAEM Valle de México se ofrece la Licenciatura de Ingeniería Industrial en un plan flexible desde el 2004, para que los estudiantes de la región tengan una educación integral y reflexiva con igualdad, así como oportunidades de obtener un conocimiento sólido. La Unidad de Aprendizaje de PROCESOS DE FUNDICIÓN es parte fundamental de la materia de Procesos de Manufactura y conforma el área de acentuación del conocimiento Ingeniería Aplicada, esta área tiene los propósitos de integrar, diseñar y administrar de manera óptima los procesos tecnológicos de producción conformados por: recursos humanos, económicos y financieros, maquinaria equipo e información mediante la adquisición de información, técnicas y metodologías en las áreas de logística, manufactura, administración de operaciones y gestión ambiental para el logro de las metas de la organización.

Considerando este enfoque pedagógico, la unidad de aprendizaje de PROCESOS DE FUNDICIÓN es considerada dentro del núcleo de formación sustantiva profesional, ya que le permite al estudiante el análisis y la aplicación del conocimiento específico proporcionando los elementos teóricos metodológicos, técnicos e instrumentales en materia de Ingeniería Aplicada. De acuerdo con el plan de estudios la unidad de aprendizaje (UA) PROCESOS DE FUNDICIÓN con clave de identificación L32237 (UA-L32237, 2023), se imparte en modalidad presencial de 6 horas/semana de las cuales 4 horas son teóricas y 2 horas prácticas. Es una UA de 8 créditos, es un curso de carácter obligatorio y pertenece al núcleo de formación sustantivo profesional. Los requisitos previos sugeridos para cursar esta UA es tener conocimiento de ingeniería de materiales, química, termodinámica y metrología (de acuerdo con el plan de estudios de ingeniería industrial). Las unidades temáticas que se instruyen en esta UA, son temas selectos que generalizan el conocimiento teórico y práctico de la metalurgia, la fundición, la metal mecánica, e ingeniería de materiales, y que además son temas fundamentales debidamente revisados por expertos en la materia, tales como; i) Fundamentos del diseño para la elaboración de modelos físicos, ii) Generalidades de las arenas para moldeo, iii) Técnicas de moldeo, iv) Diseño de sistemas de alimentación y colada en piezas de fundición, v) Procesos de fusión de los aceros al carbono, vi) Procesos de fusión del hierro gris, vii) Procesos de fusión del hierro nodular, viii) Procesos de fusión de aleaciones no ferrosas, ix) Técnicas de vaciado de los metales fundidos, y x) Defectos en piezas fundidas.

En este sentido se tiene como fortaleza el núcleo de profesores de tiempo completo (PTC) comprometidos para desarrollar actividades de investigación y docencia, para dar solución a problemas sociales, generar conocimiento, fomentar la cultura científica, así como cimentar identidad universitaria a través de la difusión del conocimiento; de los cuales 5 docentes pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores, por lo que una de líneas de investigación del Dr. Herrera es la manufactura de materiales metálicos. Como instructor el Dr. Herrera comenta que no se tiene un espacio adecuado donde aplicar

la fusión de metales como práctica experimental e investigación. Es por ello que se plantea esta propuesta como una solución a este problema para que los alumnos de Licenciatura de Ingeniería Industrial del Centro Universitario UAEM Valle de México tengan un espacio adecuado donde aplicar directamente los conocimientos teóricos adquiridos en la UA de PROCESOS DE FUNDICIÓN, y además se involucren en el desarrollo de proyectos de investigación. La manufactura y producción es muy importante para los estudiantes de ingeniería industrial, ya que a través de la tecnología se permite transformar los materiales en artículos útiles para la sociedad, así mismo el ingeniero industrial se encarga de estos procesos para que se puedan llevar de manera adecuada, y finalmente la fundición es considerada como uno de los procesos más utilizados para fabricar productos metálicos por su capacidad de producción en volumen, forma, tamaño y por su bajo costo de manufactura.



ANTECEDENTES TEÓRICOS

4. Antecedentes teóricos

En esta sección se realiza una búsqueda bibliográfica de los antecedentes teóricos de temas fundamentales que debe conocer el estudiante-lector que estudia la unidad de aprendizaje de Procesos de Fundición, que le permita la toma de decisiones en la manufactura y puesta en marcha de un horno de crisol para la fusión de metales, además de adquirir conocimientos y experiencia en esta tecnología. Por consiguiente, para lograr los objetivos de aprendizaje, el estudiante requiere de conocimientos sólidos sobre conceptos como; que es la metalurgia, que es la fusión, que es la fundición, y que además, es necesario conocer los aspectos históricos y generalidades de la metalurgia, tipos de hornos de fusión, fusión de materiales ferrosos, no ferrosos, especificaciones de los materiales refractarios para hornos de fusión, sistema de suministro de la energía calorífica, fundamentos del crisol y sus funciones, generalidades de la construcción, mantenimiento, y seguridad de los hornos, y por último los aspectos teóricos fundamentales de la fusión del aluminio y sus aleaciones, mecanismos de solidificación que son temas centrales en este trabajo de tesis.

4.1. Fundamentos históricos de la metalurgia y la fusión en hornos de crisol

El uso de los metales en la vida del ser humano ha marcado en la historia una etapa crucial como uno de los más extraordinarios descubrimientos, y que ha contribuido en grandes beneficios a nuestro actual mundo contemporáneo; y sin duda alguna, este es uno de los hechos que ha llegado ser el apuntamiento al desarrollo tecnológico y económico de una sociedad, posicionado en una era digital. Por lo que, el dejar atrás el uso de la piedra como material primario para la manufactura de muchos artículos de necesidad en esa época, esto obligó a la búsqueda de mejores materiales con más durabilidad, para fabricar herramientas, objetos con puntas, flechas, espadas cortas, cuchillos, entre otros objetos de necesidad, que al hombre le permitía sobrevivir en un medio donde la competencia con civilizaciones rivales, ejércitos de conquista u animales de la época era desventajosa; y además sin contar con las rigurosas condiciones de su habita. Por tal razón, se llegó a la necesidad de utilizar a los metales tales como Cobre (Cu), Bronce (Cu-Sn), Plata (Ag), Oro (Au) y Hierro (Fe), así como dominar los procesos de conformado, hallazgos que facilitaron el origen de la metalurgia (Tylecote, 1992). La metalurgia es una tecnología o proceso que ha estado presente desde los 5,500 años a.c. en el que consiste en aplicar calor hasta lograr la fusión del metal para desprenderlo de su mineral, y posteriormente vaciarlo en un molde para producir objetos con una forma más estética y definida, proceso también conocido como fundición. Los primeros metales en ser utilizados fueron el cobre (Cu) y el oro (Au) en el periodo calcolítico 5,500 años a.c., ya que se encontraban en estado puro y podían ser moldeados sin dificultad. Los antecedentes también indican que los primeros objetos metálicos antiguos que se conocen tienen más de 10,000 años de manufactura y no son producidos por fusión, estos fueron forjados, proceso que se da forma a los objetos

metálicos a martillazos en combinación de calor para provocar una deformación. Sin embargo, con el avance del tiempo y con el desarrollo del conocimiento en los procesos metalúrgicos hacia el año 3,500 a.c., se descubrió que, al alea el cobre (Cu) con otros metales, como el estaño (Sn), se producía bronce (Cu-Sn), o con zinc (Zn) para obtener latón (Cu-Zn), materiales con más resistencia mecánica y con mayor durabilidad que el cobre puro, manufacturando así mejores artículos de necesidad y armas. Entonces el descubrimiento de la aleación permitió la manufactura de mezclas homogéneas entre dos o más elementos metálicos que a partir de estos se forma uno nuevo, con propiedades únicas y mejores. Mientras que, en el año 1,200 años a.c., se inicia el uso de hierro (Fe) ya que tiene mayor resistencia mecánica y se encuentra con más abundancia en el planeta tierra (Villar, 2010), (Pezzano, 1992).

Por lo tanto, de los antecedentes se puede interpretar que la fundición es un proceso que se ha utilizado desde la antigüedad para la producción de objetos de metal. En ese tiempo, los primeros hornos de fundición eran simples pozos excavados en la tierra, donde se calentaba el mineral de metal hasta que se fundía por la acción del calor, y vaciar en un molde determinado. Con el tiempo, se desarrollaron hornos más sofisticados y eficientes, como los hornos de cuba y crisol como los que se utilizan en la actualidad para la fundición de grandes cantidades de metal. La metalurgia ha sido una actividad importante para la humanidad desde la prehistoria, y ha evolucionado a lo largo de los siglos con el uso de diferentes metales y aleaciones. Mientras tanto, la fusión de metales también ha evolucionado con el paso del tiempo desde los simples pozos en tierra usados en la antigüedad hasta los hornos de cuba y de arco eléctrico que se utilizan en la industria. Según el libro *"The History of Metals"* de Tylecote, la metalurgia se desarrolló en diferentes regiones del mundo y en diferentes momentos de la historia. Así que el uso de hornos para la fusión de metales no es novedad, estos se remontan desde la antigüedad. Los antiguos egipcios utilizaban hornos de barro para fundir metales, mientras que los romanos desarrollaron los hornos de cuba para la producción de hierro y acero, exclusivamente para manufacturar armas. Al pasar el tiempo, se desarrollaron otros hornos más sofisticados y eficientes, como los hornos de arco eléctrico, de inducción, y alto horno (Tylecote, 1992).

4.2. Importancia del proceso de fundición en la industria

En el diagrama de flujo de la *Figura 2*, se muestran las etapas secuenciales del proceso de fusión de metales por fundición. La fundición es un proceso de gran importancia para la sociedad e industria, la cual permite la fabricación de productos de metal, como por ejemplo objetos de uso cotidiano, piezas para automóviles, variedad de utensilios para cocina, todo tipo de herramientas, y también se utiliza en la fabricación de componentes de maquinaria pesada, como motores de aviones, turbinas de gas, y equipo para

la construcción. Su aplicación es fundamental para componentes o piezas de mayor complejidad en su diseño, y que además dificulta su procesamiento por otros métodos como la forja o al maquinado. Asimismo, es un proceso fundamental en la elaboración de lingotes de metal, los cuales son empleados como materia esencial y son a menudo utilizados en la industria de la transformación (química, automotriz, petrolera, alimenticia, metalmeccánica, entre otros).

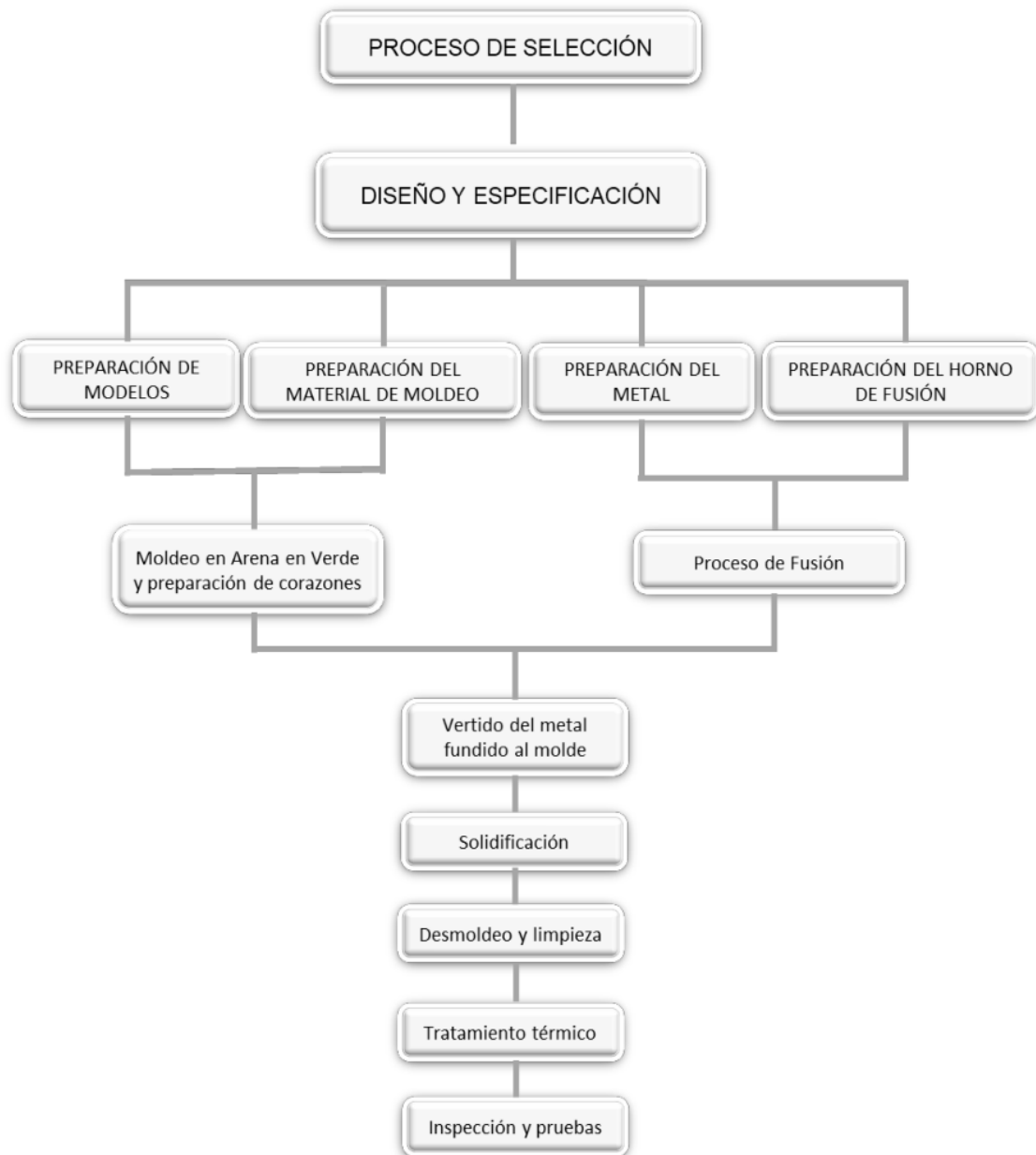


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de fundición en arena en verde (Beeley, 2001).

Según el libro *"Foundry Technology"* de Peter Beeley, la producción de lingotes de hierro, acero y aluminio son esenciales en la industria metalmeccánica y se producen mediante el proceso de fundición en hornos eléctricos de cuba. Los procesos empleados en la industria incluyen desde la fundición por gravedad, bajo presión, en molde permanente, fundición a la cera perdida, hasta la fundición centrífuga, sin embargo, el proceso de fundición que tiene mayor uso industrial por sus beneficios y costos es la técnica de moldeo en arena en verde. Este proceso se adapta muy bien a la producción de piezas de metal con formas y tamaños complejos que serían difíciles o imposibles de producir mediante otros métodos de fabricación, a bajo costo, por ejemplo, desde la manufactura de una campana, un eje de transmisión, un motor de combustión interna, un ancla para embarcación, hasta una biela de motor, entre otros. Por lo que, la fundición es fundamental en casi todas las industrias de manufactura: la mayoría de los productos requieren ser moldeadas en arena en sílica (SiO₂) y fundidas en hierro, acero (Fe-C), bronce (Cu-Sn), latón (Cu-Zn), aleaciones de aluminio (Al), cobre (Cu), zinc (Zn), oro (Au), plata (Ag) y plomo (Pb) principalmente. En la **Tabla 1** se enlista las temperaturas de fusión de algunos de los metales y aleaciones que actualmente se utilizan de manera continua en la manufactura de piezas por el proceso de fundición (Beeley, 2001).

Tabla 1. Temperaturas de fusión de algunos metales y aleaciones de importancia industrial.

METAL	TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C)	ALEACIÓN	TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C)
Hierro (Fe)	1536	Acero (Fe-C)	1420-1535
Nickel (Ni)	1453	Hierro-fundido (Fe-C)	1150-1200
Cobre (Cu)	1083	Hierro gris (Fe-C)	1260
Oro (Au)	1063	Hierro forjado (Fe-C)	1500
Plata (Ag)	961	Bronce (Cu-Sn)	900-1000
Aluminio (Al)	660	Latón rojo (Cu-Zn)	900-940
Zinc (Zn)	420	Al-Cu serie 2xxx	600-900
Plomo (Pb)	327	Inconel (Ni-Cr)	1336
Estaño (Sn)	232	Cuproníquel (Cu-Ni)	1105-1140
Cromo (Cr)	1907	Acero inoxidable (Fe-C-Cr)	1400-1530

TEMPERATURA DE FUSIÓN: Energía requerida por una sustancia para cambiar su estado de fase de sólido a líquido.

4.3. Fundamentos del proceso de fusión

El proceso de fusión implica la transformación de un material sólido en líquido mediante la aplicación de energía calorífica. Todos los metales tienen una temperatura de fusión diferente debido a sus propiedades químicas, físicas, estructurales y atómicas, lo que indica que tanto la fase sólida como la fase líquida coexisten en equilibrio en un punto determinado. En el supuesto de que la fundición de metales, se agrega calor al mineral de metal o chatarra que se encuentra en estado sólido, este se calienta

hasta que se funde alcanzando el estado líquido, después se vacía el metal líquido en un molde preparado, donde se enfriará y solidificará en la forma deseada.

El proceso de fusión también puede implicar la adición de otros componentes para producir aleaciones, con la intención de mejorar las propiedades de los materiales fundidos para los usos que requiere la industria y la sociedad, este es el resultado de mezclar dos o más componentes metálicos puros, confiriéndole el nombre de la aleación al componente de mayor proporción, tal es el caso del acero (Fe-C) convencional, que es la combinación de hierro (Fe) con $\leq 2\%$ de carbono (C) y con cantidades bajas de manganeso (Mn), silicio (Si), azufre (S), y fósforo (P) fabricada para soportar mayor resistencia a la tracción en aplicaciones donde lo requiera por su servicio. También es importante garantizar que el metal fundido esté libre de impurezas antes de su uso. Mientras tanto, el acero inoxidable contiene bajo contenido de carbono con adiciones del 16-18% de cromo (Cr), y del 10-14% de níquel (Ni) con 2 o 3% de Molibdeno (Mo) para hacerlo más resistente a la corrosión electroquímica para su uso en utensilios domésticos y algunas herramientas industriales. En tanto que al mezclar Cu con Zn resulta un producto conocido como latón, es muy dúctil, lo que le permite soportar grandes esfuerzos y se utiliza con frecuencia en instrumentos musicales y en toda clase de tuberías. Mientras que al alear 67% Cu con 33% Sn se forma una mezcla eutéctica llamada bronce, que se caracteriza por ser muy resistente al desgaste que lo hace atractivo para ser muy aplicado en la industria y ser muy demandado en la sociedad. Se entiende por mezcla eutéctica como la combinación de dos o más metales que, al fundirse, forman una composición específica con un punto de fusión más baja que el de cualquiera de sus metales puros, y que proporciona mejoras en sus propiedades. Por otro lado, el hierro gris fundido suele contener entre 2-4% C con 0.5-3% Si, principalmente, que se caracteriza por tener una estructura grafitica, es muy resistente a la tracción y al impacto, suele ser usado en utensilios de cocina y rotores de freno, finalmente, las aleaciones de aluminio con silicio (Al-Si), con cobre (Al-Cu) o zinc (Al-Zn) se utilizan en donde se requiera buena resistencia al maquinado y a la fatiga, con excelente durabilidad a la corrosión (Astigarraga, 1999).

Para conseguir la fusión de los metales, se utilizan hornos que pueden alcanzar temperaturas altas. Los hornos de fundición se dividen en dos categorías principales: hornos de crisol y hornos de cuba. Los hornos de crisol son adecuados para fundir pequeñas cantidades de metal, mientras que los hornos de cuba se utilizan para fundir grandes cantidades de metal hasta una tonelada. En general, la tecnología de fusión es un proceso esencial en la manufactura de productos metálicos, y son utilizados en una amplia variedad de industrias de transformación (Martínez y Palacios, 2000).

4.4. Definición, tipos y clasificación de hornos para fundición

Un horno para fusión se define como aquel dispositivo en el que se genera calor en su interior mediante una reacción de combustión a través de un tipo de carburante y aire, este calor latente de fusión se transmite de manera directa o indirecta a una materia sólida (metal) con el propósito de producir en esta una transformación físico-química, es decir se manifiesta un cambio de fase del estado sólido (s) al estado líquido (l), produciendo un cambio en su energía interna, manifestándose una interacción termodinámica (Coronel y Sangucho, 2019). La función principal de un horno de fusión es alcanzar y mantener temperaturas altas para la fundición de metales. Existen varios tipos de hornos de fusión, cada uno diseñado para aplicaciones específicas. Los hornos para fusión pueden construirse fácilmente a un bajo costo, una unidad pequeña es capaz de fundir tan solo 5 kg de metal. Mientras que las unidades más grandes llegan a fundir hasta 50 kg por hora y pueden construirse a un costo-beneficio razonable. Los hornos pueden ser operados con carbón vegetal, coque, propano, gasolina, diesel, aceite de motor usado, principalmente (Chastain, 2004). Los hornos del tipo industrial que se emplean para fundición han contribuido de manera significativa en el desarrollo de la tecnología para la sociedad, el motivo de su continuo uso en áreas importantes como es la ciencia y tecnología, investigación científica e industria son destinados para realizar tratamientos térmicos, operaciones de forjado, extrusión, fundición y manufactura de aleaciones avanzadas. Los hornos industriales son utilizados para la fabricación de metales y sus aleaciones por fusión, que pueden variar en su capacidad, tamaño, y diseño. Estos hornos varían en su capacidad para fundir desde unos cuantos kilogramos de metal con hornos de hogar abierto que posibilitan la fusión hasta de toneladas de capacidad. Existen diferentes tipos de hornos industriales, clasificados según su tipo de energía (calentamiento eléctrico y por combustible), cantidad de volumen a fundir, su forma de procesar el metal fundido, capacidad y costos de inversión, que a continuación se detallan en la **Tabla 2**. Cada tipo de horno tiene sus propias ventajas y desventajas, la elección del horno adecuado depende de los requisitos específicos del proceso de fundición y del tipo de metal a fundir.

Tabla 2. Clasificación de los hornos industriales para la de fusión de metales.

TIPO DE HORNO INDUSTRIAL	HORNO		CARACTERÍSTICAS
COMBUSTIBLE <ul style="list-style-type: none"> • Carbón o coque • Petróleo, diésel o aceite de motor • Gas 	Crisol	Estacionario	<ul style="list-style-type: none"> • Contenedor removible
		Basculante	<ul style="list-style-type: none"> • Con sistema de inclinación
	Reverbero	Flama directa, hogar rectangular que mantiene la energía calorífica, mayor productividad.	
	Alto Horno	Horno vertical de cúpula, usado para mayor productividad, y grandes volúmenes de metal fundido.	
ELÉCTRICO <ul style="list-style-type: none"> • Flujo de electrones • Corrientes parásitas 	Cubilote		
	Inducción		Sin núcleo y de canal para colado
	Arco eléctrico		Electrodos de grafito eléctricos
Resistencias		Alambre de acero en espiras	

4.4.1. Hornos de crisol

Un horno de crisol se puede describir como un tipo de equipo utilizado para fundir metales a altas temperaturas y que tiene un hogar en su interior en el que se le suministra energía calorífica empleando un elemento carburante y aire. El calor generado se almacena y se transfiere por conductividad a la carga metálica contenido en un recipiente conductor del calor, que a su vez este es resistente a la acción metaloestática del metal fundido y a las condiciones de reacción a altas temperaturas. Este dispositivo es conocido como crisol, el cual permite llevar a cabo la fusión y contener el metal fundido en su interior para después ser vertido a un molde previamente preparado (permanente o de arena sílica). Este tipo de hornos operan mediante una combustión de gases o un combustible líquido o sólido como el gas propano o metano, el aceite de motor reciclado, diesel, gasolina, y carbón vegetal o mineral, estos combustibles proporcionan el calor requerido en kcal para calentar y fundir la carga metálica que contiene el crisol, así como mantener la temperatura del metal fundido. También es posible suministrar calor usando energía eléctrica o utilizando un sistema de inducción electromagnética; horno de inducción o de arco eléctrico. En la **Figura 3**, se ilustra un corte transversal de un horno convencional de crisol removible, el cual es bastante práctico para la fusión y procesamiento de metales no ferrosos, además que es el más indicado para aplicación industrial para procesos donde la prevención contra la contaminación de las aleaciones es fundamental, es decir, que es el más adecuado para realizar la fusión de las aleaciones de aluminio como las que se fabrican en la presente investigación (González et. al., 2018) y (Chastain,2004).

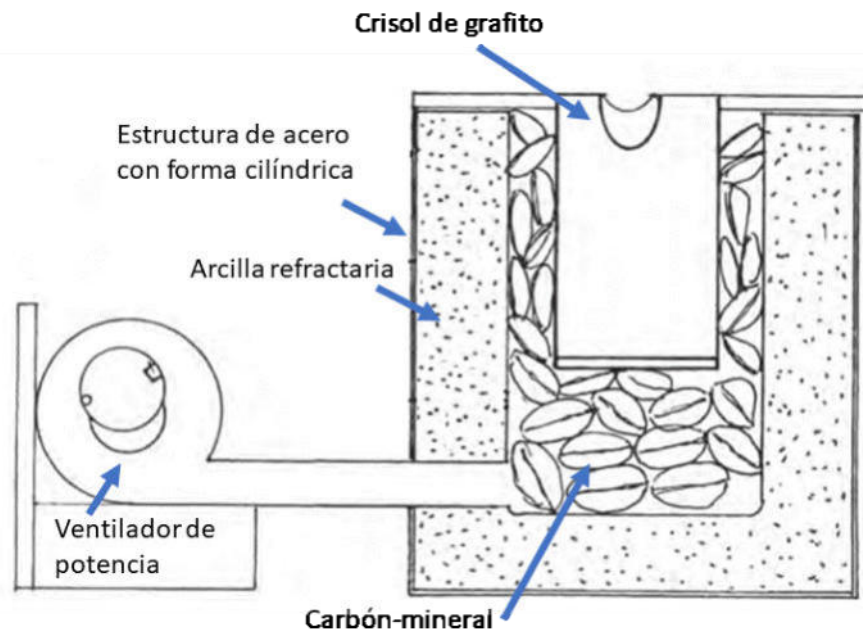


Figura 3. Diagrama representativo que ilustra un corte transversal de un horno tradicional con crisol-removible para la fusión de metales (Chastain,2004).

El crisol es un depósito cilíndrico diseñado para resistir altas temperaturas, este se construye a partir de una mezcla de arcilla con grafito y con otros agregados refractarios, que una vez cargados de metal, se calienta en un horno de crisol, como el de la **Figura 3**, para derretir la carga metálica y en su interior contener la temperatura del metal fundido. Un crisol removible se extrae con pinzas para trasladar el crisol hasta los moldes para ser llenados pertinentemente. El proceso de fusión en crisoles es uno de los procedimientos más antiguos y fundamentales para elaborar productos metálicos fundidos, y todavía se continúa empleándose en la industria por su flexibilidad de adaptación al procesamiento de una gran variedad de metales y aleaciones, que seguramente se utilizarán siempre por el beneficio económico que representa en su instalación sobre todo para fundir pequeñas cantidades de metal (CarboSystem, 2024). Los hornos de crisol removible se manufacturan con una boquilla que sobresale del perímetro del horno. En el caso de que los hornos sean fijos, el metal fundido se extrae con cuchara. Se pueden construir hornos de crisol basculantes o removibles, que se inclinan para extraer el metal fundido. En los que la colada o vaciado resulta más atractivo. Un beneficio de este tipo de hornos de crisol, tanto para fijos como basculantes, es que la carga metálica queda completamente aislada, por lo que no se altera su composición química por efecto de los gases producidos durante la combustión (Huamán, 2013). La fusión en crisol es un proceso que se puede adaptar a cualquier necesidad, volumen, dimensiones y son fácil de usarse, estos hornos pueden encenderse y apagarse en cualquier momento, se consideran muy prácticos.

4.4.2. Hornos de reverbero

El horno de reverbero es otro de los tipos de horno convencionales diseñados con forma rectangular, es muy utilizado para la fundición de metales con bajo punto de fusión, principalmente para cobre (Cu) y aluminio (Al), su interior es recubierto con ladrillo refractario, y tiene una chimenea que le permite disipar los gases del calor producido en el interior del hogar (bóveda), donde se concibe la reacción de combustión. Los antecedentes indican que estos hornos se utilizan también en la producción de latón (Cu-Zn), todo tipo de bronce (Cu-Sn), estaño (Sn) y níquel (Ni), así como en la producción de cemento, algunos hierros (Fe-C) y en el reciclado del aluminio (Al). En estos hornos, la energía que requiere para la fusión es proporcionada por varios quemadores que se alimentan por combustibles líquidos o gaseosos, la flama proporciona el calor latente de fusión directamente sobre la carga metálica. Los gases de combustión generados provocan en el hogar del horno, movimientos intensos de convección que eficientizan la capacidad calorífica para lograr fundir el metal. Los hornos de reverbero son de poca altura, pero son de gran longitud, la capacidad de estos hornos varía entre los 45 kg a los 1000 kg, y son considerados en la industria para la fusión en grandes volúmenes de metal, a pesar de tener un principio de funcionamiento muy antiguo en la industria metalúrgica (Mestanza y Lara, 2012).

En la **Figura 4**, se muestra gráficamente un horno de reverbero que se emplea actualmente en la fundición de metales no ferrosos, tales como el cobre, latón, bronce y aluminio. Está constituido por un hogar o bóveda refractaria adaptada con una mirilla (rejilla), lugar donde se introduce el combustible líquido o gaseoso; la bóveda tiene la función de crisol, lugar donde se acumula el metal fundido, y tiene una chimenea para evacuar la combustión de gases. Además, está compuesto por un sistema de recuperación del calor, muy similar al observado en un Alto Horno convencional, que son diseñados para ahorrar combustible y alcanzar la energía/calor suficiente para fundir el metal. En este sentido, la carga metálica se funde debido a la incidencia calorífica de la flama de manera directa, y a través de los gases calientes que se generan de la reacción química de combustión, y por la radiación del calor emitido desde la bóveda (Vázquez, 2019), (Smart Furnaces, 2020).

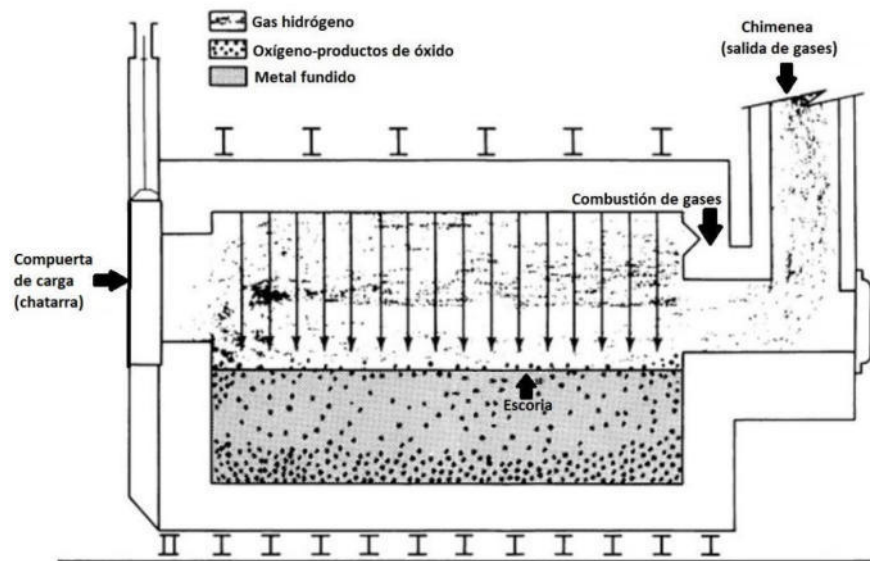


Figura 4. Vista transversal que ilustra un horno comercial de reverbero utilizado en la industria.

4.4.3. Alto Horno

El alto horno que también es conocido como BLAST FURNACE proveniente del idioma inglés, se ha utilizado por mucho tiempo en la fabricación del hierro de primera fusión. Este es un horno que tiene un hogar vertical en forma de cuba y alto en sus dimensiones, que además utiliza al elemento carbono (C) que le sirve como agente reductor de los minerales de óxido de hierro (FeO , Fe_2O_3 y Fe_3O_4 , provenientes de minas). En el alto horno, se mezclan los minerales de hierro, coque y caliza, y se someten a altas temperaturas para obtener arrabio, que es el hierro de primera fusión con alto contenido de carbono,

azufre y fosforo, proceso de reducción del hierro. La **Figura 5**, muestra como es un alto horno y cuales son partes principales que más adelante se describirán a detalle.

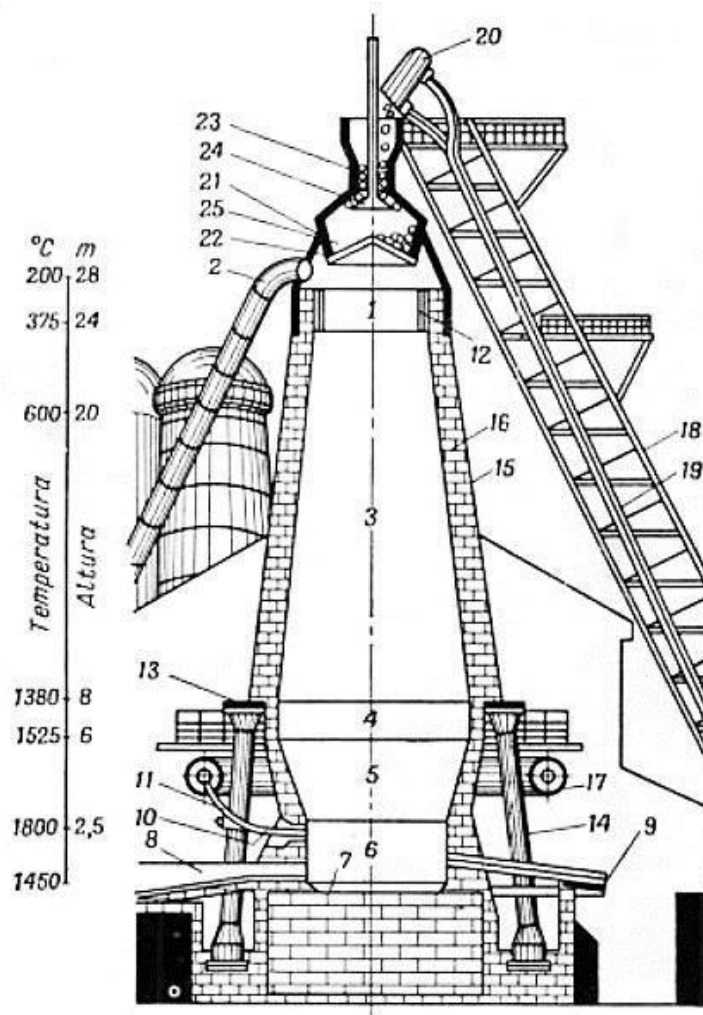


Figura 5. Vista esquemática de un corte transversal de un alto horno que indica sus partes principales (Malishev, et. al., 1983). 1—tragante; 2—salida de gases; 3—cuba; 4—vientre; 5—etalaje; 6—crisol; 7—solera; 8—piquera; 9—salida de escoria; 10 y 11—tobera; 12 y 13—aros de apoyo; 14—soporte de acero; 15 y 16—revestimiento; 17—tubo para aire; 18—montacargas inclinado; 19—carril; 20—transportador de materia; 21-24—embudo y cono; 25—carga de materiales.

La cantidad de carbono (C) se carga especialmente en forma de coque metalúrgico, y otros minerales para formar un producto que se le conoce como arrabio líquido (pig iron en inglés) o hierro de primera fusión con composición 4.5%C, 0.5-1%Si, 0.03%S, 1%P, 0.1-2.5%Mn. Posteriormente se trata por refinación para obtener acero aleado mediante un convertidor u olla de refinación. El principio del alto horno es el de producir grandes volúmenes de arrabio con composición constante a alta velocidad para satisfacer las necesidades y demandas de los clientes, siendo la temperatura del hierro y de la escoria una de las variables críticas de operación, que alrededor de los 1450°C se tienen productos en estado líquido.

Consecutivamente todo el arrabio que se produce en el alto horno se refina en una olla de operación secundaria con el fin de producir acero aleado de conformidad con lo especificado industrialmente. La composición requerida por el acero se garantiza mediante el ajuste adecuado de la composición química del arrabio y de la temperatura del horno. El arrabio que se encuentra en estado líquido se transporta en un termotanque hasta la planta de aceración, donde las impurezas como el fósforo (P), el azufre (S) y el alto carbono (C) deberán de ser disminuidas a niveles óptimos a través de la refinación con oxígeno. De igual forma, la cinética de la reacción de reducción del óxido de hierro con gases reductores es fundamental para el desempeño del proceso de reducción directa en el alto horno.

