



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Licenciatura en Ingeniería Minero Metalúrgica

**Propuesta de desgasificación de aluminio
fundido (A356) para procesos de fundición
de cera perdida: Un estudio comparativo
entre la desgasificación con hexacloroetano
e inyección de nitrógeno.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Licenciado en Ingeniería Minero Metalúrgica

P R E S E N T A

Jorge Alberto Pérez Vite

Director

Dr. Gustavo Urbano Reyes

Mineral de la Reforma, febrero 2026.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de febrero de 2026

Número de control: ICBI-D/316/2026
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Minero Metalúrgica **Jorge Alberto Pérez Vite**, quien presenta el trabajo de titulación **"Propuesta de desgasificación de aluminio fundido (A356) para procesos de fundición de cera perdida: Un estudio comparativo entre la desgasificación con hexacloroetano e inyección de nitrógeno"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Juan Hernández Ávila
Secretario: Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz
Vocal: Dr. Gustavo Urbano Reyes
Suplente: Dr. Martín Reyes Pérez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/MMM



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

“ El ser humano no está determinado por las circunstancias, sino por la libertad interior con la que decide enfrentarlas.

En medio de la incertidumbre, del dolor o del vacío, hay una fuerza que no se doblega: la voluntad de sentido. No se trata de una evasión idealista, sino de una afirmación radical de que la vida, incluso en sus momentos más oscuros, exige ser respondida con responsabilidad.

El hombre no pregunta qué puede esperar de la vida, sino que comprende que es la vida la que le interpela a él. Y su respuesta no se da con palabras, sino con actos: con la forma en que ama, trabaja, resiste, crea o simplemente permanece fiel a sus valores. Esa capacidad de responder con sentido —de transformar el sufrimiento en logro, la culpa en crecimiento, y la fugacidad en eternidad— es lo que hace del espíritu humano una llama que no se apaga. Porque mientras haya un porqué, el cómo puede ser soportado, reinventado o trascendido.”

Viktor Frankl (El hombre en busca de sentido, 1946)

Agradecimientos

Agradezco, profundamente a mi familia, no solo por su apoyo incondicional, sino por ser el cimiento silencioso sobre el cual se ha construido cada uno de mis logros. Su ejemplo, su paciencia y su fe en mí han sido faros constantes, a mi madre, por su ejemplo de constancia ha sido una brújula en los momentos de mayor incertidumbre. A mi padre, por mostrarme que el trabajo bien hecho no es solo una obligación, sino una forma de honrar la vida. Su ética, su temple y su mirada crítica me enseñaron a no conformarme con lo superficial. A mi hermano, compañero de ruta y espejo de mis propias búsquedas, gracias por las conversaciones que me ayudaron a pensar distinto, por los silencios compartidos y por recordarme que el conocimiento también se construye en familia.

A la empresa que me abrió las puertas al mundo de la fundición de cera perdida, gracias por permitirme observar, preguntar, equivocarme y aprender. Fue ahí donde el conocimiento dejó de ser abstracto y se volvió tangible, donde el metal fundido me enseñó que la transformación requiere calor, tiempo y precisión. A mis compañeros de trabajo, quienes, a pesar de estar también en proceso de aprendizaje, me ofrecieron su paciencia, su experiencia y su guía. Gracias por instruirme sin condescendencia, por corregirme sin juicio y por compartir conmigo no solo técnicas, sino también valores de colaboración, seguridad y mejora continua. Ustedes fueron mis primeros maestros en el terreno real de la ingeniería.

A mi asesor de tesis, por ayudarme a ordenar las ideas que llevaba dentro, por enseñarme que investigar no es solo buscar respuestas. Gracias por su orientación generosa, por su exigencia oportuna y por confiar en que este trabajo podía ser más que un requisito: podía ser una contribución.

Índice

Resumen.....	1
Introducción	2
Justificación.....	4
Hipótesis.....	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Capítulo 1. Marco teórico.....	7
1.1 Metalurgia del aluminio y sus aleaciones	7
1.1.1 Propiedades físicas del aluminio	7
1.1.2 Principales aleaciones del aluminio	9
1.1.3 Aleación de aluminio A356	12
1.1.4 Proceso de fusión en hornos de crisol.....	16
1.2 Métodos de desgasificación del aluminio	27
1.2.1 Fuentes de adsorción de hidrógeno en el metal líquido.....	27
1.2.2 Mecanismo de absorción del hidrógeno en el baño de aluminio líquido.....	28
1.2.3 Desgasificantes utilizados en la industria de fundición de aluminio.....	31
1.2.4 Técnicas para la evaluación de porosidad por hidrogeno	34
1.3 Proceso de fundición a la cera perdida.....	39
Capítulo 2. Desarrollo experimental	47
2.1 Diseño experimental.....	47
2.2 Selección de materia prima.....	49
2.3 Técnica de fusión.....	50
2.4 Desgasificación con tabletas de hexacloroetano	52

2.5 Desgasificación con lanza de grafito con variación de presión y tiempo de desgasificado.....	54
2.6 Evaluación de porosidad con ambos métodos de desgasificado.....	56
2.7 Análisis comparativo	58
Capítulo 3. Análisis de resultados.....	60
3.1 Preparación del metal liquido (aleación A356)	60
3.2 Desgasificación con tableta de hexacloroetano	64
3.2.1 Evaluación de eficiencia de desgasificación con tableta de hexacloroetano	68
3.3 Desgasificación por inyección de nitrógeno con lanza de grafito	70
3.3.1 Evaluación de eficiencia de la desgasificación mediante inyección de nitrógeno con lanza de grafito.....	73
3.4 Comparación de eficacia y factibilidad con ambos métodos de desgasificación en aleación de aluminio A356	77
3.5 Factibilidad y beneficios potenciales al usar la técnica de desgasificación por inyección con lanza.....	80
3.5.1 Aspecto económico	82
3.5.2 Aspecto ambiental y de salud	83
3.5.3 Aspecto práctico y operativo.....	84
Capítulo 4. Conclusiones	85
Bibliografía	88

Resumen

La microporosidad es un defecto prevalente en las fundiciones de aluminio, especialmente en aquellas producidas mediante el proceso de cera perdida, y compromete significativamente las propiedades mecánicas y la calidad superficial de las piezas producidas. Esta tesis aborda la problemática de la microporosidad en las aleaciones de aluminio A356. El objetivo principal es realizar un análisis comparativo de la eficacia de dos métodos de desgasificación, uso de pastilla de hexacloroetano y la inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito, para la mitigación de este defecto de porosidad. Se investigan los mecanismos fundamentales de formación de microporosidad, principalmente asociada al hidrógeno disuelto. La evaluación de la efectividad de los tratamientos de desgasificación se propone realizar mediante la prueba de vacío (prueba de Straube-Pfeiffer), un método reconocido en la industria para la estimación cualitativa y semicuantitativa del contenido de gas en el aluminio fundido. Se espera que este estudio proporcione información valiosa sobre la selección del método de desgasificación más adecuado en función de la aleación A356 y los requerimientos de calidad, considerando tanto la eficiencia en la reducción de porosidad como los aspectos operativos asociados a cada técnica. Los resultados permitirán optimizar los procesos de fundición a la cera perdida para fundiciones de aluminio, contribuyendo a la mejora de la calidad y fiabilidad de los componentes fabricados. Se anticipan hallazgos clave que demostrarán las ventajas relativas de la inyección de nitrógeno en la reducción de la microporosidad, lo que podría mejorar significativamente la calidad de las piezas de aluminio producidas mediante fundición a la cera perdida.

Introducción

La fundición de aluminio mediante el proceso de cera perdida es una técnica ampliamente utilizada para la producción de componentes con geometrías complejas y alta precisión dimensional. Sin embargo, la calidad de estas piezas puede verse seriamente comprometida por la presencia de microporosidad. Este defecto, caracterizado por la formación de pequeños vacíos distribuidos en la matriz metálica, tiene un impacto perjudicial directo sobre las propiedades mecánicas fundamentales, tales como la resistencia a la tracción, la ductilidad y, de manera crucial, la vida a fatiga de los componentes.

La desgasificación del aluminio fundido es una etapa crítica en el proceso de fundición, orientada fundamentalmente a la eliminación del hidrógeno disuelto, principal causante de la porosidad gaseosa. Una desgasificación efectiva se traduce en una mejora sustancial de la integridad de la fundición, una reducción en la tasa de rechazo de piezas y, consecuentemente, un incremento en el rendimiento y la fiabilidad de los productos finales. Entre los diversos métodos de desgasificación disponibles, el tratamiento con hexacloroetano y la inyección de nitrógeno representan dos enfoques con mecanismos de acción distintos. El hexacloroetano, usualmente en forma de tabletas sólidas, actúa mediante una reacción química con el aluminio fundido, generando gases (principalmente cloruro de aluminio) que arrastran el hidrógeno. Por otro lado, la inyección de nitrógeno, un gas inerte, opera bajo el principio físico de barrido, donde las burbujas de nitrógeno, al ascender a través del baño metálico, recogen el hidrógeno disuelto debido a la diferencia de presiones parciales.

La evaluación de la eficacia de los procesos de desgasificación requiere de métodos de control fiables. La prueba de solidificación en vacío, también conocida como prueba de Straube-Pfeiffer, es una técnica ampliamente aceptada en la industria de la fundición para valorar de forma cualitativa o semicuantitativa el contenido de gas en el aluminio fundido. El principio de esta prueba se basa en que la solidificación de una muestra de metal fundido bajo presión reducida exagera la formación de

porosidad a partir del gas disuelto, permitiendo una comparación visual del metal antes y después del tratamiento de desgasificación.

Los objetivos fundamentales de esta tesis se centran en realizar un análisis comparativo de los métodos de desgasificación mediante tableta de hexacloroetano e inyección de nitrógeno con lanza de grafito para la mitigación de la microporosidad en fundiciones de cera perdida de la aleación de aluminio A356. Se evaluará la efectividad de estos métodos de desgasificación utilizando la prueba de vacío como herramienta de diagnóstico. El alcance de este trabajo comprenderá una investigación experimental de la efectividad resultante, que incluirá la fusión controlada de la fundición del aluminio y la comparación entre los tratamientos de desgasificación evaluados.

Justificación

La presencia de porosidad en piezas fundidas reduce significativamente sus propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión, resistencia al impacto y la tenacidad, lo que puede llevar al rechazo de componentes, ocasionando paros de producción y pérdidas económicas. Ante esta problemática, surge la necesidad de optimizar los métodos de degasificación del aluminio fundido. Esta investigación compara dos técnicas: el uso de tabletas de hexacloroetano y la inyección de nitrógeno mediante lanza.

Al evaluar estas alternativas, se ha identificado que la inyección de nitrógeno con lanza puede ofrecer resultados equivalentes a los de un sistema automatizado con rotor inyector, pero con una inversión considerablemente menor. Esto la convierte en una opción técnicamente viable y económicamente atractiva para su aplicación en las operaciones actuales del área de fundición de la planta.

El objetivo es lograr una degasificación más eficiente, que se traduzca en piezas de mejor calidad para los clientes, reducción en los rechazos y, por ende, una mejora en la productividad y los costos de producción.

Esta investigación aportará al conocimiento en el campo de la ingeniería metalúrgica, al ofrecer un análisis comparativo detallado entre dos métodos de degasificación en procesos de fundición por cera perdida. Los resultados podrían servir como base técnica para optimizar procesos y mejorar la calidad de los componentes fabricados en aleación de aluminio A356.

Hipótesis

El método de desgasificación por inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito presentará una desgasificación más efectiva de la disminución del hidrógeno disuelto en la aleación fundida de aluminio A356, frente al método convencional con la pastilla hexacloroetano (C_2Cl_6). Esto debido al mecanismo físico de remoción mecánica, al favorecer una mayor área de contacto gas-metal y una transferencia de masa más eficiente por difusión, que promueve una remoción más efectiva y homogénea del hidrógeno disuelto. Adicionalmente, se anticipa que la inyección de nitrógeno, al no introducir especies químicas reactivas ni generar subproductos sólidos o gaseosos tóxicos, resultará en un proceso más controlable, reproducible y ambientalmente sostenible, ofreciendo no solo ventajas técnicas en la calidad del metal, sino también operativas y de seguridad industrial.

Objetivo general

Evaluar la efectividad de la inyección de nitrógeno con una lanza de grafito para la desgasificación de aluminio fundido (A356) en el proceso de fundición a la cera perdida comparándola con la desgasificación con pastilla de hexacloroetano, con el objetivo de optimizar la desgasificación para mitigar la microporosidad y reducir el rechazo interno.

Objetivos específicos

- Preparar el metal líquido (aleación A356) utilizando material de retorno (piezas rechazadas y mazarotas) en un horno de crisol basculante para el vaciado de piezas en moldes de cera perdida.
- Evaluar el hidrogeno disuelto dentro del baño fundido de la aleación A356 antes y después de desgasificar con las pastillas de hexacloroetano, utilizando la prueba de vacío Straube-Pfeiffer como herramienta de diagnóstico.
- Evaluar el hidrogeno disuelto dentro del baño fundido la aleación A356 utilizando la prueba de vacío Straube-Pfeiffer antes y después de desgasificar

con inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito, analizando la influencia de la presión de nitrógeno vs el tiempo de mantenimiento en la desgasificación.

- Comparar la eficacia, factibilidad y los beneficios potenciales de reemplazar la desgasificación de la aleación de aluminio A356 con hexacloroetano por la inyección de nitrógeno con lanza de grafito en la reducción de porosidad de piezas fabricadas con molde a la cera perdida.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 Metalurgia del aluminio y sus aleaciones

1.1.1 Propiedades físicas del aluminio

El aluminio es un elemento dúctil, destaca por su capacidad de resistir a la corrosión y por su baja densidad, es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno y el silicio, y el más abundante de los metales (Gasque Silva, 2003).

La producción primaria de aluminio es un proceso de dos etapas principales: el proceso Bayer, mediante el cual se extrae alúmina (Al_2O_3) de la bauxita. La alúmina (Al_2O_3) es la principal fuente para obtener aluminio metálico por su disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, su elevadísimo punto de fusión (superior a 2000°C) dificultaba la reducción electrolítica, proceso que requiere el material en estado líquido. Este problema se solucionó al encontrar que la mezcla de alúmina con criolita ($\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$) reduce drásticamente el punto de fusión a solo 1000°C (Gasque Silva, 2003). En 1886, Charles Martin Hall y Paul L. T. Héroult descubrieron de forma independiente que la alúmina se disuelve en criolita fundida, permitiendo su descomposición electrolítica para producir aluminio. El proceso Hall-Héroult sigue siendo la técnica fundamental para la producción industrial de aluminio, aunque se investigan alternativas. Este método ha permitido alcanzar una pureza del 99.5% en el aluminio comercial, pudiendo refinarse hasta un 99.99% (Magaña Rojas, 2009).

La metalurgia del aluminio se basa en sus propiedades únicas. Su ligereza, con una densidad mucho menor que la del acero, combinada con su alta conductividad térmica y eléctrica, su punto de fusión relativamente bajo y sus buenas propiedades mecánicas al alearse, son fundamentales. Además, su apariencia, la facilidad con la que se puede colorear y pulir, su maleabilidad, su capacidad de autopasivación (resistencia a la corrosión) y su no toxicidad han impulsado su creciente uso en diversos sectores. Esto incluye la industria del transporte aéreo y terrestre, la conducción de electricidad, la fabricación de perfiles y estructuras para la construcción, y la producción de envases. Cabe mencionar que se utiliza rara vez

100% puro y en su mayoría se usa aleado con otros metales para mejorar sus propiedades mecánicas (Ros Moreno, 2015).

Las propiedades del aluminio puro (tabla 1) lo hacen un material de alto valor en diversos procesos. Con una baja densidad de 2.7 g/cm^3 , que es aproximadamente un tercio de la del acero (7.8 g/cm^3), el aluminio ofrece ventajas significativas en aplicaciones donde la relación resistencia-peso es crítica (Palas Zúñiga, 2012). Sus altas conductividades térmica y eléctrica, junto con su bajo punto de fusión (660°C), son características clave para su procesamiento y aplicación.

Tabla 1. Relación de propiedades físicas, más relevantes del aluminio puro. Fuente: (Palas Zúñiga, 2012).

Propiedad	Característica - Valor
Color	Blanco
Estructura Cristalográfica	FCC Cúbica Centrada en la Caras
Parámetro Reticular (20°C)	0,40414 nm
Densidad (20°C)	$2,699 \text{ g/cm}^3$
Cambio Volumétrico durante la Solidificación	6,70%
Calor de Combustión	200 kcal/(atm g)
Punto de Fusión	660.2°C
Punto de Ebullición	$2057 \div 2480^\circ\text{C}$
Calor Específico	930 J
Coeficiente Lineal de Expansión Térmico (10^6)	23°C ($20 \div 100^\circ\text{C}$)
Conductividad Eléctrica (Valor máx.)	$34 \div 38 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$
Conductividad Térmica	$80 \div 230 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Resistividad Eléctrica	$2,69 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
Susceptibilidad Magnética (18°C)	0,63

El aluminio, con número atómico 13 y una configuración electrónica de ($1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^1$), se caracteriza por la facilidad con la que cede sus tres electrones de

valencia. Esta característica electrónica influye directamente en su comportamiento químico y su capacidad para formar enlaces. A nivel estructural, su celda unitaria cúbica centrada en las caras (FCC) es fundamental, ya que esta disposición atómica le confiere una alta ductilidad y maleabilidad. La estructura FCC, con sus múltiples planos y direcciones de deslizamiento, facilita enormemente la deformación plástica del material, permitiendo la manufactura de una vasta gama de perfiles y secciones transversales ingenieriles. Adicionalmente, esta misma estructura confiere al aluminio una elevada tenacidad a bajas temperaturas, aspecto crítico en ingeniería criogénica o ambientes fríos (Marín de la Puente, 2019).

El bajo punto de fusión (660°C) del aluminio es una ventaja significativa para los procesos de moldeo y conformado, ya que reduce los requisitos energéticos y de temperatura para la fusión. Sin embargo, esta misma propiedad impone una limitación en su temperatura máxima de uso continuo, generalmente entre 200 y 250°C , antes de que sus propiedades mecánicas se vean comprometidas. Un aspecto crucial para la ingeniería de procesos es la amplia brecha entre su punto de fusión y su punto de vaporización (2467°C). Esta diferencia permite la manipulación segura del aluminio líquido sin riesgo de vaporización significativa, lo que simplifica y flexibiliza los procesos de fundición y moldeo. Además, este bajo punto de fusión incide directamente en la temperatura de recristalización de las aleaciones de aluminio; a mayor pureza del aluminio, menor es esta temperatura (por ejemplo, para un aluminio del 99.996% de pureza, la recristalización ocurre entre 30 y 37°C), un factor importante a considerar en tratamientos térmicos post-procesamiento (Marín de la Puente, 2019).

1.1.2 Principales aleaciones del aluminio

La versatilidad del aluminio radica en la posibilidad de modular sus propiedades a través de la incorporación de elementos de aleación como el cobre, magnesio, silicio y manganeso, conocidos por su alta solubilidad en el aluminio. Esta manipulación composicional es fundamental para obtener aleaciones con la resistencia mecánica específica requerida para aplicaciones tan diversas como la fabricación de

componentes estructurales para la industria aeronáutica, la producción de envases para bebidas, la construcción de partes de carrocerías automotrices y de autobuses, la manufactura de electrodomésticos y la elaboración de maquinaria para la industria alimenticia. Adicionalmente, la ligereza característica de las aleaciones de aluminio se complementa con una considerable resistencia a la corrosión, la cual puede ser potenciada mediante tratamientos superficiales. Su destacada conductividad térmica y eléctrica, especialmente notable en términos de conductividad por unidad de masa en comparación con el cobre, su elevada ductilidad y sus bajos valores de densidad y punto de fusión, favorecen su procesabilidad a través de diversas rutas metalúrgicas. Finalmente, su capacidad para ser reciclado integralmente con un consumo energético significativamente menor al de su producción primaria resalta su importancia desde una perspectiva de ciclo de vida del material (Medina Ortiz, 2018).

A continuación, se detallan los efectos más significativos de los principales elementos aleantes del aluminio:

Cobre (Cu): Las aleaciones de aluminio-cobre, con contenidos que varían típicamente del 2 al 10% de Cu y a menudo otras adiciones, son de gran importancia industrial. La incorporación de cobre incrementa la colabilidad, lo que facilita los procesos de fundición. Sin embargo, disminuye la resistencia a la corrosión del material. Desde el punto de vista mecánico, el cobre aumenta la resistencia mecánica y la dureza de la aleación en estado bruto, propiedades que pueden optimizarse significativamente mediante tratamientos térmicos de solubilización, temple y recocido. Las composiciones con un 4-6% de cobre exhiben la mejor respuesta a estos tratamientos térmicos, logrando el máximo esfuerzo mecánico dependiendo de la presencia de otros constituyentes (Palas Zúñiga, 2012).

Hierro (Fe): El hierro es considerado una impureza detrimental en las aleaciones de aluminio. Su baja solubilidad en la matriz de aluminio conduce a la formación de compuestos intermetálicos indeseables. A pesar de una solubilidad en estado sólido muy baja (0.03% a 1% Fe crítico), la presencia de hierro incrementa la porosidad y promueve la aparición de intermetálicos de hierro de mayor tamaño y morfología más

gruesa, lo que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la microestructura (Palas Zúñiga, 2012).

Magnesio (Mg): Con una solubilidad sólida máxima en aluminio del 17.4%, el magnesio es un aleante clave, aunque en aleaciones forjadas actuales su contenido no suele exceder el 5.5%. A nivel microestructural, el magnesio tiende a precipitar preferentemente en los límites de grano como fases altamente anódicas (por ejemplo, Mg_5Al_3 o Mg_5Al_8). Esta precipitación puede generar susceptibilidad al agrietamiento intergranular y corrosión bajo tensión, aspectos críticos a considerar en el diseño de componentes. No obstante, la adición de magnesio aumenta significativamente la resistencia mecánica del aluminio sin una pérdida excesiva de ductilidad (Palas Zúñiga, 2012).

Manganeso (Mn): Aunque comúnmente se considera una impureza en las composiciones de fundición y se mantiene a niveles bajos en moldeo por gravedad, el manganeso es un elemento aleante importante en las aleaciones para forja. En ausencia de otros endurecedores, el manganeso por sí solo no aporta beneficios significativos en las aleaciones de aluminio fundido. Sin embargo, contribuye a incrementar las propiedades mecánicas y puede reducir la calidad de embutición en ciertos procesos (Palas Zúñiga, 2012).

Silicio (Si): El silicio tiene un efecto excepcional en la mejora de las características de fundición de las aleaciones de aluminio. Su adición al aluminio puro mejora drásticamente la fluidez, la resistencia al desgarro en caliente, las características de alimentación del molde y la resistencia a la corrosión. Debido a su baja solubilidad en el aluminio, el silicio a menudo se presenta sin combinar o formando compuestos complejos de Fe-Al-Si, que se depositan en los límites de grano. Estas impurezas actúan como sitios de concentración de esfuerzos (entallas), lo que puede disminuir la ductilidad y tenacidad, aunque se observe un ligero aumento en el límite elástico (Palas Zúñiga, 2012).

Titanio (Ti): Presente en rangos de 10 a 100 ppm en aluminio de pureza comercial, el titanio reduce la conductividad eléctrica del aluminio. Es ampliamente empleado

como refinador de grano en las aleaciones de aluminio fundido, a menudo en combinación con pequeñas cantidades de boro, una aplicación crucial para controlar la microestructura y las propiedades mecánicas de las piezas fundidas (Palas Zúñiga, 2012).

1.1.3 Aleación de aluminio A356

La clasificación de las aleaciones de aluminio se divide principalmente en dos categorías: productos forjados y productos de fundición (tabla 2 y 3). Para su estandarización, existen varias instituciones.

Entre las más relevantes se encuentran: la International Alloy Designation System (IADS) para productos forjados, American National Standards Institute (ANSI), ambas con base en la Aluminum Association de los Estados Unidos. Otras organizaciones importantes incluyen la International Organization for Standardization (ISO) y el Unified Numbering System (UNS) (Palas Zúñiga, 2012).