Los materiales fundamentales utilizados en el proceso de Alto Horno para fabricación de arrabio son; los sólidos (mineral de hierro FeO, Fe₂O₃, caliza CaCO₃, coque, fundentes), los cuales se cargan por la parte superior del horno; un flujo presurizado de aire u oxígeno se inyecta a través de toberas que se encuentran cerca de la cuba del alto horno y los hidrocarburos (gaseosos, líquidos o sólidos). En la **Figura 5** se ilustra de manera esquemática un alto horno que muestra el manejo y carga de materiales, vaciado del horno, el recorrido de los gases producidos por la combustión, el gradiente de temperatura, región donde ocurre la fusión y el equipo auxiliar del alto horno. La producción de hierro en el alto horno se ha incrementado de manera continua desde el momento de su aparición y hasta el momento en el que se han puesto en marcha hornos con capacidad de 12,000 toneladas por día. Existen diversas mejoras en la productividad debido a la construcción de hornos cada vez más grandes y con diseños más modernos (mejor maquinaria para la distribución de la carga, mejores sistemas de enfriamiento, refractarios más resistentes); así como también los cambios en las características físicas y químicas en los materiales de entrada, y así mismo el cambio en las condiciones internas del horno que han sido determinantes a las mejoras en la producción. El factor más importante que ha contribuido a incrementar la productividad del horno ha sido el cambio en la utilización de una mena sin control de tamaño, a una mena de tamaño controlado, distribuida uniformemente, sinterizada y en forma de “pellets”. Una carga uniforme permite que los gases del horno pasen rápidamente a través de la carga sin propiciar acanalamiento o desgaste y a la vez permite que el horno pueda ser operado a una velocidad de soplo mayor, y en consecuencia a una velocidad de producción mayor (Juárez, 2014).

4.4.4. Horno de Cubilote

Este es un horno de cúpula o cubilote como el que se ilustra en la **Figura 6**, quizás uno de los más usados para la fusión de hierro colado, el cuál es diseñado con un tambor cilíndrico de acero en forma vertical de al menos 10 metros de altura y con un diámetro que varía entre los 4 a 6 metros, este es recubierto con material refractario; siendo el ladrillo refractario apisonado con mezcla homogénea de arcilla refractaria, así mismo se debe permitir la introducción de un flujo de aire a través de un conducto o tobera, situada cerca del fondo del horno.

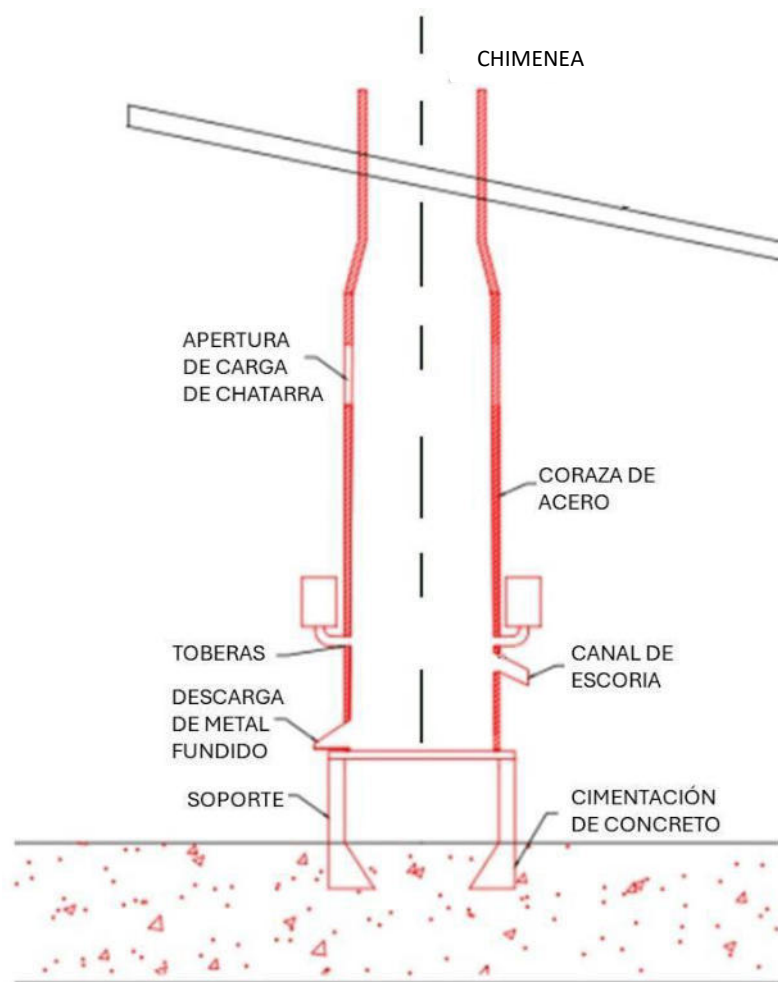


Figura 6. Representación gráfica de las partes principales de un Horno de Cubilote para fusión de hierro.

La estructura del horno de cubilote es soportada sobre una placa de acero con espesor grueso, que reposa sobre cuatro columnas separadas favorablemente para que unas compuertas abisagradas abran libremente. Además, dispone dos orificios opuestos en la parte inferior que se les da el nombre de sangría y

escoriado; por estas aperturas se extrae el metal líquido fundido y por la otra la escoria de fusión, que son las cenizas de combustión, los óxidos metálicos no reducidos, las impurezas de la chatarra, el refractario consumido y cualquier otro elemento diferente al metal deseado. La compuerta de carga de la chatarra metálica se encuentra a la mitad de la cubierta vertical y la parte superior del cubilote queda abierta. Este horno funciona con combustible sólido (coque de carbón, carbón mineral y carbón vegetal), en el que la carga metálica y el combustible están en contacto entre sí, que además le permite un rendimiento térmico elevado. Este horno representa la tecnología más antigua de producir hierro fundido barato con muy bajo contenido de azufre, mediante la carga que consiste en capas alternas de coque, fundente (caliza CaCO_3) y de chatarra de hierro y/o acero, que transforma la chatarra a hierro gris, hierro dúctil o acero de beneficio. El metal líquido cae por gravedad, mientras que los gases calientes debido a la combustión subirán a través de la columna, el intercambio de calor en esta zona calienta la carga para fundir el metal, el fundente reacciona con las impurezas del metal fundido formando la escoria, la escoria flota sobre la superficie del metal fundido por la diferencia de densidades. cuando se ha colectado el suficiente metal líquido en el crisol, se abre el canal de la escoria para extraerla, así mismo el canal de sangrado (cerrado con un tapón de arcilla) se abre y el metal líquido se recoge en una olla o cuchara de vaciado.

Por lo tanto, en la **Figura 6**, se muestran las partes esenciales de un horno de cubilote; i) Chimenea, que se ubica en la parte superior, ii) Envoltura cilíndrica del eje vertical, la cual es una lámina de acero soldada, iii) Revestimiento interno con material refractario, iv) Soporte de elevación, mecanismo que permite el ascenso y descenso de la parte superior del horno mediante la acción de un volante, v) Placa del fondo, esta es una placa de acero con cobertura circular de un diámetro igual a las dimensiones del revestimiento, que tiene una compuerta que permite la descarga del material y para realizar limpieza del horno, la compuerta esta soldada a unos tubos que están firmemente soportados en el suelo, vi) Columnas de apoyo, estas columnas son de hierro fundido o acero y son sostenidas a su vez por unos cimientos de ladrillo o de concreto, vii) Piqueras de sangría y escoria, es un canal elaborado de una lámina de acero revestido de arcilla refractaria con un ángulo de inclinación, canal por donde pasa el hierro fundido, en la parte posterior a este canal se tiene una abertura dispuesta a unos 15 a 20 cm por debajo de las toberas, viii) Toberas, ductos de hierro colado que permiten administrar aire a presión para incrementar la capacidad calorífica, ix) Intercambiador de calor, permite calentar el aire que ingresa a la zona de fusión, x) Crisol, este se ubica en la parte inferior del cubilote comprendido entre la solera y el plano de las toberas (Dante, 2014).

4.4.5. Hornos eléctricos

4.4.5.1. Hornos rotativos

Los hornos rotativos están conformados por una envoltura cilíndrica de acero, de eje horizontal, que finaliza con dos estructuras de acero una en cada extremo. Este horno gira lentamente sobre su eje mientras el material a procesar se introduce por un extremo y se desplaza hacia el otro extremo, donde se descarga el producto terminado. En uno de los extremos se encuentra el quemador y en el otro lado la salida de los gases quemados (reacción de combustión), los cuales generalmente pasan por un sistema de recuperación de calor con el fin de precalentar el aire de soplado antes de ser evacuados por la chimenea. El interior del horno está revestido con un material refractario resistente a altas temperaturas. El combustible puede incluir gas, gasolina, diésel o carbón pulverizado. Se han considerado a los hornos rotativos eléctricos como hornos de reverbero perfeccionados de alto rendimiento, ya que además de calentarse la carga metálica por inducción, es decir el contacto directo con la flama, gases y por la radiación de la bóveda caliente, se transmite calor también a través del contacto directo con la parte superior del horno, que al girar queda bajo la carga. Con esto se consigue una disminución del tiempo de fusión. Y asegurar una distribución uniforme del calor por la rotación, sin embargo. Se puede evitar el impacto aislante de la capa de escorias, que flota sobre el metal en estado líquido, que, en los hornos de reverbero ordinarios, lo que dificulta el calentamiento de la carga metálica (CarboSystem, 2024).

La capacidad de los hornos rotativos para fusión de metales varía entre los 50 kg y las 5 toneladas, aunque se han llegado a construir hornos para la fabricación del acero de alta producción. También se construyen hornos oscilantes que no pueden girar, estos solo oscilan en un sentido, es decir de un lado a otro. Los hornos rotativos se utilizan para fundir casi toda clase de metales y aleaciones, como cobre, bronce, latón, aluminio, fundiciones maleables, aceros, entre otros. Se emplean en una gran variedad de industrias, incluyendo la fabricación de cemento, cal, minerales, productos químicos, y procesamiento de metales. En la **Figura 7**, se muestra un horno rotativo, el cual consiste en un tambor de acero rotativo integrado en un chasis equipado con un mecanismo de basculamiento. El quemador se encuentra ubicado en la puerta justo en la entrada del horno, y la unidad de puerta/quemador es también la ruta de extracción de los productos de combustión y del metal fundido. La carga del horno se realiza por la puerta y la descarga se realiza basculando la unidad hacia el frente (Hormesa, 2019).

Por otro lado, los hornos eléctricos tienen grandes ventajas para la fusión de los metales, siendo los más destacados por las siguientes consideraciones (CarboSystem, 2024);

- Operan a temperaturas extremadamente elevadas hasta 3,500 °C en la mayoría de los hornos eléctricos.

- Control de la velocidad de elevación de temperatura, y mantener esta entre límites muy precisos, con regulaciones completamente automatizadas.
- La carga metálica queda completamente libre de residuos contaminantes del gas combustible.
- La regulación de la atmósfera en contacto con la masa de metal fundido, haciéndola oxidante o reductora a voluntad, e incluso en algún tipo de horno puede operarse en la condición de vacío.
- Mayor duración del revestimiento que en otros hornos.
- Se instalan en espacios reducidos y se adaptan fácilmente a cualquier proceso.
- Mayor efectividad que la de otros tipos de hornos.



Figura 7. Ilustración representativa de un horno rotativo muy usado en la industria (Hormesa, 2019).

Los tipos fundamentales de hornos eléctricos incluyen varios diseños y configuraciones que se utilizan para operaciones industriales como sinterizar, fundir y refinar metales, así como para fundir metales y realizar tratamientos térmicos; los hornos que continuación se mencionan; utilizan energía eléctrica para generar calor, alcanzando altas temperaturas para permitir la fusión como los hornos de arco eléctrico y los de inducción.

4.4.5.2. Hornos de arco eléctrico

Este horno emplea un arco eléctrico que se forma entre los electrodos de grafito y la carga metálica para generar calor. El material para fundir es la chatarra metálica que se encuentra dentro del campo del arco eléctrico.

Se utiliza principalmente en la industria metalúrgica para la fundición de metales ferrosos y no ferrosos, permite la fusión de grandes cantidades de metal. En la **Figura 8** se puede apreciar una ilustración de un horno de arco eléctrico convencional, igual como los que se utilizan en la industria para producir acero aleado comercial o acero inoxidable, a partir de chatarra de acero y hierro, así como ferroaleaciones mediante la fusión de la carga por el calor que se transmite del arco eléctrico formado entre dos electrodos de grafito. Estos hornos cuentan con una cuba u hogar de fusión revestida con material refractario y tienen una bóveda que es enfriada por agua recirculada, y están equipados con un sistema de giro hidráulico, instalado a esta bóveda que le permite la posibilidad de cargar eficientemente la chatarra metálica. Estos hornos están equipados con un sistema de colada por piqueta convencional o por el fondo mediante una piqueta excéntrica se descarga el metal fundido en una olla de vaciado, y por medio de unos soportes que le funcionan como porta- electrodos se suministra la corriente eléctrica (Smart Furnaces, 2017).

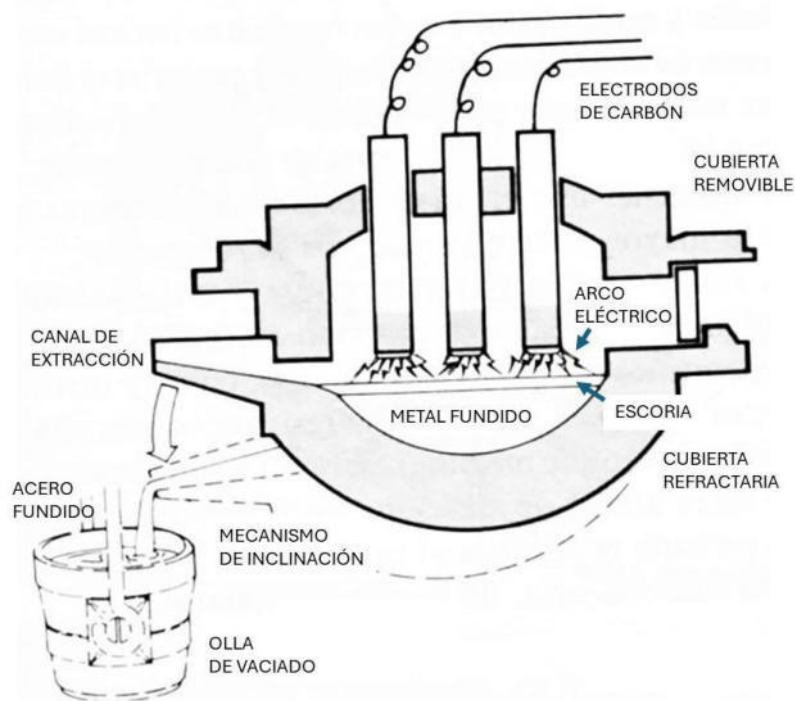
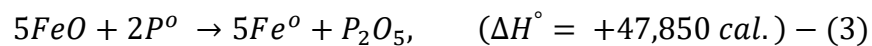


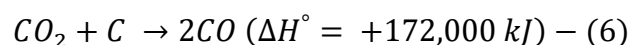
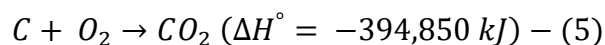
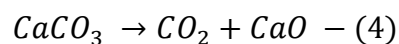
Figura 8. Ilustración representativa de un horno de arco eléctrico industrial para fabricar acero.

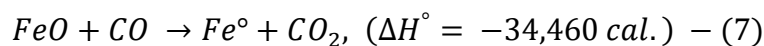
En este tipo de horno, la carga metálica se funde debido al calor latente generado a través de un arco eléctrico (diferencial de potencial). Existen diversas opciones de configuración, desde dos hasta de tres electrodos. Aunque el consumo de energía es considerado elevado, estos hornos eléctricos se diseñan a criterio para que tengan mejor desempeño y mayor capacidad de fusión, y se utilizan en la industria metalúrgica principalmente para fundir grandes cantidades de acero. Los tamaños y diseños de un horno de arco eléctrico varían desde una tonelada (utilizado en talleres de fundiciones) hasta las 50

toneladas de capacidad utilizado para la producción industrial. Los hornos de arco de arco eléctrico están formados por una cuba de chapa de acero revestida uniformemente con un material refractario, provista de barras gruesas de grafito que le sirven de electrodos. Los electrodos de grafito se conforman en el mismo horno, llenando los soportes que llevan los porta-electrodos de una mezcla formada por antracita (material refractario), coque metalúrgico, coque de petróleo y grafito amasados con alquitrán. Estos electrodos bajan hasta entrar en contacto con la carga metálica y aplicar una alta corriente eléctrica, se genera calor entre los electrodos y el metal, alcanzando temperaturas de alrededor de los 1,000 °C. El arco eléctrico se genera entre los electrodos por intermedio del metal fundido y aunque se construyen monofásicos, generalmente son trifásicos. Los hornos de arco eléctrico se emplean en baños de sales y para la fusión de acero, fundición de hierro, latones, aleaciones de níquel, principalmente (Groover, 2007), (Astigarraga, 1999). El procedimiento de fusión a través de un flujo de electrones, sistema eléctrico, es un aspecto fundamental para un horno de arco eléctrico, ya que proporciona la energía calorífica ΔH° requerida para que ocurran las reacciones termodinámicas. Para la fusión de la carga metálica (chatarra o mineral), se introduce en el horno una cantidad determinada de caliza (CaCO_3), mineral de hierro en su forma de óxido (FeO , Fe_2O_3) y se transfiere la corriente eléctrica a través de electrodos de grafito. En este sentido, el proceso de fusión del acero se puede dividir en dos etapas fundamentales: i) proceso de oxidación (etapa donde el metal pierde electrones e^{+n} de su configuración electrónica) y enseguida se lleva a cabo un segundo proceso que es el de reducción, reacción en que el metal gana una cierta cantidad n de electrones e^{-n} . En la primera etapa debido a la presencia del oxígeno el mineral o el óxido de hierro se oxida al igual que todas sus impurezas (excepto el azufre, S); en las siguientes reacciones ocurre una transferencia de electrones mediante la aceptación de átomos de oxígeno (cesión de electrones), también ocurre un proceso de reducción por reacciones electroquímicas, donde un átomo o ion adquiere electrones, que implica la disminución de su estado de oxidación.

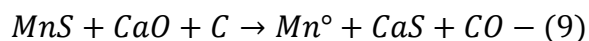
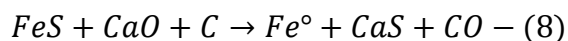


La presencia de la caliza (CaCO_3) o cal (CaO) es de importancia en el horno, para que se realice la reducción del mineral de hierro, mediante la descomposición del CaCO_3 se forma CO_2 , que después se convierte en un reductor, tal como se indica en las reacciones siguientes;





En la segunda etapa del proceso de fusión, sobre la superficie del metal fundido se forma una escoria básica compuesta principalmente por los productos de reacción (óxidos), por su naturaleza tiene menor valor de densidad. La desoxidación del metal y la transformación del azufre en las escorias se efectúa según las siguientes reacciones:



Se extraen las escorias producidas y se carga nuevamente escoria básica, repitiendo esta operación hasta la eliminación casi completa del azufre. Para la desoxidación definitiva del acero se añaden ferroaleaciones. Si se trata de obtener acero aleado se introducen ferroaleaciones con alto contenido de elementos especiales. Durante el proceso y antes de la colada del acero se efectúan análisis para certificar de que el acero a producir cumpla con los planes de producción y calidad, además de que concuerde con la composición química esperada. La duración de la fusión por corriente eléctrica, en dependencia de la capacidad del horno y de la composición de la mezcla fundida a transformar, puede variar desde 2 a 8 horas de fusión. La producción del acero en los hornos eléctricos tiene una gran importancia debido a la amplia utilización de los aceros aleados de alta calidad en la producción de maquinaria especial y herramientas de alto desempeño (Malishev, et. al.,1983).

4.4.5.3. Hornos eléctricos de inducción

- Este horno emplea la inducción electromagnética para calentar el material metálico.
- El material conductor se coloca dentro de la bobina inductora que genera corrientes eléctricas inducidas, las cuales generan calor por resistencia eléctrica para fundir el material.
- Es eficiente en términos energéticos y se utiliza para fundir metales y realizar tratamientos térmicos.

La **Figura 9** muestra un esquema ilustrativo de un horno típico de inducción (Coronel y Sangucho, 2019). En los hornos eléctricos de inducción, el calor se genera por corrientes inducidas como por ejemplo una corriente alterna. Mientras que, en los hornos electrónicos el calor se produce por la vibración molecular de la masa metálica que se trata de calentar cuando es sometido a un intenso campo de radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia.

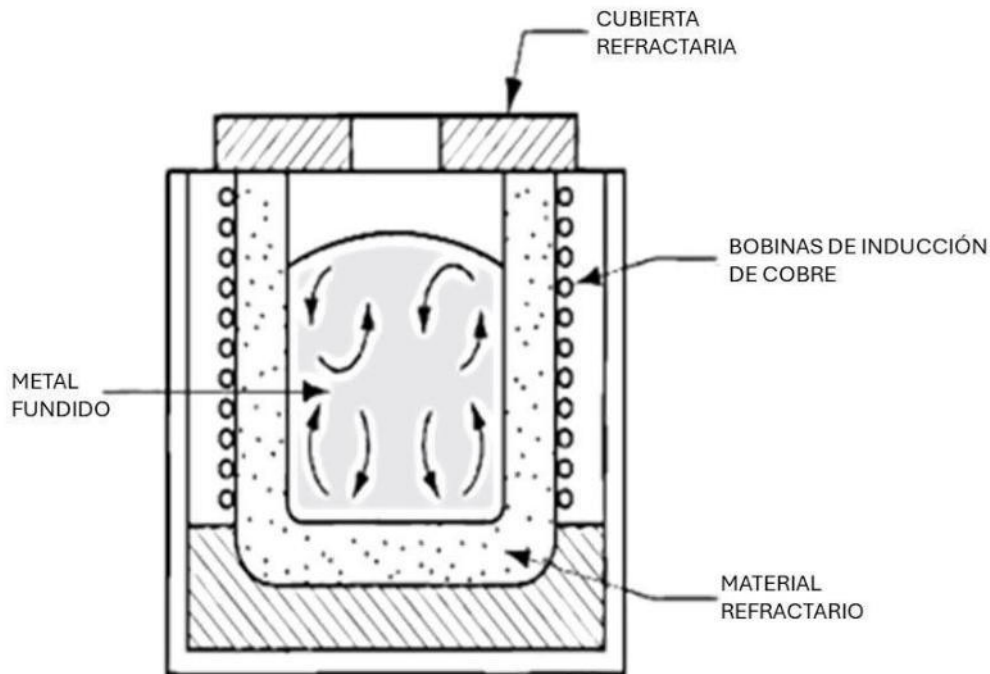


Figura 9. Ilustración representativa de un horno de inducción muy usado en la industria (Coronel y Sangucho, 2019).

Un horno de inducción emplea corriente alterna que pasa a través de una bobina que rodea al crisol, para desarrollar un campo magnético en el metal, y la corriente inducida ocasiona el calentamiento rápido y la fusión de la masa (m) del metal. El campo de fuerza electromagnética hace que ocurra una acción de agitación en el metal líquido-fundido. Asimismo, como el metal no entra en contacto directo con los elementos calientes, el ambiente en que tiene lugar se puede controlar con mayor precisión. El resultado de este tipo de hornos que puede obtenerse metales y aleaciones fundidas de mejor calidad y alta pureza, por lo que estos, hornos de inducción se emplean para la manufactura de casi cualquier aleación. En el trabajo de fusión que más se emplean en aplicaciones industriales es para fundir aleaciones de acero, hierro y aluminio (Groover, 2007). Su construcción implica un diseño complejo, debido a que su parte principal es una bobina electromagnética la cual debe generar un campo uniforme para que mediante el efecto de Joule que se produce exista una transferencia de calor uniforme en la carga metálica. La construcción de esta bobina sería muy difícil de lograr y si se plantea comprarla tal vez no existe disponibilidad en el país. Estos factores implican un alto costo de inversión de capital comparado con los otros tipos de horno eléctricos mencionados anteriormente, por lo tanto, esta alternativa no se considera viable para el desarrollo del proyecto por el alto costo de mantenimiento y del horno.

4.4.5.4. Hornos eléctricos de resistencia

- Utiliza resistencias eléctricas como fuente de calor.
- Las resistencias generan calor mediante el paso de corriente eléctrica a través de un material resistivo.
- Se utiliza para fundir metales y realizar tratamientos térmicos como temple, revenido y normalizado, entre otros.
- Control preciso de la temperatura y su capacidad para alcanzar elevadas temperaturas.

En los hornos eléctricos de resistencia, el calor se produce por el efecto Joule al circular una corriente eléctrica a través de una resistencia siguiendo el mecanismo de conducción y radiación, se pueden fabricar aleaciones donde se emplean temperaturas superiores a los 1,800°C. El horno eléctrico de resistencia ha sido diseñado para contribuir a las operaciones mineras de manera exponencial. Ofrece una amplia gama de temperaturas que pueden ir por encima de los 1,500°C. Además, hay una unidad de control automatizada responsable de hacer circular y mantener temperaturas deseadas. Debido a que estos hornos están bien sellados, tienen un vacío que no permite que el calor se escape bajo ningún concepto. Además de estos beneficios, el horno contiene un medio gaseoso inerte como protección de la atmósfera que elimina las posibilidades de oxidación, además un tratamiento de endurecimiento superficial de los metales se puede tratar en este tipo de horno. Los tipos de hornos eléctricos a base de resistencias están; hornos de mufla, hornos tubulares, hornos de caja y hornos de pozo.

Los hornos de resistencia como el de la **Figura 10**, se refiere a un horno de caja que tiene una cámara rectangular y tienden a tomar más tiempo de operación para la fusión de metales a diferencia de un horno de inducción. El tiempo requerido para obtener la temperatura pretendida junto con el tiempo necesario para fundir el metal son una desventaja bastante grande para la mayoría de las operaciones de la industria minera. Dado que estos hornos se utilizan sobre todo para pequeñas a medianas explotaciones mineras. Un horno de resistencia no es muy adecuado para la fusión de una gran cantidad de metal, y estos se utilizan en (Coronel y Sangucho, 2019);

- Sinterizado y calcinación
- Fusión de metales
- Calentamiento de metales
- Tratamientos térmicos de metales
- Recubrimiento de piezas metálicas y no metálicas
- Cocción de arcillas
- Sinterización de cerámicas
- Secado, reducción del contenido de humedad

Algunos de estos tratamientos, permiten la transformación de sus propiedades, por medio de un calentamiento y enfriamiento controlado. Se pueden dar a mayores o menores tiempos de permanencia, rangos de temperatura, velocidades de calentamiento y enfriamiento de acuerdo con el tiempo del material, tipo de material a tratar; por este motivo, es necesario un dispositivo que pueda alcanzar altos rangos de temperatura en menor tiempo sin alterar las propiedades del material a tratar (Electroheat Induction, 2024). Por lo que, los hornos eléctricos de resistencia son herramientas esenciales en numerosos procesos industriales y de investigación.



Figura 10. Vista esquemática de un Horno industrial de Resistencias fabricado por la industria Tokai Konetsu Kogyo, Co., Ltd. (Interempresas, 2024).

4.5. Fusión de materiales ferrosos

Los materiales ferrosos son aquellos que contienen hierro como componente mineral, como los aceros y el hierro fundido. El acero es una mezcla de hierro (Fe) y Carbono (C), es decir, es una aleación entre un metal como el hierro con otro elemento que puede ser un metaloide o no metal, como el carbono. El acero es un material muy utilizado en el sector de la construcción, en la fabricación de herramientas y elaboración de componentes de maquinaria, entre otros usos. Es barato de producir, siendo incluso menos costoso que el aluminio. El uso del acero en la industria es por su dureza, resistencia tanto física como mecánica, y resistencia moderada ante la corrosión, pero incrementa su resistencia a la oxidación si se combina con Cromo 16-18%, Níquel 1-14%, Molibdeno 2-3% y además por la facilidad en trabajarlo o ser maquinado. Otro punto a favor es que se puede reciclar, fundir partes desechadas y trabajar otra vez con el acero sin que pierda sus propiedades. Por lo que, la fundición de materiales ferrosos, como el hierro y el acero, es un proceso importante en la industria del metal. Estos materiales se funden a altas

temperaturas en hornos de cuba alto horno, horno de arco eléctrico, y horno de inducción se utilizan en la producción de una amplia variedad de productos de acero, desde partes de automóviles hasta estructuras de construcción, entre otros.

La fundición de hierro se realiza a través del proceso de fusión en un alto horno de cuba vertical, donde se funde el mineral de hierro junto con coque y piedra caliza para producir hierro líquido de primera fusión (arrabio 4-5% C , 0.5-1% Si , 0.1-2.5% Mn , 0.03% S , 1% P), siendo el carbono el elemento reductor. Este hierro líquido se vierte por colada continua para producir productos de hierro fundido o ser refinado para acero aleado. La fundición de acero se realiza mediante la fusión de chatarra de acero y otros materiales en hornos eléctricos de arco o de inducción. El acero líquido se vierte en moldes y se moldea para producir una amplia variedad de productos o en colada continua para producir planchones o tochos. El proceso de fundición en alto horno implica la fusión de mineral de hierro junto con coque y piedra caliza en un horno grande y alto. El coque es un combustible utilizado para proporcionar calor al horno, mientras que la piedra caliza se utiliza para eliminar las impurezas del mineral de hierro. El proceso de fundición en alto horno es esencial en la producción de hierro y acero, ya que permite la producción de grandes cantidades de metal a un costo relativamente bajo (Barreiro, 1978). En la *Figura 11*, se muestra el proceso continuo de la manufactura de aceros al carbono aleados.

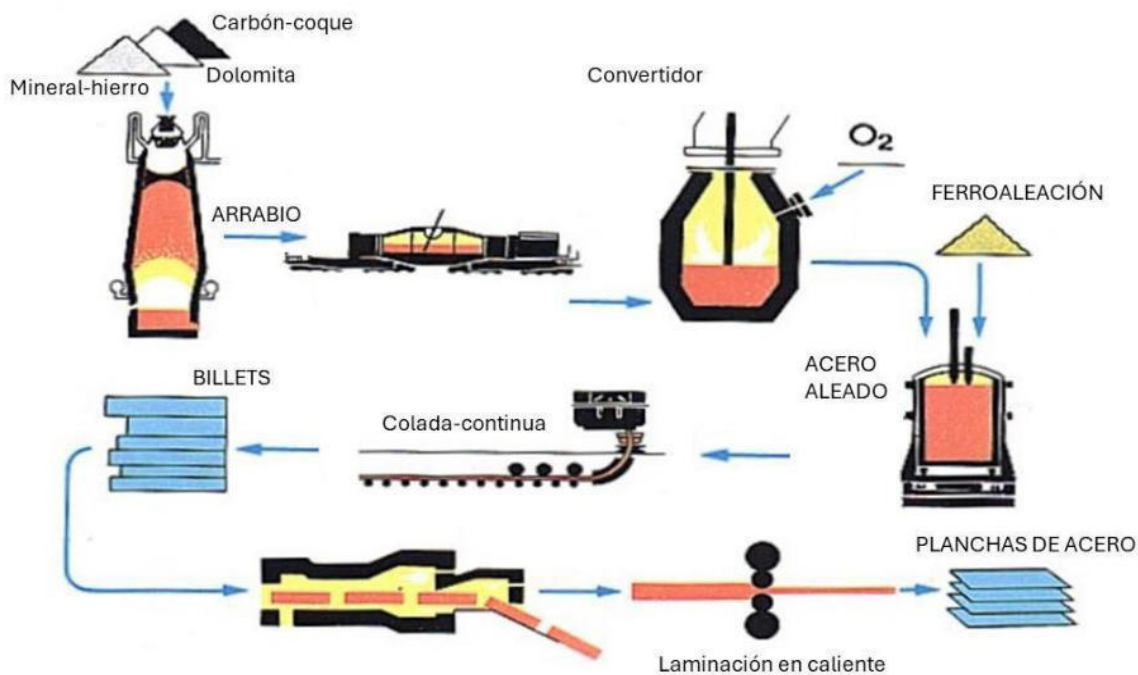


Figura 11. Proceso de manufactura del acero aleado en alto horno por colada continua. Esto se inicia en un alto horno, donde se funde la materia primaria a la temperatura de 1350°C y la transformación química en un metal rico en hierro que es el arrabio. Este horno está diseñado por tener dos

soportes firmes en forma de cono unidos por sus bases mayores. Mide de 20 a 30 metros de alto y de 4 a 9 metros de diámetro; su capacidad de producción puede variar entre 500 y 1500 toneladas diarias. Una vez que el hierro líquido se ha producido en el alto horno, se vierte en moldes para producir productos de hierro fundido. En el caso de la producción de acero, se utiliza el proceso de fusión eléctrica en un convertidor, donde el arrabio se transforma en acero utilizando hornos de arco eléctrico o de inducción. Posteriormente, por laminación se obtiene planchones de acero. Es importante tener en cuenta que el proceso de fundición de metales ferrosos puede generar grandes cantidades de gases de escape y escoria, lo que puede tener un impacto severo en el medio ambiente. Por esta razón, es importante seguir las normas y regulaciones ambientales durante el proceso de fundición.

4.6. Fusión de materiales no ferrosos

Los materiales no ferrosos son aquellos que no contienen hierro en cantidades elevadas, entre estos están el aluminio, cobre, níquel, titanio, magnesio, y sus aleaciones. Estos materiales se utilizan en la producción de una amplia variedad de productos, desde partes de aviones, electrónica, construcción y hasta joyería. Componentes de la fundición de materiales no ferrosos, como el aluminio, el cobre y el zinc, es también importante en la industria metalurgia. Estos materiales suelen tener una serie de ventajas en ciertas especificaciones debido a sus aplicaciones específicas como una alta resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y térmica, menor peso en comparación con los metales ferrosos. Según el libro *"Metallurgy Fundamentals"* de Daniel A. Brandt y J.C. Warner, la fundición de metales no ferrosos se lleva a cabo en hornos de crisol o de cuba. En el caso de la fundición de aluminio y sus aleaciones, se utiliza el proceso de fundición en crisol. El proceso de fundición en crisol implica la fusión de chatarra de aluminio junto con otros materiales, como silicio, magnesio y cobre para producir aluminio líquido. El aluminio líquido se vierte en moldes para producir productos de aluminio de aplicación industrial.

Por otro lado, en la fundición de cobre, se utiliza el proceso de fundición en cuba. El proceso de fundición en cuba implica la fusión de mineral de cobre en un horno grande y profundo. El cobre líquido se recoge en una cuchara y se vierte en moldes para producir productos de cobre. Es importante tener en cuenta que el proceso de fundición de metales no ferrosos también puede generar grandes cantidades de gases de escape y escoria, lo que puede tener un impacto perjudicial en el medio ambiente si no se regulan. Por esta razón, es importante seguir las normas y regulaciones ambientales durante el proceso de fundición, de acuerdo con las normas oficial mexicana NOM-166-SEMARNAT-2014 que regula los límites máximos permisibles de emisión de plomo gases como hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, otros gases provenientes de la combustión de metales en el proceso de combustión.

4.7. Materiales refractarios para hornos de fusión

Los hornos de fusión utilizados en la industria del metal deben ser construidos con materiales refractarios. Los materiales refractarios son materiales que pueden soportar altas temperaturas sin deformarse o degradarse. En la fundición de metales, los materiales refractarios se utilizan para revestir los hornos y crisoles y para protegerlos del calor y de la corrosión. De acuerdo con el libro "Refractories Handbook" de Charles A. Schacht, los materiales refractarios utilizados en la fundición de metales incluyen ladrillos refractarios, cementos refractarios, materiales de aislamiento térmico y materiales de protección contra la corrosión. Los ladrillos refractarios se utilizan para revestir los hornos y crisoles, están hechos de materiales como arcilla, alúmina y sílice. Los cementos refractarios se utilizan para unir los ladrillos refractarios que están hechos de materiales como cemento de alúmina y cemento de fosfato.

Los materiales de aislamiento térmico se utilizan para proteger los hornos y crisoles de la pérdida de calor y están hechos de materiales como lana de vidrio cerámica de fibra. Los materiales de protección contra la corrosión se utilizan para proteger los hornos y crisoles de la corrosión, están hechos de materiales como ladrillos de magnesia y ladrillos de cromo. Es importante seleccionar los materiales refractarios adecuados para el tipo de metal que se va a fundir y la temperatura a la que se va a fundir. Los materiales refractarios también deben seleccionarse en función de la durabilidad y la resistencia al desgaste. (Charles A. Schacht, 2004).