El sistema de designación para el aluminio y sus aleaciones no solo clasifica el tipo de producto (forjados, piezas fundidas o lingotes de fundición), sino también sus respectivos tratamientos. Es importante destacar que los lingotes de fundición son una excepción, ya que no se clasifican por temperatura. Esta designación y la composición de las aleaciones, junto con sus tratamientos, están registradas por la Aluminum Association (AA) bajo el estándar ANSI H35.1 en los Estados Unidos (Palas Zúñiga, 2012).

Es importante mencionar que los productos de aluminio puro y sus aleaciones son codificados de acuerdo con la norma H35.1 de la American National Standard Institute (ANSI), mientras que las aleaciones fundidas se codifican de acuerdo con la norma ASTM B275, ambas emitidas por EE.UU. Estas designaciones son internacionales, aunque hay países que poseen su propia nomenclatura. Para mayor información remitirse al artículo sobre tratamientos térmicos para los aluminios (Castro & Luisa, 2014).

Tabla 2: Codificación de aluminios laminados. Tomada de (Castro & Luisa, 2014).

Aluminio puro 99.0 pureza	1XXX
Aluminio aleado principalmente con Cobre.	2XXX
Aluminio aleado principalmente con Manganeso.	3XXX
Aluminio aleado principalmente con Silicio.	4XXX
Aluminio aleado principalmente con Magnesio.	5XXX
Aluminio aleado principalmente con Magnesio y Silicio.	6XXX
Aluminio aleado principalmente con Zinc.	7XXX
Aluminio aleado con otros elementos (Litio)	8XXX

Tabla 3: Codificación de fundiciones de aluminio. Tomada de (Castro & Luisa, 2014).

Aluminio puro 99.0 pureza	1 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Cobre.	2 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Silicio y adiciones de Cobre y/o Magnesio.	3 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Silicio.	4 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Magnesio.	5 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Zinc.	7 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Estaño.	8 xx.x
Aluminio aleado con otros elementos.	9 xx.x

En el ámbito de la fundición de aluminio, es fundamental comprender y mitigar la formación de defectos como la porosidad y la microporosidad. El principal desafío de

esta tesis radica en que estos defectos se originan primordialmente por la precipitación de hidrógeno disuelto durante el proceso de fusión en estado líquido del metal.

Este estudio se enfoca específicamente en la clasificación de aleaciones de aluminio para fundición, dado que se trabajará con la aleación A356.

Entre las aleaciones de Al-Si destinadas a la fundición, la A356 (Al-7Si-0.3Mg) es la más prevalente, especialmente en los sectores automotriz y aeroespacial. Su popularidad se debe a su excepcional colabilidad y una favorable relación resistencia/peso. Esta aleación es apta para diversos métodos de fundición, incluyendo la cera perdida (Hidalgo, 2019).

La aleación A356 está compuesta por Al-7Si-0.3Mg, (véase la composición química en la tabla 4). El silicio (Si) es el elemento predominante, añadido para mejorar la colabilidad y fluidez del material. El magnesio (Mg), por su parte, confiere la resistencia necesaria. El hierro (Fe) se considera una impureza, ya que suele afectar negativamente las propiedades mecánicas en la mayoría de las aleaciones. Adicionalmente, existen elementos en menor proporción, como el Mn, Cu o Ti, que pueden aportar beneficios significativos al incorporarse a estas aleaciones (Hidalgo, 2019).

Tabla 4. Composición química de la aleación de aluminio A356. (ASTM International, 2015).

Aleación	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
A356	6.5 — 7.5	0.25 — 0.45	0.20 máx	0.20 máx	0.10 máx	—	—	0.10 máx	0.20 máx	Resto (balance)

La aleación A356 se emplea extensamente en el ámbito de la ingeniería estructural y en la fabricación de componentes que demandan baja densidad o elevada resistencia frente a la corrosión. Su participación ha sido significativa en el sector

aeroespacial, particularmente en la construcción de aeronaves con recubrimientos metálicos. Las superficies de A356 desarrollan espontáneamente una capa pasiva de óxido de aluminio que actúa como barrera protectora contra la corrosión (Paredes Jiménez, 2023).

En el diseño automotriz, los vehículos fabricados con A356 incorporan bastidores conformados por perfiles extruidos, lo que garantiza una adecuada rigidez estructural. Esta configuración representa una transformación sustancial respecto al paradigma tradicional basado en carrocerías de acero, donde la rigidez se deriva principalmente del ensamble de paneles (Paredes Jiménez, 2023).

Asimismo, se han desarrollado compósitos con matriz de A356 que encuentran aplicación en sistemas propulsivos como motores y turbinas aeronáuticas, así como en estructuras de soporte como fuselajes y trenes de aterrizaje. La aleación A356 es preferida en entornos aeronáuticos por su resistencia mejorada a la corrosión y a la fatiga cíclica. Su elevada relación resistencia-peso, combinada con una manufacturabilidad eficiente, la convierte en una opción estratégica para sistemas espaciales y misiles (Paredes Jiménez, 2023).

El sector automotriz se posiciona como uno de los principales beneficiarios del uso de A356, explorando su implementación en componentes críticos como válvulas, carcasas de transmisión y cilindros con sistemas de enfriamiento por agua (Paredes Jiménez, 2023).

Además, la aleación A356 se adapta a aplicaciones que requieren propiedades metalúrgicas específicas como alta soldabilidad, excelente colabilidad, hermeticidad bajo presión y resistencia a ambientes corrosivos. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen sistemas de control de motores, instalaciones nucleares y procesos de fundición que emplean moldes permanentes de alta resistencia o moldes para colado por cera perdida (Paredes Jiménez, 2023).

1.1.4 Proceso de fusión en hornos de crisol

Esta sección se enfoca en las etapas prácticas del tratamiento del aluminio fundido, desde la preparación de la carga hasta las operaciones de desoxidación y desgasificación, cruciales para el estudio comparativo. La metalurgia del aluminio en la práctica de la fundición involucra una secuencia de pasos cuidadosamente controlada. Es decir, está influenciada por diversos factores inherentes a los materiales y procesos involucrados en la fusión de las aleaciones de aluminio:

Tipo de unidad de fusión:

Se refiere al horno o equipo utilizado para fundir el metal. La fusión de la aleación de aluminio A356 para el proceso de fundición a la cera perdida se puede llevar a cabo en varios tipos de hornos, siendo el horno de crisol una opción común en fundiciones pequeñas y medianas.

Horno de crisol

En la fundición de aluminio, los hornos de crisol son equipos esenciales para la fusión por lotes de aleaciones no ferrosas. En esencia, el metal se funde y contiene en un recipiente tipo marmita, el crisol, mientras que los calentadores externos, típicamente uso de combustible, transfieren el calor a través del crisol hacia el metal (Calvo, 2016).

Este método de fundir los metales en crisol es uno de los más antiguos y sencillos, y sigue siendo ampliamente utilizado en las fundiciones modernas. Su permanencia se debe a su bajo costo inicial y a que el metal se funde sin contacto directo con el combustible, lo que es crucial para la calidad del aluminio (Calvo, 2016).

Horno de crisol basculante

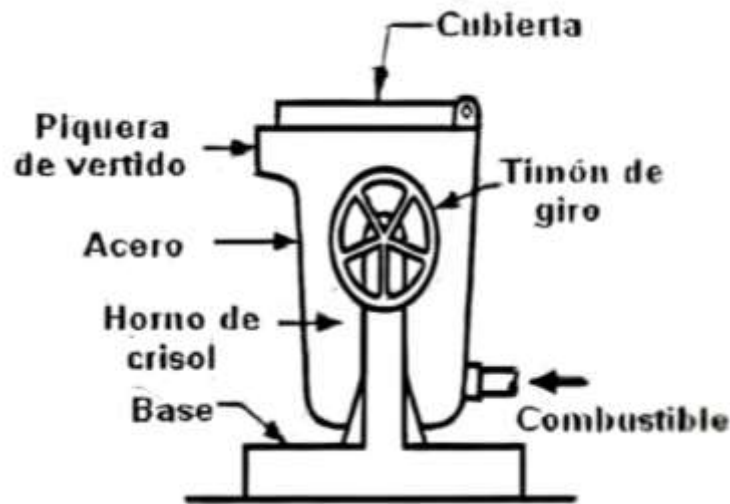


Figura 1. Horno de crisol basculante (Calvo, 2016).

Los hornos de crisol basculantes son una variante avanzada de los hornos de crisol fijos. Su característica distintiva es la capacidad de inclinarse para verter el metal fundido, ya sea en cucharas de colada o directamente en los moldes (figura 1). El eje de rotación de estos hornos puede estar en el centro o transversal a la boquilla de vertido, e incluso directamente por debajo de la boquilla misma, lo que permite un vaciado completo del crisol (Calvo, 2016).

Para operar un horno de crisol basculante, el calentamiento inicial del crisol vacío debe ser lento y gradual durante los primeros 10 minutos, utilizando la llama mínima de los quemadores (figura 2). Posteriormente, la velocidad de calentamiento se incrementa por etapas hasta que el crisol adquiere un color rojo incandescente, lo que suele tomar aproximadamente 30 minutos. Una vez alcanzado este punto, el crisol se carga con la aleación de aluminio y los quemadores se ajustan a su máxima potencia. Es fundamental cargar el crisol con el horno en posición vertical, utilizando tenazas lo suficientemente largas para asegurar que el material llegue al fondo (Calvo, 2016).

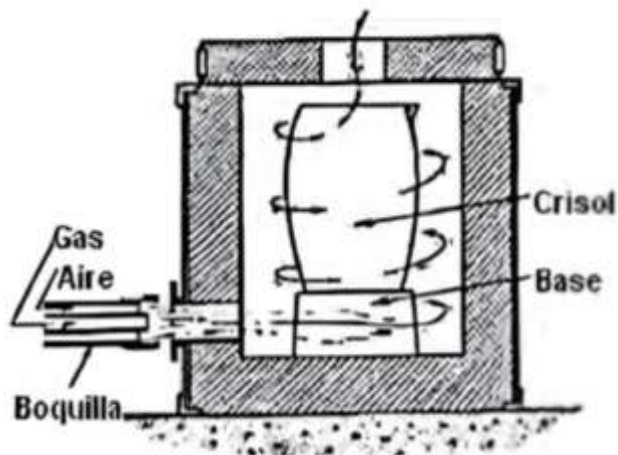


Figura 2. Sección transversal del calentamiento con gas dentro de horno de crisol (Calvo, 2016).

Combustible usado en el horno de crisol

En el contexto de la fundición de aluminio, los hornos de crisol equipados con quemadores tienen la flexibilidad de utilizar diversos combustibles (tabla 5), como el gas natural, el propano o el fuel oil (Calvo, 2016).

A continuación, se presenta una tabla que resume las fuentes de energía compatibles con los hornos de crisol para la fundición de aleaciones no ferrosas:

Tabla 5. Fuentes de energía compatibles con los hornos de crisol (Calvo, 2016).

Fuente de energía	Forma de la fuente de energía	Aleaciones	Horno
Gas	Gas licuado de petróleo (GLP): • Propano (C_3H_8) • Butano (C_4H_{10}) Gas natural licuado (GNL): ○ Metano (CH_4)	No ferrosos	Horno de crisol

En la metalurgia de fusión del aluminio, el objetivo principal es obtener un metal líquido a una temperatura óptima, libre de gases disueltos, óxidos, escorias e inclusiones que puedan comprometer sus propiedades físicas y mecánicas. Además, es crucial realizar esta fusión de manera rápida, evitando un sobrecalentamiento que podría provocar una pérdida significativa de elementos de aleación y, consecuentemente, un bajo rendimiento. Así, un fin primordial de una fusión adecuada es lograr una alta eficiencia en la recuperación de los materiales. Para alcanzar estos objetivos, se emplea lo que se conoce como técnica de fusión (Deaquino Lara, 1996).

Secuencia de la técnica de fusión

En la metalurgia de fusión del aluminio, el diseño de la técnica de fusión abarca los siguientes aspectos generales en la tabla 6, para asegurar la calidad del producto final:

Tabla 6. La técnica de fusión adecuada en hornos de crisol. (Deaquino Lara, 1996).

Pasos	Proceso a realizar
1. Balance de carga	Este primer paso es crucial para determinar las proporciones exactas de los materiales a cargar en el horno. El objetivo es alcanzar la composición química deseada en la aleación fundida, lo cual impactará directamente en las propiedades del producto.
2. Preparación de la carga	La materia prima, ya sean lingotes o chatarra, debe ser preparada adecuadamente antes de su introducción en el horno. Esto incluye ajustar su tamaño, asegurar que esté libre de grasas y aceites, y, fundamentalmente, precalentarla para evitar choques térmicos que puedan dañar los crisoles y optimizar la eficiencia energética del proceso.

3. Acondicionamiento del horno	Dependiendo del tipo de horno utilizado, es esencial realizar un acondicionamiento previo para proteger los crisoles. Por ejemplo, en los hornos de crisol que inician en frío, se debe realizar un precalentamiento para prevenir el desgaste prematuro del crisol, prolongando su vida útil.
4. Secuencia de carga	La secuencia en que se introducen los materiales al horno es de vital importancia, ya que influye directamente en la velocidad de fusión, la calidad del producto final y las recuperaciones (rendimiento). Esta secuencia se determina por factores como el tipo y cantidad relativa de materia prima, sus puntos de fusión y solubilidades.
5. Consecución de la temperatura de trabajo	Alcanzar y mantener la temperatura de trabajo adecuada es fundamental. Esta temperatura se establece en función de los pasos subsiguientes del proceso antes del vaciado en moldes.
6. Primera desescorificación	Este paso tiene como objetivo evitar la contaminación del baño líquido por la escoria ya formada durante las etapas iniciales y los tratamientos del metal líquido. La eliminación oportuna de escorias es clave para mantener la pureza de la aleación.
7. Tratamientos del metal líquido	Se aplican uno o varios tratamientos al metal fundido para garantizar la microestructura y las propiedades mecánicas deseadas en la pieza final. Ejemplos incluyen la desgasificación para eliminar hidrógeno o la adición de modificadores para afinar el grano.

8. Segunda deseskorificación	Una segunda fase de deseskorificación se realiza para evitar que cualquier escoria residual ingrese a los moldes durante el vaciado, lo cual podría generar defectos superficiales o inclusiones en la pieza fundida.
9. Consecución de la temperatura de colada	Finalmente, se ajusta el metal a la temperatura óptima para la colada. Esta temperatura es específica para cada tipo de aleación y para las secciones de las piezas a producir, asegurando un llenado adecuado del molde y la formación de una estructura sólida uniforme.
10. Vaciado a moldes	El último paso es el vaciado controlado del metal líquido en los moldes, un momento crítico que determina la forma final de la pieza y donde la correcta gestión de los pasos anteriores se materializa.

Cada uno de estos aspectos debe ser rigurosamente observado y controlado para lograr una fusión adecuada de cualquier material metálico en el proceso de fundición de aluminio.

Materiales metálicos de carga

La selección y gestión de los materiales metálicos de carga, definidos por el tipo de aleación, la forma de la materia prima (lingotes, retorno interno o aleante maestro) y la cantidad a procesar, son críticas para el éxito de la fusión. Es fundamental controlar rigurosamente la calidad del retorno (chatarra interna), asegurando que esté libre de impurezas, humedad y contaminantes para evitar defectos por inclusiones, la generación excesiva de escoria y la dificultad en el proceso de desgasificación.

Aspectos metalúrgicos

1. Diagrama de fase: Las temperaturas de fusión, tanto de elementos puros como de aleaciones, son parámetros fundamentales en la determinación de las temperaturas de trabajo para la preparación de las aleaciones fundidas.

El diagrama de fase representa gráficamente las fases presentes en función de la composición química y las temperaturas específicas, este diagrama termodinámico es esencial para la selección o procesamiento de los materiales. La información que se puede obtener de los diagramas de fase, es: (Escudero García, 2016).

- 1.- Identificación de las fases presentes en distintas composiciones y temperaturas bajo condiciones de enfriamiento lento, es decir, en equilibrio termodinámico.
- 2.- Evaluación de la solubilidad de un elemento o compuesto dentro de otro en estado sólido bajo equilibrio termodinámico.
- 3.- Determinación de la temperatura de inicio de solidificación de una aleación y de los puntos donde ocurren transformaciones de fase.
- 4.- Establecimiento de las temperaturas de fusión específicas para cada fase presente.
- 5.- Determinar las fases de solubilidad que intervienen en el mecanismo de endurecimiento por precipitación.

Las aleaciones de aluminio-silicio representan entre el 85% y el 90% de las piezas fundidas de aluminio, debido a que el silicio, como elemento principal de aleación, mejora significativamente la fluidez del metal fundido y su resistencia a la corrosión (Escudero García, 2016).

El diagrama de fase Al-Si (figura 3) exhibe un punto eutéctico característico a una concentración de 12.5% de Si y una temperatura de 577 °C. Según su contenido de silicio, estas aleaciones se clasifican en: (Escudero García, 2016).

Hipoeutécticas: con contenido de Si inferior al 12.5%.

Hipereutécticas: con contenido de Si superior al 12.5%.

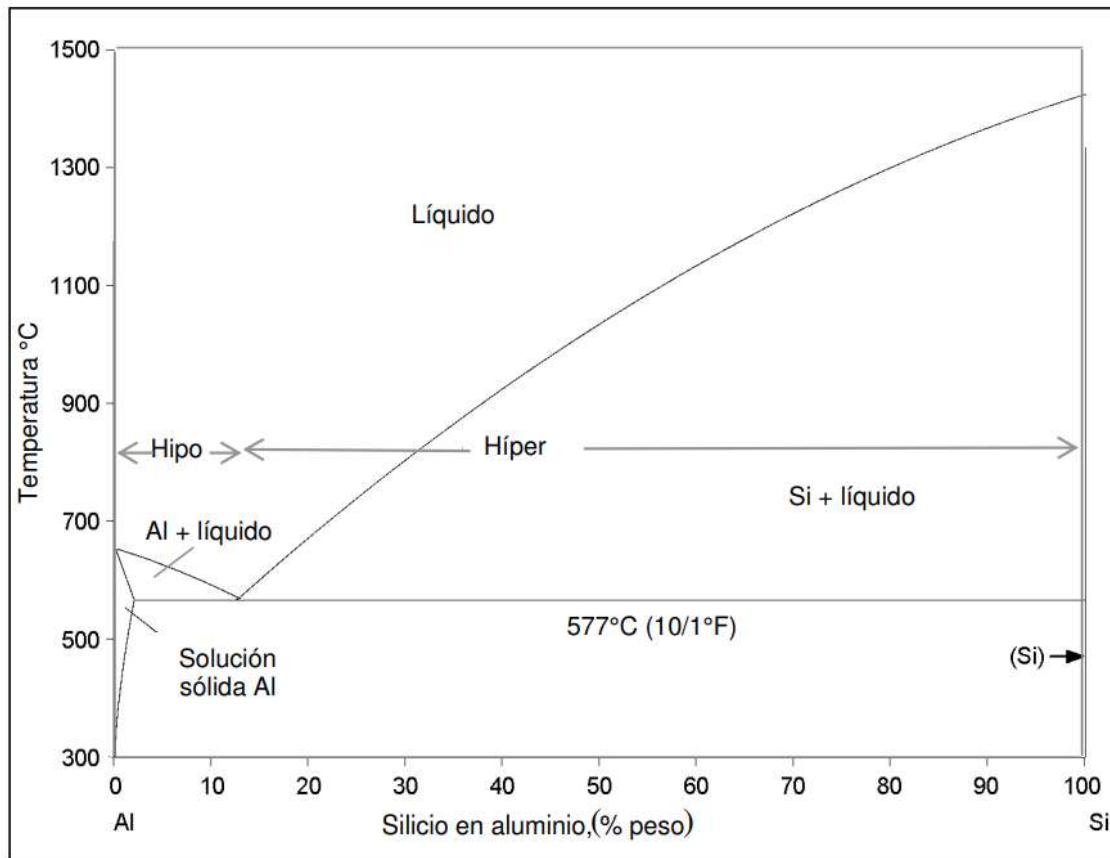


Figura 3. Diagrama de fase de Al-Si (Escudero García, 2016).

2. Fundentes: Sustancias añadidas para limpiar el metal y evitar la formación de óxidos.

El aluminio posee una alta afinidad química con el oxígeno, lo que provoca la formación instantánea de una capa superficial de óxido de aluminio (Al_2O_3) de aproximadamente 4 nanómetros de espesor, incluso en condiciones atmosféricas normales. Esta capa se genera en fracciones de segundo tras la exposición del metal al ambiente. Además, cuando el aluminio fundido entra en contacto con vapor de agua, se facilita la absorción de hidrógeno en el baño metálico. Durante la solidificación, este gas tiende a liberarse en forma de burbujas, generando porosidad

y otros defectos estructurales. Tanto el óxido de aluminio como el hidrógeno disuelto son responsables de los defectos más frecuentes en componentes fundidos de aluminio. También es común la aparición de inclusiones derivadas de la interacción entre el magnesio presente en el metal o en los refractarios y el aluminio fundido. Esta reacción forma aluminato de magnesio (espinela), que se manifiesta visualmente como manchas oscuras en la superficie del metal solidificado (Reynolds, 2022).

Composición y presentación de los fundentes

Los fundentes comerciales para aluminio se presentan en diversas formas físicas, siendo las mezclas en polvo las más utilizadas. También existen formulaciones en gránulos y tabletas. La base química de la mayoría de los fundentes incluye cloruro de potasio (KCl) y cloruro de sodio (NaCl), aunque pueden incorporarse otros compuestos inorgánicos como sulfatos, fluoruros, carbonatos y nitratos, según los requerimientos específicos del proceso metalúrgico. (Reynolds, 2022).

En los procesos de fundición, especialmente en la remoción de escorias, el uso de fundentes es indispensable debido a las altas temperaturas requeridas para garantizar la eficiencia metalúrgica. Estos compuestos se clasifican principalmente en tres tipos, según su función específica dentro del tratamiento térmico del metal:

- **Fundentes de cobertura:** Diseñados específicamente para fundiciones de aluminio, estos fundentes actúan como barrera protectora frente a la oxidación superficial del metal fundido y limitan la absorción de hidrógeno atmosférico. Su rango de fusión se sitúa entre los 420 °C y 600 °C, y pueden encontrarse tanto en estado sólido como líquido. Su aplicación contribuye a preservar la calidad del baño metálico durante la fusión (Mora Reinozo, 2020).
- **Fundentes de escoriado:** Estos fundentes tienen como propósito facilitar la separación de la escoria del aluminio líquido. Operan mediante una reacción exotérmica controlada que permite una eficiente recuperación del metal atrapado en la escoria. En el mercado existe una amplia gama de formulaciones con propiedades exotérmicas variables. Para seleccionar el fundente adecuado,

se recomienda evaluar parámetros como el porcentaje de aluminio retenido en la escoria, el volumen de escoria generado y la compatibilidad química del fundente con la aleación base, especialmente en sistemas que requieren bajos contenidos de elementos como calcio (Ca), sodio (Na) u otros aditivos sensibles (Mora Reinozo, 2020).

- **Fundentes de limpieza:** Su función principal es remover óxidos metálicos presentes en el baño fundido. Estos fundentes están formulados para generar una escoria más ligera y menos compacta que la producida por los fundentes de escoriado, facilitando así la limpieza del metal. Para maximizar su efectividad, todos los tipos de fundentes deben ser sometidos a una agitación vigorosa que asegure un contacto homogéneo con el baño metálico (Mora Reinozo, 2020).

3. Adiciones: También se pueden añadir refinadores de grano para controlar el tamaño y la morfología de los granos cristalinos durante la solidificación, lo que mejora las propiedades mecánicas de la fundición.

Refinación de tamaño de grano

El refinamiento de grano contribuye a incrementar la resistencia al agrietamiento en caliente, reduce los efectos negativos de la porosidad gaseosa y favorece una distribución más homogénea de dicha porosidad en el cuerpo de la aleación. El tamaño final del grano está determinado por la cantidad de núcleos disponibles en el metal líquido al inicio de la solidificación, así como por la velocidad de enfriamiento: cuanto más rápida sea esta, más fino será el grano obtenido (Medina Ortiz, 2018).

La incorporación de ciertos elementos de aleación puede inducir la formación de núcleos de crecimiento. El titanio, especialmente cuando se combina con boro, actúa como un potente agente nucleante y es el refinador más utilizado en la industria. El titanio por sí solo, en concentraciones de 0.02–0.15%, puede emplearse, aunque su efecto se atenúa aproximadamente a los 40 minutos. La adición conjunta de boro y titanio no solo genera granos más finos, sino que también reduce la aparición de decoloraciones superficiales (Medina Ortiz, 2018).