4.8. Sistema de suministro de energía calorífica quemadores de combustión


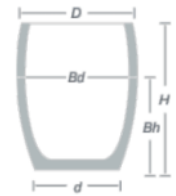
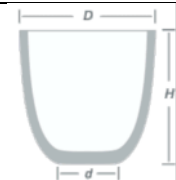

Los hornos de fusión utilizan diferentes sistemas de suministro de energía calorífica, como quemadores de gas, combustión directa y hornos eléctricos. Los quemadores de combustión son dispositivos utilizados para mezclar un combustible con un oxidante presurizado como el aire y encender esta mezcla para producir una flama controlada y de potencia. Los quemadores de gas son muy comunes en los hornos de cuba y de crisol, mientras que los hornos de arco eléctrico y de inducción utilizan electricidad para calentar el metal. El suministro de energía calorífica es esencial en el proceso de fusión de metales y se logra mediante la combustión de un combustible. En el libro "Industrial Burners Handbook" de Charles E. Baukal Jr., se indica que, los quemadores son el componente clave del sistema de suministro de energía calorífica en la fundición de metales. Los quemadores se utilizan para proporcionar la cantidad correcta de combustible y aire al horno de fusión para alcanzar la temperatura de fusión deseada. Los tipos de combustibles utilizados en la fundición de metales incluyen gas natural, propano, gasolina, diésel y aceite residual. Los quemadores se clasifican en función de su diseño y capacidad, y pueden ser de dos tipos principales: quemadores atmosféricos y quemadores de presión. Los quemadores atmosféricos

funcionan a presión atmosférica y, se utilizan en hornos pequeños y medianos, mientras que los quemadores de presión se utilizan en hornos de mayor tamaño y pueden funcionar a presiones más altas para alcanzar temperaturas elevadas. Es importante seleccionar el tipo de quemador adecuado para el horno de fusión y el tipo de combustible que se utilizará. Los quemadores también deben mantenerse adecuadamente para garantizar un rendimiento óptimo de la combustión y transferencia de calor, así como reducir el riesgo de fallo en operación.

4.9. Crisol y sus funciones

En la **Tabla 3** se pueden observar las distintas formas de crisoles usados para fundición. El crisol es un recipiente resistente a las temperaturas, que se utiliza con frecuencia en la fundición de metales para contener el metal fundido y transportar a la zona de vaciado a moldes. Según el libro "Foundry Technology" de Peter Beeley. Los crisoles son esenciales en diferentes procesos metalúrgicos, químicos y donde se requiera fundir metales, son diseñados para resistir altas temperaturas.

Tabla 3. Clasificación de las formas más comunes de los crisoles de grafito usados para la fusión de metales.

TIPO DE CRISOL	APLICACIÓN	DISEÑO DEL CRISOL
Forma "A"	Horno de crisol estacionario y removible	
Forma "B"	Horno de crisol removible	
Forma "BU"	Horno de crisol estacionario	
Forma "C"	Horno de inducción estacionario y removible	

Los crisoles se fabrican con materiales cerámicos/refractarios, como arcilla, grafito, cerámica, sílica, zirconio, alúmina, entre otros y que pueden soportar altas temperaturas sin derretirse, así como las condiciones corrosivas del proceso de fusión. La función del crisol es contener el metal fundido y mantenerlo a una temperatura constante antes de vaciar en los moldes para producir productos metálicos. Los crisoles de arcilla se utilizan para fundir metales de baja temperatura, como el estaño y el plomo, mientras que los crisoles de grafito se utilizan para fundir metales de alta temperatura, como el hierro, el acero y aluminio. Además de contener el metal fundido, el crisol también puede actuar como un medio para eliminar las impurezas del metal fundido. Algunos crisoles contienen sustancias químicas, como flujo, que pueden ayudar a reducir las impurezas en el metal fundido. Es importante seleccionar el crisol adecuado para el tipo de metal que se va a fundir y la temperatura a la que se va a fundir. Además, es importante mantener el crisol limpio y en buen estado para evitar contaminaciones en el metal fundido y prolongar la vida útil del crisol.

4.10. Construcción, mantenimiento y seguridad de los hornos

Los hornos de fusión deben ser construidos adecuadamente para garantizar que el horno pueda alcanzar y mantener la temperatura necesaria para fundir metales, así como la seguridad de los trabajadores y la calidad del producto. Es importante seguir las normas de seguridad en el manejo de hornos y asegurarse de que los hornos estén en buen estado de funcionamiento antes de su uso. Los hornos también deben ser inspeccionados y mantenidos regularmente para garantizar que estén funcionando de manera óptima y así evitar accidentes o fallos en el proceso de fundición. La construcción, mantenimiento y seguridad de los hornos son factores críticos en la fundición de metales. La construcción de hornos debe llevarse a cabo teniendo en cuenta la capacidad del horno. El diseño, la calidad de los refractarios, la construcción, instalación del crisol y eficiencia energética del quemador. El mantenimiento es esencial para garantizar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil. Esto puede incluir la reparación de los revestimientos refractarios, el reemplazo de los quemadores y la limpieza regular del horno. La seguridad también es un aspecto crítico en la fundición de metales. Es importante seguir las normas y regulaciones de seguridad pertinentes para minimizar el riesgo de lesiones y daños a la propiedad. Esto puede incluir la instalación de sistemas de ventilación adecuados para controlar las emisiones de gases, la capacitación de los trabajadores en prácticas de seguridad adecuadas y la implementación de medidas de protección personal, como ropa de protección y equipo de respiración. Además, es importante tener en cuenta las consideraciones ambientales durante la construcción, mantenimiento y operación de los hornos de fundición para minimizar el impacto ambiental del proceso de fundición. Finalmente se hacen pruebas y ajustes de los parámetros de fusión y combustión para su óptima operación (Malishev, et. al., 1983).

4.11. Aspectos teóricos fundamentales del aluminio y sus aleaciones

4.11.1 Generalidades del aluminio y del cobre

El aluminio es un metal no ferroso que se utiliza ampliamente en la industria debido a sus atractivas propiedades, tales como baja densidad, buena conductividad térmica y eléctrica, excelente resistencia a la corrosión, pero carece de propiedades mecánicas. El autor del libro John E. Hatch. "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", indica que el aluminio se puede alearse con otros elementos, como el silicio, el cobre y el magnesio, para mejorar sus propiedades mecánicas. El aluminio puro tiene una estructura cristalina de tipo cúbico centrada en las caras (FCC por sus siglas en inglés, Face Cubic Center), lo que le proporciona al aluminio su alta conductividad térmica y eléctrica. La adición de otros elementos de aleación a la estructura del aluminio puede cambiar su estructura cristalina, por lo tanto, sus propiedades físicas y mecánicas. Tiene un número atómico de 13 y una densidad de 2.7 g/cm^3 , que es un tercio del acero (7.83 g/cm^3) o 63% menor en masa (más ligero), esto permite que en la construcción las estructuras sean más ligeras y resistentes, particularmente el beneficio es en todo tipo de vehículos espaciales y terrestres (Hatch 1984). Entiéndase por estructura cristalina a la disposición ordenada y repetitiva de átomos en un sólido, formando una red cristalina y que determina las propiedades de los materiales.

El aluminio tiene capacidad de resistir un ataque por corrosión por su habilidad de formar un óxido de aluminio protector (Al_2O_3), que es la causa principal de falla en la mayoría de los materiales comerciales de aplicación. La superficie del aluminio cuando se expone a un ambiente corrosivo, esta se combina con el oxígeno del aire y puede formar una película delgada de óxido de aluminio (Al_2O_3) que le sirve de barrera protectora contra la corrosión, a diferencia del óxido de hierro FeO , la película de óxido de aluminio no se desprende, y no permite la exposición de ninguna parte de su superficie a la oxidación. Si la película protectora de aluminio se rompe mecánicamente, esta se sella con hidróxidos y se restaura nuevamente al instante, y se adhiere firmemente al metal base. Mientras que el Cobre, otro de los materiales ampliamente más utilizados en la industria debido a su excelente conductividad térmica y eléctrica, su densidad es de 8.96 g/cm^3 con número atómico de 29, excelente resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación y buena resistencia a la fatiga, no tiene propiedades magnéticas, es considerado como un metal de transición e importante metal no ferroso. La mayor parte del cobre se obtiene por el procesamiento por reciclado y de sulfuros minerales como la calcocita (Cu_2S), covelita (CuS), calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y enargita (Cu_3AsS_4). Los minerales oxidados son la cuprita (Cu_2O), tenorita (CuO), malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3 \cdot (\text{OH})_2$), azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot (\text{OH})_2$), crisocola ($(\text{Cu,Al})_4\text{H}_4 \cdot (\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) y brocantita ($\text{Cu}_4\text{SO}_4 \cdot (\text{OH})_6$). El grado del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los yacimientos más ricos y ha incrementado la demanda del

cobre. El cobre puro por naturaleza es también dúctil, pero se puede endurecer por los mecanismos de trabajado en frío, solución sólida y endurecimiento por precipitación de elementos de segunda fase. Muchas aleaciones de cobre pueden ser unidos por soldadura por gas, arco eléctrico y otros métodos de resistencia. El cobre y sus aleaciones se utilizan para el transporte de la electricidad en aparatos eléctricos y en la electrónica. Se utiliza también aplicaciones durables y decorativas, como techos de cobre, herrajes para puertas, barandillas y elementos decorativos, en el transporte como autos y aviones, y en sistemas de plomería principalmente. En la **Tabla 4** se enlistan las propiedades más importantes para el aluminio (Al) y el cobre (Cu) (Hatch, 1984).

Tabla 4. Características atómicas, físicas y químicas del aluminio (Al) y del cobre (Cu).

PROPIEDADES	PARÁMETROS-VALORES	
	Al	Cu
Símbolo	Al	Cu
Número atómico	13	29
Peso atómico	26.98 g/mol	63.55 g/mol
Color	Blanco-Plata	Metálico-rojizo
Estructura cristalográfica	FCC, Cubica Centrada en las Caras	
Parámetro reticular	0.40414 nm	0.3616 nm
Radio atómico	0.143 nm	0.128 nm
Densidad	2.7 g/cm ³	8.96 g/cm ³
Expansión volumétrica durante su solidificación	67.2x10 ⁻⁶ β(1/°C)	50.1x10 ⁻⁶ β(1/°C)
Temperatura de fusión	660.37°C	1084.62°C
Temperatura de ebullición	2057-2480°C	2835°C
Calor específico, C _p	930 Joules	385 Joules
Conductividad térmica a 100°C	213 W/m-K	400 W/m-K
Resistividad eléctrica	0.0265 μΩ-m	0.0174 μΩ-m
Estado de oxidación	+3	+1, +2
Configuración electrónica	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ¹	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 4s ² 3d ⁹

Por lo que el aluminio puede resistir la corrosión por sustancias salinas y otros medios corrosivos, además de una amplia gama de otros agentes químicos y físicos. La combinación única de propiedades que presentan el aluminio y sus aleaciones, hacen de este material uno de los más versátiles, económicos y atractivos para una amplia gama de usos y aplicaciones; desde la fabricación de papel de aluminio para embalajes, empaques para alimentos y uso doméstico hasta aplicaciones industriales de ingeniería más exigentes; como en fuselajes de aeronaves. Por lo que, las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar en aplicación (con respecto a los aceros) como materiales que más se utilizan con fines estructurales (Maffia, 2013). Las siguientes propiedades permiten al aluminio y sus aleaciones a desempeñarse en varios sectores industriales;

- 1) Resistencia a la corrosión: Para ser ampliamente utilizadas en ambientes salinos.
- 2) Conductividad térmica: Las aleaciones de aluminio en comparación con acero éstas alcanzan altas temperaturas en mayor tiempo.
- 3) Conductividad eléctrica: Después del cobre, el aluminio es el segundo material con un mejor desempeño como conductor eléctrico y es más económico.
- 4) Relación resistencia/peso: El aluminio por su baja densidad y alta resistencia mecánica han remplazado al acero en aplicaciones estructurales.
- 5) Resistencia a la fractura: Las aleaciones de aluminio poseen alta dureza, así como excelente resistencia a la fractura.
- 6) Resistencia a la fatiga: El aluminio y sus aleaciones tienen un desempeño similar a la del acero convencional.
- 7) Módulo de elasticidad: El aluminio tienen un tercio del valor con respecto al del acero, pero absorben tres veces más energía elástica, tiene excelente ductilidad el aluminio.
- 8) Maquinabilidad: El aluminio y sus aleaciones mediante la forja pueden adquirir diversas formas fácilmente por su excelente respuesta a la deformación.
- 9) Unión: Las aleaciones de aluminio responden eficazmente a la soldadura.
- 10) Reciclabilidad: En comparación con otros metales el aluminio es susceptible de reciclar.
- 11) Moldeabilidad: Las aleaciones de aluminio se adaptan fácilmente al proceso de moldeo permitiendo conseguir configuraciones complejas.

4.11.2 Introducción a las aleaciones de aluminio

De acuerdo con la literatura, las aleaciones de aluminio se pueden clasificar en 2 grupos muy específicos; uno de ellos aplica para aleaciones obtenidas por el método tradicional de colado (fusión) y el otro para fabricar productos por el mecanismo de forjado;

- Aleaciones de aluminio por colado, proceso de fusión
- Aleaciones de aluminio de forja; proceso de conformado en frío

Aleaciones configuradas para aplicaciones que requieren una mayor resistencia mecánica, si se alea con elementos tales como el cobre (Cu), magnesio (Mg), manganeso (Mn), y zinc (Zn), por lo general se agregan en combinación de dos o más de estos elementos junto con hierro (Fe) y silicio (Si), para alcanzar un rendimiento óptimo. En la **Tabla 5**, se muestra el sistema de designación numérica únicamente para las aleaciones de aluminio obtenidas por el proceso de moldeo y fusión, además se presenta su composición química que le caracteriza (Hatch, 1984), (King, 1992). Sin embargo, los tratamientos térmicos

que se les aplica a estas aleaciones se basan en el mecanismo de solubilidad de las fases activadas térmicamente, que contemplan el solubilizado-recocido, templado y endurecimiento por precipitación, a este grupo de aleaciones se les distingue por ser termo-tratables o tratadas térmicamente, otras aleaciones pueden responder al endurecimiento por trabajado mecánico. En seguida del tratamiento térmico, se les aplica un recocido para proporcionar otras propiedades mecánicas y mejorar la tenacidad. A estas aleaciones se les llama aleaciones endurecibles por trabajado mecánico, mientras que otras aleaciones coladas no son tratables térmicamente, estas se utilizan tal como se obtienen por el proceso de fusión, es decir en su forma de recibido. La **Tabla 5** indica que se utiliza un sistema internacional numérico de cuatro dígitos (xxxx) para identificar a las aleaciones de aluminio.

Tabla 5. Aleaciones típicas de aluminio y su designación, obtenidos por fusión.

TIPO DE ALEACIÓN	CÓDIGO	APLICACIONES
Aluminio con un mínimo del 99.00% de pureza	1XXX	Endurecible por deformación, alta formabilidad, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica, fácilmente unido por soldadura, se utiliza en láminas y tiras para embalaje, equipos químicos, carrocerías de carros cisterna o camiones, y trabajos elaborados de chapa metálica.
Al-Cu, adición de cobre	2XXX	Tratable térmicamente, alta resistencia a la tracción a temperatura ambiente y elevadas temperaturas. Unión mecánicamente, pero algunas aleaciones son soldables por arco eléctrico con gas. Ampliamente utilizados en partes de aeronaves (2024) y carrocerías de camiones y en construcciones atornilladas o remachadas, entre otros.
Al-Mn, adición de manganeso	3XXX	Alta formabilidad y resistencia a la corrosión con resistencia media a la tracción final, fácilmente unido por soldadura. La aleación 3003 es ampliamente utilizada en utensilios de cocina y equipos químicos debido a su alta resistencia a la corrosión. La aleación 3105 es usada para techos y revestimientos.
Al-Si, adición de silicio	4XXX	Tratable térmicamente, buenas características de flujo del metal fundido, resistencia media a la tracción, fácil de unir mediante soldadura, responde adecuadamente al forjado y se utiliza en la industria automotriz.
Al-Mg, adición de magnesio	5XXX	Endurecible por deformación, excelente resistencia a la corrosión, tenacidad, soldabilidad; resistencia moderada a la tracción. Se utiliza en la construcción, aplicaciones automotrices, criogénicas y marinas, aleaciones representativas: 5052, 5083 y 5754. Las aleaciones 5xxx se emplean en la edificación y la construcción; estructuras de carreteras, incluidos puentes, tanques de almacenamiento y recipientes a presión; tanques criogénicos y sistemas para temperaturas tan bajas cerca del cero absoluto, y aplicaciones marinas.
Al-Mg-Si, adición de magnesio con silicio	6XXX	Tratable térmicamente, alta resistencia a la corrosión, excelente respuesta a la extrusión; moderada resistencia a la tracción. La aleación 6063 es muy utilizada por su capacidad de ser extruida; arquitectura y automotriz.
Al-Zn, adición de zinc	7XXX	Tratable térmicamente, alta resistencia a la tracción; alta tenacidad. Las aleaciones 7xxx se utilizan en la industria aeronáutica principalmente.

Otras adiciones	8XXX	Tratable térmicamente, alta conductividad, resistencia a la tracción y dureza. El Fe y Ni proporcionan resistencia con poca pérdida de conductividad eléctrica, por lo que se utilizan en una serie de aleaciones representadas por 8017 para conductores eléctricos.
-----------------	------	---

El primer dígito indica el grupo de la aleación o elemento principal, los dos últimos identifican los componentes químicos de la aleación de aluminio o indican su pureza. Adicionalmente al sistema numérico de cuatro dígitos, se utiliza otra nomenclatura para denominar la condición de entrega (recibido) o los tratamientos térmicos aplicados a las aleaciones de aluminio, tanto los de conformado como los moldeados. Por ejemplo, las aleaciones suministradas en calidad de “como fabricadas” o en condición de “recocido” se les designan con los sufijos F y O, respectivamente. La letra W designa a la condición “solubilizada”. Por otro lado, las aleaciones suministradas en la condición de “endurecidas por deformación” son designadas con la letra H, y con la letra T en la condición “tratada térmicamente”. Los dígitos siguientes a la letra H representan el grado de endurecimiento por deformación y los dígitos siguientes de T se refiere al tipo de tratamiento de envejecimiento (Maffia, 2013), (King 1992). Todas estas condiciones se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Tratamiento térmico y nomenclatura de temple para las aleaciones de aluminio.

Sufijo que indica; tratamiento básico o condición que se encuentra la aleación	Primer dígito del sufijo; indica un tratamiento secundario que se encuentra la aleación	Segundo dígito del sufijo; indica un tratamiento secundario que se encuentra la aleación
F: Fabricado	Trabajado en frío.	1. 1/4 endurecido
O: Productos recocidos o forjado	Trabajado en frío y parcialmente recocido.	2. 1/2 endurecido
H: Endurecido por trabajado mecánico o trabajado en frío	Trabajado en frío y normalizado	3. 3/4 endurecido
W: Tratada térmicamente en solución		4. completamente endurecido
T: Tratada térmicamente en sales		5. extra endurecido
	1. Solución parcial más envejecido natural.	
	2. Productos de fundición recocidos.	
	3. Solución más trabajado en frío.	
	4. Solución más envejecido natural.	
	5. Envejecido artificial.	
	6. Solución más envejecido artificial.	
	7. Solución más normalizada.	
	8. Solución más trabajado en frío y envejecido artificial.	
	9. Solución más envejecido artificial y trabajado en frío.	

4.11.3. Clasificación y aplicaciones de las aleaciones de aluminio

El aluminio y sus aleaciones son comúnmente agrupadas en series, como se describen a continuación; la

Tabla 7, muestra la composición química de las aleaciones de aluminio únicamente para las obtenidas por moldeo y fusión.

Tabla 7. Composición química de las aleaciones de aluminio para moldeo y fusión.

Serie	Aleante	Mg	Si	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
1xxx	Al > 99%	0.006-0.25	0.006-0.7	0.002-0.05	0.006-0.6	-	0.006-0.35	-
2xxx	Al-Cu	0.02-0.8	0.1-1.3	0.05-1.3	0.12-1.3	0.05-2.3	0.8-6.8	0.1-0.8
3xxx	Al-Mn	0.05-1.3	0.3-1.8	0.05-1.8	0.1-1.0	0.05	0.05-0.5	0.05-1.0
4xxx	Al-Si	0.05-2.0	0.8-13.5	0.03-1.5	0.2-1.0	0.15-1.3	0.05-1.5	0.05-0.25
5xxx	Al-Mg	0.2-5.6	0.08-0.7	0.03-1.4	0.1-0.7	0.03-0.05	0.03-0.35	0.05-2.8
6xxx	Al-Mg-Si	0.05-1.5	0.2-1.8	0.03-1.0	0.08-1.0	0.2	0.1-1.2	0.05-2.4
7xxx	Al-Zn	0.1-3.7	0.1-0.5	0.02-1.5	0.1-0.7	0.1	0.05-2.6	0.8-8.7
8xxx	otros	0.02-1.4	0.1-1.0	0.02-1.0	0.1-2.0	0.2-11.3	0.03-2.2	0.03-1.8

Serie 1xxx: Aluminio (Al) con pureza de 99%

Aluminio de más del 99.00% de pureza, esta aleación no tiene elementos de aleación significativos tiene aplicaciones en los sectores eléctricos y químicos. Se caracteriza por tener excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, así como bajas propiedades mecánicas, y excelente trabajabilidad. Puede endurecerse por la dispersión de otro elemento de aleación. El hierro (Fe) y silicio (Si) son las impurezas principales, con posible presencia de cobre (Cu) o zinc (Zn) en cantidades bajas de 0.1% en peso, respectivamente (Maffia, 2013) y (King 1992). Un ejemplo típico es el aluminio 1100 que se utiliza en la industria de embalaje y en intercambiadores de color, se utiliza para hacer laminas en la industria de alimentos y bebidas.

Serie 2xxx: Aleaciones de aluminio con cobre (Cu)

El cobre (Cu) es el principal elemento de aleación en este grupo de aleaciones del 4-8%, puede contener magnesio (Mg) como una adición de elemento secundario. Estas aleaciones suelen tener una alta resistencia y son utilizadas principalmente en aplicaciones cuando se requiere un alto rendimiento mecánico y resistencia a la fatiga. Estas aleaciones requieren de un tratamiento térmico de solubilidad para obtener mejores propiedades. En condición de solubilizadas, estas aleaciones muestran propiedades mecánicas similares y veces superiores a los aceros de bajo carbono. En algunos casos se emplea el tratamiento térmico de precipitación T6 (envejecimiento) para aumentar aún más sus propiedades mecánicas. Este tratamiento aumenta la tensión de fluencia, con las consiguientes pérdidas en alargamiento; su efecto sobre la resistencia a la tracción no es tan grande. Las aleaciones de la serie 2xxx no tienen tan buena resistencia a la corrosión como la mayoría de las otras aleaciones de aluminio, y bajo ciertas condiciones pueden estar expuestas a la corrosión intergranular o por picaduras. Por lo tanto,

estas aleaciones en forma de hojas-láminas, generalmente están recubiertos con un aluminio de alta pureza, una aleación que contenga 1% de Zn. El recubrimiento obtenido es normalmente del 2 al 5% del espesor de la superficie, ofrece protección galvánica. Las aleaciones de la serie 2xxx están particularmente diseñadas para piezas y estructuras que necesiten altas relaciones de resistencia/peso. Se utilizan en aquellos servicios que requieren una buena resistencia a temperaturas de hasta 150°C. Las aplicaciones de esta aleación 2xxx incluyen: cabezas automotrices, pistones, fuselaje de avión, estructura de edificios, engranes, carcasas de bombas, las aleaciones tipo son 2010, A201, A206, 2080 2220, 2024, etc. (Becerra, 2013).

Serie 3xxx: Aleaciones de aluminio con manganeso (Mn)

El manganeso es el principal elemento de la aleación de la serie 3xxx. Estas aleaciones son generalmente no tratables térmicamente, pero tienen un 20% más de resistencia que las aleaciones de la serie 1xxx. Debido a que sólo un porcentaje limitado del manganeso (hasta aproximadamente del 1 al 1.5%) se puede añadir eficazmente al aluminio, este es un elemento importante en algunas pocas aleaciones. Estas aleaciones son conocidos por su excelente resistencia a la corrosión, buena trabajabilidad y moderada resistencia mecánica. Las aplicaciones de esta aleación incluyen ornamentales, reflectores, partes de suspensión, envases, radiadores, en la construcción, sistemas de transporte (ducto), pistones principalmente monoblocks y cabezas automotrices. Las aleaciones más comunes son las siguientes: 3080, 3190, A319, B319, 3200, 3320, 3330, A333, A336, 3540, A390, 3560, entre otras (Ynga, 2016).

Serie 4xxx: Aleaciones de aluminio con silicio (Si)

El principal elemento de aleación en esta serie es el silicio, que se puede agregar en cantidades suficientes (hasta 12%) a causa de una reducción en el rango de fusión sin producir fragilidad. Por esta razón, las aleaciones de Al-Si se utilizan en alambres de soldadura donde el intervalo de fusión es más bajo que el del metal base. La mayoría de las aleaciones de esta serie son no tratables térmicamente, pero cuando se utiliza en soldadura de aleaciones tratables térmicamente, absorben algunos de los constituyentes de la aleación y así responden a un tratamiento térmico en una medida limitada. Las aleaciones que contienen cantidades considerables de silicio (Si) se tornan de un color gris oscuro cuando se le aplican acabados de óxidos anódicos y por esto es que son demandadas para aplicaciones arquitectónicas. El silicio proporciona propiedades como lo es la expansión térmica, buena fluidez, buena resistencia a la corrosión, principalmente que hace a la aleación ser aplicada en varios sectores industriales, como la automotriz. La aleación 4032 tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y alta resistencia al desgaste, por lo que la hace idónea para la producción de pistones de motores fabricados por forja. En general este tipo de aleaciones son de uso general, teniendo buenas características para vaciar en grandes cantidades, piezas con partes intrincadas de secciones delgadas. Se presentan

buenas propiedades mecánicas además de una excelente resistencia a la corrosión y muy buena soldabilidad. Las aplicaciones de esta aleación son: varillas de soldadura, componentes automotrices, aplicaciones marinas, ornamentales, propelas, defensas, etc (Maffia, 2013) y (King 1992).

Serie 5xxx: Aleaciones de aluminio con magnesio (Mg)

El principal elemento de aleación en esta serie es el magnesio (Mg), le proporciona una excelente resistencia a la corrosión buena soldabilidad, resistencia moderada al alta, y buena formabilidad. Cuando se utiliza como elemento de aleación junto con el manganeso (Mn), el resultado es una aleación endurecible por acritud de moderada a alta resistencia mecánica. El magnesio es considerablemente más eficaz que el manganeso como endurecedor, aproximadamente 0.8% de Mg que es igual a 1.25% de Mn, y puede ser añadido en cantidades mayores. Las aleaciones de esta serie poseen buenas características de responder al proceso de soldadura y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Algunas de las aleaciones usadas en ambientes corrosivos son las siguientes: 5120, 5130, 5140 y 5350. Para la alta resistencia a la corrosión se requiere un bajo contenido de impurezas, por lo cual estas aleaciones se deben de preparar con metal de alta calidad. Estas aleaciones son adecuadas para ensambles soldados y son frecuentemente utilizadas para acabados arquitectónicos, en la construcción, fabricación de barcos, tanques de almacenamiento, automóviles, y estructuras expuestas a ambientes agresivos. En general este tipo de aleaciones posee buena maquinabilidad, de apariencia atractiva cuando se anodizan; pero la baja característica de vaciado y la tendencia del magnesio a oxidarse, aumenta la dificultad de manejo y por lo tanto su costo (Maffia, 2013 y King 1992).

Serie 6xxx: Aleaciones de aluminio con magnesio (Mg) y silicio (Si)

Las aleaciones de la serie 6xxx contienen silicio y magnesio en proporciones requeridas para la formación de siliciuro de magnesio (Mg_2Si). Este compuesto inter-metálico las hace tratables térmicamente, lo que significa que pueden endurecerse mediante procesos de tratamientos térmicos. Aunque no son tan resistentes como la mayoría de las aleaciones de las series 2xxx y 7xxx, las aleaciones de la serie 6xxx tienen buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión, así como moderada ductilidad y buena resistencia mecánica. La estructura de estas aleaciones de este grupo puede ser modificada con el tratamiento térmico-temper T4 (tratamiento térmico de solución, pero no de precipitación) y reforzadas por segunda fase después de un tratamiento térmico de precipitación completo (T6) (Medina, 2018). Estas aleaciones se usan para marcos de ventanas, componentes de aviones, partes automotrices, estructuras de puentes y perfiles de extrusión. Las aleaciones más versátiles son 6061(estructuras de aeronaves y componentes automotrices) 6063(perfiles extruidos usados en marcos estructurales) y 6082 (estructuras de lata resistencia).

Serie 7xxx: Aleaciones de aluminio con zinc (Zn)

El zinc, en cantidades de 1 a 8%, es el principal elemento de aleación en aleaciones de la serie 7xxx, y cuando se combina con un porcentaje menor de magnesio, resulta para las aleaciones tratables térmicamente para obtener de moderada a muy alta resistencia mecánica, y donde se requiere una relación, resistencia y peso óptimo, como en la industria aeroespacial, estructuras de alta tensión y componentes deportivos de alto rendimiento como bicicletas y equipo escolar. Por lo general, otros elementos, como el cobre (Cu) y el cromo (Cr), se agregan en pequeñas proporciones. Pequeñas adiciones de escandio (Sc) también mejoran las propiedades. Por lo que, las aleaciones de la serie 7xxx se utilizan en estructuras de fuselajes, equipos móviles, y piezas sujetas a altas tensiones de trabajo. Como lo es la aleación 7020 (componentes de vehículos y estructuras), 7075 (componentes deportivos y aeroespacial), 7050 (resistencia mecánica y corrosión) y 7475 (estructuras aeronave). Las aleaciones 7xxx de alta resistencia exhiben una reducida resistencia a la corrosión bajo tensiones (SCC) y a menudo se utilizan en un tratamiento térmico ligeramente sobre-envejecida para proporcionar mejores combinaciones de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y resistencia a la fractura.

Serie 8xxx: Aleaciones de aluminio con otros elementos

Son aleaciones con una amplia gama de composiciones químicas como el magnesio, el zinc o el silicio. Por ejemplo, se consigue un rendimiento mejorado a elevadas temperaturas a través de la utilización de aleaciones Al-Fe-Ce reforzadas por dispersión (por ejemplo, 8019) o aleaciones Al-Fe-V-Si (por ejemplo, 8009, fabricadas por metalurgia de polvos). También se puede lograr una baja densidad y una rigidez mayor en aquellas aleaciones que contengan litio para aplicaciones aeroespaciales (por ejemplo, 8090). Esta última aleación, que es endurecible por precipitación y ha reemplazado a aleaciones de las series 2xxx y 7xxx en aplicaciones aeroespaciales (por ejemplo, componentes de helicópteros). Pero la adición de silicio (Si) al aluminio puede aumentar su resistencia y rigidez. En general estas aleaciones se destacan por su ligereza, resistencia mecánica moderada y propiedades específicas que varían según los elementos de aleación. Estas aleaciones fueron desarrolladas para satisfacer las demandas de componentes de baterías, envases y en equipos que requieren bujes, en donde la capacidad de carga, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión sea alta (corrosión provocada por los aceites lubricantes en motores de combustión interna). Los bujes fabricados con estas aleaciones son superiores en lo general a los construidos con la mayoría de los aceros (King 1992).

Las descripciones de estas aleaciones en general se muestran en la **Tabla 5, 6 y 7**, las cuales se clasifican de acuerdo con el aleante principal y su composición química. La razón predominante para alea el aluminio puro y fabricar una aleación es aumentar la resistencia mecánica, la dureza, la resistencia al desgaste, la fluencia, la relajación de tensiones o la fatiga del material resultante. Se pueden fabricar

aleaciones con diferentes combinaciones de elementos químicos, a fin de obtener excelentes propiedades. La **Figura 12** muestra las diferentes combinaciones de los elementos principales de aluminio con Zn, Mg, Cu, Mn, y Si, y el tipo de aleación que se obtiene, así como sus propiedades.

En referencia a la **Figura 12**, los efectos sobre estas propiedades son específicos por la variación de los diferentes elementos de aleación y sus combinaciones entre ellos, y además están relacionadas con los diagramas de fase de la aleación con las microestructuras y las subestructuras que se forman como resultado de la solidificación, historia termo-mecánica, tratamiento térmico y/o trabajo en frío. Los elementos aleantes que están presentes en aleaciones comerciales de aluminio (y que además proporcionan una alta resistencia, especialmente cuando se combinan con el endurecimiento por deformación por trabajo en frío o con un tratamiento térmico, o ambos,) son: cobre, magnesio, manganeso, silicio y zinc, tal como se muestra en la antes citada **Figura 12**. Estos elementos tienen solubilidad sólida que es significativa en aluminio, y en todos los casos la solubilidad aumenta con la temperatura. Para aquellos elementos que forman soluciones sólidas, el efecto de endurecimiento cuando el elemento está en solución tiende a aumentar con el aumento de la diferencia en los radios atómicos del disolvente (Al) y soluto (elemento aleante). Este factor se pone de manifiesto en los datos obtenidos a partir de soluciones sólidas de aleaciones binarias de alta pureza en estado recocido, pero es evidente que otros efectos están involucrados, siendo uno de los principales el factor de unión atómica y la configuración electrónica. Los efectos de varios solutos en solución sólida son parecidos cuando hay un soluto más grande y otro con un radio atómico más pequeño que el de aluminio, que cuando ambos son pequeños o más grandes. El manganeso en solución sólida es muy eficaz en el fortalecimiento de las aleaciones binarias. Su contribución a la resistencia de aleaciones comerciales es escasa, debido a que, en estas composiciones, como resultado de las operaciones de fabricación, el manganeso es en gran parte precipitado y no cumple la función de aumento de resistencia mecánica (Maffia, 2013), (Hacht, 1984).

Por último, las aleaciones endurecibles por tratamiento térmico son aquellas que aumentan su resistencia al ser expuestas al calor seguidos de un enfriamiento brusco y envejecido natural. Para provocar la formación de precipitados en la estructura, reforzando así la matriz de aluminio. Por otro lado hay un grupo de aleaciones que no responden al tratamiento térmico, estos endurecen por la deformación o trabajo en frío, para provocar un aumento de las imperfecciones estructurales y se benefician las propiedades mecánicas (Hatch, 1984), (King, 1992).

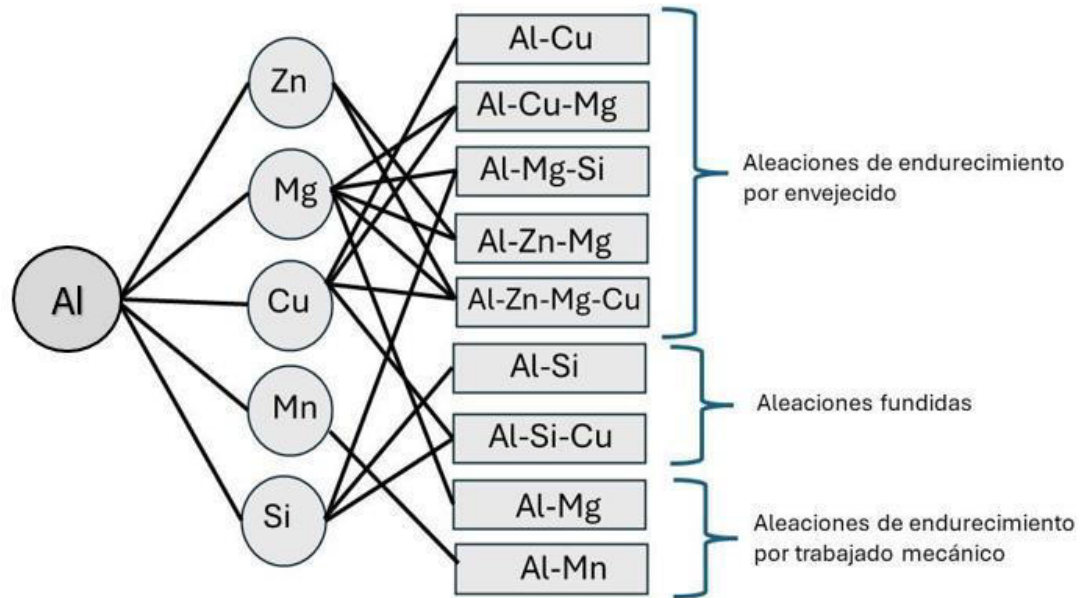


Figura 12. Principales elementos de aleación que se pueden combinar con el aluminio para formar las aleaciones de aluminio que actualmente se aplican en la sociedad.