Es recomendable realizar la desgasificación y el refinamiento de grano de manera simultánea, ya que los agentes nucleantes, especialmente en forma de tabletas, pueden absorber humedad y elevar el contenido de hidrógeno disuelto en el baño metálico si no se manejan adecuadamente (Medina Ortiz, 2018).

Es bien sabido que los metales y aleaciones por lo general se solidifican con estructura de grano columnar grueso bajo condiciones de colada normales a menos que el modo de solidificación se controle cuidadosamente. Es posible desarrollar granos equiaxiales finos en la estructura, ya sea aumentando el número de sitios de nucleación o por la multiplicación de granos. McCartney ha definido refinamiento del grano como la supresión deliberada de crecimiento de grano columnar, en lingotes y piezas de fundición y una buena formación de la estructura de solidificación equiaxial por todo el material (Medina Ortiz, 2018).

Las ventajas que principalmente se obtienen con el refinamiento de grano es: reducción de la susceptibilidad al agrietamiento en caliente, mejora en la distribución de porosidad, incremento en la resistencia mecánica y en la elongación (Medina Ortiz, 2018).

Consideraciones operativas: Una posible desventaja del refinamiento excesivo es la disminución de la fluidez del metal fundido, lo cual puede dificultar el llenado completo de moldes complejos. Existen dos métodos principales para lograr el refinamiento de grano: (Medina Ortiz, 2018).

1. Enfriamiento acelerado: mediante el uso de templaderas en los moldes, se induce una solidificación rápida que favorece la formación de granos finos.
2. Adición de agentes nucleantes: se introducen compuestos químicos que incrementan la cantidad de sitios de nucleación disponibles en el baño metálico.

1.2 Métodos de desgasificación del aluminio

1.2.1 Fuentes de adsorción de hidrógeno en el metal líquido

Diversas fuentes contribuyen a la absorción de hidrógeno durante la fundición de aluminio:

- **Hornos de fusión (combustión de gas):** Los gases de combustión contienen humedad, que al reaccionar con el aluminio en estado líquido, libera hidrógeno. Es crucial mantener un control riguroso de la combustión, especialmente en hornos que utilizan combustibles líquidos o gaseosos. Una ligera atmósfera oxidante es preferible, ya que la capa de óxido de aluminio formada en la superficie del baño actúa como una barrera protectora contra la posterior interacción con oxígeno o vapor de agua (Murillo, 1987).
- **Humedad atmosférica:** La humedad en el ambiente es una fuente significativa de hidrógeno. Su concentración varía considerablemente según el clima, siendo mayor en ambientes cálidos y húmedos. Esta fuente se vuelve particularmente crítica cuando se rompe la película de óxido superficial del metal líquido, como durante el trasvase del caldo o cualquier manipulación que exponga el metal a la atmósfera. Si bien, bajo condiciones de fusión óptimas, la absorción de hidrógeno de la humedad atmosférica es reducida, incluso con niveles de humedad moderados, en condiciones menos favorables, incluso bajas humedades pueden causar problemas. Esto hace que el manejo del metal desde el horno hasta las cucharas de colada y los moldes sea una operación muy delicada (Murillo, 1987).
- **Superficies de aluminio y herramientas frías:** Las películas de gases adsorbidos, productos de corrosión o reacción en las superficies del aluminio, así como la humedad en herramientas frías (como cucharas o agitadores), son también importantes fuentes de hidrógeno que deben ser consideradas (Murillo, 1987).
- **Humedad del molde:** La humedad presente en los moldes entra en contacto directo con el metal líquido durante el vertido. Un diseño adecuado de canales

y bebederos es esencial para minimizar la turbulencia del metal, lo que a su vez reduce la absorción de hidrógeno (Murillo, 1987).

1.2.2 Mecanismo de absorción del hidrógeno en el baño de aluminio líquido

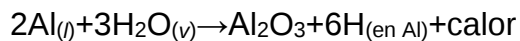
Investigaciones realizadas han confirmado que, entre los diversos gases, solo el hidrógeno exhibe una solubilidad significativa en las fundiciones de aluminio que podría generar defectos metalúrgicos. Esta particularidad ha dirigido la mayor parte de los estudios sobre la absorción de gases en el aluminio hacia el comportamiento del hidrógeno.

Comprender el origen del hidrógeno es crucial para minimizar su absorción. Dado que las condiciones en un entorno de fundición pueden fluctuar diariamente, es indispensable una revisión exhaustiva de todas las posibles fuentes de hidrógeno antes de cada ciclo de fundición.

Una elevada concentración de hidrógeno disuelto conduce a un defecto crítico: la porosidad, manifestada como pequeñas cavidades distribuidas en la pieza fundida (Pinhole). Este tipo de porosidad impacta negativamente las propiedades mecánicas del aluminio, disminuyendo la resistencia a la tracción y la elongación, aunque su efecto sobre el límite elástico es mínimo (Murillo, 1987).

La incorporación del hidrógeno molecular (H_2) en el baño de aluminio líquido es un proceso exotérmico. Inicia con la adsorción en la superficie del metal, seguida de su difusión hacia el interior en estado atómico (Murillo, 1987).

Cuando la fuente de humedad es el vapor de agua, se produce una reacción de solubilización de hidrógeno con el aluminio líquido que genera alúmina (Al_2O_3) e hidrógeno atómico (H), liberando energía, como se ilustra en la siguiente ecuación:



Para ilustrar el impacto de la presencia de hidrógeno, considere que, en condiciones de alta humedad, un metro cúbico de aire podría contener hasta 13 gramos de vapor de agua. Si este reacciona con el aluminio como se describe, se liberaría más de un gramo de hidrógeno. Una cantidad tan pequeña de hidrógeno es suficiente para

causar fallas severas que podrían resultar en el rechazo de una producción de aluminio fundido (Murillo, 1987).

Es crucial controlar la concentración final de hidrógeno en el metal líquido. Esto se debe a que, a medida que la temperatura desciende durante la solidificación, la solubilidad del hidrógeno disminuye drásticamente. Aunque el hidrógeno busca escapar, el corto tiempo de solidificación a menudo lo atrapa dentro de la pieza, formando burbujas conocidas como porosidades. Este defecto compromete significativamente las propiedades mecánicas y la apariencia superficial de la pieza fundida (Fonseca Rodríguez, 2006).

Influencia de la temperatura en la solubilidad del hidrógeno

Tanto el aluminio en estado líquido como las elevadas temperaturas hacen que la absorción de hidrógeno sea un proceso espontáneo y difícil de prevenir, dadas las múltiples fuentes de hidrógeno presentes en el proceso de fundición.

Aunque los elementos de aleación no alteran la solubilidad del hidrógeno por debajo del punto de fusión, por encima de este, las curvas de solubilidad sí muestran un desplazamiento. Por ejemplo, en la figura 4, en aleaciones como la A356 (que contiene silicio y magnesio y tiene un punto de fusión más bajo que el aluminio puro), se observa una disminución en la solubilidad del hidrógeno en comparación con el aluminio puro (Fonseca Rodríguez, 2006).

Dado que las altas temperaturas son perjudiciales para el metal líquido, es esencial utilizar temperaturas de colado relativamente bajas. Esto evita el recalentamiento innecesario del metal y, consecuentemente, reduce la absorción de gases.

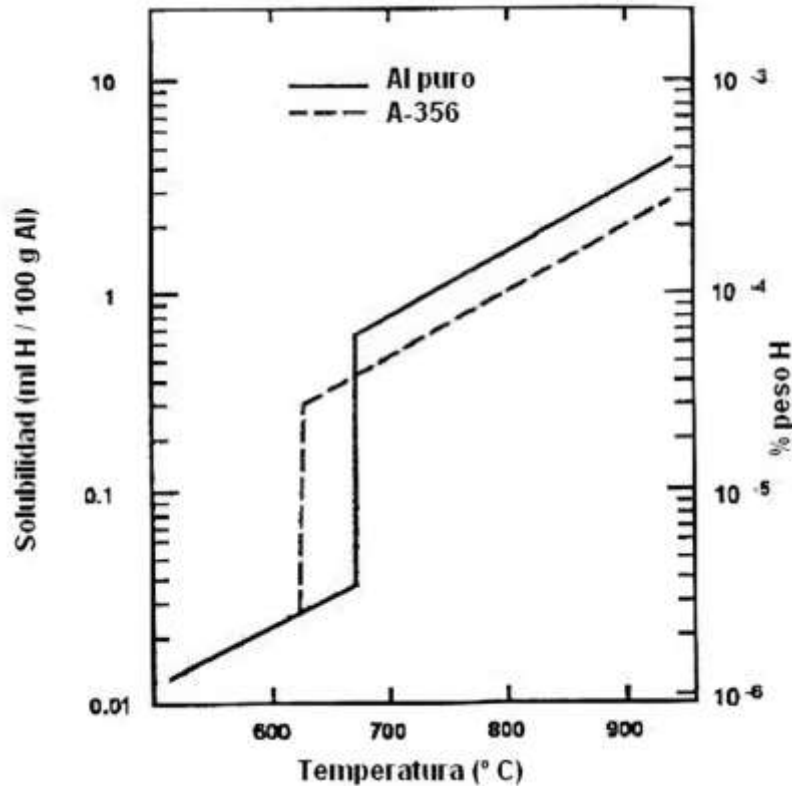


Figura 4. Solubilidad del hidrógeno en el aluminio puro en función de la temperatura, manteniendo constante la presión de hidrógeno (Fonseca Rodríguez, 2006).

El contenido de hidrógeno y su solubilidad en el aluminio se expresan comúnmente en mililitros de hidrógeno (a 20°C y 1 atm de presión) por cada 100 gramos de metal, o en partes por millón (ppm) (Hernández Navarro, 2017). La equivalencia entre estas unidades es la siguiente:

- $\text{ppm} = 0.8381 \times \text{ml}/100 \text{ g}$
- $\text{ml H}/100\text{g Al} = 1.1932 \times \text{ppm}$

En resumen, al preparar el metal para la fundición, es imperativo que la temperatura de colado y el tiempo de fusión sean los mínimos posibles. Estos parámetros son determinantes para controlar la absorción de hidrógeno y, por ende, la calidad final de la fundición.

1.2.3 Desgasificantes utilizados en la industria de fundición de aluminio

El propósito principal de la desgasificación es reducir el contenido de hidrógeno disuelto en el metal líquido. Al eliminar el hidrógeno, se previene la porosidad que se forma durante la solidificación y que afecta negativamente las propiedades de la pieza.

Desde una perspectiva metalúrgica en fundiciones de aluminio, hacer burbujear gases a través del metal líquido ha demostrado ser un método muy efectivo para la desgasificación. Es importante distinguir entre los gases que actúan por un mecanismo de lavado físico (gases inertes) y aquellos que participan en una reacción química durante el tratamiento (tabletas de hexacloroetano C_2Cl_6) (Ayala Cázares, 2014).

El cloro es un gas químicamente activo, y es considerablemente más reactivo que el nitrógeno. Cuando el cloro se introduce en el fundido, forma cloruro de aluminio, el cual se sublima y asciende a la superficie del baño. Gracias a su fina y uniforme distribución, el cloruro de aluminio provoca un lavado muy activo, contribuyendo a una eficiente eliminación de impurezas. No obstante, el uso de cloro presenta desafíos económicos, sanitarios (ya que es venenoso) y ecológicos que deben considerarse (Ayala Cázares, 2014).

- **Proceso de desgasificación con hexacloroetano**

Es posible obtener las ventajas de desgasificación del cloro utilizando el hexacloroetano (C_2Cl_6), un compuesto orgánico sólido no higroscópico (no se humedecen ni se disuelven al estar expuestos a la humedad). Este se descompone al introducirlo bajo la superficie del metal líquido, liberando cloro (Ayala Cázares, 2014).

Los fabricantes de equipos de fundición suelen ofrecer hexacloroetano bajo diversas marcas comerciales, ya sea en polvo o en tabletas, dosificadas para tratar volúmenes específicos de aleación fundida.

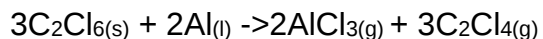
Cuando se desgasifica con hexacloroetano, es crucial cerrar el horno antes de que la carga alcance su temperatura de vaciado. Esta temperatura, una vez cortado el combustible, la superficie del baño debe ser tratada con fundente para eliminar la mayor parte de las impurezas y luego cubrirse con una capa delgada adicional de fundente. La temperatura de fusión ideal para este proceso debe oscilar entre 700 – 710°C (Ayala Cázares, 2014).

La cantidad requerida de hexacloroetano se introduce bajo la superficie del metal utilizando un bastón especial con forma de campana con poros en su extremo. El bastón se mantiene cerca del fondo del crisol hasta que la evolución del cloro ha cesado, lo que toma aproximadamente tres minutos (Ayala Cázares, 2014).

Posteriormente, se retira el bastón y se permite que la mezcla repose durante unos diez minutos, tiempo en el que debería alcanzar la temperatura de vaciado. Finalmente, el fundente en la superficie de la carga se agita para disolver las impurezas y otras materias en suspensión. Una vez hecho esto, el fundente se retira con una cuchara perforada, dejando el baño listo para el vaciado (Ayala Cázares, 2014).

Reacción química del hexacloroetano y remoción del hidrógeno

La reacción química que ocurre en el aluminio fundido con el hexacloroetano es la siguiente: (Ayala Cázares, 2014).



En este proceso, el cloruro de aluminio (AlCl_3) generado contribuye a la remoción del hidrógeno por arrastre mecánico, ya que el hidrógeno es adsorbido por este compuesto.

• Gases inertes y su aplicación

El nitrógeno es un ejemplo de gas inerte. Al pasar a través del aluminio fundido, el nitrógeno reduce la presión parcial del hidrógeno, lo que facilita su eliminación del metal. Simultáneamente, este proceso ayuda a arrastrar óxidos y otras impurezas no metálicas hacia la superficie. Sin embargo, el nitrógeno no es recomendable para

aleaciones de aluminio-magnesio (AlMg) debido a la posible formación de nitruros. En estos casos, es preferible utilizar argón (Ayala Cázares, 2014).

Proceso de desgasificación con lanza de grafito con gas inerte

Este proceso consiste en introducir gas nitrógeno o argón en el baño de aluminio líquido a través de una lanza que tiene un recubrimiento refractario. Durante la inyección, se mueve constantemente la lanza en el metal para asegurar una distribución uniforme del gas en todo el baño. Para optimizar la eficiencia de este sistema, es fundamental controlar dos variables clave: el tiempo de inyección y el flujo del gas (Hernández Navarro, 2017).

Mecanismos de transporte de masa en la eliminación del hidrógeno disuelto del aluminio líquido usando gas inerte.

Al introducir burbujas de gas de purga en el aluminio líquido para eliminar el hidrógeno disuelto, ocurren varios fenómenos de transferencia de masa. Las etapas cinéticas clave involucradas en la desgasificación del aluminio mediante un gas inerte son las siguientes: (Hernández Navarro, 2017).

- 1) **Transporte convectivo y difusivo:** El hidrógeno se mueve por convección y difusión desde el interior del metal líquido hasta las proximidades de la burbuja de gas inerte.
- 2) **Difusión a través de la capa límite:** El hidrógeno luego difunde a través de una delgada capa de fluido estancado, conocida como capa límite, que envuelve la burbuja.
- 3) **Adsorción y desorción en la burbuja:** En la superficie de la burbuja, ocurre una adsorción química donde dos átomos de hidrógeno se separan de una molécula. Posteriormente, una molécula de hidrógeno gaseoso se desorbe de la superficie de la burbuja.
- 4) **Difusión gaseosa dentro de la burbuja:** Una vez dentro de la burbuja, el hidrógeno se difunde como una especie gaseosa a través del gas de purga.

- 5) **Remoción del hidrógeno:** Finalmente, el hidrógeno es transportado hacia la superficie del baño de metal o hacia las paredes refractarias, saliendo del sistema.

1.2.4 Técnicas para la evaluación de porosidad por hidrógeno

Es fundamental que la desgasificación siempre se combine con un método de evaluación del nivel de hidrógeno. Sin esta medición, el fundidor carece de un medio confiable y reproducible para determinar cuándo se ha alcanzado la concentración de hidrógeno deseada.

Técnica de muestras líquidas: Método de presión reducida (Ensayo Straube-Pfeiffer)

Una de las técnicas más comunes es el método de presión reducida, también conocido como el ensayo Straube-Pfeiffer. En este procedimiento, se toma una muestra del metal líquido y se le permite solidificar bajo una presión reducida dentro de un crisol recubierto. Al disminuir la presión, los poros de gas presentes en el metal se expanden (se puede ver la comparativa en figura 5), resultando en porosidades más grandes en comparación con las que se formarían bajo presión atmosférica (Bautista Lujano & Pasalagua Chávez, 2008).

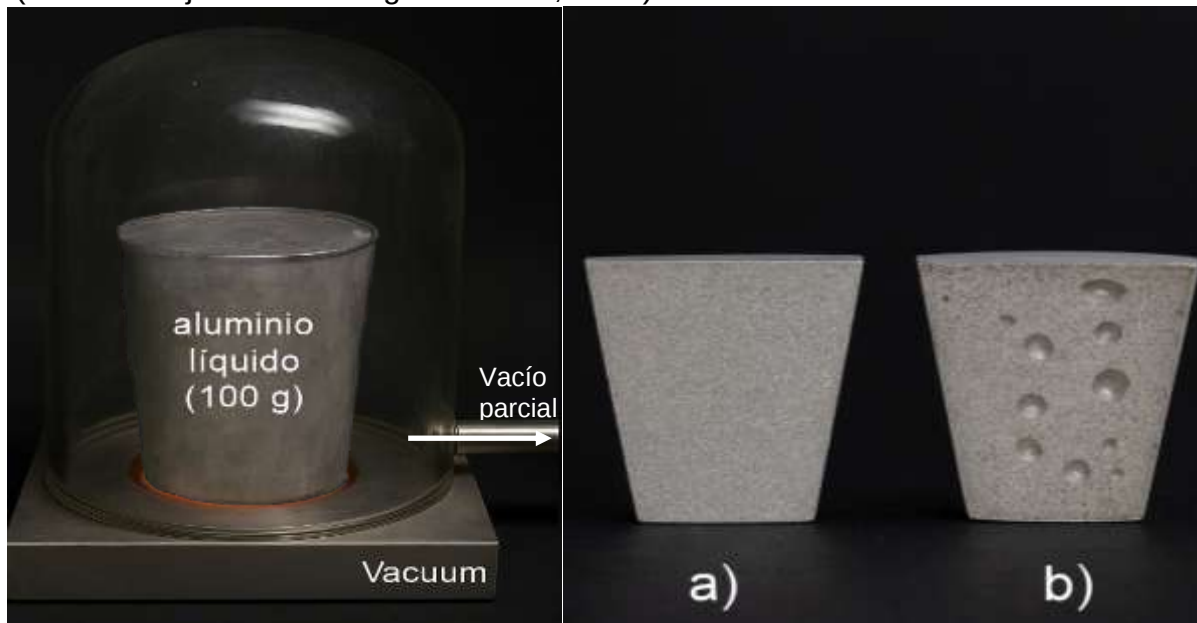


Figura 5. Comparación macroscópica de probetas solidificadas: a) Muestra solidificada en atmósfera normal, b) Muestra solidificada en atmósfera reducida.

Métodos de lectura directa

Los métodos de lectura directa se basan en la observación visual de la superficie de la muestra solidificada. Si la superficie de la muestra presenta una forma abombada o convexa, esto indica que el baño líquido tiene un contenido de hidrógeno relativamente alto. Por el contrario, una superficie hundida o cóncava sugiere un bajo contenido de hidrógeno en el metal líquido (Bautista Lujano & Pasalagua Chávez, 2008).

La porosidad final de la probeta se evalúa visualmente, ya sea examinando un corte central y examinar ambas mitades o midiendo su densidad relativa. Es importante considerar que la presencia de inclusiones en el metal puede influir en cómo se distribuye la porosidad interna (Bautista Lujano & Pasalagua Chávez, 2008).

Evaluación visual de la porosidad interna

Una técnica consiste en cortar la muestra solidificada por la mitad y examinar ambas superficies para identificar la porosidad interna. Esta inspección visual se compara con muestras patrón, como las mostradas en la figura 6. Para una evaluación más precisa, las secciones de la muestra pueden ser pulidas utilizando métodos de preparación metalográfica (Bautista Lujano & Pasalagua Chávez, 2008).

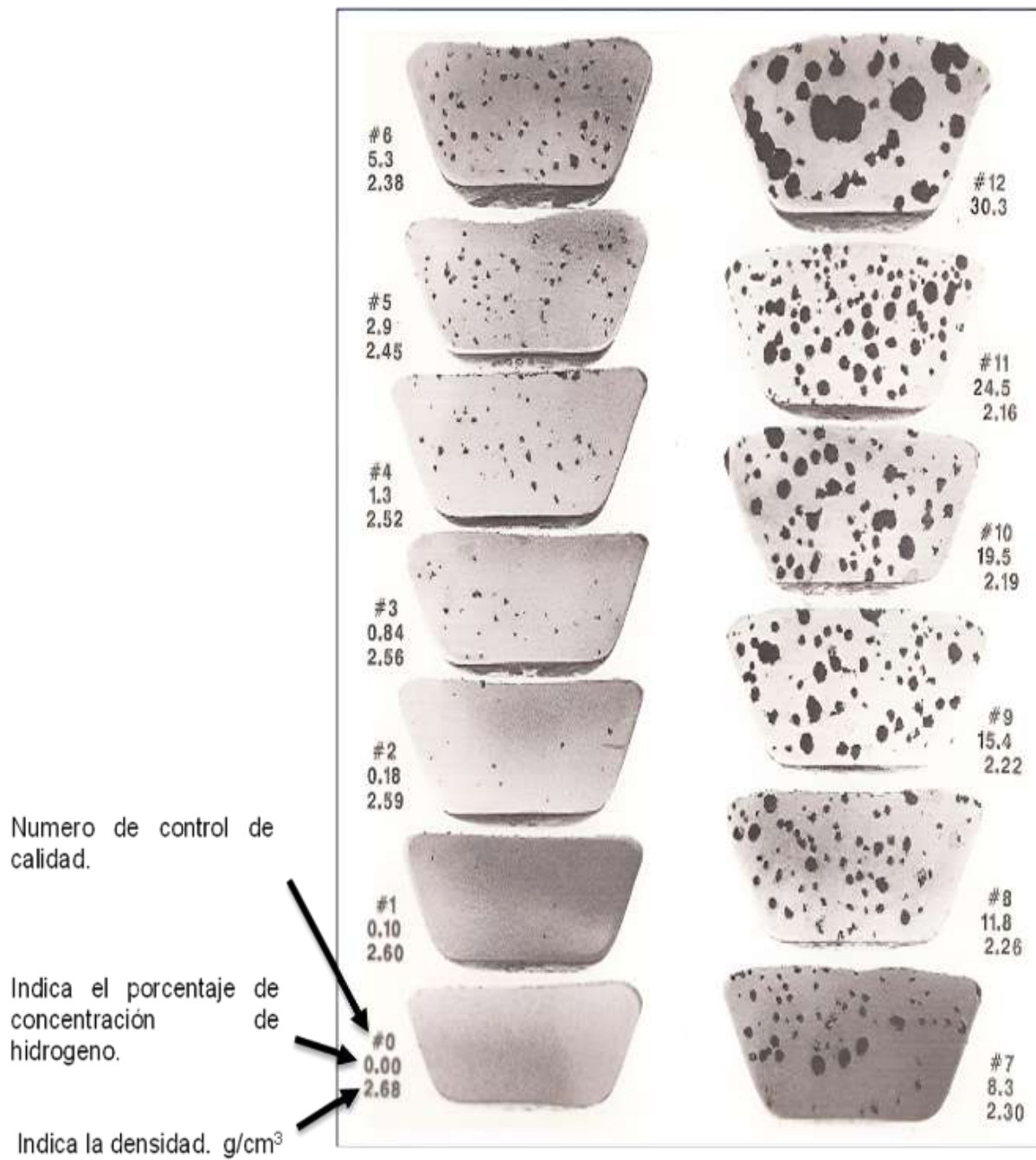


Figura 6. Tabla de referencia de los patrones estandarizados para la evaluación visual de la porosidad por hidrógeno de las probetas seccionadas (Medina Ortiz, 2018).