4.11.4. Efectos de los elementos aleantes en la formación de las fases de la aleación

Todas las aleaciones de aluminio comerciales contienen hierro (Fe) y silicio (Si), así como dos o más elementos agregados intencionalmente para mejorar las propiedades mecánicas. Las fases formadas y la función de los elementos de aleación se describen a continuación. Está en referencia a la **Figura 12** que se presentó anteriormente, donde se resume los agregados aleantes más comunes que se presentan en las aleaciones de aluminio para las diferentes series;

Hierro (Fe): El hierro no es un elemento principal en las aleaciones de aluminio, pero usualmente todas las aleaciones de aluminio contienen algo de hierro que se considera como una impureza remanente después de refinar la bauxita y después de la fusión, pero mejora la resistencia a la temperatura y reduce la expansión térmica. Un diagrama de fases es capaz de predecir que durante el proceso de solidificación de una aleación de aluminio-hierro, la mayor parte del hierro se mantiene en fase líquida hasta que solidifica el eutéctico formado por una solución sólida, más partículas del compuesto intermetálico Al_3Fe . Dependiendo de la velocidad de solidificación y de la presencia de otros elementos tales como manganeso, se pueden formar partículas metaestables de Al_6Fe , ortorrómbicas, en lugar de la fase de equilibrio Al_3Fe .

Silicio (Si): Este elemento es también una impureza en algunas aleaciones de aluminio comerciales. Dos fases ternarias: α ($\text{Al}_{12}\text{Al}_3\text{FeSi}$), cúbica y β ($\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$), monoclinica, se forman por medio de una reacción eutéctica. Pero a bajos contenidos de silicio, casi todo el hierro está presente como Al_3Fe . A medida que aumenta el contenido de silicio, aparece primero la fase α (Al-FeSi) y luego la fase β (Al-Fe-Si). En los productos comerciales, las fases pueden no ser las predichas por los diagramas de equilibrio debido a los extensos tiempos requeridos a altas temperaturas para acercarse al equilibrio por otro lado, en grandes cantidades de silicio, esta mejora la fluidez y el vaciado de la aleación líquida. Por consiguiente, se utiliza en soldaduras para placas de las series 3xxx y 4xxx. En la fundición de aleaciones, el contenido de silicio varía de aproximadamente 5 a 20%. Aleaciones hipereutécticas (aquellas que contiene $>12.6\%$ de Si 12.6% si es la composición eutéctica) se utilizan para el motor monoblock, porque las partículas de silicio primarias son muy resistentes al desgaste. El silicio se añade deliberadamente en algunas aleaciones que contienen magnesio para proporcionar endurecimiento por precipitación; la aleación es la: Al-Mg-Si, la cual es la base para la serie 6xxx. A bajos contenidos de magnesio, el silicio elemental puede estar presente como partículas de segunda fase. Sin embargo, a medida que aumenta el contenido de magnesio, se encuentran partículas de silicio elemental y el constituyente Mg_2Si . Aumentando aún más el contenido de magnesio, sólo estará presente la fase Mg_2Si . Aleaciones ternarias son endurecidas por la precipitación de la fase metaestables Mg_2Si . Finalmente, con la adición de cobre, se forma una fase compleja $\text{Al}_4\text{CuMg}_5\text{Si}_4$ (Ynga, 2016).

Cobre (Cu): el cobre es un componente principal en las aleaciones de la serie 2xxx(Al-Cu), mejora la resistencia mecánica y al calor, pero disminuye la resistencia a la corrosión, y mejora su dureza a través del endurecimiento por precipitación. El sistema de aluminio-cobre es la base para la serie 2xxx y muchas otras aleaciones tratables térmicamente que contengan cobre entre 4 y 7%. En las aleaciones aluminio-cobre comerciales, alguna porción del cobre se combina con el aluminio y el hierro para formar durante la solidificación, partículas de $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ tetragonal, o de fase α (Al, Cu, Fe), ortorrómbica. Estas no se pueden disolver durante los tratamientos térmicos posteriores, pero pueden transformarse tratando antes el lingote o pieza de fundición. Durante el tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio-cobre (con escaso contenido magnesio), precipita la fase Al_2Cu como la fase de endurecedora. El agregado de magnesio en aleaciones de aluminio-cobre da como resultado la formación de la fase Al_2CuMg por descomposición eutéctica. Precursores metaestables Al_2CuMg se utilizan para reforzar varias aleaciones estructurales utilizadas en la industria aeroespacial porque confieren una combinación deseable de resistencia, tenacidad a la fractura y la resistencia al crecimiento de grietas por fatiga. La descomposición eutéctica ocurre cuando un líquido solidifica para formar dos fases sólidas con diferente estructura, a una temperatura constante conocida como temperatura eutéctica.

Manganeso (Mn): El manganeso aumenta la resistencia mediante el endurecimiento por solución sólida sin afectar otras propiedades como la ductilidad. El sistema de aluminio-manganeso es la base para las aleaciones de aluminio como la serie 3xxx, son aleaciones más utilizadas para el conformado debido a su excelente trabajabilidad y resistencia a la corrosión. Las aleaciones comerciales Al-Mn contienen tanto hierro como silicio. Durante la solidificación de los lingotes de tamaño comercial, se forman por reacción eutéctica las fases $Al_6(Mn,Fe)$ y $Al_2(Fe,Mn)Si$. El manganeso restante permanece en solución y precipita durante el precalentamiento de lingotes como $Al_2(Mn, Fe) Si$ y dispersoides $Al_6(Mn,Fe)$. Estos dispersoides de segunda fase refuerzan el material y controlan el tamaño de grano recristalizado. En las aleaciones que contienen cobre, el manganeso precipita como partículas de $Al_2Cu_2Mn_3$. Los efectos sobre la resistencia son menores, pero los precipitados ayudan en el control del tamaño de grano después del tratamiento térmico de solución.

Magnesio (Mg): El magnesio mejora la resistencia sin afectar la moldeabilidad aumenta la resistencia, especialmente a la tracción y mejora la corrosión. El sistema de aluminio-magnesio es la base para la serie 5xxx de aleaciones de aluminio no tratables térmicamente. Estas aleaciones presentan excelentes combinaciones de resistencia y resistencia a la corrosión por endurecimiento de solución sólida y endurecimiento por trabajo en frío. Aunque, en principio, el diagrama de fases muestra una curva de solvus ideal para el endurecimiento por precipitación, hay una cierta dificultad en la nucleación de la fase Al_3Mg_2 , lo cual ha impedido la comercialización de las aleaciones de aluminio-magnesio tratables térmicamente, a menos que contengan silicio en modo suficiente, o cobre, o zinc para formar precipitados de Mg_2Si , Al-Cu-Mg o Al-Zn-Mg.

Zinc (Zn): Incrementa las resistencias y permite el endurecimiento por precipitación. Estas aleaciones con Zn son muy resistentes, sobre todo si se combinan con magnesio y cobre, pero baja resistencia a la corrosión. Este elemento genera un escaso fortalecimiento por solución sólida o endurecimiento por acritud al aluminio, pero los precipitados de Al-Zn-Mg proporcionan la base para las aleaciones de la serie 7xxx. La acritud es un fenómeno que ocurre en el aluminio, cuando es sometido a procesos de deformación plástica, como estirado, laminado o forjado, durante este proceso el aluminio aumenta su resistencia y dureza. Dos fases pueden formarse por descomposición eutéctica en aleaciones comerciales de Al- Zn-Mg: $MgZn_2$ hexagonal, y $Al_2Mg_3Zn_3$ (bcc, cubica centrada en el cuerpo). Dependiendo de la relación de zinc/magnesio, las aleaciones sin cobre se ven reforzadas por precursores metaestables de $MgZn_2$ o $Al_2Mg_3Zn_3$. En las aleaciones Al-Zn-Mg-Cu, Cu-Al actúan con el zinc en $MgZn_2$ para formar $Mg (Zn, Cu, Al)_2$. También pueden formarse en estas aleaciones por descomposición eutéctica y por precipitación en estado sólido, dispersando partículas Al_2CuMg .

4.12. Diagramas de fase de Al-Cu

Los diagramas de fase describen las fases son representaciones graficas de temperatura. vs. Composición, que describen las fases que coexisten en equilibrio termodinámico en una aleación. Estos diagramas son herramientas fundamentales en la ciencia de materiales y metalurgia ya que permiten comprender y predecir el comportamiento de las aleaciones y compuestos bajo diferentes condiciones. Debido a que el equilibrio químico está involucrado, los diagramas de fase están basados en los principios termodinámicos. Estos diagramas de fase son una demostración cualitativa de la interrelación entre los diagramas de fase y la termodinámica. Los diagramas de fases son una herramienta útil para determinar los compuestos formados en la microestructura de una aleación y su variación en la concentración y la temperatura de solidificación (Asbhy y Jones, 2012). Adicionalmente, los diagramas ayudan a; i) determinar las fases de equilibrio que se forman y su temperatura de disolución, ii) determinar la temperatura de fusión y la ruta de solidificación, iii) establecer las temperaturas apropiadas para el vaciado y aplicación de tratamientos térmicos e iv) identificar la concentración máxima de los aleantes para prevenir la cristalización de partículas gruesas primarias. Por ejemplo; un sistema multifásico, en una condición de equilibrio, es que la energía libre molar parcial o el potencial químico de cada componente debe ser el mismo en todas las fases (α , β), presentes, pero si el, pero si el potencial químico es mayor en una fase, esta tendera a moverse hacia la fase donde el potencial químico sea menor. Donde ΔG_i es la energía de Gibbs del componente i, α y β son las fases.

$$\Delta G_i^{-\alpha} = \Delta G_i^{-\beta} - (10)$$

Por ejemplo, se puede citar el Fe-C, el potencial químico del carbono (C) en el hierro (Fe) saturado de carbono es el mismo que el grafito, para 5 wt.% C en hierro saturado. Una situación similar existe con respecto al equilibrio de la aleación aluminio Al-Si, donde el potencial químico del silicio puro es igualado por menos del 15% en peso Si en solución. Por lo que, los diagramas de fase describen las relaciones de estabilidad para compuestos y soluciones (sólidos y líquidos). Para entender estas relaciones basadas en la termodinámica, es necesario comparar el diagrama de fase (diagrama temperatura-composición) con el gráfico equivalente de energía libre-composición. Para construir el gráfico de composición de energía libre, debe reconocerse que para una solución binaria la energía libre molar integral es;

$$\Delta G = X_1 \cdot \overline{\Delta G_1} + X_2 \cdot \overline{\Delta G_2} - (11)$$

Las soluciones ideales ($\alpha_i = X_i$) produce F^* , es el cambio de energía libre en la formación de 1 mol de una solución binaria ideal a partir de los componentes en el estado estándar puro:

$$F^* = \Delta G - (X_1 \cdot \Delta G_1^\circ + X_2 \cdot \Delta G_2^\circ)$$

$$= RT(X_1 \cdot \ln X_1 + X_2 \cdot \ln X_2) - (12)$$

Una gráfica de F^* en función de X_2 se muestra en la **Figura 13**. Claramente, $F^* < 0$ con un mínimo de $X_2 = 0.5$. Para soluciones no ideales ($\gamma_i \neq 1$), la curva puede ser más alta o baja que la línea ideal, y puede ser asimétrica. Se puede demostrar que las interceptaciones de una línea tangente dibujada en cualquier punto de la curva darán $(\Delta \bar{G}_1 - \Delta G_1^\circ)$ y $(\Delta \bar{G}_2 - \Delta G_2^\circ)$.

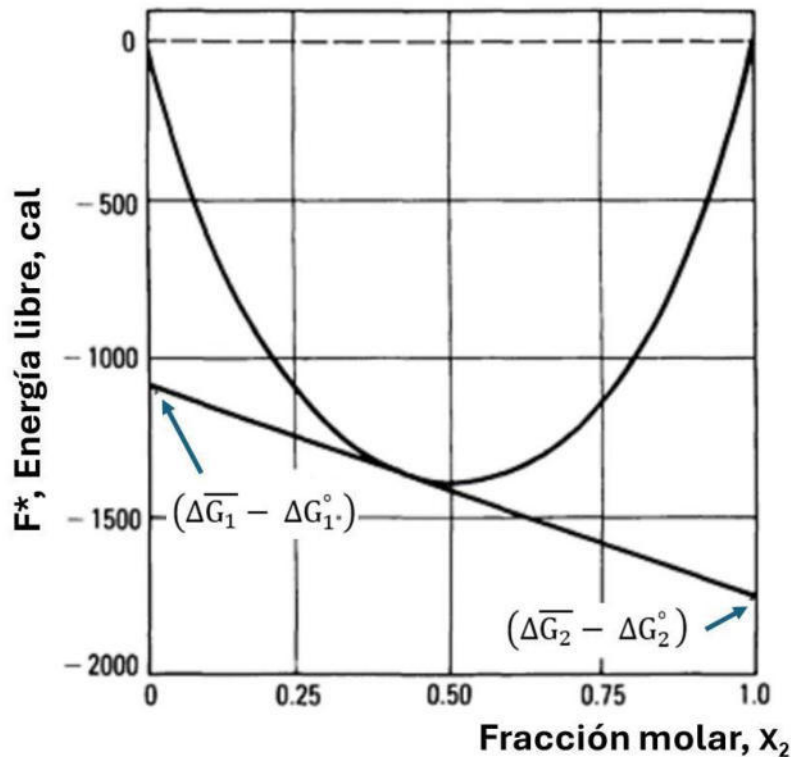


Figura 13. Energía libre de la formación de una solución ideal de componentes líquidos en el estado estándar del material puro. También se ilustran las tangentes para determinar las energías libres molares parciales de solución.

Estas son las energías libres molares parciales de solución del estado estándar líquido. Para soluciones metálicas, $\Delta G_1^\circ < 0$ la reacción ocurre espontáneamente, por lo tanto, ΔG_i es obtenido directamente de este diagrama. La energía libre de una fase de composición definida se representa como un punto en el diagrama de composición de energía libre. Claramente, si tal fase estuviera en equilibrio con una solución, la solución de equilibrio y el compuesto tendrían que estar a lo largo de la misma línea tangencial para que la **ecuación 10 y 11** puedan cumplirse. Esta condición se ilustra en la **Figura 14**. Donde se muestra el diagrama de fase que resulta de las restricciones termodinámicas. Esta condición se ilustra en la **Figura**

14 (a). Mientras que, la *Figura 14(b)* muestra el diagrama de fase que resulta de las restricciones termodinámicas. En la *Figura 14(a)*, $F^* < 0$ para la fase 1 del sólido puro porque el líquido fue considerado como estado estándar, y a la temperatura elegida, en tanto que el líquido es menos estable que el sólido (ASM, 1988).

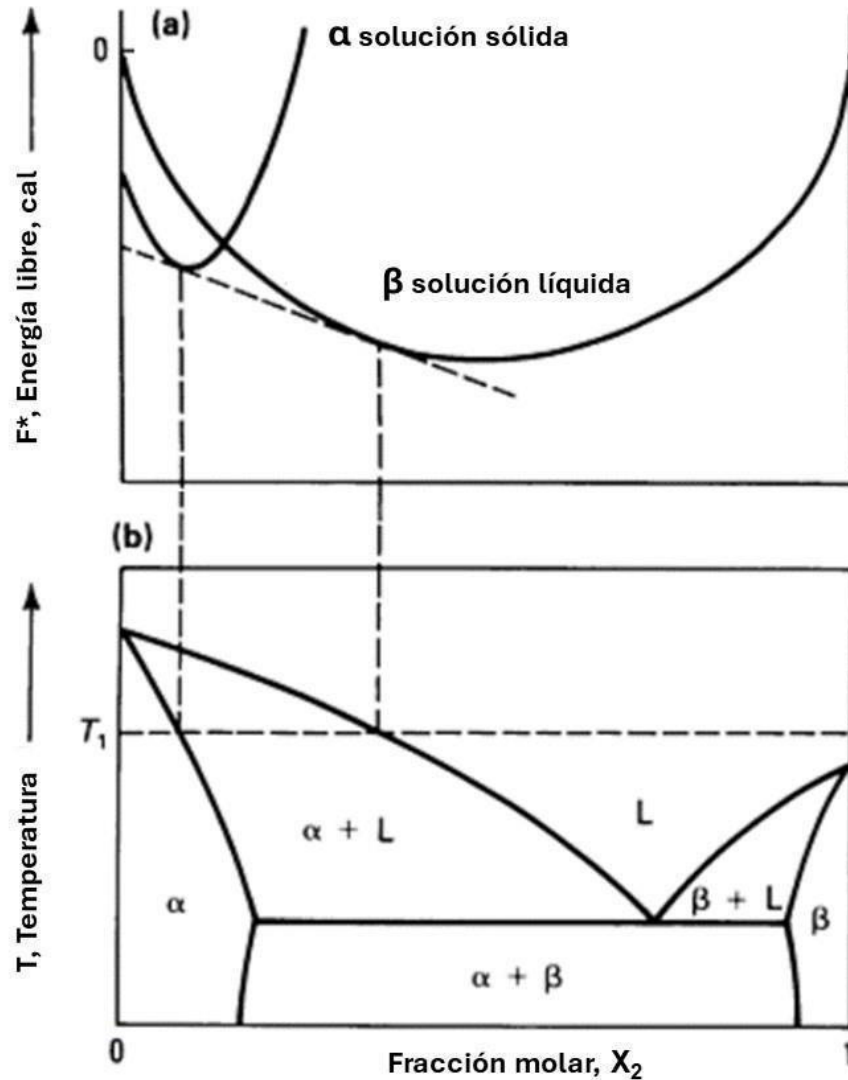


Figura 14. Diagramas de fase que representa la relación entre la composición de la energía libre (a) y la composición con la temperatura para el equilibrio entre una solución líquida y una solución sólida primaria α y β energías (b).

Por otro lado, un diagrama de fases es esencialmente un instrumento considerado como un mapa que muestra las estables relativas de varias fases presentes en el equilibrio bajo las diferentes condiciones de temperatura y composición. Por lo tanto, para una composición dada de una aleación, se puede utilizar un diagrama de fase para determinar las fases, que estarán presentes en el equilibrio a medida que

la fusión se solidifica. Además, también se puede utilizar un diagrama de fase para estimar la actividad de los componentes en solución líquida y para comprender el comportamiento de la solución líquida. Por ejemplo, si el diagrama es para un sistema eutéctico simple, es probable que no exista un compuesto intermetálico. Sin embargo, un compuesto en el estado sólido debe aparecer en el diagrama, entonces la asociación de átomos diferentes está ocurriendo probablemente en el líquido. Por lo tanto, se puede predecir si una solución líquida exhibirá fuertes desviaciones negativas o positivas del comportamiento ideal de las formas de los líquidos. Otro ejemplo demostrativo, que es fundamento de esta investigación, son las aleaciones del sistema 2xxx (Al-Cu) que contiene menos de 1% Mn, este último debe considerarse el elemento clave porque aumenta significativamente la estabilidad térmica de la aleación. La introducción de cantidades relativamente grandes de los principales elementos de aleación es posible porque se caracterizan por ser solubles en aluminio (Al), como suele observarse en los diagramas de fase binaria. En el que todos los principales elementos de aleación (Mg, Cu, Si, Li, Mn y Ag) forman diagramas de fase eutéctica con el aluminio.

En este sentido, en la **Figura 15**, se muestra el diagrama de fases de Al-Cu, que es del “tipo de solución sólida” y se caracteriza por la presencia de una reacción eutéctica en el equilibrio, que desaparece tras un tratamiento térmico T6. El diagrama de fase Al-Cu es un diagrama binario que muestra la temperatura y composición de una aleación de dos componentes aluminio y cobre a presión constante. En el diagrama de la **Figura 15** se observan varias fases en solución sólida y fases intermetálicas complejas en toda la región del diagrama de fases. La máxima solubilidad de Cu en Al es de 5.65% en peso, a la temperatura de 548°C, formando una solución sólida sustitucional de fase α . una reacción eutéctica ocurre entre las concentraciones de 5.65% hasta 52.5% de Cu (**Figura 16**). También se observa una solución sólida de cobre (β) donde el cobre se disuelve en pequeñas cantidades de aluminio formando una fase sólida de cobre en la región de alta temperatura. Una concentración superior al porcentaje máximo empleado en este tipo de aleaciones, que en general no superan más del 15%, pues a partir de esta concentración se forman compuestos intermetálicos que promueven el endurecimiento de la aleación. En este diagrama están presentes las fases α (Al puro) y θ (Al_2Cu), que son soluciones sólidas de cobre en la matriz de aluminio que cristaliza en una red cúbica centrada en las caras (fcc). La fase eutéctica está formada por cristales intermetálicos de aluminio con cobre (Al_2Cu), precipitados en la matriz de aluminio. La temperatura eutéctica es de 548°C, que corresponde a una concentración del 33.2% de Cu. La fase Al_2Cu fortalece a la aleación mediante el mecanismo de endurecimiento por precipitación.

En consecuencia, una reacción eutéctica metaestable ($L = \eta + \theta$) ocurre durante un enfriamiento a condiciones de equilibrio, pero una reacción peritética estable ($L + \eta = \theta$) se observa durante un calentamiento subsecuente de las de muestras, como un tratamiento térmico de recocido. Por lo que, la

solubilidad del Cu en el Al varía 0.45% a 300°C hasta 5.65% a 548°C, el cobre endurece bastante al aluminio, por lo que esas aleaciones poseen propiedades mecánicas excepcionales, pero mantienen la buena maquinabilidad y ligereza que posee el aluminio. En general, estas aleaciones de Al-Cu, se caracterizan por tener buena resistencia a la tracción, alta formabilidad durante cualquier trabajo mecánico, buena estabilidad térmica, y una menor resistencia a los agentes atmosféricos (corrosión) que las aleaciones que no tienen cobre. Estas aleaciones no pueden ser soldadas convencionalmente, más que por técnicas particulares, como por ejemplo la soldadura por haz de electrones (Martin, 2006).

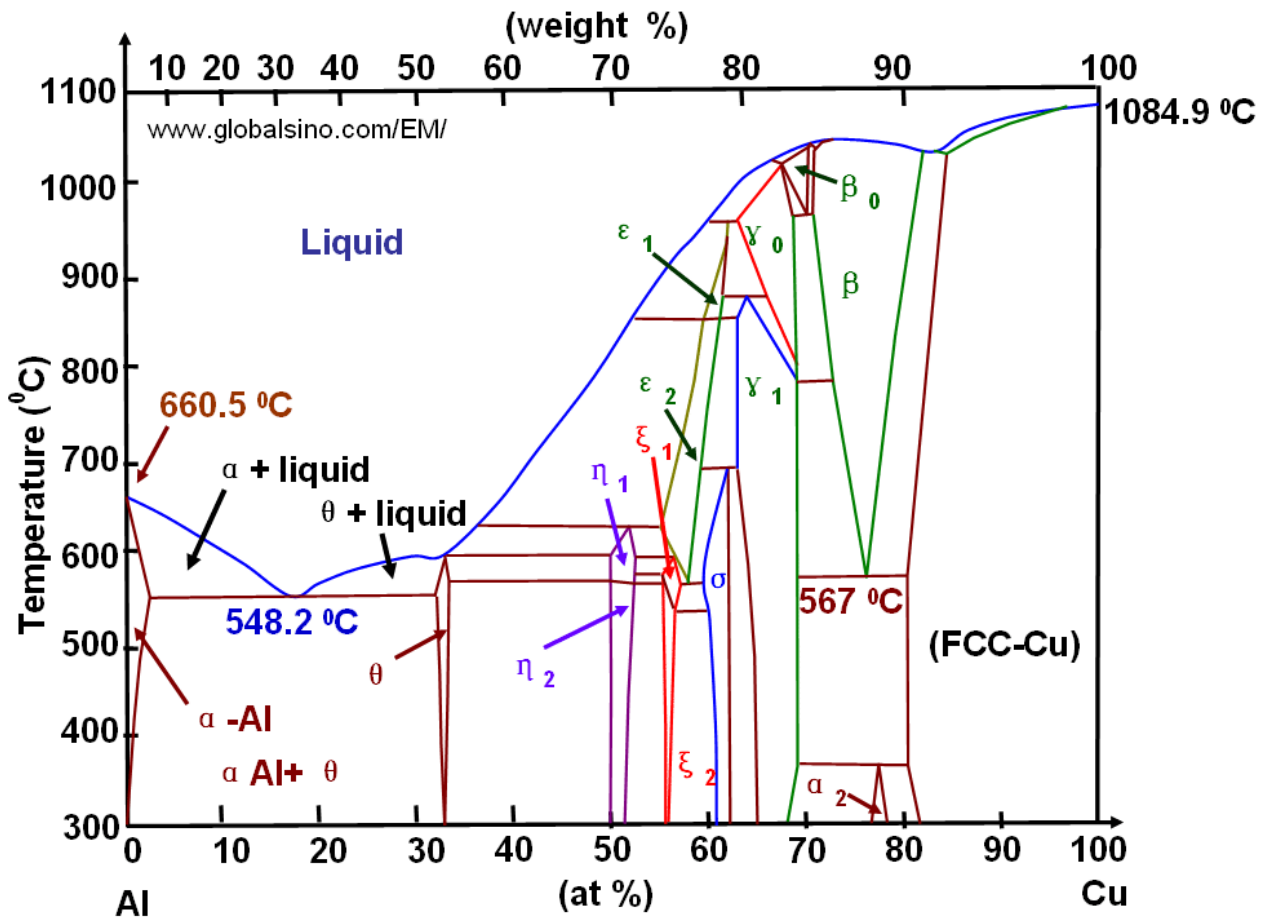


Figura 15. Diagramas de equilibrio Al-Cu, que muestran las fases presentes en la aleación a diferente temperatura y concentración de Cu en el Al.

Finalmente, la microestructura de las aleaciones de aluminio es importante en la determinación de sus propiedades finales de aplicación industrial específica. Las aleaciones de aluminio pueden tener una estructura de solución sólida, donde los átomos de los elementos aleantes se disuelven en la estructura cristalina del aluminio, donde los elementos aleantes forman compuestos intermetálicos en la estructura cristalina del aluminio proporcionando mejores propiedades (Hatch, 1984). Las aleaciones de aluminio en general se pueden someter a endurecimientos por deformación y por precipitación, a fin de conseguir

una óptima combinación de propiedades mecánicas. Por lo regular este tipo de aleaciones de Al-Cu se someten primero a un tratamiento térmico consistente en disolución y luego temple, enseguida, un trabajado en frío, y finalmente se endurece por precipitación. Las fases principales del sistema Al-Cu, que pueden coexistir al mezclar estos dos elementos son; Aluminio sólido (α -Al) que es una solución líquida de cobre en aluminio con estructura fcc, el aluminio solo puede disolver una pequeña cantidad de cobre (aproximadamente 0.2% en fase). Fase θ Al_2Cu , esta es una fase intermetálica cuando hay más átomos de cobre en la aleación, y es responsable del endurecimiento de la aleación por precipitación. El énfasis de esta investigación es fabricar por el proceso de fusión y colado en molde permanente lingotes de Al-Cu, con diferente contenido de cobre, 10, 20, 30, 40 y 60% para estudiar la presencia de las siguientes fases en una solución sólida, α , β y fases intermetálicas θ Al_2Cu , h , y ϵ . Con la finalidad de proponer composiciones de aleaciones ligeras para aplicaciones aeroespaciales, automotrices y en estructuras mecánicas debido a su buena relación y combinación de resistencia mecánica, ligereza, y capacidad de endurecimiento por precipitación. También es objetivo estructurar los mecanismos de endurecimiento por precipitación y los mecanismos de transformación de fase del estado líquido al estado sólido.

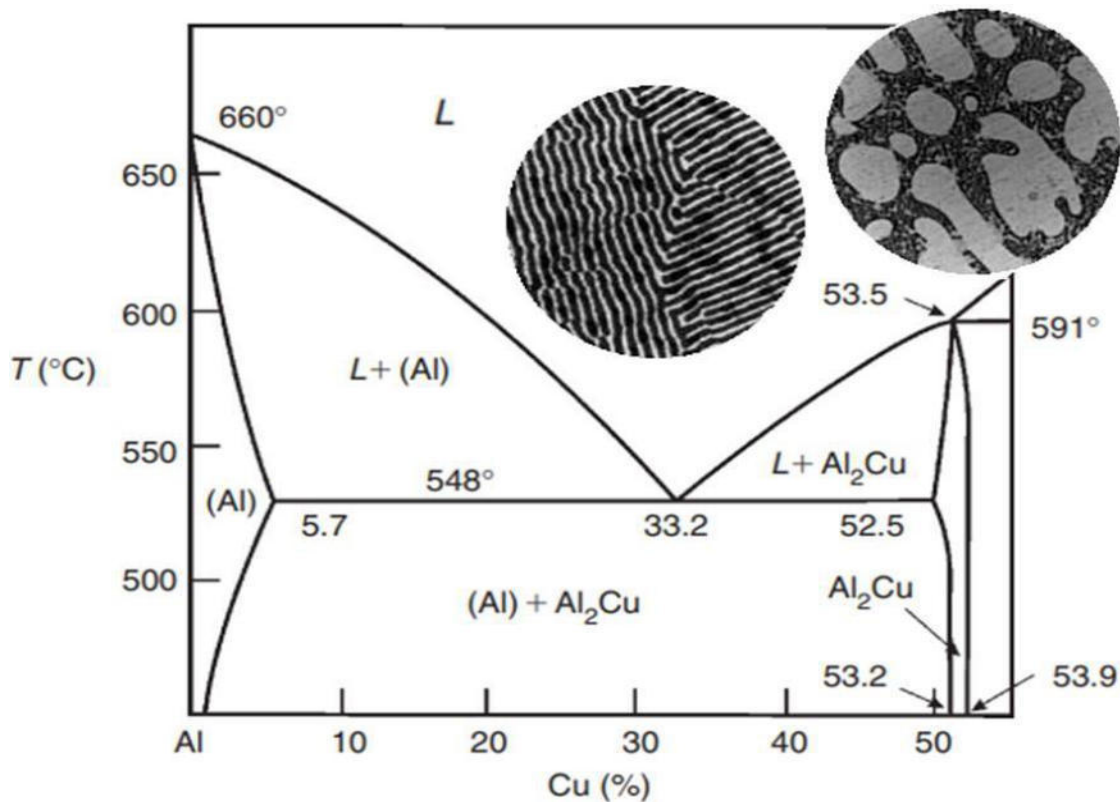


Figura 16. Reacción eutéctica del diagrama de equilibrio Al-Cu, mostrando sus fases en equilibrio (Hatch, 1984) y (Román, 2019).



OBJETIVOS

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Diseñar, construir y puesta en marcha de un horno de fundición con crisol removible para la manufactura de lingotes de aluminio con diferente contenido de cobre (Al-Cu) en moldes permanentes de acero.

5.2 Objetivos específicos

- Identificar mediante una revisión bibliográfica exhaustiva que se ha investigado a lo relevante de hornos de crisol.
- Demostrar prácticamente la relevancia de la fundición como uno de los procesos fundamentales de producción de metales en la industria de la transformación.
- Identificar los parámetros que intervienen en el diseño y construcción de un horno de crisol removible para fundición.
- Identificar cada una de las etapas de operación de los pasos que conlleva el proceso de fundición.
- Identificar las herramientas y equipos requeridos en el proceso de fundición.
- Desarrollar habilidades en la aplicación e implementación de las técnicas de manufactura aprendidas en la teoría de procesos de fundición.
- Determinar los factores importantes que influyen en la selección de parámetros para los procesos de fundición.
- Establecer ciertos criterios de diseño para los moldes permanentes de acero o los moldes desechables de arena sílica en verde.
- Establecer un diseño del molde necesario para llevar a cabo experimentalmente la fusión, considerando las contracciones volumétricas que presentan los metales al solidificar.
- Determinar la carga metálica que será fundida en el horno de fusión.
- Calcular el tiempo de fusión y solidificación, así como el peso de los lingotes fundidos.
- Manufacturar lingotes de la aleación de Al provenientes de envases reciclados y Al-Cu para su uso industrial.
- Generar conocimiento y habilidades en el uso de equipos para maquinado, así como evaluar las propiedades de los productos fundidos de aluminio.
- Evaluar las propiedades físicas, químicas, mecánicas y microestructurales de los productos de aluminio obtenidos de la fusión.
- Determinar los elementos de aleación presentes en los lingotes de fundidos de aluminio.
- Esquematizar la trayectoria de solidificación utilizando diagramas de fase para los diferentes lingotes de aluminio.

HIPÓTESIS

6. Hipótesis

La construcción de un horno de fundición posibilitará la elaboración de aleaciones de aluminio con el fin de fomentar el conocimiento práctico en los estudiantes de INGENIERÍA INDUSTRIAL, del Centro Universitario UAEM Valle de México, además de consolidar la investigación científica en la fabricación materiales metálicos por el proceso de fusión. Se prevé que el diseño y la construcción de un horno de fundición permita manufacturar lingotes de aluminio con cobre para su uso industrial de excelente calidad.

METODOLOGÍA

7. Metodología y desarrollo experimental

La metodología aplicada a esta investigación se refiere al tipo mixto, que es un enfoque que combina la investigación cualitativa y cuantitativa para proporcionar una comprensión más completa y profunda de la investigación, así como validar los resultados obtenidos.

7.1. Lista de materiales y equipos de caracterización

MATERIALES

- 1 tambor cilíndrico de acero de dimensiones 70 cm de altura con 38 cm de diámetro.
- 25 ladrillos y 25 kilogramos de mortero refractario.
- 25 kilogramos de una mezcla consistente de arcilla.
- 6 metros de tubería galvanizada de 1/2 pulgada de diámetro.
- 1 crisol de acero para retener el metal fundido.
- 5 moldes cilíndricos de acero de 7 cm de altura con 7.6 cm de diámetro, para recibir el metal fundido.
- 1 set de herramienta requerida para el proceso de fusión.
- 1 set de herramientas y equipos para la preparación de arena para fundición.
- Implementos de seguridad para realizar la fusión; casco, guantes, careta, mandil y zapatos con casquillo.
- 1 contenedor para almacenar botes de bebida, estos son de aluminio recuperado por reciclado.
- 15 kilogramos de alambre reciclado de cobre.
- 2 galones de combustible, mezcla de 50% de diésel (gasóleo) con 50% de aceite usado de motor.
- 50 kilogramos de una mezcla de arena sílica, bentonita, carbón marino fino y otros aditivos.
- 2 cajas de moldeo.

EQUIPOS

- 1 horno de crisol removible.
- 1 equipo especializado para impulsar aire a presión, turbina de 1 hp de potencia.
- 1 torno horizontal para maquinado.
- 1 cierra cinta para el corte de los lingotes de aluminio.

- 1 equipo para preparar muestras metalográficas para su inspección de sus propiedades.
- 1 equipo pistola de fluorescencia de Rayos-X (FRX), Brucker, TITAN S1.
- 1 equipo de espectrometría de arco eléctrico por chispa Q4 TASMÁN, de Brucker.
- 1 equipo durómetro Brinell, HB.
- 1 equipo de medidor de dureza Vickers, HV.
- 1 microscopio metalográfico invertido de la marca Olympus GX51.

7.2 Descripción del proceso de construcción del horno de fusión

En esta sección se describen los materiales y el procedimiento para el diseño, la construcción, y puesto en marcha de un horno de crisol removible para fundir aluminio y su aleación con cobre (Al-Cu), por lo que se aplica una metodología mixta basada en aspectos teóricos y experimental. La *Figura 17* muestra un diagrama de bloques de operación, en este diagrama se describe cada una de las etapas tal como sigue;

- Diseño de un horno para fusión de aluminio con crisol removible.
- Manufactura de un horno convencional con coraza cilíndrica de acero con crisol removible.
- Aplicación de un revestimiento refractario en el interior del horno.
- Integración de los componentes del horno.
- Puesto en marcha del horno.
- Realizar pruebas de operación para verificar la eficiencia del horno.
- Selección de chatarra (materiales de aluminio de bote reciclado y alambre de cobre) para la carga del crisol.
- Fusión de lingotes de aluminio provenientes de latas recicladas de pureza, de alrededor 97-98% de Al. Fusión de lingotes de la aleación de aluminio con cobre (Al-Cu), a diferente contenido de Cu de 10, 20 30, 40 y hasta 60% en peso.
- Diseño y manufactura de lingoteras cilíndricas de acero.
- Proceso de vaciado en cilindros de acero.
- Proceso de solidificación del metal en las lingoteras.
- Inspección visual y limpieza de lingotes, así como su identificación.
- Maquinado de lingotes de aluminio fundidos.
- Análisis por Rayos-X, (FRX), determinación de la dureza mecánica por la técnica de Brinell HB, determinación de la microdureza Vickers HV, análisis de la composición química por el método de chispa, y análisis de las características microestructurales por microscopía óptica.