Evaluación semicuantitativa por densidad relativa

Existen también métodos de evaluación semicuantitativa que se basan en el cálculo de la densidad relativa de las muestras completas obtenidas mediante el ensayo de presión reducida (Bautista Lujano & Pasalagua Chávez, 2008).

La densidad relativa es un método rápido, eficaz, simple y ampliamente aplicado. Se determina pesando la muestra primero en aire y luego en agua. La fórmula es:

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{Peso del espécimen en aire}}{(\text{Peso del espécimen en aire} - \text{Peso del espécimen en agua})}$$

Una densidad relativa más alta en la muestra indica un menor contenido de gas en el baño. La mayoría de las fundiciones emplean este método para establecer los límites aceptables de hidrógeno en su proceso (Bautista Lujano & Pasalagua Chávez, 2008).

Es importante destacar que las operaciones que utilizan hornos de crisol o cucharas de transferencia para el metal líquido suelen determinar la densidad relativa antes de autorizar el vaciado del metal. En el caso de fundiciones que operan con hornos de reverbero para fusión continua, la densidad relativa se evalúa periódicamente, generalmente cada una, dos o tres horas, dependiendo de la variabilidad del proceso específico (Bautista Lujano & Pasalagua Chávez, 2008).

Prueba Tatur

La prueba Tatur es una técnica utilizada para evaluar macro y micro porosidad en aleaciones. La prueba utiliza un molde permanente de geometría estándar. El asentamiento y la contracción, macro porosidad y micro porosidad puede evaluarse por medición de la densidad y el desplazamiento de la contracción. Estos tipos de contracción se ven afectados por muchos parámetros, tales como inclusiones, contenido de gas, elementos de aleación refinamiento de grano, la modificación en la microestructura y la tasa de enfriamiento. Los investigadores Argo y Gruzleski utilizaron la prueba Tatur como una medida para controlar los niveles de Hidrógeno de 0.20 ml H₂/100 g Al. La prueba consta de un molde permanente de geometría fija.

Utilizando una técnica sencilla para medir la densidad y el desplazamiento de agua, esto es posible para cuantificar el volumen de micro contracción, macro contracción y el asentamiento de metal por contracción. A fin de obtener información confiable se requiere tomar una serie de muestras para poder evaluar estadísticamente. La densidad teórica puede ser obtenida por cálculos, mientras que la densidad aparente puede ser calculada con el principio de Arquímedes. El total de la contracción de la aleación no es afectada por la modificación, solamente cambia de macro contracción a micro contracción, la modificación con estroncio o sodio generan cambios en la disminución de macro contracción, pero a su vez se genera un aumento en la micro contracción, en otras palabras, la micro contracción es re-distribuida cuando la modificación ocurre. A través de este estudio se puede evaluar la distribución de porosidad que existe en el material, realizando pruebas controlando la temperatura de molde y de metal líquido, el siguiente esquema muestra la geometría de molde que se utiliza en este estudio, así también la distribución y concentración de macro porosidad y micro porosidad (Medina Ortiz, 2018).

1.3 Proceso de fundición a la cera perdida

El proceso de fundición a la cera perdida es una ruta metalúrgica de precisión que permite la fabricación de componentes con geometrías complejas y tolerancias ajustadas. A continuación (figura 7), se detalla su secuencia operativa:

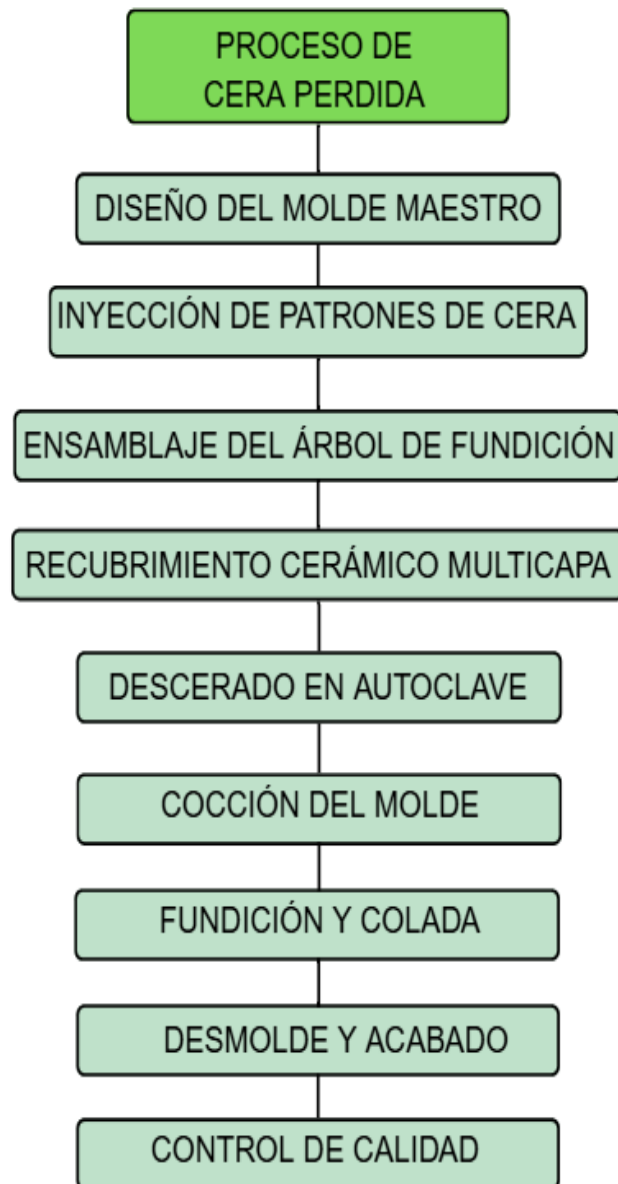


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de fundición a la cera perdida.

Diseño y fabricación del molde maestro

La fase inicial consiste en el diseño y la fabricación de un molde maestro de aluminio. Este molde se elabora meticulosamente para replicar las especificaciones dimensionales y geométricas de la pieza final deseada (Morales Ramírez, 2023). La figura 8 muestra las cavidades de impresión en matriz maestra de aluminio para la conformación de modelos de cera inyectada.



Figura 8. Molde maestro de aluminio (Morales Ramírez, 2023).

Inyección de cera

Una vez listo el molde, se procede a la inyección de cera industrial mediante una máquina inyectora especializada. En un área dedicada a la cera, se producen repetidamente modelos de cera con la réplica exacta de la pieza. Para asegurar una fácil extracción del modelo, se aplica un desmoldante en las cavidades internas del molde y se utiliza aire a presión para su fácil extracción (Morales Ramírez, 2023). En la figura 9 se observa el proceso de inyección de cera de patrones en matriz metálica bajo parámetros controlados de temperatura y presión.



Figura 9. Proceso de inyección de cera en molde de aluminio (Morales Ramírez, 2023).

Acabado y ensamble del modelo de cera

Los modelos de cera obtenidos son sometidos a un proceso de rebabado para optimizar su acabado superficial (figura 10). Si el diseño del molde de aluminio no incluye directamente las coladas (canales de alimentación), estas se agregan manualmente al patrón de cera en esta etapa (Morales Ramírez, 2023).



Figura 10. Modelo de cera conectada a colada de cera.

Armado de árboles de fundición

Los modelos de cera, ya con sus coladas, se ensamblan cuidadosamente sobre un tronco central o mazarota utilizando cera caliente y herramientas específicas. Este tronco actúa como el alimentador principal de metal durante la fundición. El conjunto final, que incluye modelos, coladas, el tronco, barras de soporte, marcos y la copa de vaciado, se denomina árbol de fundición. La orientación y el número de modelos en el árbol se definen para optimizar el flujo del metal y la calidad de las piezas (Morales Ramírez, 2023). En la figura 11 se observa el ensamble de modelos de cera para la canalización del metal fundido durante la colada. (Morales Ramírez, 2023).



Figura 11. Árbol de fundición.

Construcción del molde cerámico

Los árboles de fundición ensamblados se trasladan a una sección del área de cerámicos, donde son sometidos a un proceso de recubrimiento. Inicialmente, se enjuagan (a veces con aditivos como desengrasantes), se lavan (elimina contaminantes que puedan afectar el revestimiento) y secan los árboles (temperatura entre 20–25 °C), para luego ser sumergidos en un baño lodo cerámico. Inmediatamente después, se aplican capas finas de arena silica sobre las superficies húmedas con el lodo cerámico. Cada capa se deja secar por intervalos específicos para garantizar el endurecimiento. Este proceso se repite varias veces, utilizando progresivamente materiales cerámicos de granulometría más gruesa, hasta construir un revestimiento cerámico robusto capaz de soportar las altas temperaturas y el estrés asociado a la presión metalostática de la fundición del metal (Morales Ramírez, 2023).

En la figura 12 se observa el recubrimiento primario mediante inmersión en suspensión coloidal del lodo refractaria para formar el revestimiento cerámico. En la figura 13 se observa el curado térmico controlado de la capa cerámica aplicada para lograr estabilidad dimensional y resistencia en verde.



Figura 12. Recubrimiento primario (Morales Ramírez, 2023).



Figura 13. Curado de las capas cerámicas (Morales Ramírez, 2023).

Extracción de cera (Descerado)

Una vez que el molde cerámico ha alcanzado el número de capas requerido y los tiempos de secado se han cumplido, se introduce en un autoclave. Allí, la cera interna se remueve mediante presión a vapor y la cera se recupera para su reciclaje (Morales Ramírez, 2023).

En la figura 14 se observa los moldes cerámicos sometidos a descerado mediante autoclave de vapor a presión y temperatura elevadas.



Figura 14. Ingreso de los moldes cerámicos al autoclave (Morales Ramírez, 2023).

Cocción del molde

Posteriormente, el molde cerámico pasa por un proceso de cocción o sinterización (figura 15), que favorece su endurecimiento, aumenta su resistencia mecánica y mejora la permeabilidad de los moldes cerámicos dejándolas sin residuos de cera en su interior (Morales Ramírez, 2023).



Figura 15. Ingreso del molde cerámico para su cocción.

Fundición y colado del metal líquido en moldes cerámicos

Previo a la fundición, el departamento encargado calcula la carga de metal y planifica el número de moldes a fundir según la aleación a producir. Los moldes cerámicos se precalientan en un horno para minimizar el choque térmico por humedad al contacto con el metal fundido. Se prepara el tipo de horno a utilizar (inducción o gas). Una vez precalentados, los moldes se posicionan en el área de colada. Se verifican las temperaturas tanto del metal fundido como de los moldes cerámicos para asegurar que estén dentro de las especificaciones antes de proceder con el vaciado del metal líquido (Morales Ramírez, 2023). En la figura 16 se observa el vaciado del metal líquido en el molde cerámico.



Figura 16. Vaciado del baño metálico al molde cerámico.

Remoción cerámica y acabado

Tras la solidificación, los moldes cerámicos con las piezas coladas se trasladan a un área de acabado. Aquí, el molde cerámico se retira del árbol de metal mediante diversas técnicas. Esto puede incluir métodos mecánicos como martillos neumáticos, mesas vibratorias y chorros de agua a alta presión, o métodos químicos que emplean soluciones calientes de sosa cáustica (NaOH) o potasa cáustica (KOH) para disolver el material cerámico. Los procedimientos de limpieza y tratamiento superficial en esta etapa también incluyen el granallado, sandblast, decapado y flapeado (lijado con disco de lámina abrasiva) (Morales Ramírez, 2023).

Finalmente, las piezas individuales se separan del árbol mediante corte, y se les aplican procesos de rectificado, pulido, enderezado y, si es necesario, soldadura y tratamientos térmicos. Posteriormente, se realizan pruebas de calidad, como la inspección con líquidos penetrantes. Dependiendo de la aplicación final, las piezas pueden ser sometidas a maquinado de precisión o a ensayos mecánicos para verificar su conformidad con las especificaciones de ingeniería (Morales Ramírez, 2023).

En la figura 17 se observa la estructura metálica solidificada post-fundición y desmolde, mostrando el sistema de alimentación y canalización después del granallado.