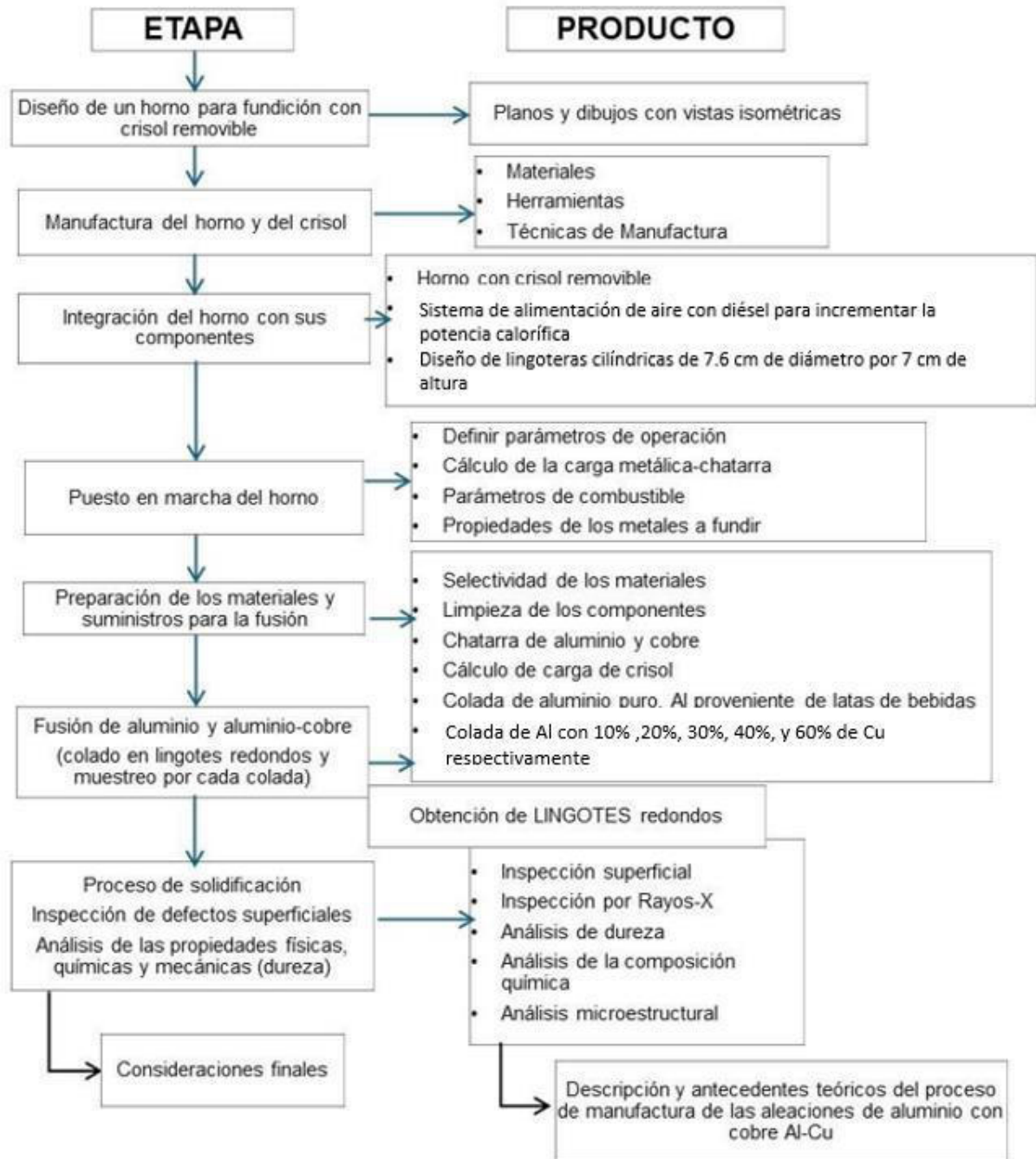


Figura 17. Diagrama de flujo de las etapas del diseño, manufactura y puesto en marcha de un horno de fundición de crisol removible.

7.3 Diseño de un horno de crisol removible

Se realiza un plano-diseño de un horno con crisol removible, el cual consta de una coraza cilíndrica de acero, en este caso se utiliza un tambor cilíndrico de acero, el cual es recubierto el interior con ladrillo refractario seguido de una mezcla de (arcilla compactada y sinterizada). Finalmente, con una mezcla de

mortero refractario es utilizada para insular o generar una barrera térmica entre el metal y el hogar donde se lleva a cabo la fusión del metal, este diseño se muestra en la **Figura 18**. Es importante señalar que; este tipo de horno es similar a los que se utilizan en la industria, pero de menor capacidad, este horno es idóneo para realizar fusiones por encima de 1000°C, además este horno va a hacer operado con una turbina de aire para incrementar la capacidad calorífica, este horno es asistido por diésel con aceite quemado de motor para alcanzar la fusión en tiempos relativamente muy cortos.

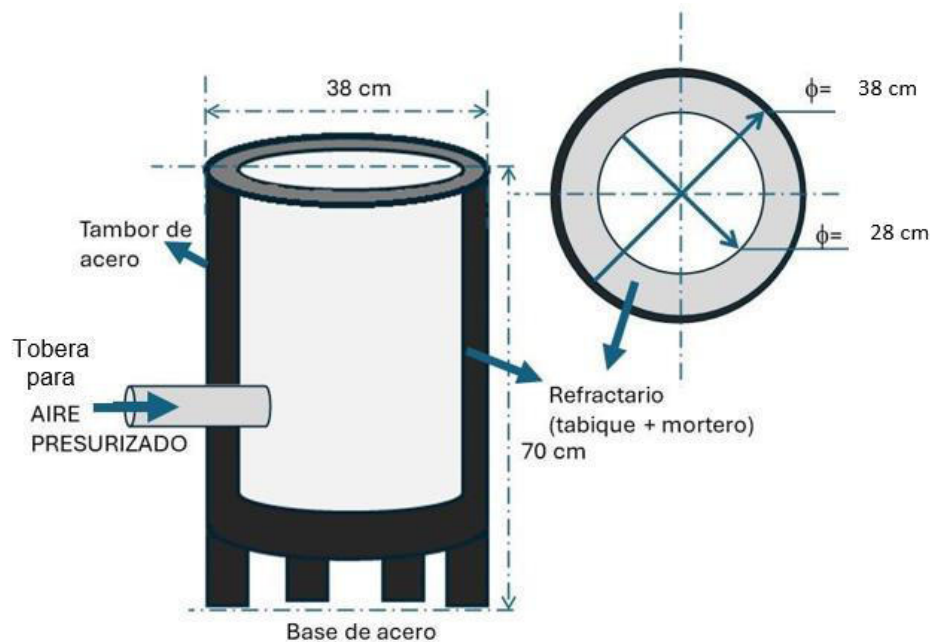


Figura 18. Representación del diseño de horno de crisol removible para su uso industrial, diagrama que muestra el diseño interior y exterior, cotas en cm, se observan las capas que componen el recubrimiento.

Es recomendable que, al diseñar este horno de crisol, debe considerarse lo siguiente para su óptima operación; (i) un horno con un hogar cilíndrico es más eficiente caloríficamente que un horno de precámara rectangular. ii) el horno debe ajustarse dimensionalmente de acuerdo con el tamaño del crisol y su capacidad de fundir. iii) el diámetro del hogar en su interior debe ser dimensionado entre 15 y 30 cm más que el diámetro del crisol. iv) la altura del hogar interno con su recubrimiento debe tener un margen de movilidad para cuestiones de operación entre 25 y 50 cm entre el borde superior del crisol y la tapa, evitar que la flama del quemador impacte directamente sobre él crisol, además. v) el orificio del quemador debe colocarse desde el fondo por el costado del crisol. vi) el colocado del refractario se aplica en capas uniformes, esto permite un calentamiento uniforme, conservación de la energía y bajas pérdidas de calor y finalmente. vii) control del flujo del aire es esencial para mantener la temperatura deseada.

7.4 Construcción del horno y del crisol

El tambor de acero se recubre con los ladrillos refractarios que se colocan verticalmente en forma circular cubriendo todo el diámetro del contenedor, dejando una cavidad interna para colocar el crisol de acero. La tapadera debe medir 43 cm de diámetro y tiene un par de jaladeras de varilla de acero corrugado que le servirán para levantarla; en el centro tiene un orificio de al menos 8 cm de diámetro y el espesor de las paredes del mortero refractario es de 6 cm. La precámara de combustión del horno es el espacio cilíndrico que forman los ladrillos, este debe medir 28 cm de diámetro y puede contener un crisol con un máximo de 14 cm de diámetro y 19 cm de altura. Las paredes y el acero del tambor deben medir 9 cm de espesor; y el conducto de entrada del combustible de 8 cm.

Para formar el crisol, se requiere de un contenedor donde se lleve a cabo la fusión del metal, donde se va a recibir el metal líquido, en este caso lo recomendable es tener un crisol de cerámica, grafito o alúmina, pero esto implica un costo elevado. Sin embargo, en esta investigación se construye un crisol de acero, ya que su punto de fusión del acero es 1600°C y en este trabajo se alcanzará la temperatura máxima de 800°C, siendo el punto de fusión del aluminio de 660°C, en estas condiciones el acero únicamente se pone al rojo vivo sin pasarlo al estado de fusión. Para esto se consiguió un depósito de acero que es un refrigerador en una chatarrería este es de un cuarto de pulgada de espesor y se construye el crisol mediante un proceso de soldadura con las características siguientes; se cortó una placa de acero de alta resistencia, y se realizó a soldar una agarradera de forma que pueda conectarse con un tubo de 2.54 cm (1") de diámetro, como soporte con una agarradera de 90 cm para manipular el crisol. **La figura 19** muestra las características de diseño del crisol que se construye en este trabajo de tesis.

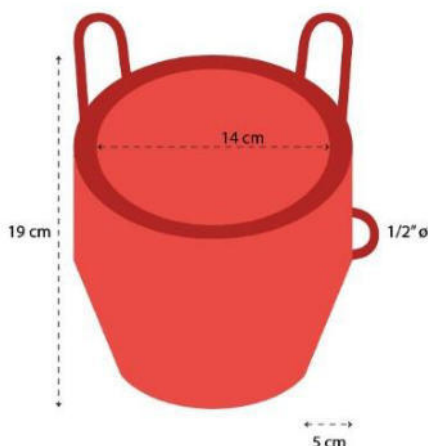


Figura 19. Representación del crisol removible para su uso en el horno, diagrama que muestra el diseño con sus medidas en cm.

7.5. Integración de los componentes del horno

La **Figura 20**, muestra el armado de los componentes integrales para llevar a cabo el funcionamiento del horno y fundir cualquier aleación de aluminio. Depósito de combustible (1), cámara de combustión (horno)

(2), tubería como sistema de transporte (3), propulsor de aire (4), crisol (6), y otras herramientas principales. La integración de estos componentes debe ser precisa y planificada para asegurar que este horno funcione adecuadamente, así como garantizar su eficiencia y seguridad, sin pérdidas de calor para mantener un control adecuado del proceso de fusión.

Diseño de la instalación

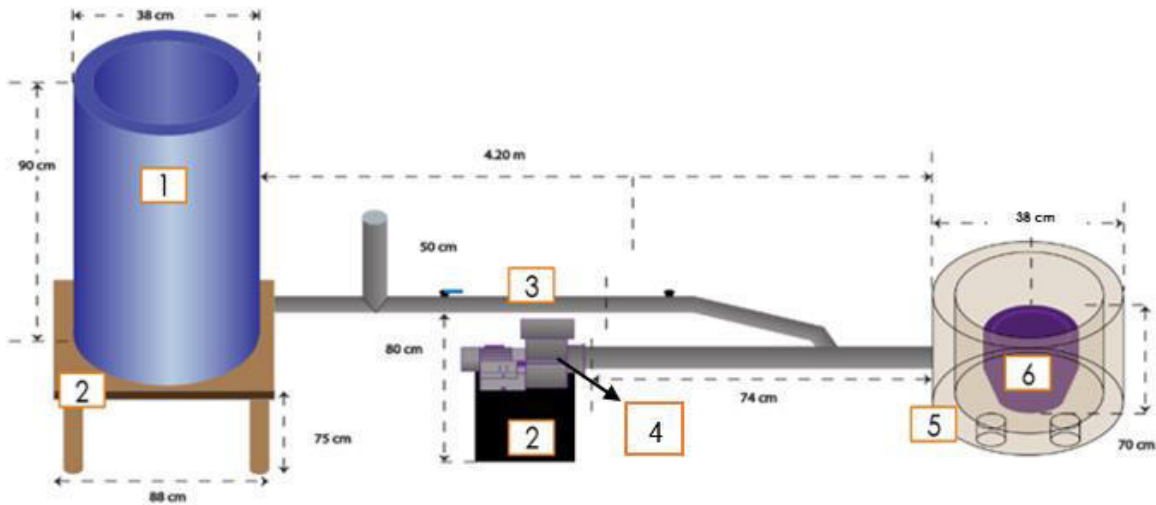


Figura 20. Representación del diseño de la instalación de un horno de crisol para uso industrial. 1) Contenedor cilíndrico almacenamiento de combustible, 2) base de soporte, 3) tubería galvanizada de 1/2" de diámetro, 4) turbina generadora de aire a presión, 5) horno con coraza de acero, 6) crisol removible de acero.

Se realiza mediante una búsqueda en la literatura algunas metodologías existentes sobre la construcción de un horno para fusión de metales tipo industrial, para este caso se utiliza un tambor cilíndrico (de dimensiones 70 cm de altura y 38 cm de diámetro) con capacidad de 80 litros de volumen, este es de acero convencional, material aislante térmico “tabique refractario de arcilla” 25 piezas, mortero refractario, tubería de acero (1.27 cm diámetro, 1/2”) para el armado del sistema de combustión del aire y un depósito donde se contiene el combustible, este debe fluir a gravedad con una pendiente determinada pasando por la tubería hacia el crisol. Además, se diseña un crisol de acero de cedula de 1/4 pulgada de espesor ($1/4 = 0.6$ cm) para llevar a cabo la fusión del metal, también se diseñan ciertas herramientas, así como una base de acero para reposar el crisol del horno para que genere el suficiente calor en el interior del horno, este armado de los elementos que componen el sistema del horno se muestra en la **Figura 20**.

7.5.1. Sistema de transporte de combustible para la fusión

El sistema de transporte utiliza tubería galvanizada; se hace un diseño de transporte de tubería de galvanizada de media pulgada ($\frac{1}{2}$ "), el cual consta de codos niples de acero, tubos largos, se hace la conexión y se hace un derivado de (Y) donde un conducto transporta directamente diésel con aceite (combustible), por el otro conducto un flujo de aire que al llegar al final del horno impactan directamente al crisol en una sola salida y se hace la mezcla de aire con el combustible. El mismo aire impulsa el combustible, una vez realizada la combustión el aire se incrementa la potencia energética del combustible, se utiliza una llave de paso para dejar que el combustible sea impulsado por gravedad o se detenga, se utiliza de igual manera una turbina de un caballo de potencia (1 HP) para que salga a presión hacia el horno de crisol removible y a si la capacidad calorífica tenga más intensidad.

7.6. Diseño de molde permanentes

Se fabrican cilindros permanentes de acero para verter el metal fundido y obtener un lingote con una forma determinada. Para este caso se seleccionan cilindros de acero de diámetro 7.6 cm x 7 cm con espesor de 4 mm, el cual se cortó de un tubo de acero con las medidas indicadas que servirá para colar el metal fundido y en seguida desmoldar como se muestra en la **Figura 21**. Estos moldes permanentes de acero servirán para vaciar el aluminio fundido, para que soporten la temperatura de fusión del aluminio (660 °C), siendo la temperatura de fusión del acero (1600°C) que es superior a la del aluminio. Adicionalmente, se manufactura una lingotera con capacidad de 3 kg, el fondo de esta lingotera, está marcado con las letras UAEM para que los lingotes de aluminio sean identificados.



Figura 21. Moldes cilíndricos de acero, que son (moldes permanentes) para formar los lingotes de aluminio.

7.7. Requerimientos energéticos para llevar a cabo la fusión

Una vez terminado el diseño del horno y el armado de los componentes del horno, se realiza un análisis entre el uso del combustible, para este caso y por la facilidad de tener más rápido la fusión, se usa el carburante; que es una mezcla de diésel con aceite quemado de motor para incrementar la potencia del horno y adquirir la máxima capacidad calorífica impulsado por un flujo de aire que impacta hasta el crisol. Mediante esta mezcla de combustible líquido con aire se realiza la fusión de la aleación de aluminio en tiempos cortos. Por lo que, la intención de este horno es fundir aleaciones de aluminio empleando un crisol de acero y con el uso de la técnica de fusión para llevar del estado sólido al estado líquido la carga metálica aplicando una energía externa al material y vaciarlo en un molde permanente de acero para obtener lingotes.

7.7.1. Fusión de aluminio de 96% de pureza, y fusión de la aleación Al-Cu, con 10, 20, 30, 40 y 60%Cu

• FUSIÓN DE LINGOTES DE ALUMINIO DE ENVASES DE BEBIDAS

Se ingresa al crisol 4 kilogramos de chatarra de aluminio en latas recicladas, tal como las que se utilizan para bebidas refrescantes de acuerdo a su procedencia, este aluminio es de aproximadamente 95-96% de Al, inspeccionado por 20 pruebas con FRX (fluorescencia de Rayos X) que indica que además tiene trazas de Si, Cu, Mn y Zn, principalmente (se refiere a la aleación Al6082: 96.02%Al, 1.07%Mn, 1.29%Si, 0.81%Mg, 0.52%Fe, 0.23%Cu, 0.04%Zn), El aluminio en estas condiciones se funde a los 660°C, y tiene la capacidad de llevar a cabo el cambio del estado sólido al líquido en aproximadamente 40 minutos desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de fusión con el equipo disponible en esta investigación. Una vez fundido el aluminio este se vacía en moldes de acero cilíndricos idénticos a la temperatura de 750°C, y esperar a que estos solidifiquen completamente para ser desmontados. Nota; la cantidad de cobre que tiene el material de reciclado es relativamente bajo; de (0.23%Cu), a esta aleación se le conoce como AlCu0 por que no se agrega cobre. Además, para estandarizar el procedimiento se obtuvieron varios lingotes de aluminio en producción de 50 lingotes de aluminio proveniente de latas de reciclado, para mantener constante las mismas características y composición química de los materiales que se alimentarán en las próximas fusiones de Al-Cu, para AlCu10, AlCu20, AlCu30, AlCu40 y AlCu60. Más detalle de estas aleaciones se presenta a continuación. Las latas de aluminio que se utilizan en esta investigación provienen del envasado de alimentos y bebidas, recicladas. Estas latas tienen Mg de 0.5-1.5%, Mn entre 0.5-1.5% para aumentar la resistencia mecánica y formalidad del envase, mejora la resistencia a la corrosión. Mientras que la presencia de Fe, Si, Cu y Zn, menor al 1.0% se agrega para mejorar la resistencia estructural y la maquinabilidad durante el proceso.

- **FUSIÓN DE LINGOTES DE Al-Cu 10%**

El horno se carga con 4 lingotes de aluminio de la siguiente manera, **Lingote (1). 818 g. Lingote (2). 850 g. Lingote (3). 855 g. y Lingote (4). 911 g.** (wt. de los lingotes de aluminio Al), **TOTAL= 3,434 gramos de aluminio Al y 10% de alambre de cobre Cu = 343 g.** Los 4 lingotes de Al tienen una masa total de 3,434 gramos (127.3 moles de Al), por lo que se calcula el 10% a esta masa para determinar la masa equivalente del cobre, siendo 343 g de Cu (5.4 moles Cu). Se cargan al crisol los pesos correspondientes de Al y Cu (3,434g + 343g=3.777g de la carga metálica). Se cargan también 5 litros de diésel y 5 litros de aceite quemado estos son mezclados y se vierten en un contenedor cilíndrico para facilitar la buena combustión de fuego y distribución del calor. Se permite el paso del combustible a gravedad y por medio de una válvula de distribución el combustible pasa por la tubería hasta llegar al interior del horno, se enciende fuego dentro del hogar del horno con una porción de estopa impregnada de combustible. Una vez que la flama toma control y temperatura, se conecta una turbina de aire 1 Hp de potencia para impulsar el combustible y generar una flama potente que impacta al horno directamente.

Se ingresa el crisol de acero con los 4 lingotes de Al, posteriormente se abre la válvula de distribución de combustible a una potencia deseable permitiendo la incidencia de una energía directa durante 19:02.15 minutos, en este periodo de tiempo el Al ha pasado a su estado líquido. En esta etapa se agrega la porción de Cu 343 g a flama de fuego bajo, el cual se controla por una válvula, se agrega la porción de 343 gramos de Cu al crisol, se le abre la válvula del combustible para permitir fuego directo durante 4:34.36 minutos más, para que el Cu se incorpore a la mezcla de aluminio, y con un gancho de acero se agita la mezcla para homogenizar los metales en el estado líquido. Al mismo tiempo se precalientan los moldes permanentes de acero durante 2:00.0 minutos, en el mismo horno para evitar un choque térmico. Finalmente, estos moldes se colocan sobre una placa de metal, se extrae el crisol a los 30 minutos de fusión y mediante unos ganchos de metal, se vacía el metal fundido en los moldes con suavidad, una vez vaciado se deja solidificar hasta llegar a su estado sólido, posteriormente se analiza la superficie y se toman los pesos correspondientes.

- **FUSIÓN DE LINGOTES DE Al-Cu 20%**

Se carga el horno con 4 lingotes, con los correspondientes pesos; **Lingote (1). 773 g. Lingote (2). 875 g. Lingote (3). 752 g. y Lingote (4). 849 g.** (wt. de los lingotes de aluminio Al), **TOTAL= 3,249 gramos de aluminio Al y 20% de alambre de cobre Cu = 649 g.** Los 4 lingotes de Al tienen una masa total de 3,249 gramos (120.4 moles de Al), por lo que se calcula el 20% a esta masa para determinar la masa equivalente del cobre, siendo 649 g de Cu (10.2 moles Cu). Se cargan al crisol los pesos correspondientes de Al y Cu (3,249g + 649g=3,898 g de la carga metálica).

Se sigue la misma metodología explicado anteriormente. Solo que para esta aleación Al-20% la carga

metálica alcanza su estado líquido en 21:51.49 minutos. En este tiempo se agrega el Cu en dos porciones de 324.5 g, la primera porción se continua a fuego directo por 5:37.19 minutos y se mezcla. Se carga la segunda porción de 324.5 g de Cu y los 3:35.73 minutos se mezclan los materiales. Se precalientan los moldes permanentes de acero durante 2:00.0 minutos para evitar un choque térmico. Finalmente, estos moldes se colocan sobre una placa de metal, se extrae el crisol a los 45- minutos de fusión y se vacía el metal fundido en los moldes, se deja solidificar hasta llegar a su estado sólido a la temperatura ambiente, posteriormente se analiza la superficie y se toman los pesos correspondientes de los lingotes de aluminio.

- **FUSIÓN DE LINGOTES DE Al-Cu 30%**

Cantidad de masa determinada para para los 4 lingotes que se agregan al horno. **Lingote (1). 842 g. Lingote (2). 836 g. Lingote (3). 732 g. y Lingote (4). 792 g.** (wt. de los lingotes de aluminio Al), **TOTAL= 3,202 gramos de aluminio Al y 30% de alambre de cobre Cu = 960 g.** Los 4 lingotes de Al tienen una masa total de 3,202 gramos (118.7 moles de Al), por lo que se calcula el 30% a esta masa para determinar la masa equivalente del cobre, siendo 960 g de Cu (15.2 moles Cu). Se cargan al crisol los pesos correspondientes de Al y Cu (3,202g + 960g=4,162 g de la carga metálica). Esta aleación de Al-30% la carga metálica alcanza su estado líquido en 23:44.59 minutos. A este periodo de tiempo se agrega el Cu en tres porciones de 320 g, al agregar la primera se continua a fuego directo por 6:55.34 minutos y se mezcla. La segunda porción se deja por 4:44.87 minutos se mezclan los materiales. La tercera porción se deja por 2:67.48 minutos se mezclan los materiales. Finalmente, al transcurrir 50 minutos de fusión se vacía el metal fundido en los moldes, se deja solidificar, posteriormente se analiza la superficie y se toman los pesos correspondientes de los lingotes de aluminio fundidos.

- **FUSIÓN DE LINGOTES DE Al-Cu 40%**

Los lingotes de carga de aluminio tienen un peso de; **Lingote (1). 835 g. Lingote (2). 780 g. Lingote (3). 785 g. y Lingote (4). 832 g.** (wt. de los lingotes de aluminio Al), **TOTAL= 3,232 gramos de aluminio Al y 40% de alambre de cobre Cu = 1,292 g.** Los 4 lingotes de Al tienen una masa total de 3,232 gramos (119.8 moles de Al), por lo que se calcula el 40% a esta masa para determinar la masa equivalente del cobre, siendo 1,292 g de Cu (20.3 moles Cu). Se cargan al crisol los pesos correspondientes de Al y Cu (3,232g + 1,292g=4,524 g de la carga metálica). Esta aleación Al-40% la carga metálica alcanza su estado líquido en 25:26.15 minutos. A este periodo de tiempo se agrega el Cu en cinco porciones de 258 g; (1-porción) a 7:08.92 minutos, (2-porción) a 3:51.97 minutos, (3-porción) a 2:39.99 minutos, (4-porción) a 2:39.99 minutos y (5-porción) a 2:20.55 minutos y se mezclan. Finalmente, al transcurrir 60 minutos de fusión se vacía el metal fundido en los moldes, se deja solidificar, posteriormente se analiza la superficie y se toman los pesos correspondientes de los lingotes de aluminio fundidos.

- **FUSIÓN DE LINGOTES Al-Cu 60%**

Se cargan al horno 4 lingotes de aluminio; **Lingote (1). 812 g. Lingote (2). 785 g. Lingote (3). 638 g. y Lingote (4). 692 g.** (wt. de los lingotes de aluminio Al), **TOTAL= 2,927 gramos de aluminio Al y 60% de alambre de cobre Cu = 1,756 g.** Los 4 lingotes de Al tienen una masa total de 2,927 gramos (108.5 moles de Al), por lo que se calcula el 60% a esta masa para determinar la masa equivalente del cobre, siendo 1,756 g de Cu (27.6 moles Cu). Se cargan al crisol los pesos correspondientes de Al y Cu (2,927g + 1,756g=4,683 g de la carga metálica). Esta aleación Al-60% la carga metálica alcanza su estado líquido en 23:22.37 minutos. Para estas condiciones el sistema líquido no puede disolver 60% Cu de la masa de Al, por lo que requiere una temperatura por igual de 1,085°C o incrementar el tiempo de fusión. Para esta aleación Al-Cu60% se agrega el Cu en seis porciones de 293 g; (1 y 2 porciones) durante 6:08.90 minutos, (3-porción) a 5:12.15 minutos, (4-porción) a 4:10.19 minutos, (5-porción) a 2:35.11 minutos y (6-porción) a 1:30.02 minutos y se mezclan. El tiempo de proceso de difusión disminuye por el incremento de la temperatura. Finalmente, al transcurrir 80 minutos de fusión se vacía el metal fundido en los moldes, se deja solidificar, posteriormente se analiza la superficie y se toman los pesos correspondientes de los lingotes de aluminio fundidos.

7.7.2. Solidificación y maquinado de los productos de fusión

La **Figura 22** muestra la secuencia del trabajado mecánico a estos materiales fundidos de aluminio, en su forma de lingotes cilíndricos. El metal fundido de aluminio para cada caso se vació directamente a un molde permanente de acero con forma cilíndrica, permitiendo que el metal fundido llene por completo y solidifique lentamente de acuerdo con su naturaleza del equilibrio de solidificación. Hasta que la cristalización de cada lingote ocurra por los mecanismos de nucleación, crecimiento y difusión de los cristales a temperatura ambiente. La segregación, microporosidad y rechupe que se observan son características asociadas al proceso de fusión. Se obtienen 4 lingotes por aleación fundida. A continuación, se desmoldan los productos y se inspeccionan visualmente para determinar la presencia de defectos, y se seleccionan aquellos que tienen un mejor control de los parámetros de fusión. Todos los materiales se les determina la masa, el volumen y densidad, se marcan, se seccionan en cuatro partes mediante una cortadora vertical, y son maquinados en su forma cilíndrica y se obtienen muestras representativas, para los diferentes estudios.



Figura 22. Fusión y solidificación de lingotes fundidos de aluminio. Procesamiento mecánico de los lingotes de aluminio para la extracción de muestras representativas para su estudio de caracterización de propiedades.

7.8. Análisis de los productos fundidos de aluminio

7.8.1. Supervisión visual de los lingotes fundidos

Mediante una supervisión visual se analizan superficialmente todos los productos obtenidos con la finalidad de identificar defectos superficiales como porosidad, rechupes, juntas fundidas o mal llenado que son defectos más comunes del proceso de solidificación en lingote para los diferentes tipos de aleaciones que se fundieran. Por lo que se seleccionan los mejores materiales fundidos, también se adoptó la filosofía, si una fusión no cumple con las especificaciones establecidas, se optó en volver a fundir la aleación recuperando el material defectuoso o con el error cometido de proceso, como derrame del lingote o mal llenado de los moldes. En general los lingotes presentan rechupe por solidificación y microporosidad fina en todo el volumen.

7.8.2. Análisis de la composición química por fluorescencia de Rayos-X (FRX)

Se analizan los productos fundidos por fluorescencia de Rayos X para determinar los elementos de aleación presentes en los productos obtenidos. Para este fin, se utiliza un equipo de campo industrial (pistola FRX) marca Bruker, modelo TITAN S1, en el que se aplica una aceleración de electrones de 20kV sobre la muestra metálica de aluminio, y se emite un fotón incidente-X proveniente de las capas internas de nivel K, L, M o N del átomo, y después regresa a su estado fundamental de equilibrio, esta

diferencia de energía se cuantifica por un detector que por discriminación de energía dispersiva en KeV y longitud de onda, así mismo el conteo de electrones, es posible determinar los elementos que componen la aleación (Brucker-S1 TITAN, 2019).

7.8.3. Análisis de la composición química por espectroscopia de chispa

Se analizan los productos fundidos por espectrometría de arco eléctrico por chispa para determinar cuantitativamente los elementos presentes en los materiales obtenidos. Para esto, se utiliza un equipo Brucker Q4 TASMAN serie 2 con longitud de onda de λ : 200-620 nm, la excitación de electrones provenientes de la muestra metálica se produce en el pequeño espacio existente entre un par de electrodos, y se genera el paso de electricidad entre dos electrodos a través de este pequeño espacio proporciona la energía necesaria para fusionar la muestra y producir átomos o iones característicos del estado electrónico excitado. La espectrometría de emisión es una técnica más de espectroscopia que analiza las longitudes de onda de los fotones emitidos por los átomos o moléculas excitadas durante su transición desde un estado de inferior energía de un nivel a otro. Cada elemento emite un conjunto característico de longitudes de onda discretas en función de su estructura electrónica. Mediante la observación de estas longitudes de onda puede determinarse la composición elemental de la muestra (Brucker Q4 TASMAN, 2024).

7.8.4. Determinación de dureza por la prueba Brinell, HB

De acuerdo con la literatura, la dureza se define como la habilidad del metal a resistirse a la deformación por penetración o a cambiar de forma cuando se le aplica una carga dinámica. En mineralogía se denomina a la dureza a la propiedad que tiene un material a resistirse a ser rayado por otro material. Para determinar la dureza de un material se han desarrollado diversos tipos de ensayos en el que se basan en la penetración de un material con un indentador endurecido (bola de acero tratado térmicamente o punta de diamante). Por lo que a los materiales fundidos para cada aleación, se les determina la dureza de acuerdo con el método Brinell, que es un ensayo que consiste en presionar con una fuerza F (250 Kgf) la superficie del metal con una bola de acero (5 mm de diámetro) tratada térmicamente que le sirve como indentador, y que mediante la deformación plástica deja una impresión de un casquete esférico sobre la superficie del metal, y se calcula el diámetro de la penetración, permitiendo dar un valor comparativo de la dureza entre ambos materiales, la unidad que se obtiene es en HB, muy usado para materiales suaves o de baja dureza (Maya, 2022).

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} - (13)$$

Siendo, P la carga aplicada en kgf, D el diámetro de la bola de acero utilizada en milímetros y d la huella que se produce durante el ensayo en milímetros.

7.8.5. Análisis de la dureza por micro-dureza Vickers

La micro-dureza Vickers es similar al ensayo Brinell ya que se obtiene el cociente de la carga aplicada por la superficie de la imprenta. Esta prueba utiliza una carga pequeña y el penetrador es un diamante en forma de pirámide de base cuadrada en la cual la inserción del punto es en orden de los micrómetros con ángulo de 136° entre caras opuestas. Pueden ensayarse superficies delgadas, y mediante la lógica de la deformación plástica de la superficie del material. El indentador se presiona sobre la superficie del material con fuerza controlada. Se calculan las distancias de la penetración de este diamante, permitiendo dar un valor comparativo de la dureza entre ambos materiales, la unidad que se obtiene es en HV, muy usado para materiales altamente duros (Maya,2022). Para determinar la dureza HV se utiliza la siguiente formula;

$$HV = \frac{1.854F}{D^2} ; D = \frac{d_1 + d_2}{2} (mm^2) - (14)$$

Siendo D, el área de la impresión de indentación en mm², d1 el largo de la huella, d2 ancho de la huella; F es la fuerza aplicada en kgf, constante del ángulo de indentación del diamante $2 \cos 22^\circ = 1.854$.

7.8.6. Análisis de la microestructura por microscopía óptica

Se analiza la superficie de los productos fundidos utilizando un Microscopio Metalográfico tipo Invertido de la marca Olympus GX51, tal como el que se muestra en la **Figura 23**. La obtención de una imagen de la superficie de las muestras de aluminio requiere de una serie de operaciones que van desde el corte o remoción de una muestra representativa con un tamaño adecuado para ser manipulable. En seguida, se desbasta la superficie por frotamiento sobre lija de papel abrasivo de granulometría del más grueso al fino, ej. #80, #150, #240, #320, #400, #600 y #1000 grit: donde el subfijo grit, se refiere una medida que indica el tamaño de las partículas abrasivas pasantes en el papel lija, que a su vez determina la capacidad

de la lijada en la superficie trabajada. Finalmente, se realiza un pulido a la superficie utilizando un disco giratorio forrado de lana o paño, se agrega una suspensión abrasiva de partículas de alúmina hasta que la muestra quede pulida a espejo. Al colocar la muestra en la platina la intensidad del haz de luz irradia la muestra permitiendo observar la imagen de la estructura de la aleación, así se puede evaluar los detalles microestructurales de las diferentes aleaciones estudiadas. Este microscopio permite observar muestras a 50X, 100X 200X y 400X, siendo X los aumentos del microscopio (Olympus-GX51, 2015).

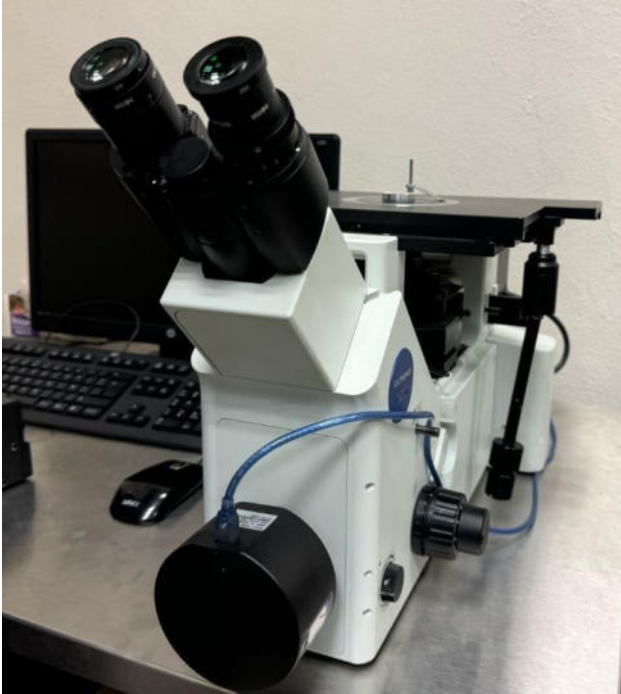


Figura 23. Microscopio metalográfico invertido de la marca Olympus –GX51 utilizado para el análisis de la microestructura.



RESULTADOS
Y
DISCUSIÓN DE
RESULTADOS

8. Resultados y discusión de resultados

8.1. Manufactura de un horno de crisol removible

Como resultado de esta investigación, se construyó un horno fijo de crisol removible de acuerdo con los requerimientos especificados en el diseño de la *Figura 20*. Se toma en consideración la capacidad de fusión, productos a fundir, temperatura y tipo de administración del calor por combustible, incremento de la capacidad calorífica mediante soplo de aire a presión, selección de los materiales de construcción, emplear un crisol apropiado para contener el metal fundido y resistir las altas temperaturas, considerar un hogar o precámara robusta para retener el calor y concentrar la energía calorífica que se impacte directamente al crisol, considerar un aislante térmico o material refractario adecuado para tener una mejor eficiencia de operación. A continuación, se describe de manera general el procedimiento de manufactura del horno de acuerdo con las siguientes etapas;

Etapa 1 Diseño y planeación: Se diseña un horno de crisol con la capacidad requerida a fundir, la selección de crisol y el diseño del sistema de combustión.

Etapa 2 Selección de los materiales: Se selecciona un tambor de acero con una altura de 70 cm y diámetro de 38 cm, se utilizó como coraza para el horno de crisol removible. Estas dimensiones son las requeridas para introducir y extraer un crisol de esta manera manipular el metal líquido a necesidad.

Etapa 3 Preparación: Se prepara la superficie lijando y limpiando el interior del tambor, para eliminar cualquier residuo superficial que pueden afectar la adherencia del refractario. Se prepara una mezcla de cemento refractario, el cual se mezcló por 5 minutos hasta obtener una consistencia homogénea.

Etapa 4 Aplicación: Se coloca el tabique refractario alrededor de la coraza del acero o tambor cilíndrico por el interior hasta lograr aislar la superficie de acero y finalmente se aplica por capas uniformes hasta cubrir el tabique. El revestimiento aplicado en el interior del horno consistió en cubrir uniformemente y con tabique refractario la circunferencia del horno de acero, seguido de una capa gruesa de una mezcla de concreto resistente a alta temperatura, desde el fondo hasta las paredes del tambor de acero, tal como se muestra en la *Figura 24*, al mismo tiempo se prepara una tapa del mismo material (concreto refractario).

Etapa 5 Curado y secado: Permitir fraguar la mezcla del revestimiento al menos por 5 días, con la finalidad de que el tabique refractario tenga buena adherencia al tambor de acero, en seguida se sinteriza el recubrimiento con un soplete a una flama constante por 20 minutos. Finalmente, en la parte inferior al horno se le sueldan tres perfiles cuadrados de 10 cm de longitud que le sirve como base para fijar el crisol, de esta manera así queda listo para su uso de inmediato, como se indica en la *Figura 25*.

Etapa 6 Ensamble y montaje: Se integran los componentes o accesorios al horno como el crisol que es el recipiente donde se contiene el metal fundido, (este crisol fue manufacturado de acero, como se describió anteriormente), un sistema que proporciona el combustible por tubería galvanizada, sistema de control de la capacidad calorífica empujando una turbina proporcionar aire a presión, y herramientas de seguridad como guantes resistentes al calor, gafas de protección, mandil de carnaza resistente, y herramientas adecuadas de manipulación del metal fundido. Además, se establece un programa de mantenimiento y limpieza continuo. Esto incluye inspecciones periódicas del revestimiento refractario, limpieza de los quemadores y verificación de las condiciones del crisol.



Figura 24. Colocado del ladrillo refractario en el interior del horno y revestimiento interior del tambor de acero con mezcla de concreto resistente a alta temperatura.



Figura 25. Ilustración del horno de crisol removible terminado, vista lateral y vista superior.

8.2. Puesto en marcha del horno de crisol removible

El encendido del horno consiste en encender el hogar del horno con una flama hecha por estopa humedada con diésel, enseguida se abre la válvula del distribuidor del depósito para permitir el paso del combustible (aceite + diésel) hacia la tubería que conduce al interior del horno de fusión. Para hacer la combustión de la estopa impregnada de combustible, y después de unos minutos se pone en marcha una turbina de aire para que impacte la flama y genere mayor capacidad calorífica. En la **Figura 26** se muestra cada uno de los componentes físicos con los cuales se realiza el proceso de fusión, donde se ingresa el combustible, y pasa por el sistema de alimentación de aire, este crea una flama para incrementar la potencia calorífica, y fundir el metal dentro del crisol. Enseguida, se realizan pruebas para verificar que todos los componentes integrales funcionen correctamente, y así evaluar el rendimiento del horno bajo condiciones operativas. La capacidad calorífica de un horno es la medida de la cantidad de la energía térmica que el horno pueda almacenar o liberar para fundir un material y se expresa como $C = mC_p$, m es la masa del material (revestimiento) y C_p es la capacidad calorífica específica del material en (J/Kg·k), mientras que la potencia calorífica es una medida de la cantidad de energía térmica que el horno puede transferir por unidad de tiempo $P = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, y se mide en KW o BTU/hr, donde P es la potencia calorífica en vatios W, Q es la cantidad de calor transmitido en julios J y t es el tiempo en el que se transfiere el calor en segundos. Q es el calor (energía térmica) necesario para elevar la temperatura del material hasta su punto de fusión, fundido y manteniendo un estado líquido. El calor necesario para el proceso de fundición se divide en varias etapas.

i) Calor sensible (Q de fusión), $Q_s = mC_p\Delta T$, ii) Calor latente de fusión, energía requerida para cambiar de estado sólido al líquido, $Q_i = mLf$, iii) Energía adicional para mantener el metal a la temperatura deseada.

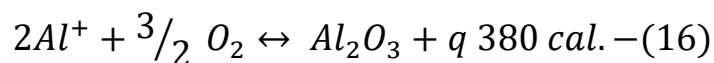
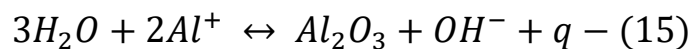


Figura 26. Puesto en marcha de un horno de crisol removible para la fusión del aluminio.

8.3. Fusión del aluminio y sus aleaciones

La fusión es un proceso físico que con lleva una transformación molecular del estado de la materia de sólido (s) a líquido (l) por la acción del calor latente de fusión, ΔH^o proporcionado por un combustible eficiente. El calor latente de fusión es la cantidad de energía necesaria para cambiar un material sólido a su estado líquido sin que cambie su temperatura, y se mide en J/g o J/Kg. Cuando se calienta un sólido, se transfiere calor a los átomos que vibran con mayor velocidad a medida que se incrementa la energía. En esta investigación para la fusión, se utiliza aluminio reciclado proveniente principalmente de envase de bebidas (bote de aluminio), obteniendo así aluminio de segunda fusión que se genera por la fusión de chatarra. El Cu se obtiene mediante reciclado de conductor eléctrico. Toda esta materia prima es conseguida en depósitos de reciclaje y posteriormente es convertida en lingotes o preformas de Al o Al-Cu (Mestansa y Lara, 2012).

En particular, el aluminio (Al) tiene un punto de fusión de aproximadamente 660.37 °C, y un calor latente de fusión de 397 J/g relativamente más bajo en comparación con el cobre 1084.62 °C o hierro 1600°C, esto hace que se tenga mayor efectividad de un 80% más de calor latente para lograr fundir aluminio que el cobre. Para obtener mejores resultados en el proceso de fusión es necesario regular la temperatura del metal fundido, puesto que una vez que toda la carga se ha fundido, la temperatura comenzara a elevarse con mayor rapidez, si es que se sigue con el mismo suministro de calor, ya que el requerimiento calorífico será menor y mayor potencia en la fusión de la aleación debido a la eficiencia de la turbina de aire. La variedad de óxidos que se producen en la superficie del metal fundido, se le llama escoria y esto es aluminio oxidado con otros óxidos de metales residuales, también se le llama alúmina anhídrida. La escoria es un subproducto de fusión de metales, que son las impurezas no deseadas y por ser menos densas flotan en la superficie del metal fundido. En el estado líquido la formación de óxidos se debe por la reacción del vapor de agua adsorbido con en el metal, proveniente de la humedad ambiental; tal como se indica a continuación en la ecuación 15 y 16;



La **Figura 27**, se muestra experimentalmente una visualización de la operación del horno en la fusión del aluminio y el proceso de vaciado en moldes permanentes de acero, para obtener lingotes cilíndricos. Para esto, experimentalmente, se logró cargar el crisol con chatarra de aluminio teniendo una carga de 4 kg provenientes de botes de bebida reciclado, la cual se consiguió elevar la temperatura desde 20°C hasta cerca de los 900°C, en un tiempo aproximado de 45-60 minutos, al mismo tiempo se precalientan los moldes permanentes de acero en, un mismo horno, para evitar un choque térmico durante el vaciado. En seguida, se extrae el crisol con un maneral de acero y se le retira la escoria, e inmediatamente se vierte en moldes permanentes de acero con forma cilíndrica, tal como se observa en la **Figura 27** el metal fundido.



Figura 27. Proceso de fusión del aluminio, y de la aleación Al-Cu, chatarra fundida en un horno de crisol removible, visión del colado en moldes permanentes de acero.

8.3.1. Cálculo del calor de fusión

Teóricamente se realizó un cálculo preliminar del calor de fusión que requiere la carga metálica para transformar una cierta cantidad de materia desde el estado sólido a líquido, de acuerdo con los datos experimentales, para este cálculo se utiliza la ecuación 17, que es la expresión general del calor y que interpreta la cantidad de energía requerida para llevar a cabo el cambio de fase;

$$Q_{carga\ metálica} = q_1 + q_2 + q_3 - (17)$$

Para realizar este cálculo, se deben considerar los siguientes criterios; criterios consultados de la literatura (Mestansa y Lara, 2012) y (Coronel y Sangucho, 2019), los cuales se adecuaron experimentalmente para el caso práctico que se desarrolla en esta investigación para la manufactura de lingotes de aleación Al- Cu, estos criterios se mencionan a continuación:

- Determinar el calor q que se requiere para elevar de la temperatura ambiente (20°C), hasta los 660°C , que es exactamente la temperatura de fusión del aluminio ($T_f= 660.37^{\circ}\text{C}$) considerando el diagrama de fases de la **Figura 15 y 16**. Incrementar 100°C más por pérdida de energía por la transferencia de calor durante la extracción del crisol, remoción de escoria y durante el vaciado de metal líquido.
- Considerar el calor q como producto del calor latente de fusión ΔH por el peso total de la carga, la literatura indica que el ΔH para el aluminio es de $10.5 \text{ kJ/g-átomo o mol}$.
- Se recomienda que la temperatura del metal fundido para que pueda ser vaciado en condiciones óptimas, en moldes permanentes, debe incrementarse la temperatura alrededor de 750°C .

1. Cálculo de q_1 , para elevar temperatura del aluminio hasta 660°C .

$$q_1 = \frac{m C_p (T_f - T_i)}{t} = \frac{4 \text{ kg} * 0.215 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C} * (660 - 20^{\circ}\text{C})}{0.67 \text{ h}} = 821.50 \text{ kcal/h}$$

- Calor requerido ($q \cdot dT$) para elevar la temperatura ($20-660^{\circ}\text{C}$).
- Carga del crisol, 4 kg de Al-aluminio.
- Calor específico del aluminio, $C_p = 0.215 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$.
- Temperatura de fusión de Al-aluminio $T_f = 660^{\circ}\text{C}$.
- Tiempo de fusión $t = 40$ minutos (0.67 h).

2. Cálculo de q_2 , energía calorífica para fundir aluminio.

$$q_2 = \frac{m \lambda}{t} = \frac{4 \text{ kg} * 94.82 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}}{0.67 \text{ h}} = 566.09 \text{ kcal/h}$$

- Calor requerido (q) para producir un cambio de fase.
- Calor latente de fusión del Al-aluminio $\Delta H = 94.82 \text{ kcal/kg}$

3. Cálculo de q_3 , energía adicional para mantener el metal fundido.

$$Q_3 = \frac{m C_p (T_f - T_i)}{t} = \frac{4 \text{ kg} * 0.215 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C} * (750 - 660^{\circ}\text{C})}{0.67 \text{ h}} = 115.52 \text{ kcal/h}$$

- Calor requerido (q) para alcanzar la temperatura de colado de 750°C.
- Temperatura de colado 750°C.

Como resultado teórico, la cantidad de calor total que se requiere para fundir la carga metálica de aluminio (4 kg), es la suma de los calores individuales calculados anteriormente, datos que se sustituyen a la ecuación 17.

$$Q_{carga\ metálica} = (821.50 + 566.09 + 115.52) \text{ Kcal/h}$$

$$Q_{carga\ metálica} = 1503.11 \text{ Kcal/h}$$

Finalmente, la carga de metal fundido vaciar 4 moldes cilíndricos con dimensiones indicadas anteriormente. La investigación en la presente tesis considera diferentes coladas de aluminio (sin alear con cobre), y para aluminio con cobre (Al-10%Cu, Al-20%Cu, Al-30%Cu, Al-40%Cu y Al-60%Cu), siendo un total de 24 lingotes obtenidos. Para el estudio de esta investigación. La forma de estos lingotes se observa en la **Figura 28**, información a detalle se observa en la **Tabla 8**.



Figura 28. Apariencia de los lingotes de aluminio- Al y Al-Cu obtenidos por fusión.

Tabla 8. Medidas y peso de los lingotes de Al y Al-Cu obtenidos por fusión.

Lingote, #	Diámetro ϕ , cm	Altura h, cm	Peso w, grs	Lote de colado
Al, 0% de Cu				
Lingote 1	7.5	5.8	940	02022024-2
Lingote 2	7.5	5.5	809	
Lingote 3	7.5	5.5	852	
Lingote 4	7.5	5.6	908	
			= 3,509	
Al-Cu, 10% de Cu				
Lingote 5	7.5	6.0	818	02022024-2
Lingote 6	7.5	6.5	850	
Lingote 7	7.5	6.0	855	
Lingote 8	7.5	6.0	911	
			= 3,434	
Al-Cu, 20% de Cu				
Lingote 9	7.5	6.0	773	26012024
Lingote 10	7.5	5.5	875	
Lingote 11	7.5	6.0	752	
Lingote 12	7.5	6.0	849	
			= 3,249	
Al-Cu, 30% de Cu				
Lingote 13	7.5	6.0	842	19012024
Lingote 14	7.5	6.5	836	
Lingote 15	7.5	6.3	732	
Lingote 16	7.5	6.3	792	
			= 3,202	
Al-Cu, 40% de Cu				
Lingote 17	7.5	6.5	835	08122023
Lingote 18	7.5	6.8	780	
Lingote 19	7.5	7.0	785	
Lingote 20	7.5	7.0	832	
			= 3,232	
Al-Cu, 60% de Cu				
Lingote 21	7.5	6.3	812	01122023
Lingote 22	7.5	6.8	785	
Lingote 23	7.5	6.6	638	
Lingote 24	7.5	6.6	692	
			= 2,927	

8.4. Maquinado de los lingotes de Al y de la aleación de Al-Cu

Las preformas o lingotes de aluminio obtenidos tienen una forma cilíndrica como las mostradas en la **Figura 29**, obteniéndose 4 por cada fusión para los diferentes materiales estudiados, su tamaño en promedio es de 7.5 cm de diámetro y de 5.5 a 7 cm de altura. Se observa un detalle muy evidente en la superficie, un hundimiento, esto es conocido como rechupe, que indica la disminución de volumen durante el proceso de solidificación que es el cambio del estado del material de líquido a sólido.

(contracción volumétrica). Estos productos son maquinados en torno convencional para obtener cilindros uniformes, enseguida son seccionados en discos de 2.54 cm de diámetro por 0.5 cm de altura, para ser manipulables durante los análisis de la caracterización de las propiedades. Es importante hacer notar que al maquinar los cilindros de aluminio sin adición de cobre muestra un comportamiento maleable durante el maquinado, permitiendo una deformación plástica, el cual permite que la viruta o el residuo se enrosque indicando que es de corte sin fracturarse, muy maleable. En cambio, al incrementar la cantidad de cobre desde 10 hasta 60% se observó que la forma de la viruta al corte se fractura más fácilmente a medida que incrementa la cantidad de cobre, así mismo requiere más energía del buril, para el corte por lo que se seleccionó cambiar a otra herramienta de mayor resistencia al trabajado mecánico, esto es por la elevada dureza que adquiere la matriz de aluminio al adicionar el cobre con 60%. En la **Figura 30** se muestra la secuencia del maquinado, los lingotes son seccionados en cuatro partes empleando una sierra cinta vertical, en donde se cortan los materiales de aluminio y después maquinados en su forma cilíndrica empleando un torno convencional.



Figura 29. Forma y dimensiones de los lingotes de Al y Al-Cu, fundidas en un horno de crisol removible.



Figura 30. Corte y maquinado de los lingotes de Al y Al-Cu, fundidos en un horno de crisol removible.

8.5. Composición química elemental por chispa

En la **Tabla 9**, se presentan los resultados del análisis de la composición química elemental de los lingotes fundidos, empleando un Espectrómetro de Emisión Óptica por Chispa, modelo Q4 TASMAN, **Figura 31**. Esta es una técnica de análisis químico elemental que utiliza una emisión atómica por chispa y arco eléctrico sobre una muestra metálica, para determinar la cantidad de elementos químicos presentes en la muestra después de exponerse a una fuente de luz interna que emite electrones acelerados a alta potencia. Finalmente, la muestra se vaporiza en la zona analizada, debido a que la superficie se ataca con una chispa eléctrica para alcanzar temperaturas muy elevadas, esta energía excita a los átomos de la superficie, en esta técnica se utiliza como conductor gas de argón. Este puede originarse a través de un arco eléctrico o una chispa que genera una descarga eléctrica, de allí el nombre de la técnica. Durante el proceso se emite una onda característica de la línea espectral atómica, que determina y compara su longitud de onda para obtener la identidad del elemento presente en el material. Mientras que la intensidad luminiscente ultravioleta procedente corresponde a la cantidad de átomos de dicho elemento cada elemento tiene un valor único de la longitud de onda que le caracteriza.

Esta emisión atómica se dispersa con un monocromador, y un dispositivo óptico mide la composición de la luz, y se detectan los compuestos presentes. Además, esta técnica permite determinar datos cualitativos y cuantitativos de varios elementos metálicos presentes en la muestra. El equipo en este sentido proporciona la composición elemental de la aleación analizada en pocos segundos. Los resultados

en la **Tabla 9** muestran la presencia de Cobre, Cu que incrementa de 0.23 hasta 45.92% de acuerdo con la producción del material por fundición. En referencia a la norma, esta aleación se identificó que pertenece a la serie 2xxx de Al-Cu, que tiene como elementos presentes Si (0.1-1.3%), Mn (0.05-1.3%), Mg (0.02-0.8%), Fe (0.12- 1.3%), Ni (0.05-2.3%) y Zn (0.1-0.8%), principalmente. En la **tabla 9** se observa que los elementos de aleación Si, Mn, Mg, Fe, Ni y Zn coinciden y se ajustan a los valores de referencia, de la serie 2xxx siendo que para el cobre (Cu) se incrementa gradualmente de 0.23% (AlCu0), 12.79% (AlCu10), 21.37% (AlCu20), 30.85% (AlCu30), 41.62% (AlCu40) y 54.92% (AlCu60), para proporcionar resistencia mecánica (Gasex, 2024). Y buena resistencia a la fatiga, de aplicación estructural donde se requiera estas propiedades, como en la industria aeroespacial y automotriz.

Tabla 9. Composición química elemental de las fundiciones obtenida por emisión atómica por chispa [%wt].

Aleante	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Ni	Zn	Al-bal.
Al -puro	1.29	0.23	1.07	0.81	0.52	0.023	0.04	96.02
AlCu10	1.124	12.79	0.576	0.756	0.540	0.024	0.583	83.607
AlCu20	0.437	21.317	0.606	0.797	0.558	0.032	0.058	76.195
AlCu30	0.593	30.850	0.492	0.648	0.485	0.062	0.069	66.801
AlCu40	0.388	41.623	0.515	0.507	0.389	0.010	0.051	56.517
AlCu60	0.988	54.920	0.417	0.354	0.425	0.070	0.326	42.50



Figura 31. Ilustración de un espectrómetro de Emisión óptica por Chispa, modelo Q4 TASMAR para determinar la composición química elemental en metales.

8.6. Composición química por Fluorescencia de Rayos-X, FRA

Por otro lado, se emplea la una pistola que emite fluorescencia de Rayos-X Titan S1, para análisis rápidos y precisos en el campo industrial. En la **Tabla 10**, se muestra el análisis elemental por tipo de lingote fundido de aluminio empleando una técnica no destructiva de emisión llamado, Fluorescencia de Rayos-X, **Figura 32**. Los análisis se realizaron aplicando un voltaje de aceleración de electrones de 50 keV, con una corriente de 39 μ A, a una distancia de 3 mm de la fuente del acelerador hasta la superficie de la muestra a estudiar.

Tabla 10. composición química elemental de las fundiciones de aluminio obtenida por fluorescencia de Rayos-X XRF [%wt].

Aleante	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Ni	Zn	Al-bal.
Al -puro	1.22	0.19	0.89	0.72	0.52	0.02	0.15	96.29
AlCu10	1.11	12.59	0.49	0.60	0.51	0.01	0.05	84.69
AlCu20	0.48	21.71	0.58	0.73	0.43	0.04	0.06	76.03
AlCu30	0.35	31.14	0.65	0.86	0.46	0.05	0.08	66.49
AlCu40	0.33	39.81	0.41	0.47	0.57	0.02	0.05	58.39
AlCu60	0.89	52.92	0.44	0.35	0.66	0.02	0.003	44.72

Se utilizó la espectroscopia de fluorescencia de Rayos-X (XRF), técnica que permite determinar las concentraciones de elementos químicos presentes en los materiales de estudio. Con un equipo portátil y muestreo rápido de campo se identifica una gran variedad de elementos químicos en tan solo en segundos, con un límite de detección de hasta 0.002% (20 ppm). La Fluorescencia de Rayos-X utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X que se genera al excitar una muestra con una fuente emisora de electrones. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de orbitales interiores del nivel de energía principal donde se encuentra el electrón en un átomo (K, L, M, N, etc) que son las capas electrónicas. Por ende, los electrones de los orbitales más lejanos al átomo ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones: que es llamada Radiación-X fluorescente o secundaria. Esta radiación de fluorescencia es característica para cada elemento químico, que es una energía característica, como se deduce en la siguiente ecuación;

$$Ee = h\nu - \beta e - (18)$$

Siendo Ee , la energía proyectada en $e - \text{Volts}$, h constante de Plank ($4.1356 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$), ν es la frecuencia, y βe es la energía de enlace del electrón en el átomo. Consecuentemente, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados conocida como longitud de onda (Valentinuzzi, 2008). La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones; es decir, se obtiene

un espectro característico de la intensidad de radiación en función de la energía, iguales a los que se muestran en la **Figura 33**.

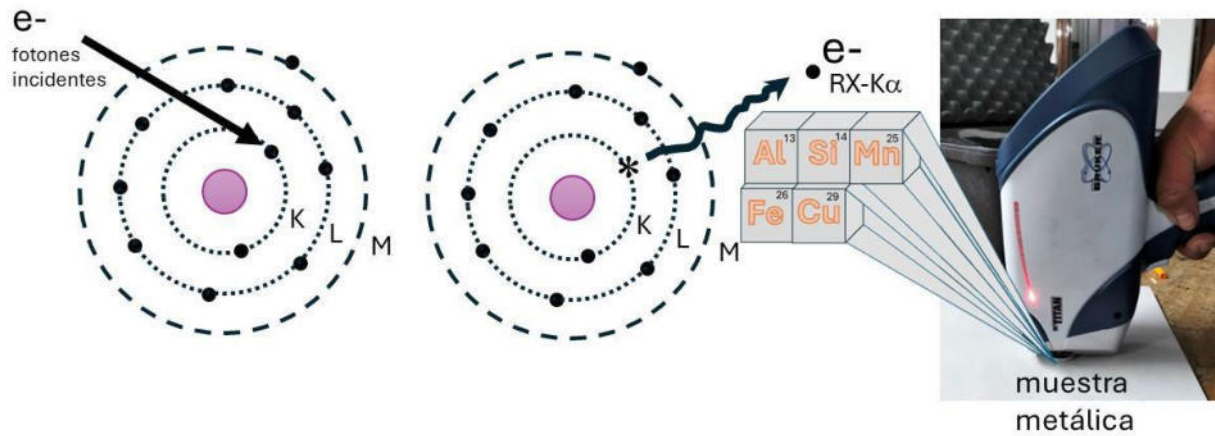


Figura 32. Interacción electrónica de un fotón que es adsorbido por un electrón de la subcapa K, y este sale expulsado con una energía igual al del fotón generando Rayos-X característico, equipo emisor.

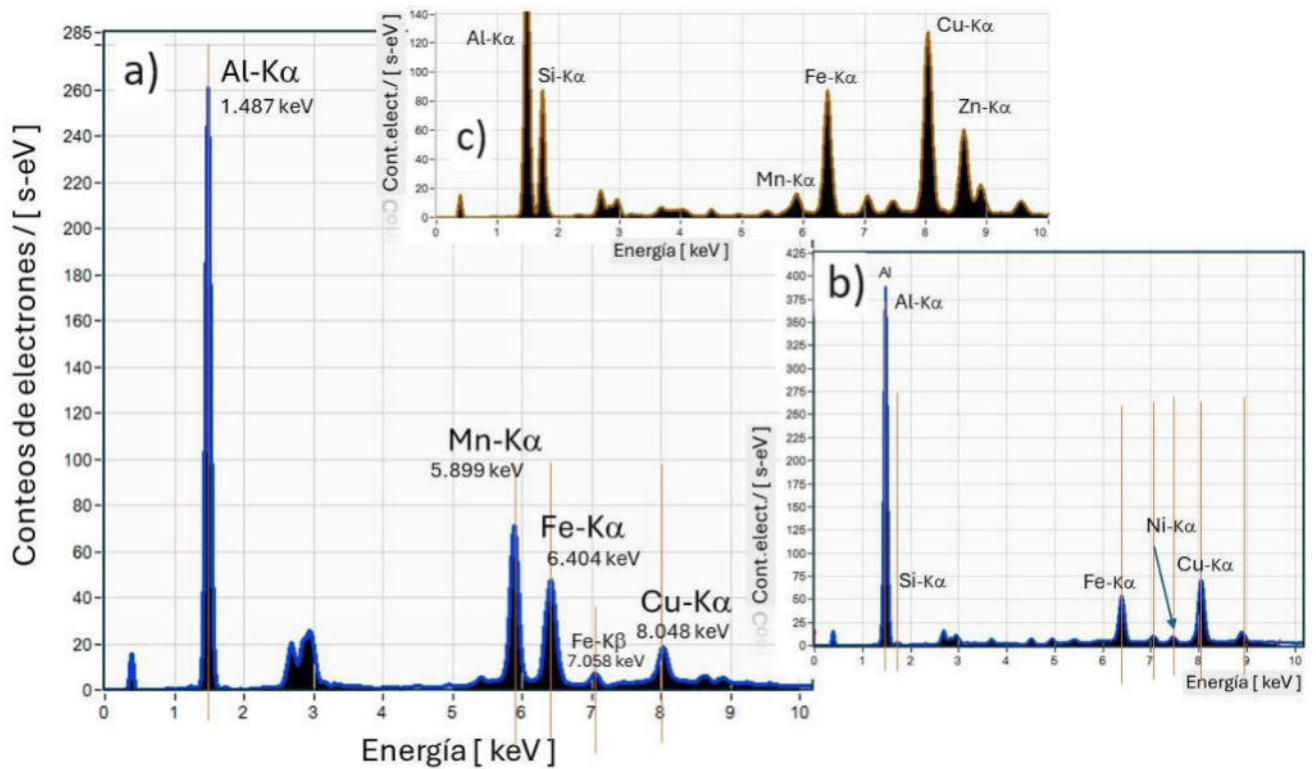


Figura 33. Ilustración representativa de un espectro de Fluorescencia de Rayos-X (FTR) característicos para algunas de las aleaciones de Al-Cu. a) Identificación de elementos para Aluminio de reciclado, b) elementos presentes en el lingote fundido de AlCu20 y c) identificación de elementos de aleación en el AlCu40.

Los resultados de la **Tabla 10** indican la presencia de 0.33-1.22%Si, 0.41-0.89%Mn, 0.35-0.86%Mg, 0.43-0.66%Fe, Ni 0.01-0.05%, y Zn 0.03-0.15%, estos valores se ajustan a la serie 2xxx. Mientras que el cobre se incrementa de 0.19, 12.59, 21.71, 31.14, 39.81, y 52.92%, respectivamente para cada aleación estudiada. La variación de los resultados con respecto a la **Tabla 9**, se refiere a la sensibilidad de cada técnica, se incluye que cambios son aceptables.

8.7. Pruebas de dureza, propiedades mecánicas

La dureza es una propiedad que deben tener los materiales como prioridad para ser útiles, lo que indica el grado de desgaste o su susceptibilidad a la falla, y se relaciona directamente con el rendimiento mecánico que de los materiales a desempeñarse íntegramente durante su servicio industrial. Por lo que los materiales de aluminio estudiados en esta investigación se les ha agregado Cu para mejorar su resistencia mecánica, con 10, 20, 30 40 y hasta 60% en peso, esta prueba de dureza utiliza un indentador que se presiona sobre el área superficial del espécimen por un período de tiempo, con una fuerza dada y midiendo la indentación (huella marcada), el indentador es una bola de acero templado, puede ser un cono o una base piramidal con punta de diamante (Maya, 2022).

8.7.1 Prueba estática de dureza BRINELL

Para este estudio, se determina la dureza de las aleaciones de aluminio fundidas con un equipo durómetro Otto Wolpert Werke como el de la **Figura 34**, para determinar el efecto de la adición del Cu a la estructura atómica del aluminio, para esto se utilizó una prueba comercial estática, conocida como BRINELL, unidades HB. Esta prueba consiste en presionar lentamente con un indentador la superficie de la muestra en un tiempo determinado de 15 segundos, el indentador es una bola de acero tratada térmicamente de 5 mm de diámetro que penetra a una carga determinada de 250 kgf. Esta fuerza es lo suficiente como para provocar una deformación en la superficie, dejando marcada una huella con forma esférica, se mide la marca y se determina la dureza, con la siguiente ecuación; es necesario notar que se realizaron 10 pruebas por lingote. P es la carga del indentador [kg], D_b es el diámetro de la bola de acero [mm] y d diámetro de la huella indentada [mm].

$$HB = \frac{2P}{\pi D_b \left(D_b - \sqrt{D_b^2 - d^2} \right)} - (19)$$

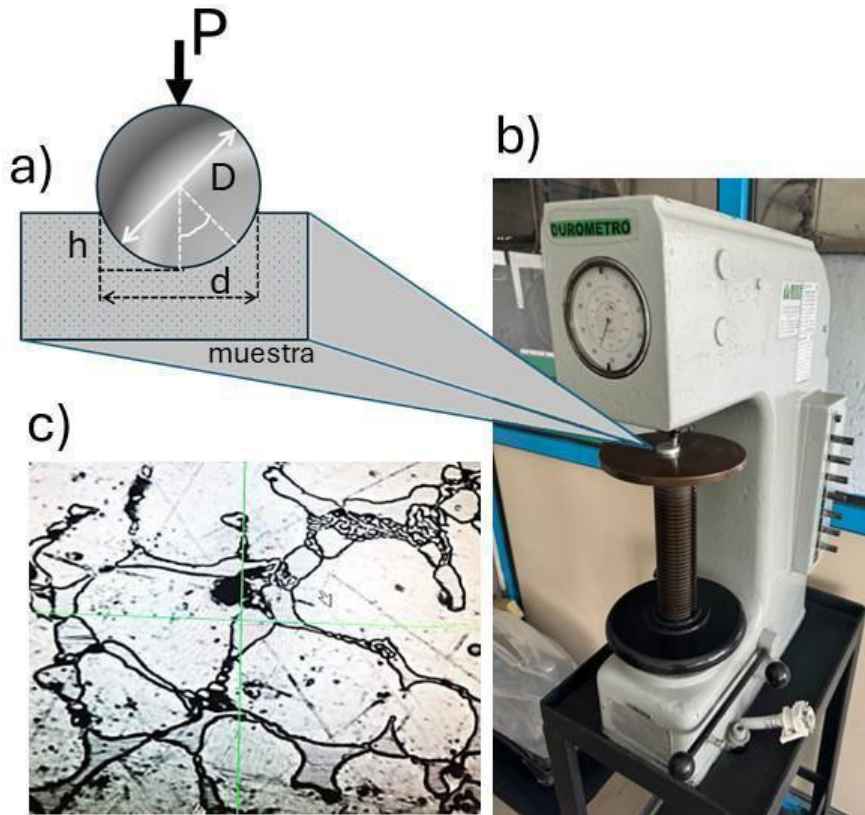


Figura 34. Durómetro para prueba de dureza BRINELL con indentador de bola de acero de 5 mm de diámetro; a) Identador de acero, b) durómetro y c) Prueba en una aleación de aluminio.

La **Tabla 11**, presenta los resultados de dureza HB obtenidos del ensaye BRINELL para los lingotes de aluminio con diferente contenido de cobre, Cu. Se puede observar que la dureza de la aleación base aluminio (bote reciclado sin adición de cobre) es de 76 HB, en presencia de los elementos como Cu, Si, Mn, Mg, Fe, Zn y Ni. Mientras que el aluminio puro (99.999%) tiene una dureza de 60HB según datos de la literatura. Para el caso de la aleación Al-Cu0, su dureza es de 70HB por su baja presencia de Fe, Mg, Zn y Ni. Pero al aumentar el cobre a 10% la dureza es de 86HB, 97HB para 20%, 121HB para 30%, 137HB para 40% y 151HB para 60%. Siendo así, los resultados demuestran que la dureza responde proporcionalmente al momento de la cantidad de adición de cobre en la aleación. Esto es atribuido al cambio de morfología, y estructura la presencia de nuevas fases acorde al contenido de cobre incrementa. La dureza de los productos fundidos corresponde a la distribución de las fases existentes en la estructura del material de aluminio, por lo que la presencia de compuestos de $Al_2Cu-\Theta$ resulta ser más resistente que la fase Al- α .

Tabla 11. Resultados de la prueba de dureza BRINELL HB para cada lingote fundido de aluminio fundido.

ALEACIÓN	AlCu0*	AlCu10	AlCu20	AlCu30	AlCu40	AlCu60
DUREZA, HB	76	86	97	121	137	151

Aluminio 99.99% de pureza tiene una dureza HB de 60.

* Aluminio (bote bebida-reciclada), 1.2%Si, 2.17%Cu, 0.41%Mn, 0.67%Mg, 0.59%Fe, 0.02%Ni, 0.15%Zn.

8.7.2 Prueba estática de micro-dureza VICKERS

Para este estudio, se determina la dureza de las aleaciones de aluminio fundidas empleando la técnica de micro-dureza Vickers HV, para efectos de comparación. Para este propósito, se utiliza una máquina EMCO-TEST (duroskan) como el que se muestra en la **Figura 35**. Esta prueba es similar a la dureza BRINELL, consiste en un indentador de forma piramidal de base cuadrada, y ángulo de punta de 136° (diamante HV0.5) que presiona la superficie de la muestra en un tiempo determinado de 15 segundos, a una carga de 500 N. Esta fuerza induce una deformación en la superficie de metal de aluminio, dejando marcada una huella con una forma rómbica, enseguida se miden las diagonales y se determina la dureza, con la siguiente ecuación;

$$HV = 0.102 * \frac{2F \operatorname{sen} \frac{136^\circ}{2}}{D^2} - (20)$$

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} - (21)$$

Es necesario notar que se realizan 10 pruebas por lingote. La dureza Vickers HV, se expresa como el cociente de la carga aplicada F (en Newton N) y la diagonal promedio de la superficie de la indentación permanente en la muestra. Para calcular la superficie de la indentación piramidal, se obtiene el promedio de las diagonales d1 y d2 (en mm), siendo la superficie de base de las indentaciones Vickers no suele ser exactamente cuadrada. Una huella grande indica que el material es más dúctil. La **Tabla 12**, presenta los resultados de dureza HV0.5 y HV0.25, obtenidos del ensaye VICKERS para los lingotes fundidos de aluminio con diferente contenido de cobre, Cu.

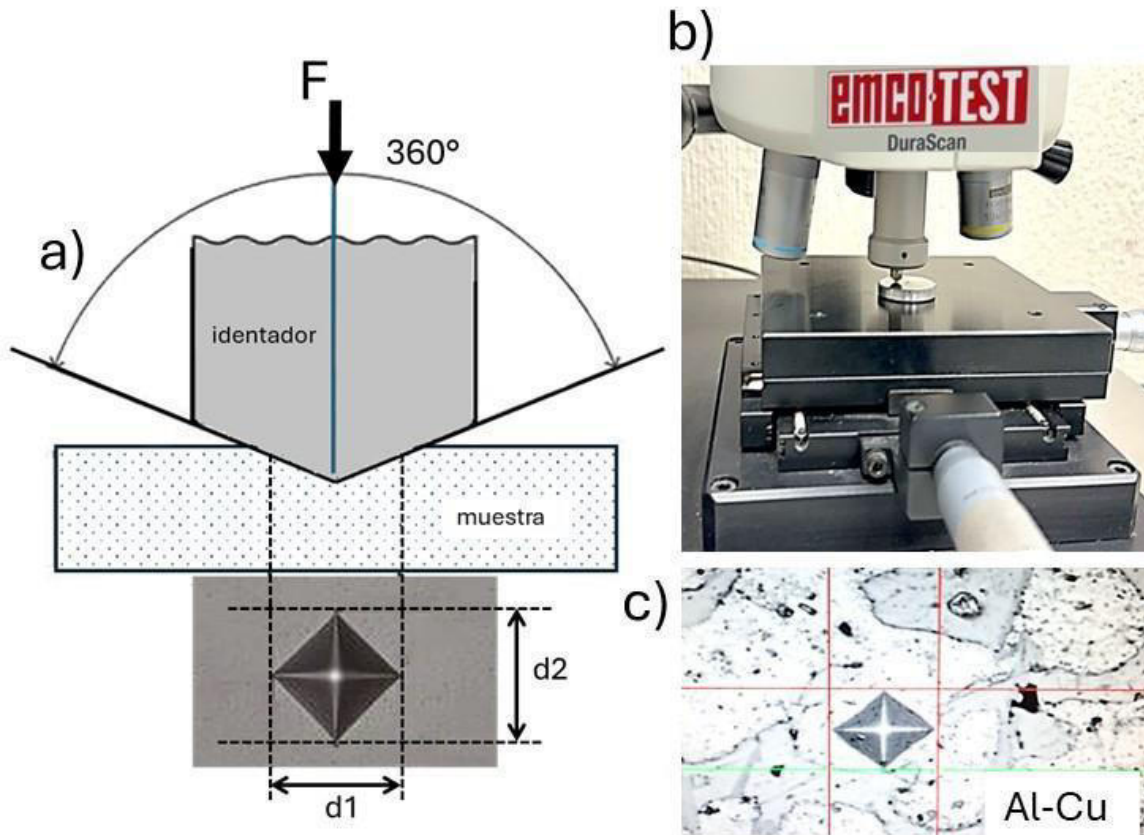


Figura 35. Equipo durómetro para prueba de dureza BRINELL con indentador de bola de acero de 5 mm de diámetro; a) Identador de acero, b) durómetro y c) prueba en una aleación de aluminio.

Tabla 12. Resultados de prueba de dureza VICKERS HV para cada lingote fundido de aluminio fundido.

ALEACIÓN	AlCu0*	AlCu10	AlCu20	AlCu30	AlCu40	AlCu60
DUREZA, HV _{0.5}	85	141	172	196	235	323
DUREZA, HV _{0.25}	98	145	164	187	218	304

Aluminio 99.99% de pureza tiene una dureza HV de 100.

* Aluminio (bote bebida-reciclada), 1.2%Si, 2.17%Cu, 0.41%Mn, 0.67%Mg, 0.59%Fe, 0.02%Ni, 0.15%Zn (literatura). 1.3%Si, 0.2%Cu, 1.1%Mn, 0.8%Mg, 0.52%Fe, 0.02%Ni, 0.04%Zn (experimental).

HV0.25 se refiere a la carga aplicada durante la prueba, que es de 0.25 kg. Mientras que, HV0.5 utiliza una carga de 500g. Se puede observar que la dureza de la aleación sin la adición de cobre oscila de 85 a 98 HV, en presencia de bajo contenido de Cu, Si, Mn, Mg, Fe, Zn y Ni, principalmente. Se compara con la HV del aluminio puro 99.999% tiene una dureza de 100 unidades HV, Pero siendo este mayor por los elementos de aleación al aumentar el cobre a 10% la dureza aumenta a entre 141-145 HV, 164-172 HV para 20%, 187-196 HV para 30%, 218-235 HV para 40% y 304-323 HV para 60%. Estos resultados, demuestran que la dureza HV aumenta proporcionalmente a la adición de cobre en la matriz de aluminio. Esto se atribuye a la presencia de nuevas fases con contenido de cobre. La dureza de los productos fundidos corresponde a la distribución de las fases existentes en la estructura del material de aluminio, por lo que la presencia de compuestos de $Al_2Cu-\emptyset$ resulta ser más resistente que la fase $Al-\alpha$.

8.8. Determinación de las propiedades microestructurales, asociadas a la estructura atómica

8.8.1 Detalles de la estructura atómica

Es importante notar que el aluminio que se estudia en la presente investigación, proviene de metal recuperado del reciclaje de bote para bebidas, esto para tener un estándar y control de la composición química, y así adicionar una cantidad de cobre determinada a la estructura del aluminio, consiguiendo los siguientes beneficios; i) mejora la resistencia a la corrosión, ii) buena conductividad térmica, y conductividad eléctrica, iii) mejor relación resistencia/peso, iv) baja densidad y alta resistencia mecánica, v) resistencia a la fractura, vi) resistencia a la fatiga, vii) elasticidad, viii) buena maquinabilidad, ix) reciclabilidad y x) moldeabilidad y xi) mejor respuesta tratamiento térmico. Estos beneficios hacen a las aleaciones Al-Cu ideales para su uso en los sectores como la aeronáutica, automotriz, y la industria militar.

Las características del aluminio y sus aleaciones; proporcionan ligereza, buena resistencia mecánica, por su baja densidad (2.70 g/cm^3) que satisfacen las actuales demandas que se exigen como un material estructural y debido a que algunas de sus aleaciones presentan un aumento de la resistencia mecánica de forma considerable. En este sentido, la aleación 2xxx, es muy utilizada en la industria aeronáutica como parte del material estructural del fuselaje, puertas y alas de aviones, donde la combinación de ligereza y la alta resistencia mecánica son factores de mucha importancia.

En referencia, de las propiedades físicas del aluminio caben resaltar, su alta conductividad térmica y eléctrica, esta última la hace adecuada para muchas aplicaciones dentro de la industria eléctrica, su baja temperatura de fusión unido a su elevada temperatura de ebullición hace al aluminio idóneo para la fundición. El aluminio cristaliza en una red cristalina cubica centrada en las caras FCC (FCC por sus siglas en inglés fase cubic center) y no sufre cambios alotrópicos, lo que le confiere una alta plasticidad,

aunque las propiedades mecánicas varían enormemente según sean los elementos aleantes y los tratamientos termo-mecánicos a los que se haya sometido. El aluminio tiene una temperatura de fusión de 660 °C, lo que limita mucho su aplicabilidad a temperaturas elevadas. Algunos de los mecanismos por los que se consigue aumentar la resistencia mecánica son por tratamiento térmico, deformación, aleación y dispersión de precipitados de segunda fase, estos procesos en ocasiones disminuyen la resistencia a la corrosión. Las aleaciones de aluminio suelen contener Cu, Mn, Mg, Si, Zn y Ti en proporciones variables entre el 0.1% y el 5 %. La aleación 2xxx tiene como principal elemento aleante al Cu, aunque con relativa frecuencia también se encuentran presentes otros elementos, tales como Mg, Mn, Fe y Si que contribuyen de forma considerable en sus propiedades mecánicas es por esto que a continuación se detalla la influencia de estos elementos en las aleaciones (Asbhy y Jones, 2012).

El COBRE: un elemento principal que aumenta de manera notable la resistencia a la tracción y la dureza, por la precipitación de la fase θ Al₂Cu tanto en condiciones de extrusión como de tratamiento térmico. Las aleaciones que contienen de 2 a 6% Cu tienen una respuesta más efectiva al tratamiento térmico, reduce la resistencia a la corrosión y en ambientes muy específicos en ciertos tipos de aleaciones, induce a la corrosión bajo tensión. También reducen la resistencia al agrietamiento en caliente y la colapsabilidad en piezas fundidas (Franco, 2017).

Magnesio (Mg). En combinación con el cobre, el magnesio forma compuestos que mejoran la resistencia mecánica, aumenta la resistencia a la fatiga. El Manganeso mejora la tenacidad, actúa como afinador grano. El Zinc segrega en pequeñas cantidades para mejorar la resistencia mecánica. Por otro lado, la solución sólida de aluminio es α : su número de coordinación es 12, tiene cuatro átomos por cada celda y tiene una estructura cristalina FCC considerada una de las que tiene mejor empaquetamiento por su alto factor de llenado (0.74). Se cristaliza en forma de dendritas en la base de la red cristalográfica del aluminio, el plano de llenado más cercano es {111} y la dirección de llenado más cercana en esta red es. Los átomos están unidos por enlaces metálicos con baja energía de unión (105-837 kJ/mol) y cada uno de estos al ceder tres electrones de valencia a un gas electrón forma iones de aluminio que rellenan los vacíos que hay en la red cristalina. Bajo una tensión externa los iones de aluminio pueden cambiar de posición en la red cristalina impidiendo la fractura de la unión interatómica que a nivel macroscópico se traduce como una deformación plástica del metal. De los doce sistemas de deslizamiento que posee el aluminio, el sistema {111} < 110 > es el que produce deformación plástica permanente (Millán, 2016). El silicio en niveles adecuados mejora la fluidez. El hierro es una impureza muy común en el aluminio.

8.8.2 Solidificación y detalles microestructurales

En acuerdo con el trabajo de *Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado de Millán Delgado*, se discute que los diagramas de fases son una herramienta muy útil para comprender los efectos que produce la solidificación sobre la microestructura de una aleación y la variación en la concentración de los aleantes, así como la temperatura de solidificación y el tipo de procesamiento térmico (Millán, 2016). Adicionalmente, los diagramas de fase ayudan a: 1) determinar y cuantificar las fases de equilibrio que se forman, y su temperatura de disolución, 2) determinar la temperatura en la que inicia la fase de fusión y de solidificación para identificar la ruta de solidificación, 3) establecer las temperaturas apropiadas para la fusión y vaciado, y aplicación de tratamientos térmicos y por último, 4) identificar la cantidad máxima de adición de los aleantes para evitar la cristalización de partículas gruesas primarias. La metalurgia básica del aluminio con poca adición de cobre, el cual se explica en el diagrama de equilibrio Al-Cu, en vez de precipitar la fase Al- α precipita la fase θ : Al₂Cu, como se observa en la **Figura 36**.

Esta es una forma alternativa de reforzar el aluminio mediante la dispersión de elementos reforzantes como el cobre, o con varios tipos de materiales cerámicos, por ejemplo: SiC, Al₂O₃, MgO, B₄C, entre otros. Es notorio que con mínimos adiciones de Cu se ofrece un aumento en considerar la resistencia mecánica por efecto de la solución sólida y además por endurecimiento por precipitación de la fase Al₂Cu. Las aleaciones que puede tener de 2 al 6 % de Cu, presentan mejor respuesta a los tratamientos térmicos. Desafortunadamente la presencia de cobre en exceso en la matriz de aluminio reduce la resistencia a la corrosión, además su concentración debe ser limitada debido a que reduce la capacidad de moldeo, por su excesivo endurecimiento. El aluminio forma una variedad de compuestos ricos con el Cu a medida que aumenta su concentración (fase θ , η y ζ) para las concentraciones estudiadas, las cuales se muestran en el diagrama de fases de la **Figura 36**, donde se muestra que hay una disolución de Cu en Al, no obstante, se presentan compuestos intermetálicos, es por esto, por lo que se considera la importancia de este diagrama de Al-Cu. En la **Figura 37**, se presenta una representación gráfica de las trayectorias de solidificación de las aleaciones formadas para cada cantidad de cobre agregada al sistema de aluminio (Franco, 2017).

En este sentido, en la **Figura 37** se muestra las estructuras obtenidas durante el proceso de solidificación como resultado de la fusión, tal como se observó en el microscopio óptico. La aleación a_1 es el material de referencia (material de reciclado de botes de bebida) sin alear que funde alrededor de 660°C y tiene 94% Al y el resto 2.3%Cu, Mn (0.5%), Mg (0.7%), Fe (0.7%) entre otros, durante el enfriamiento a temperatura ambiente, se forma una estructura de Al- α con una dureza HB de 76 unidades y se compara con la del Al

puro-99.999% su dureza es de 60HB (según la literatura). Sin embargo, al adicionar 10% de Cobre al aluminio (5.4 mol Cu y 127.3 mol Al) aleación α_2 , disminuye ligeramente el punto de fusión a 600°C por la pendiente de la reacción eutéctica que promueve la precipitación de la mezcla eutéctica fase Al- α + Al₂Cu θ , se observa claramente una fase oscura en las imágenes que indica la presencia de precipitados intermetálicos de Al₂Cu, la dureza incrementa a 86HB y 145HV en promedio, con composición de 12.79%Cu. Para la aleación α_3 se agrega 20% Cu (10.2 mol Cu y 120.4 mol Al) la temperatura de fusión de esta mezcla es de 570°C (concentración muy cercana al punto eutéctico 548.2°C y 17%Cu), y precipita la fase eutéctica con mayor dispersión de la fase θ , las micrografías muestran los precipitados de cobre en fase oscura. Se alcanza una dureza de 97HB y 167HV en promedio, para 21.317%Cu.

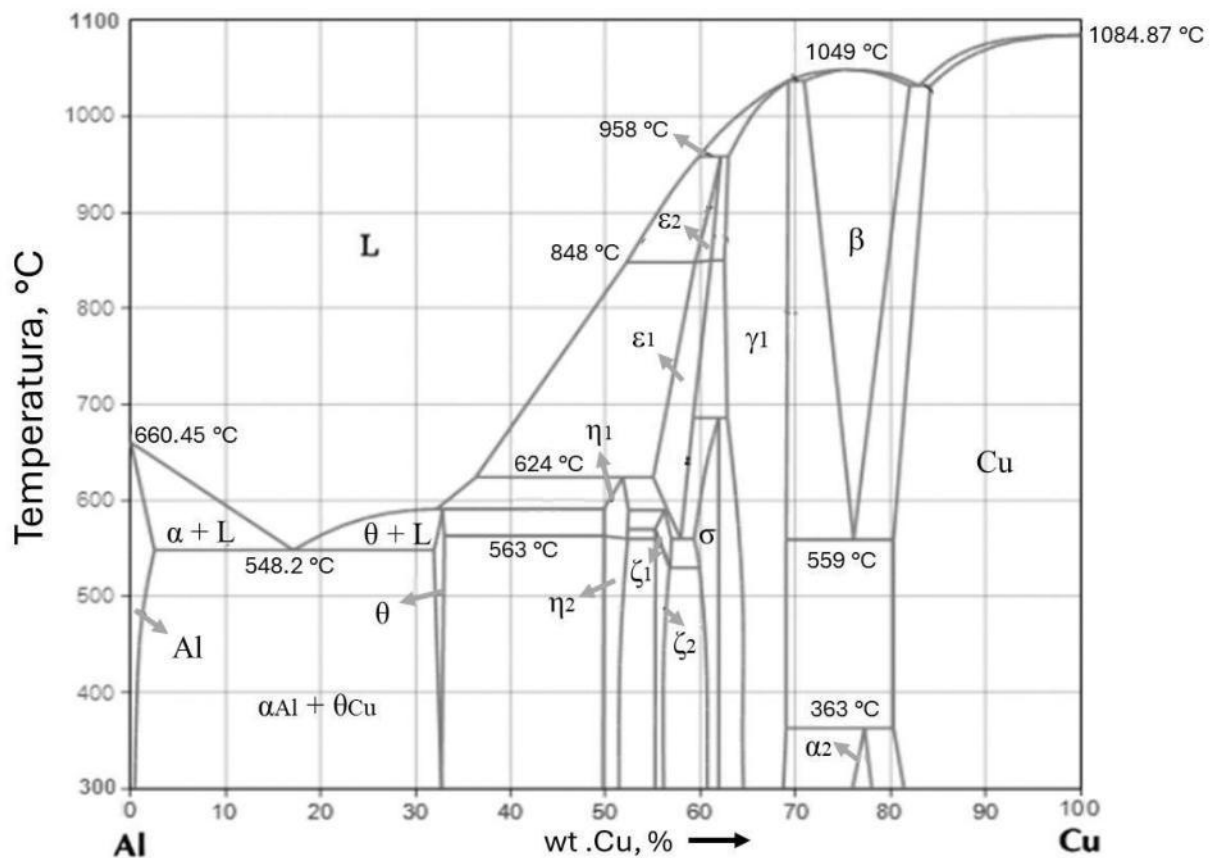


Figura 36. Ilustración del diagrama de fases Al-Cu, donde se muestran fases y compuestos intermetálicos (Franco, 2017).

Para α_4 que representa la aleación de solidificación de aluminio con 30% Cu (15.2 mol Cu y 118.7 mol Al) y se funde a la temperatura de 590°C, al solidificar se presenta la fase eutéctica pero con mayor dispersión de la fase θ . Las micrografías muestran precipitados abundantes de Al₂Cu en fase oscura, esta

mezcla promueve un incremento de la dureza a 121HB y 191HV en promedio, para 30.85%Cu. Para las concentraciones mayores a 40%, por ejemplo, la aleación **a₅** y **a₆** para 40% y 60% respectivamente. Para 40%Cu (20.3 mol Cu y 119.8 mol Al) se presenta una transformación de fase, de una mezcla eutéctica a una mezcla peritética de $\theta + \eta$, esta mezcla funde a la temperatura de 624°C. La nueva fase provoca un aumento de la dureza hasta 137HB y 235HV, para 41.623% Cu. Para el caso de agregar 60%Cu (27.6 mol Cu y 108.5 mol Al) teóricamente se funde a la temperatura cercana a los 1000°C, se agregan las concentraciones en las porciones descritas anteriormente y por lapsos de tiempo, se aumenta la potencia del horno. Los resultados obtenidos en esta investigación, indican que se lleva a cabo una transformación de fase (η) con una dureza de 151HB y hasta 323HV. La composición indica que se alcanza únicamente 54.92%Cu, que se estabiliza en una mezcla de $\eta + \zeta$, El propósito establecido para llegar a la fase γ , no se ha conseguido debido a la cantidad restante de Cu, que se ha difundido a la escoria, de esto, se deduce que faltó más potencia al horno o más tiempo de fusión, observación que será sugerida experimentalmente para trabajos de investigación a futuro.

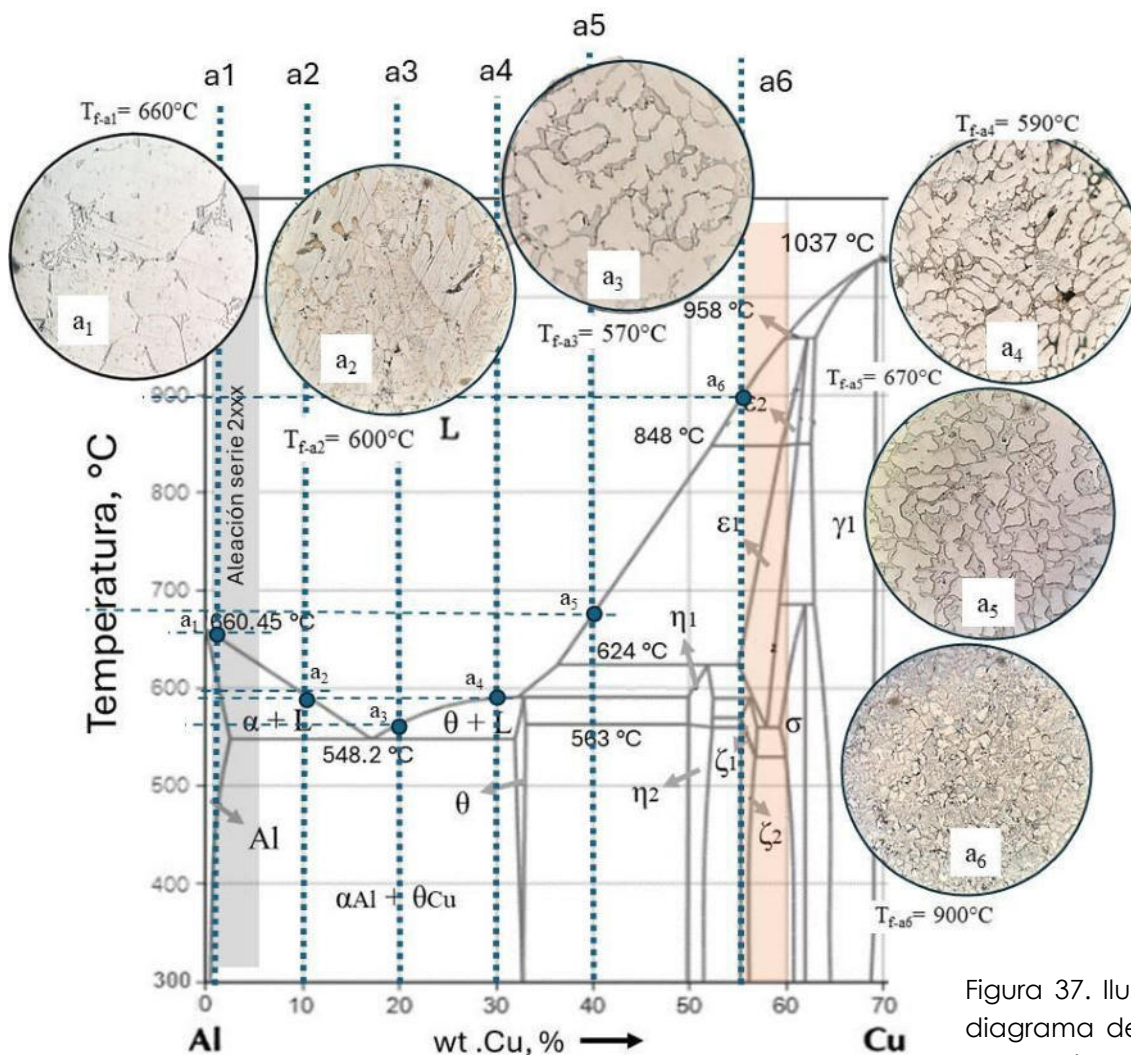


Figura 37. Ilustración del diagrama de fases Al-Cu, se muestran fases y compuestos intermetálicos.

En general, entre las regiones que componen el diagrama de fases de las aleaciones Al-Cu se encuentran: 1) fases formadas por solidificación de soluciones sólidas primarias α -aluminio y θ -cobre, 2) una fase mixta ($L+\alpha$, $L+\theta$) que da como resultado una mezcla ($\alpha+\theta$) que es el dominio eutéctico, donde se ubica la fase líquida y la fase solución sólida ya sea para la composición de aluminio o de cobre (8-32%Cu), 3) la curva liquidus es la línea superior que indica la temperatura o punto invariante a la cual la aleación se funde y 4) curva solidus (línea inferior) que indica la mayor temperatura a la cual la aleación se solidifica. La transformación de líquido (l) a sólido (s) en las aleaciones Al-Cu se produce mediante una reacción eutéctica la cual es posible observar en el diagrama de fases en el punto eutéctico donde se presenta la siguiente transición: $L \rightarrow \alpha + \beta$ (*Figura 36 y 37*). Estas *Figuras*, muestran la microestructura que resulta al variar la concentración de cobre pasando de una aleación hipoeutéctica a hipereutéctica. Las aleaciones hipoeutécticas suelen tener una estructura de red compuesta por cristales o granos gruesos provenientes de la solución sólida de aluminio (región blanca) rodeados por una segunda fase (regiones grises) (*Figura 37*), mientras que, las aleaciones eutécticas e hipereutécticas se caracterizan por tener una estructura conformada por la mezcla entre redes de granos y precipitados de segunda fase con dispersión de Cu/Al₂Cu. Por lo que la microestructura de las aleaciones Al-Cu habitualmente están compuestas por una red continua de fases secundarias, entre las cuales se encuentran las fases intermetálicas que pueden influenciar las propiedades mecánicas del material dependiendo de la concentración de los aleantes presentes. Las fases intermetálicas más comunes en estas aleaciones se muestran en los diagramas de fase de la *Figura 37* (Millán, 2016).

La *Figura 37* muestra una gran variedad de estructuras que se van modificando para las diferentes aleaciones de Al-Cu fabricadas por fundición en horno de crisol removible. Ejemplo, **a1** es la aleación que se designa para el material que proviene de la fusión de bote de bebida que tiene 2.33% Cu, 1.5% Si, 0.464% Mn, 0.678% Mg y 0.679% Fe, principalmente, designado en este trabajo como Al-Cu0, no se agrega cobre a su sistema). Este material de reciclado funde a la temperatura de 660 °C, energía requerida para transformar la materia del estado sólido al estado líquido, y después aumentar a 7750°C para remover la escoria y vaciar en un molde permanente. La estructura se caracteriza como ya se mencionó por tener una estructura con fases primarias de precipitados de Al- α , permitiendo disolver sin dificultad la cantidad de átomos de Cu (~2.3%) en la estructura de Al, permitiendo la mezcla, en tanto que adiciones mayores hasta por 6.8%Cu como la aleación de la serie 2xxx. En esta condición el Al no permite disolver más cantidad de Cu, por lo que los átomos de cobre son expulsados formando un constituyente de segunda fase llamado mezcla eutéctica fase Al₂Cu (fase θ) en baja proporción y Al- α , como se ve a otras concentraciones de cobre.

En la **Figura 38** se muestra una ilustración de la formación de las fases para este tipo de estructuras, que ocurre cuando los aleantes tienen una concentración superior a su límite de solubilidad sólida en el Al durante el enfriamiento. En este proceso resultan los constituyentes de fases secundarias tales como precipitados puros del aleante principal, y la dispersión de intermetálicos como la fase Al_2Cu . La formación de esta fase resulta cuando el aleante Cu excede su límite de solubilidad y en consecuencia la red cristalina del aluminio no puede acomodar más átomos del aleante obligando a los átomos restantes del aleante no disueltos a formar una nueva fase de diferente estructura cristalina en la que puedan acomodarse con mayor facilidad ya sea θ , η , o ζ . El límite de solubilidad sólida varía para cada aleante, aunque en la mayoría de los casos es bajo, debido a que ningún metal se mezcla completamente con el aluminio cuando éste se encuentra en estado sólido.

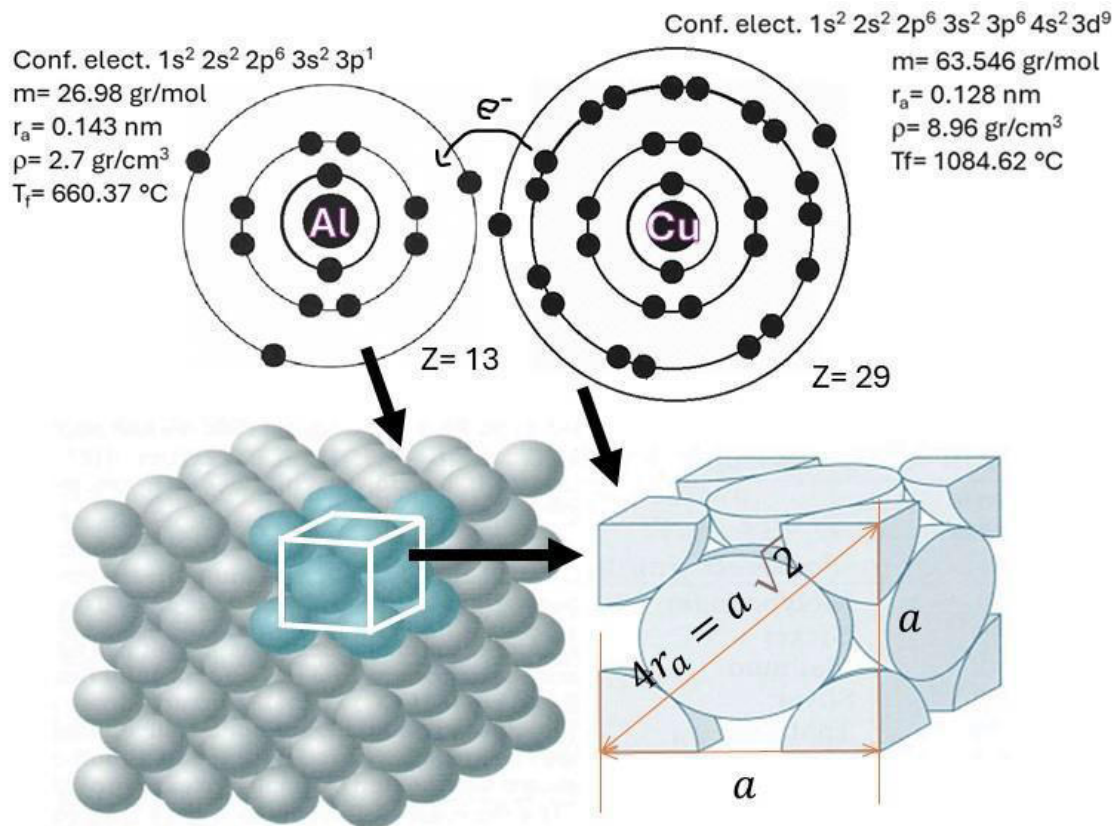


Figura 38. Configuración electrónica y su estructura atómica centrada en la cara, (fcc), del aluminio y del cobre.

Este proceso de aleación se le conoce como endurecimiento por solución sólida, una forma de darle propiedades mecánicas es endurecer al aluminio mediante la adición de partículas metálicas como el cobre. Estas partículas se disuelven en metal en el estado líquido y al solidificar se precipitan formando compuestos o fases. Como es el caso la adición de cobre (Cu) al aluminio (Al) para hacer la aleación Al-

Cu. El Aluminio tiene una estructura atómica cúbica centrada en las caras (fcc de sus siglas en inglés) y radio atómico de 0.143 nm, mientras el cobre tiene un radio atómico ligeramente menor de 0.128 nm con una estructura igual al del aluminio (fcc), estos elementos difieren entre sí, en sus radios atómicos del 10.48%, el cobre tiene mayor densidad que el aluminio del 37%, 39% más del punto de fusión y 57.5% más de masa atómica, como se indica en la **Figura 38**. En tanto que; la literatura indica que para que se logre la formación de soluciones sólidas sustitucionales ambos materiales deben ser parecidos tanto químicamente como físicamente; y cumplir con los siguientes criterios; es decir,

- *El tamaño atómico de los metales aleantes no deben diferir por más del 15%, la aleación de Al-Cu cumple con este requisito.*
- *Las características químicas deben ser similares, no se cumple por completo.*
- *Tener un mismo sistema de cristalización, se cumple para esta aleación.*

En este sentido, puede interpretarse que los átomos de cobre podían reemplazar a los átomos de aluminio para formar una aleación de solución sólida de sustitucional, pero con cierto grado de solubilidad. De acuerdo con el diagrama de fases (**Figura 36**), a la temperatura ambiente por lo que el aluminio podrá disolver hasta el 5.65% de Cu en la zona α -primaria, a mayor concentración de Cu hasta 53.5 y 53.7 % de Cu precipita una fase de Al_2Cu (fase θ), y este diagrama presenta una configuración de fases más complicada por arriba del 50% de Cu, por otro lado, otra de las intenciones de esta investigación al agregar hasta 60% de Cu, para lograr la formación del intermetálico (η_2), no se logró porque se requería de aumentar la potencia del horno o mayor tiempo de fusión. En el diagrama de fases de la **Figura 37** se observa una reacción eutéctica a 548.2°C a 33%Cu, otra a 557°C con 88% Cu y también una reacción peritética a 624°C (71%Cu).

Los compuestos intermetálicos derivados de reacciones de segunda fase provienen de las interacciones eutécticas y/o peritéticas; que dependen de la transición del estado líquido al estado sólido y su mecanismo de nucleación de cristales en el líquido, seguido de formación y crecimiento mediante la adición de más materia líquida. La fuerza impulsora para que ocurra este cambio se puede obtener considerando el cambio en la energía libre ΔG° durante la solidificación. Considere un volumen determinado de un líquido que solidifica por debajo de la T_m por un intervalo de temperatura ΔT . Si se forma un embrión sólido de (radio r), su energía libre de activación ΔG del sistema se reducirá a la mínima requerida por unidad de volumen tal que pueda ocurrir la cristalización tal como lo indica la ecuación siguiente;

$$\Delta G = -\left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3 \Delta G_v + \pi r^2 \gamma_s - (22)$$

Esta ecuación calcula la energía mínima requerida para formar un cristal sobre la interfase sólido/líquido (μ_s) por unidad de área. Entonces, una partícula sólida con radio $r < r_c$ podrá crecer en condiciones muy específicas, estas partículas se conocen como embriones, y se volverán a disolver en el estado líquido mientras no se disminuya la energía libre del sistema (requiere de un enfriamiento rápido), en tanto que las partículas con $r > r_c$, se conocen como núcleos, y estos crecerán disminuyendo la energía del sistema hasta formar cristales aglomerados que se transforman en fases.

$$r_c = \frac{2\gamma_s}{\Delta G_v} - (23)$$

Por lo tanto, para pequeños intervalos de subenfriamiento, r_c es mayor, se tiene una baja probabilidad de que se forme un embrión en el líquido metálico en un tiempo determinado, debido al movimiento térmico aleatorio entre los átomos. Por lo tanto, es probable que solo exista una cantidad baja de núcleos por unidad de volumen en el líquido. Pero altos rangos de subenfriamiento, r_c resulta menor y la probabilidad de formar un núcleo en esta condición es alta. Pero una vez que se forman estos núcleos estables en el líquido, pueden crecer a expensas del líquido circundante hasta que todo el volumen es sólido. En seguida se observa que la mayoría de los núcleos cristalinos crecen más rápidamente a lo largo de ciertas direcciones cristalográficas, lo que hace que se desarrollen cristales en forma de espiga, mientras que otros pueden ramificarse lateralmente que dan lugar a cristales con una matriz tridimensional conocidas como dendritas, que son como las que se observa en el diagrama de enfriamiento de la **Figura 39**. Un crecimiento dendrítico es el resultado del crecimiento celular en el que desarrollan protuberancias laterales, en tanto que un enfriamiento acelerado se manifiesta un crecimiento con mayor rapidez, estos cristales crecen proyectándose frontalmente que avanzan rápidamente, y desarrollan ramificaciones con geometrías complejas.

En este sentido, para partículas primarias que tienen alta energía: se refiere a la fase sólida o núcleos, dendritas que se forman primeramente y se desprenden del metal líquido (fase-L) seguidas por las de menor energía, siguiendo un mecanismo de nucleación y crecimiento de la fase primaria. En este sentido como resultado de la solución sólida sustitucional, la **Figura 39** muestra claramente la simulación de fases para la trayectoria de solidificación de la aleación **a2/90-10** (Al-10%Cu), este mecanismo fue descrito brevemente en secciones anteriores. De aquí se deduce que; a la temperatura T1, temperatura que se encuentra por encima de los 660°C, que es la T-fusión del Al, el metal fundido en esta región es 100% líquido que contiene posiblemente 90%Al y 10%Cu disuelto.

1) La fase Al- α inicia su precipitación desde la región bifásica L+Al α (T2) alrededor de los 570°C y después se transforma por el mecanismo de difusión durante su solidificación a un constituyente policristalino con morfología gruesa de cristales equiaxiales y posibles dendritas de la fase Al- α , y con una dispersión heterogénea de partículas secundarias del posible compuesto intermetálico Al₂Cu, que es una fase refinada con partículas dispersas de θ (T4). 2) Este constituyente ocurre su precipitación por una reacción eutéctica (mezcla de $\alpha + \theta$ Al₂Cu): lo que es el resultado de un intermetálico de Al₂Cu o cristal metálico que se forma durante la solidificación lenta en equilibrio, principalmente este tipo de compuestos se presenta para aquellas aleaciones conocidas como hipoeutécticas. Estos compuestos pueden clasificarse en dos categorías como solubles e insolubles. Los solubles son aquellos compuestos que se disuelven al realizar un precalentamiento al lingote fundido, previo a un proceso de deformación o durante un tratamiento térmico. 3) Existen unos dispersoides en la matriz metálica que se presentan por la precipitación de aleantes de solubilidad limitada en el aluminio sólido, los cuales son imposibles de disolverse una vez que estos se precipitan.

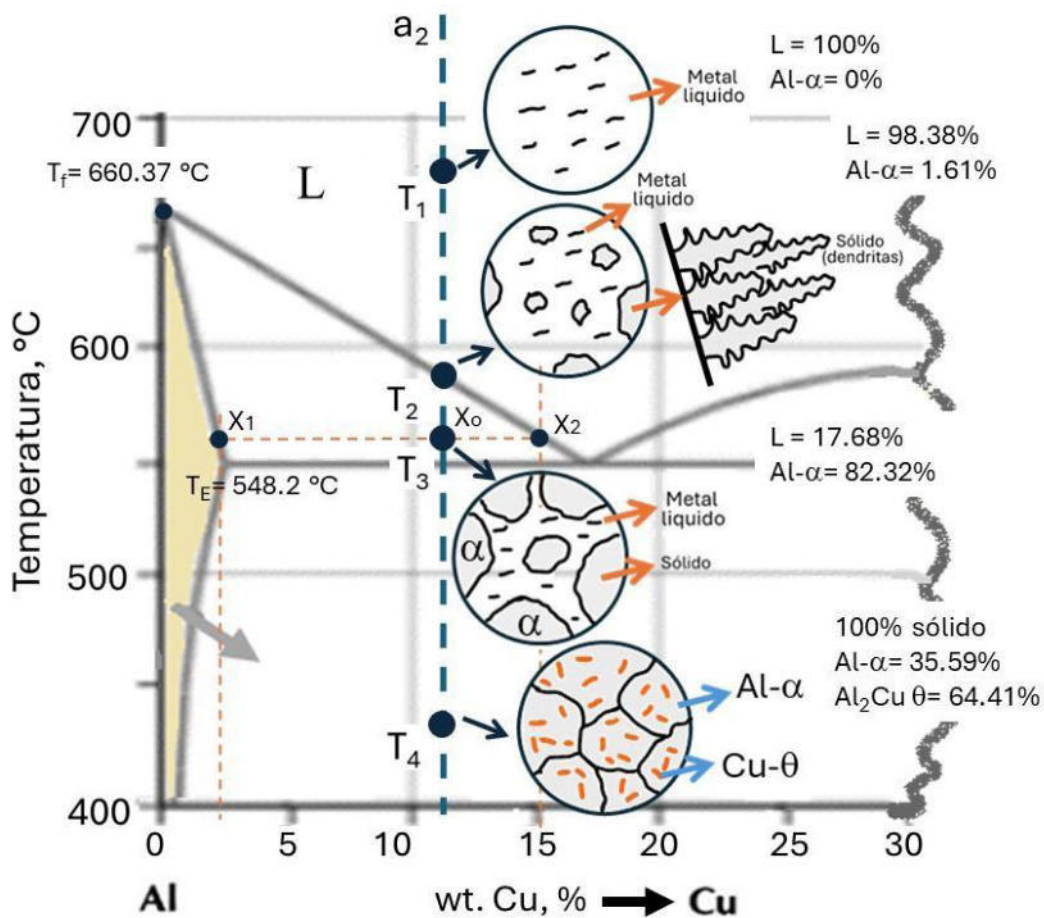


Figura 39. Diagrama de fase Al-Cu que muestra la solidificación de una aleación 90Al-10Cu, simulando la microestructura a varias temperaturas.

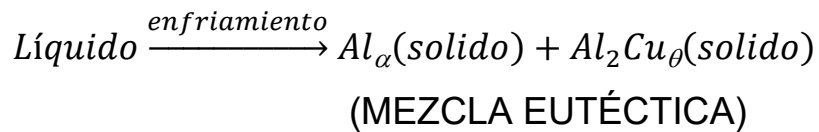
Se determinó la composición química de las fases de la aleación 90Al-10Cu que se representa por la línea vertical **a2** del diagrama de equilibrio de la **Figura 39**, posicionándose en la región bifásica de L+Al α a la temperatura T2. Se traza una línea horizontal hasta los límites de la línea del Solidus, y Liquidus, respectivamente, se llevan las intersecciones al eje de las abscisas X, donde se lee el % en wt. del Cu. Método llamado regla de la palanca, el % de fases para cada temperatura siguiendo la solidificación para el caso de la aleación **a2**, se muestran en la **Tabla 13**, utilizando la ecuación indicada a continuación.

$$\%Al_{\alpha}(solido) = \left(\frac{X_2 - X_0}{X_1 - X_2} \right) * 100 - (23)$$

$$\%liq. (metal - fundido) = \left(\frac{X_0 - X_1}{X_1 - X_2} \right) * 100 - (24)$$

Tabla 13. Cálculo del porcentaje de las fases presentes para cada temperatura, para la aleación **a2** (Al-10%Cu) obtenido por la regla de la palanca.

TEMPERATURA (°C)	T1	T2	T3	T4
FASE LÍQUIDA, %	100% líquido	98.38% líquido	17.68% líquido	0% líquido
FASE SÓLIDA, %	0% sólido	1.61% sólido Al- α	82.32% sólido Al- α	100% sólido
	88%A 12%Cu	—	—	35.59% Al- α 64.41% Al ₂ Cu θ



Finalmente, en esta investigación se fabricaron diferentes lingotes de Al-Cu con un contenido de cobre hasta el 60% para obtener la fase ζ_2 , por lo que el diagrama de fases binario del sistema Al-Cu es seccionado en la parte fundamental de estudio. Generalmente, a través de la simulación experimental, **Figura 40**, se encontró que la morfología de la microestructura de las aleaciones puede describirse como polifásica, coexistiendo la fase α , rica en aluminio, y la fase θ , correspondiente a la fase de los compuestos intermetálicos Al₂Cu, más dos fases nuevas en la región η y ζ . Las mismas se distribuyen de diferente manera, de acuerdo con el diagrama de fases y la velocidad de solidificación, en función a la composición de las aleaciones de aluminio para las siguientes condiciones; **a1** no adición de Cu, el cobre viene agregado como parte de la manufactura del bote de bebida, **a2** (Al-10%Cu), **a3** (Al-20%Cu), **a4** (Al30%Cu), **a5** (Al-40%Cu) y **a6** (Al-60%Cu). Se concluye que la disminución de la fracción de la fase α , a expensas de la región interdendrítica se manifiesta en la disminución del espaciamiento dendrítico secundario al aumentar el contenido de cobre.

En la **Figura 41** y **42** se presentan las micrografías a 500x y 400x de las diferentes aleaciones de Al-Cu estudiadas. En las micrografías se pueden observar las fases presentes, la solución sólida Al- α y la fase intermetálica Al₂Cu- θ), así como la estructura de la mezcla eutéctica. Las dos fases características de la aleación Al-Cu son: la solución sólida Al- α rica en aluminio en la región dendrítica, la fase intermetálica Al₂Cu en la zona interdendrítica de las aleaciones Al-10% Cu y Al-20%; así como el de referencia Al-0%Cu, estas micrografías se muestran en la **Figura 41**. Como se espera de acuerdo con lo calculado por los diagramas de fase y trayectoria de solidificación (**Figura 42**), indica que, para el incremento del cobre en las aleaciones, aumenta la fracción de fase θ presente, pero aún predomina la fracción de fase α para Al-30%Cu. En la **Figura 42**, se presentan las micrografías para la aleación Al-30% Cu, Al-40% y Al-60%, donde se observa una distribución gruesa de la fase θ . Además, se observa la formación de una nueva fase (η), en la literatura no hay información de esta fase, mezclando Al-Cu. Se ha demostrado que esta microestructura es producto de la nucleación y crecimiento independiente de las dos fases eutécticas durante la solidificación rápida y el crecimiento eutéctico durante la solidificación lenta.

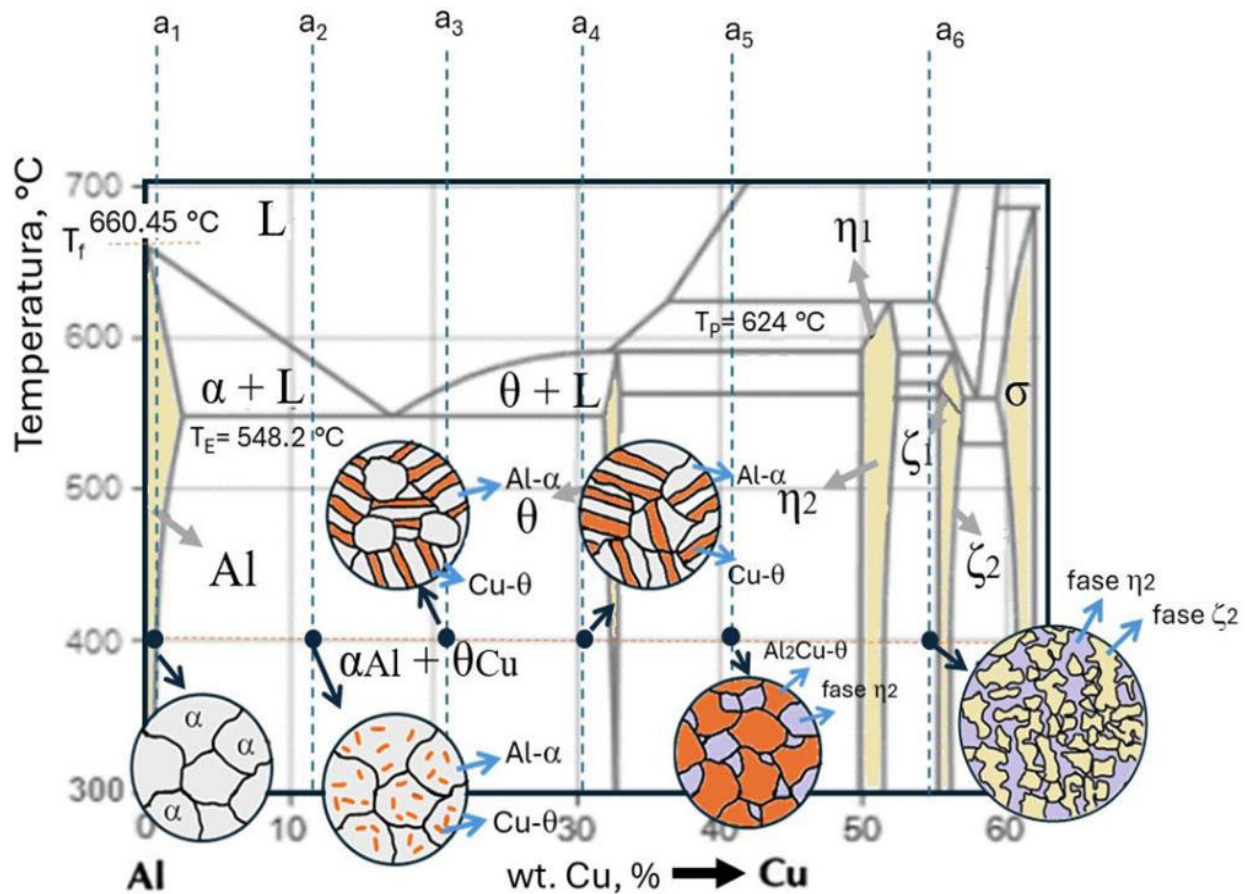


Figura 40. Diagrama de fase Al-Cu que muestra la simulación experimental de la solidificación de la aleación 90Al-10Cu, simulando la microestructura a varias temperaturas, para las diferentes aleaciones estudiadas.

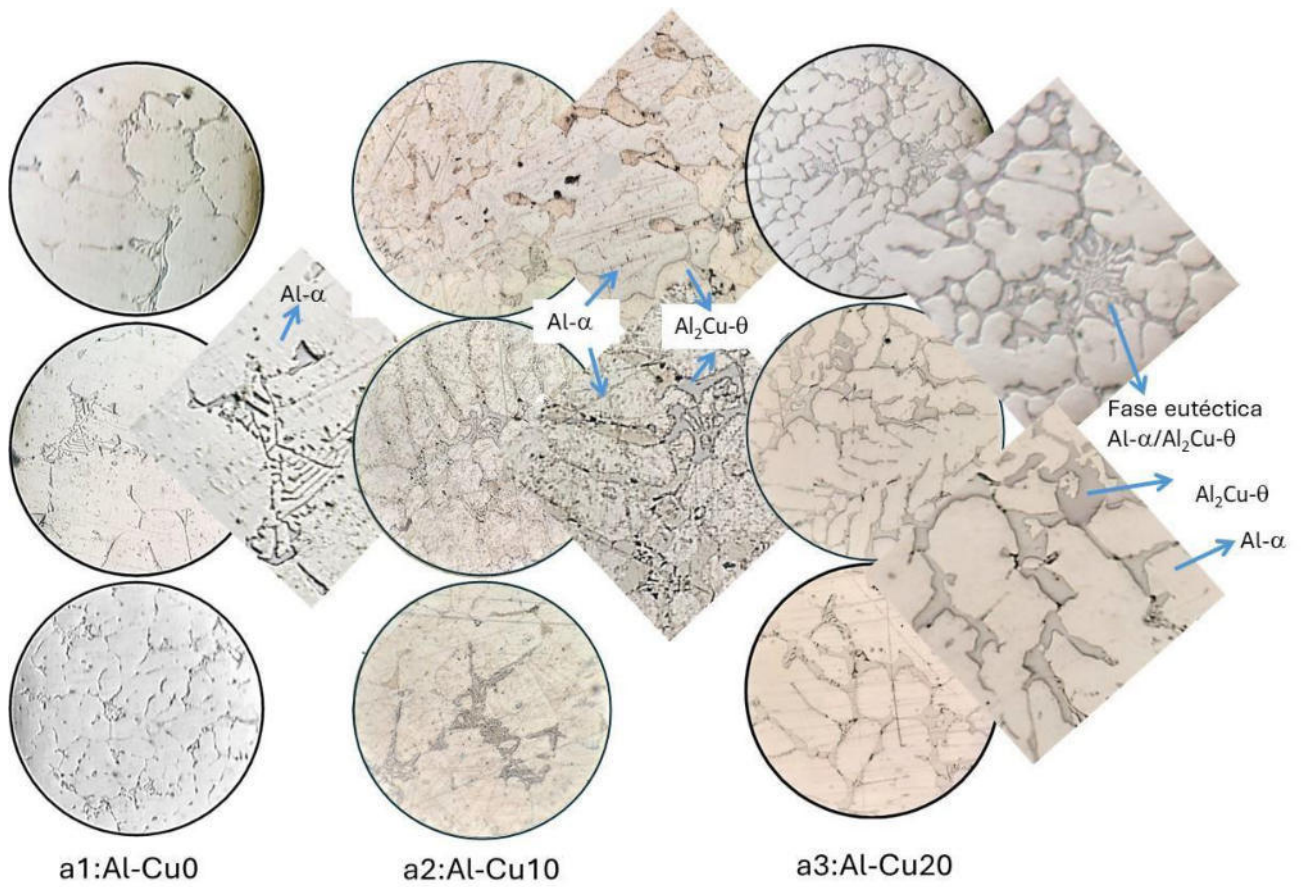


Figura 41. Imágenes de microscopio óptico a 500 y 400x aumentos para la aleación **a1**, **a2** y **a3**, para varias concentraciones de cobre.

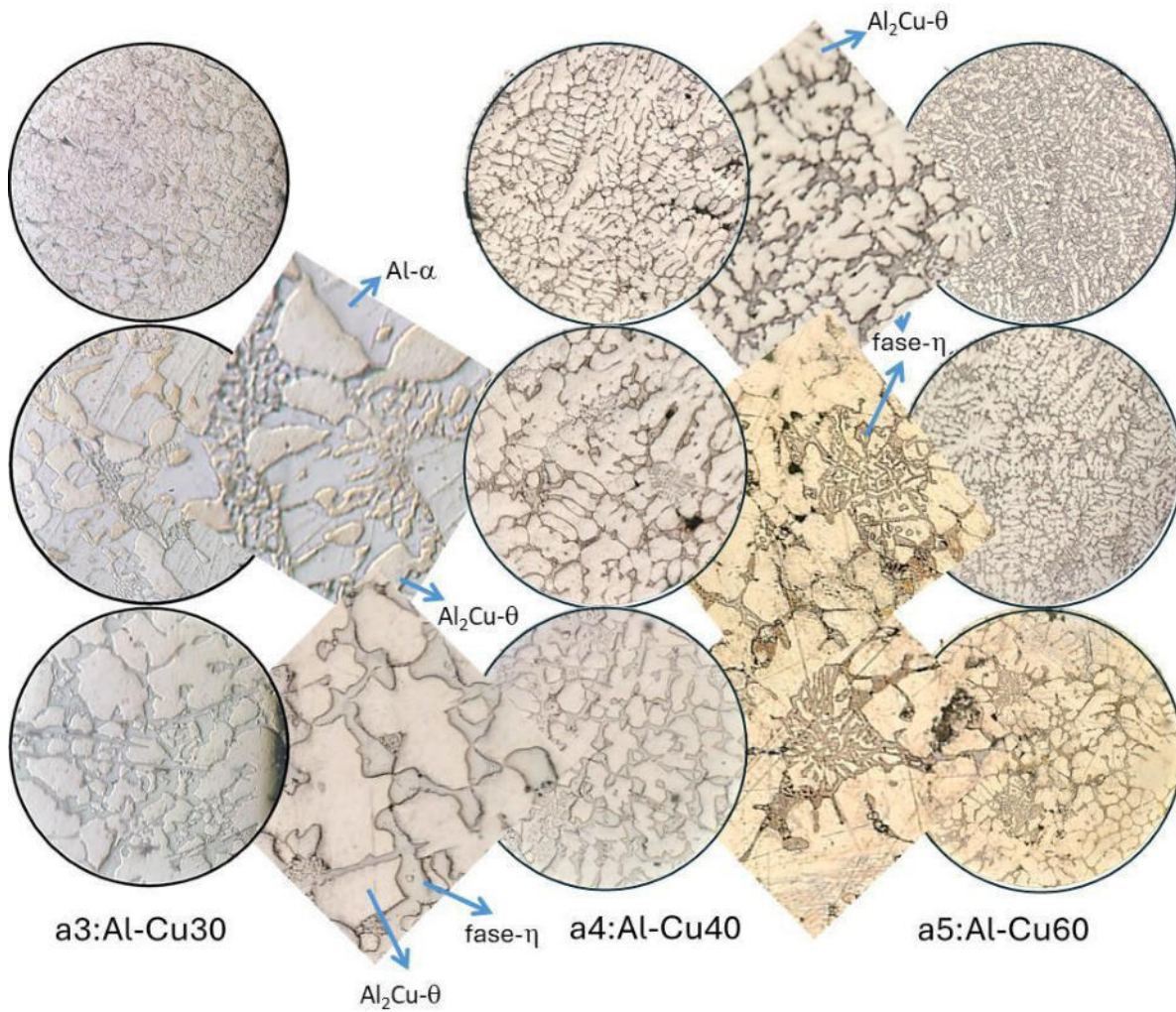


Figura 42. Imágenes de microscopio óptico a 500 y 400x aumentos para la aleación a_1 , a_2 y a_3 , para varias concentraciones de cobre.

A decorative frame composed of multiple overlapping, slightly offset gold-colored lines forming a complex, multi-pointed geometric shape, resembling a stylized star or a series of nested polygons. The frame is centered on the page and surrounds the text.

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se diseñó y se construyó un horno de combustión industrial de crisol removible, para fundir aluminio de 5 kg de capacidad, por su facilidad de operar e instalar para una práctica a nivel de laboratorio, en investigación aplicada y para su uso en la Unidad de Aprendizaje de Procesos de Fundición. Para su construcción se utilizó un tambor cilíndrico de acero y se establecieron los siguientes criterios de diseño; diámetro del horno (28 cm) considerando el espesor del material refractario, altura del horno desde la base y tapa (70 cm). Este horno funciona con una mezcla 50/50 partes de aceite de auto reciclado más diésel como combustible y aire impulsado por una turbina para fundir una carga metálica de 4 kg de aluminio, esta carga requiere de un calor de fusión de 1503.11 kcal/h.

En esta investigación, se logró satisfactoriamente la fusión de una serie de cargas de aluminio proveniente de botes de bebidas recicladas con composición química (1.2%Si, 2.17%Cu, 0.41%Mn, 0.67%Mg, 0.59%Fe, 0.02%Ni, 0.15%Zn). Este aluminio reciclado se manufactura en forma de lingotes fundidos cilíndricos de aluminio con dimensiones establecidas.

En esta investigación se lleva a cabo un análisis de la trayectoria de la solidificación de aluminio mediante el uso de los diagramas de equilibrio Al-Cu. Una simulación del proceso de fundición permitió determinar la temperatura de fusión para cada aleación estudiada. Además, se identificaron las características microestructurales del proceso de fundición y mediante la simulación se determinaron ciertas condiciones del proceso las mismas que son: temperatura de fusión (660 °C), tiempo de fusión (0.67 hr), cantidad de aluminio a fundir (4 Kg) y calor necesario para fundir dicha carga es de aproximadamente 1503.11 kcal/h. Estas variables permitieron desarrollar los cálculos del porcentaje de las fases presentes para cada aleación fundida, para dimensionar, seleccionar los materiales adecuados y construir el horno de crisol removible para fundir el aluminio y sus aleaciones.

Se realizó la validación del horno durante la manufactura de lingotes de aluminio con diferente contenido de cobre, además de registrar los datos de su operación en tiempo real, observando un buen desempeño, el cual favoreció finalizar esta investigación. La determinación de las propiedades de dureza, la composición química, los detalles microestructuras en función del cobre; son aspectos demostrativos y de investigación, para mostrar el buen desempeño del horno, y la obtención de lingotes de excelente calidad.

Por el proceso de fusión se logró la manufactura de cilindros de Al-Cu perteneciente a la serie 2xxx, a diferente contenido de cobre de 10 al 60%, el cual le confiere resistencia mecánica, buena maquinabilidad, esta aleación da un enfoque prospectivo importante en la ingeniería de materiales y la fundición, especialmente para aplicaciones industriales, que requieran alta resistencia y ligereza.

**EXPERIENCIA
PRÁCTICA DE
MOLDEO EN
ARENA EN VERDE**

10. Experiencia práctica de moldeo en arena en verde

Preparar y mezclar la arena de moldeo.



Moldeo de la letra (A), uso de un modelo de madera.



Cubrir el modelo y sus alrededores con arena tamizada.



Rellenado del molde con arena.



Proceso de compactación de la caja.



Diseño de los sistemas de alimentación, donde se vierte el metal fundido (aluminio).



Desmontaje de modelos.



Suministrar el metal fundido a través del embudo de colada, dejando solidificar 20 minutos.



Separar las cajas, romper el molde y retirar la pieza fundida para su posterior limpieza, así como el mecanizado y extracción de piezas fundidas de aluminio.



Como producto final se obtuvieron las letras UAEM Valle de México fabricadas de aluminio, y colocadas en la entrada de esta institución.





**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**



Referencias bibliográficas

- Ashby, M.F. y Jones, D.R.H. (2012). **Engineering Materials: An introduction to properties, applications and design**. Cuarta edición, Edit. Butterworth-Heinemann Elsevier, Oxford, Inglaterra.
- ASM Int. (1988). Casting. 9th edición. **ASM Metals Handbook, Vol. 15**.
- Astigarraga Urquiza, J. (1999). **Hornos de arco para fusión de acero: teoría, cálculo y aplicaciones**. Vol.9, Edit. Mac.Graw-Hill.
- Barreiro, J. (1978). **Fabricación de hierro, acero y fundiciones**. Primera edición. Edit. Urmo, S.A. de Ediciones.
- Becerra Zamarripa, N. (2015). **Soldabilidad de la aleación de aluminio 2024 por el proceso de soldadura de fricción-agitación por puntos (FSSW) empleada en la industria aeronáutica**. Tesis académica, COMIMSA, Saltillo, Coahuila, México.
- Beeley, Peter. (2001). **Foundry technology**. Segunda edición, Edit. Butterworth Heinemann, Londres, Inglaterra.
- Brandt, D.A., Warner, J.C. (2009). **Metallurgy fundamentals**. Quinta edición, Edit. Goodheart-Willcox.
- Brucker (2019). **User manual: S1 Titan/tracer 5/CTX Handheld XRF Spectrometers of Brucker**. <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/elemental-analyzers/handheld-xrf-spectrometers/S1-TITAN.html>
- Brucker (2024). **User manual: Q4 Tasman series 2, Optical Spectrometer of Spark, Brucker**. <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/elemental-analyzers/optical-emission-spectrometers/q4-tasman.html>.
- CarboSystem (2024). **Tipos de hornos industriales**. <https://carbosystem.com/tipos-de-hornos-industriales/>
- Castro Hernández, F.J., et. al. (2012). **Estudio de impacto del programa educativo de Ingeniería Industrial**. Archivos del Centro Universitario UAEM Valle de México.
- Centro Universitario UAEM Valle de México (2004). **Currículo del programa de estudios de Ingeniería Industrial**. Archivos del Centro Universitario UAEM Valle de México.
- Centro Universitario UAEM Valle de México (2023). **Reseña histórica**.
- Charles, E.B. jr (2003). **Industrial Burners Handbook**. 1st edition Engineering & Technology.
- Charles, S. (2004). **Refractories Handbook**, 1st Edition Engineering & Technology, Physical Sciences
- Chastain, S.D. (2004). **Metalcasting: A sand casting manual for the small foundry Vol.1**. Primera edición, Florida, USA.
- Coronel Subía, M.A., Sangucho Simba, A.S. (2019). **Diseño e implementación de un horno basculante para fundir aluminio**. Tesis académica, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.
- Dante Salas, A. (2014). **Conformado por deformación plástica**. Documento académico, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Electroheat Induction (2024). **Comparación entre hornos de inducción y hornos de resistencia**. <https://electroheatinduction.com.mx/comparacion-entre-hornos-de-induccion-y-hornos-de-resistencia/>
- Franco Madrid, J.D. (2017). **Efecto de la Ceria (CeO₂) en la microestructura y propiedades mecánicas de una aleación de aluminio 2024**. Tesis académica, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV, Chihuahua. México.

- Frank King (1992). **El aluminio y sus aleaciones**. 1era edición, editorial Limusa.
- Gasex (2024). **Espectroscopía de emisión atómica por chispa y arco**.
<https://gasex.cl/argon/que-es-la-espectroscopia-de-emision-atmica-de-chispa-y-arco/>
- González Salazar, B., et al. (2018). **Hornos metalúrgicos**. Informe de Laboratorio, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Perú.
- Groover, M.P. (2007). **Fundamentos de manufactura moderna**. Tercera edición, Edit. McGraw-Hill Interamericana, Ciudad de México, México.
- Hatch, John E. (1984). **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. Primera edición. Aluminum Association Inc. and ASM International.
- Hormesa (2019). **Horno rotativo basculante fijo**. <https://hormesa-mexico.com/es/horno-rotativo-basculante-fijo/>
- Huamán Elías, E.L. (2013). **Crisoles para uso en laboratorio**.
https://www.mef.gob.pe/contenidos/doc_siga/catalogo/ctlogo_familias_crisoles_lab.pdf
- INEGI (2020). **Panorama sociodemográfico de México (censo) 2020**.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197889.pdf
- Interempresas (2024). **Ahorro de energía con las resistencias de carburo de silicio**.
https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/102896-Ahorro-de_energia-con-las-resistencias-de-carburo-de-silicio.html
- Juárez Elizalde, J.D. (2014). **Estudio termodinámico de escorias en metalurgia y materiales**. Tesis académica, Instituto Politécnico Nacional-ESIQIE, México.
- Maffia, E.G. (2013). **Aluminio y sus aleaciones**. Revista Estructura y propiedades de las aleaciones.
- Malishev, A., et. al. (1983). **Tecnología de los metales**. Sexta edición, Edit. MIR, Moscú, URSS.
- Martin, John (2006). **Materials for Engineering**. Tercera edición. Edit. Woodhead publishing Materials, Inglaterra.
- Martínez Baena, M. y Palacios Zavaleta, N. (2000). **Metalografía de Aceros y Fundiciones**, Edit. Imprenta Gráfica Real S.A., Perú.
- Maya López, A.I. (2022). **Difusión atómica de Boro como protección a la corrosión y rendimiento mecánico de aceros industriales**. Tesis académica, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Medina Ortíz, F. (2018). **Optimización del proceso de fundición de aluminio 356 en molde permanente vaciado por gravedad**. Tesis académica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Mestanza Barragán, D.F., Lara Villegas, V.P. (2012). **Diseño y construcción de un horno de combustión industrial para fundir aluminio**. Tesis académica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Millán Delgado, F. (2016). **Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado**. Tesis académica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- NOM-166-SEMARNAT-2014. **De Protección Al Ambiente**, P. F. (s. f.). NORMA OFICIAL MEXICANA. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-166-semarnat-2014>
- Olympus (2015). **User manual: Inverted Metallurgical Microscope GX51, Olympus**.
<https://www.olympus-ims.com/es/microscope/gx51/>
- Pezzano, P.A. (1992). **Tecnología Mecánica**. Tomo I. Edit. Alsina. Parana, Buenos Aires.

- Román, A.S. (2019). **Influencia de la estructura de solidificación en la resistencia a la corrosión de aleaciones Al-Cu para el adecuado manejo de soluciones conteniendo NaCl y Biodiesel**. Tesis académica, Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Argentina.
- Smart Furnaces (2017). **Horno de arco eléctrico para fundición de hierro y acero**. GHI Smart Furnaces. <https://www.ghihornos.com/hornos-industriales/fundicion-hierro-acero/horno-arco-electrico/>
- Smart Furnaces (2020). **Horno de reverbero para fundición de aluminio**. GHI Smart Furnaces. <https://www.ghihornos.com/hornos-industriales/fundicion-aluminio/horno-reverbero/>
- Tylecote, R.F. (1992). **A history of metallurgy**. Segunda edición, Edit. Maney for the Institute of Materials, Londres, Inglaterra.
- UAEM (2021). **Historia de la Universidad Autónoma del Estado de México**, Toluca. <https://www.uaemex.mx/mi-universidad/bienvenido-a-la-uaem/historia.html>.
- UA-L32237 (2023). **Programa de la Unidad de Aprendizaje Procesos de Fundición (Ingeniería Industrial)**. Archivos del Centro Universitario UAEM Valle de México.
- Valentinuzzi, M.C. (2008). **Análisis por fluorescencia de Rayos-X: Implementación de guías de haces en reflexión total**. Documento académico, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Vázquez Escobar, E.D. (2019). **Diseño y construcción de un horno de combustión industrial para fundir aluminio**. Tesis académica, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Perú.
- Villar González, J.I. (2010). **La fundición de bronce a la cera perdida**. Tesis académica, Universidad de Salamanca, España.
- Ynga Guerrero, J.P. (2016). **Aluminio y sus aleaciones**. Tesis académica, Universidad Nacional de San Marcos, Lima.

GLOSARIO

GLOSARIO

GLOSARIO

- ❖ **Acritud:** Es un fenómeno que ocurre en el aluminio, cuando es sometido a procesos de deformación plástica, como estirado, laminado o forjado, durante este proceso el aluminio aumenta su resistencia y dureza.
- ❖ **Aleación:** La combinación de dos o más elementos, de los cuales al menos uno es un metal, para constituir un nuevo material que tenga las propiedades de sus componentes.
- ❖ **Aluminio (Al).** Metal ampliamente utilizado en una gran variedad de industrias debido a sus propiedades físicas y químicas favorables.
- ❖ **Carbono (C).** Elemento químico esencial para la vida y un componente clave en muchas industrias debido a su versatilidad química y sus propiedades únicas.
- ❖ **Cobre (Cu).** Metales más antiguos y ampliamente utilizados por la humanidad debido a sus excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas.
- ❖ **Compuestos intermetálicos:** Consta de al menos dos elementos metálicos que se combinan para dar una nueva fase de las mismas propiedades, composición y estructura cristalina de los elementos metálicos originales.
- ❖ **Crisol:** Es un recipiente que se fabrica con materiales refractarios, utilizado para la fundición de ciertas sustancias a alta temperatura. Por lo general se producen con grafito y arcilla.
- ❖ **Diagramas de fase.** Los diagramas de fase son representaciones gráficas que muestran las condiciones bajo las cuales diferentes fases de un material coexisten en equilibrio. Estos diagramas son herramientas fundamentales en la ciencia de materiales y la metalurgia, ya que proporcionan información sobre cómo los materiales cambian de estado o fase en función de variables como la temperatura, la presión y la composición química.
- ❖ **Dureza Brinell (HB).** La prueba de dureza que consiste en aplicar una carga específica sobre una esfera de acero endurecido o de carburo de tungsteno, que se presiona contra la superficie del material en cuestión. La huella dejada por la esfera se mide y se utiliza para calcular la dureza del material.
- ❖ **Dureza Vickers (HV).** La prueba de dureza Vickers implica la aplicación de una carga específica a un indentador en forma de pirámide, que tiene un ángulo de 136 grados entre sus caras. La carga se aplica durante un tiempo determinado, y se mide el tamaño de la huella dejada en la superficie del material.

- ❖ **Energía calorífica.** La energía calórica o energía térmica es una forma de energía que se asocia con la temperatura de un sistema. Es el resultado del movimiento de las partículas que componen la materia, y puede transferirse de un cuerpo a otro debido a diferencias de temperatura.
- ❖ **Escoria:** Es un subproducto de la fusión de metales, que son las impurezas no deseadas y por menos densas flotan en la superficie del metal fundido.
- ❖ **Estructura atómica.** Organización y disposición de las partículas subatómicas en un átomo. Cada átomo está formado por un núcleo central rodeado de electrones. La comprensión de la estructura atómica es fundamental para la química y la física, ya que explica cómo se forman los elementos, las moléculas y cómo interactúan entre sí.
- ❖ **Fluorescencia de Rayos-X.** Técnica analítica no destructiva utilizada para determinar la composición elemental de materiales sólidos, líquidos y en polvo. Se basa en el principio de la emisión de fluorescencia de rayos X que ocurre cuando los átomos de una muestra son excitados por un haz de rayos X de alta energía, lo que causa la emisión de rayos X secundarios con longitudes de onda características de los elementos presentes en la muestra.
- ❖ **Fundición:** Es un proceso que disminuye y calienta un determinado material para posteriormente obtener un metal natural y luego incluirlo en un molde.
- ❖ **Fusión:** Consiste en introducir calor (energía) en un cuerpo sólido, para ocasionar que sus partículas comiencen a desplazarse con mayor velocidad, perdiendo así sus fuertes uniones y convirtiéndose en un líquido.
- ❖ **Grit:** Se refiere una medida que indica el tamaño de las partículas abrasivas pasantes en el papel lija, que a su vez determina la capacidad de la lijada en la superficie trabajada.
- ❖ **Hidrocarburos:** Son un grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. Son los compuestos orgánicos más simples y pueden ser considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos.
- ❖ **Hierro (Fe).** Aleación de Fe-C, con múltiples aplicaciones por sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, esencial en la ingeniería, la construcción y la manufactura de materiales metálicos.
- ❖ **Horno de fusión:** Un horno de fusión es un equipo utilizado en la industria metalúrgica para fundir metales y aleaciones a temperaturas elevadas. Estos hornos son fundamentales para procesos de manufactura que requieren la transformación de materiales sólidos en

líquidos, permitiendo su posterior conformado, colado o refinamiento.

- ❖ **Lingote:** Es una pieza de metal en bruto, por lo general en forma de barra, cilíndrica o similar.
- ❖ **Mena:** Está constituida por minerales cuya extracción produce un beneficio económico y por minerales que carecen de valor económico o cuyo aprovechamiento sería demasiado costoso.
- ❖ **Materiales refractarios.** Los Materiales refractarios son aquellos diseñados para resistir altas temperaturas y, a menudo, ambientes químicos agresivos. Se utilizan en aplicaciones donde se requiere la conservación de calor, así como la protección de equipos y estructuras en industrias como la metalurgia, la cerámica, el vidrio y la energía.
- ❖ **Metales ferrosos.** Los metales ferrosos son aquellos que contienen hierro como componente principal. Este tipo de metales son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades mecánicas, resistencia y versatilidad. Los metales ferrosos se clasifican en dos categorías principales: hierro puro y aleaciones de hierro, siendo el acero y el fundido los más comunes.
- ❖ **Metales no ferrosos.** Los metales no ferrosos son aquellos que no contienen hierro en cantidades significativas. Estos metales son valorados por sus propiedades específicas, como resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y térmica, y ligereza. Se utilizan en diversas aplicaciones industriales, desde la construcción hasta la electrónica y la fabricación de componentes especializados.
- ❖ **Mezcla eutéctica:** La combinación de dos o más metales que, al fundirse, forman una composición específica con un punto de fusión más baja que el de cualquiera de sus metales puros, y que proporciona mejoras en sus propiedades.
- ❖ **Microestructura.** La microestructura se refiere a la estructura interna de un material que se puede observar bajo un microscopio. Este término es fundamental en el estudio de materiales, ya que la microestructura tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas de un material.
- ❖ **Silicio (Si).** Elemento fundamental en la tecnología moderna y en la Tierra misma. Es uno de los elementos más abundantes y tiene una amplia gama de aplicaciones industriales, especialmente en la electrónica, la energía solar y los materiales de construcción.
- ❖ **Solidificación:** Es el proceso de cambio físico o cambio de fase mediante el cual la materia pasa de estado líquido a estado sólido.