Figura 17. Estructura metálica después del granallado.

Capítulo 2. Desarrollo experimental

2.1 Diseño experimental

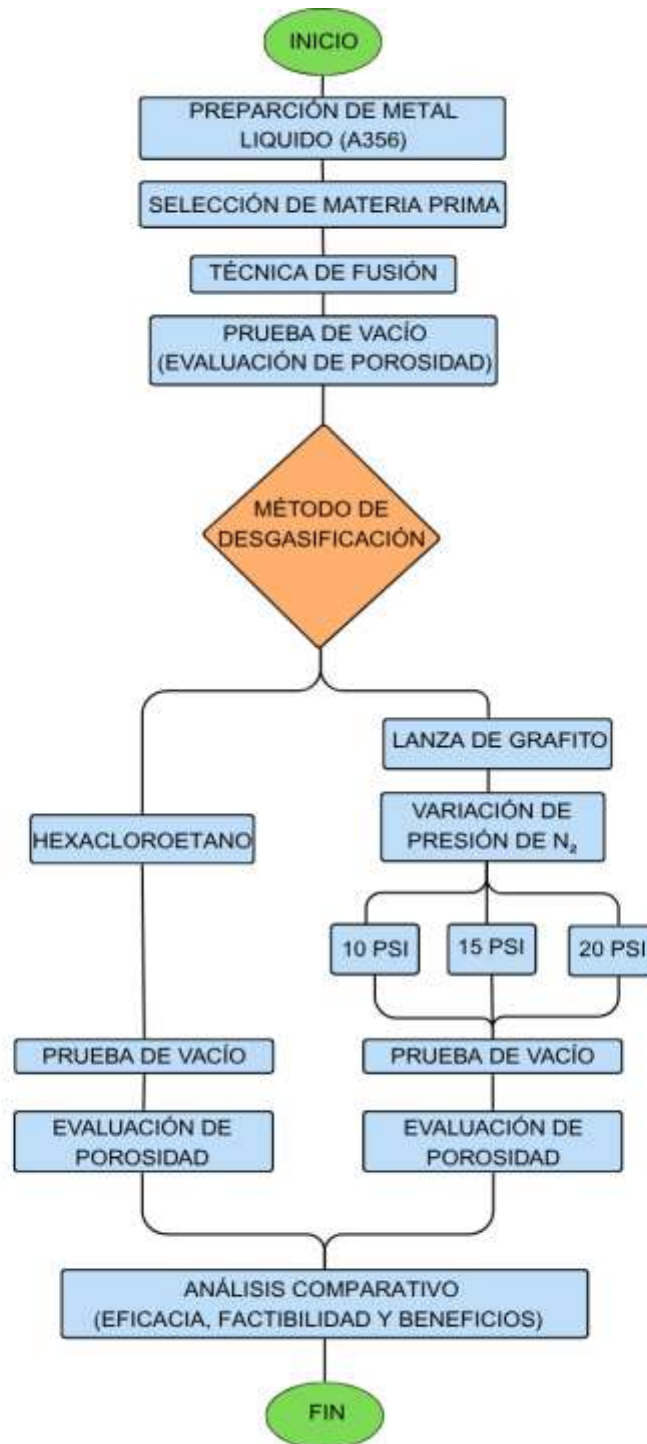


Figura 18. Diagrama de flujo del desarrollo experimental para la evaluación comparativa de los métodos de desgasificación.

La presencia de hidrógeno disuelto en el baño metálico constituye uno de los factores críticos en la generación de porosidad en piezas fundidas de aluminio, especialmente en procesos de fundición a la cera perdida. Este fenómeno se traduce en defectos internos y rechazos por microporos que afectan directamente la calidad del producto final. En el área de fundición, actualmente se emplean tabletas de hexacloroetano (C_2Cl_6) como método convencional de desgasificación; sin embargo, se han reportado limitaciones en su eficacia y preocupaciones ambientales por sus subproductos.

Ante este panorama, se propone desarrollar un estudio experimental que evalúe de forma comparativa la eficiencia del tratamiento químico con hexacloroetano optando por la técnica física de inyección de nitrógeno (N_2) mediante lanza de grafito propuesta, como alternativa sustentable para la remoción del gas hidrogeno disuelto en la aleación A356. La inyección de N_2 genera burbujas que, al ascender, favorecen el arrastre del hidrógeno hacia la superficie, sin introducir compuestos reactivos al sistema.

En la figura 18 del diagrama de flujo representa el protocolo experimental diseñado para conducir la evaluación comparativa entre el método convencional de desgasificación con tabletas de hexacloroetano (C_2Cl_6) y el método alternativo de inyección de nitrógeno (N_2) mediante lanza de grafito propuesta. El diseño experimental se estructura para garantizar la obtención de datos que permitan una comparación técnica, con el propósito último de validar la viabilidad de implementar una tecnología más limpia y segura en los procesos de fundición de aluminio.

El diseño experimental contempla la aplicación de ambos métodos bajo condiciones controladas, utilizando como herramienta de evaluación el ensayo de presión reducida (Straube-Pfeiffer), el cual permite cuantificar la porosidad en probetas solidificadas en atmósfera de vacío. Este análisis ofrece una caracterización precisa del grado de desgasificación alcanzado por cada tratamiento.

El objetivo es evaluar la reducción de porosidad inducida por hidrógeno en muestras obtenidas antes y después de aplicar cada tratamiento. Este análisis permitirá

determinar los parámetros operativos óptimos y la viabilidad industrial de cada técnica. Para validar el uso de nitrógeno como alternativa, el diseño del desarrollo está enfocado en medir la eficiencia de desgasificación y comportamiento metalúrgico. Las dificultades observadas en el uso de hexacloroetano, como piezas producidas con microporos, generación de escorias secundarias y exposición a compuestos reactivos sugieren la necesidad de explorar métodos más seguros y sustentables.

Los resultados obtenidos permitirán establecer si la inyección de nitrógeno puede sustituir exitosamente al hexacloroetano como estándar operativo, brindando una solución más eficiente, menos contaminante y más compatible con buenas prácticas en procesos de fundición de aluminio. Además, se documentarán los materiales utilizados, parámetros operativos, configuración de equipos y procedimientos estandarizados. Se pondrá especial énfasis en las variables críticas como temperatura de proceso de fundición, tiempo de tratamiento de desgasificación, presión de inyección de nitrógeno con la lanza de grafito y comportamiento metalúrgico post-tratamiento.

El objetivo final es establecer las condiciones óptimas para una desgasificación eficiente, segura y ambientalmente responsable, que pueda sustituir progresivamente el uso de hexacloroetano por tecnologías más limpias en la industria de fundición de aluminio.

2.2 Selección de materia prima

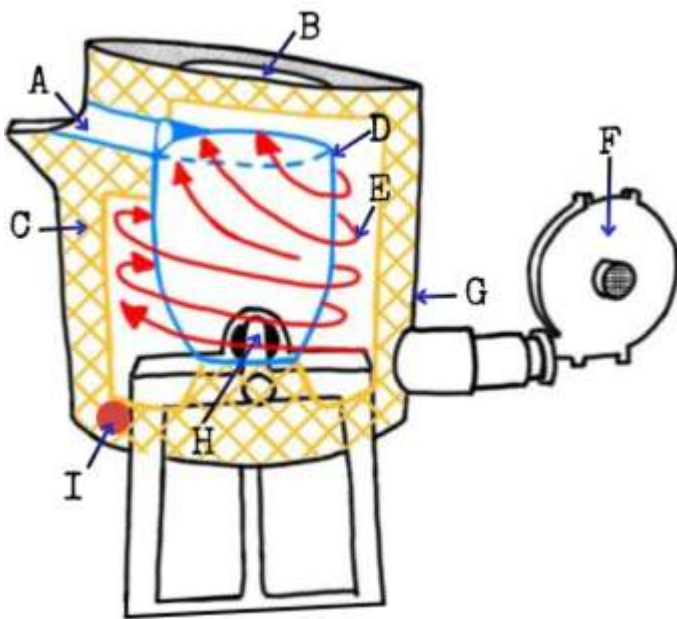
En el proceso de selección de materia prima para la obtención de un baño metálico eficiente, se contemplan 70 kg de aleación de aluminio A356 (composición química según ASTM B26), compuestos exclusivamente por retorno de piezas defectuosas y excedentes de fundiciones, tales como mazarotas. Esta materia prima será sometida a un riguroso control de calidad para garantizar la ausencia de humedad y de residuos cerámicos remanentes de operaciones anteriores. La correcta inspección previa permite minimizar la generación de escorias durante la fusión, evitando la formación

de óxidos y asegurando un baño metálico limpio y homogéneo. Este enfoque técnico no solo optimiza el rendimiento térmico del crisol y la eficiencia de la fundición, sino que también mejora la calidad estructural del metal, incrementando la integridad del producto final y reduciendo costos operativos asociados a la depuración del metal fundido.

2.3 Técnica de fusión

Para llevar a cabo la fusión de la aleación de aluminio A356, se empleará un horno de crisol de grafito con mecanismo basculante, diseñado para una capacidad de 70 kg. Este sistema incorpora un eje de giro de alta resistencia térmica y mecánica, capaz de soportar la carga total del crisol durante la operación. La inclinación controlada se realiza mediante actuadores manuales, que permiten una dosificación precisa del metal fundido al momento del vaciado, contribuyendo así a la eficiencia del baño metálico. El horno también está equipado con un sistema de bloqueo que garantiza la estabilidad posicional, evitando desplazamientos accidentales y mejorando la seguridad en el entorno de trabajo. Esta configuración optimiza el proceso de colada, reduce el riesgo de defectos por escoria y favorece una estructura metálica homogénea, esencial para obtener componentes de alta integridad mecánica en aplicaciones críticas.

- **Equipo de fusión** (Horno de crisol basculante; figura 19):
 - Capacidad crisol: 70 kg de capacidad (45 cm alto x 38 cm de diámetro)
 - Medidas del horno: ancho (75 cm) x altura (86 cm)
 - Altura total con base(118cm)
 - Alimentado con gas propano.



- A. Boca de colada.
- B. Boca de alimentación.
- C. Mampostería de ladrillos refractarios de alta alúmina.
- D. Crisol de grafito.
- E. Quemador de premezcla forzada (flujo de aire + gas).
- F. Ventilador de tiro forzado.
- G. Estructura de acero inoxidable.
- H. Eje de muñón. Mecanismo basculante.
- I. Sistema de bloqueo de posición.

Figura 19. Esquema de las partes principales del horno de crisol.

El proceso de fusión para la aleación de aluminio A356 inicia con el precalentamiento del horno de crisol de grafito durante un lapso aproximado de 30 minutos. Esta etapa es crítica para evitar choques térmicos que puedan comprometer la integridad estructural del crisol, así como para eliminar cualquier traza de humedad presente en su superficie interna, previniendo así reacciones indeseadas durante la fusión. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se interrumpe temporalmente el flujo de gas y aire con el fin de incorporar la materia prima, en este caso, 70 kg de retorno de fundición acomodando de forma compacta y segura dentro del crisol. Con la carga introducida, se reactiva el sistema térmico para iniciar la fusión controlada del aluminio.

Tras completar el proceso de licuefacción, se procede al monitoreo térmico del baño metálico mediante un dispositivo de termopar equipado con sensores desechables. Este control de temperatura se realiza ubicando la punta del sensor directamente en el aluminio líquido, asegurando lecturas precisas. El intervalo térmico ideal para esta aleación se encuentra entre 690 °C y 710 °C, lo que garantiza una fundición eficiente sin riesgo de sobrecalentamiento. Mantener este rango térmico minimiza la formación de óxidos metálicos y reduce la absorción de hidrógeno, fenómeno común cuando

hay presencia de humedad ambiental, lo cual podría comprometer las propiedades mecánicas del producto final. Esta metodología asegura un baño metálico de alta pureza, libre de escorias y apto para aplicaciones estructurales exigentes.

Una vez alcanzada la temperatura óptima de fusión para la aleación de aluminio A356, se procede a realizar el desescoriado mediante un cucharón perforado diseñado para la extracción eficiente de escoria superficial. Este paso debe ejecutarse con especial cuidado, evitando generar turbulencias en el baño metálico, ya que éstas favorecen la absorción de hidrógeno, un gas indeseado que puede comprometer la calidad metalúrgica al provocar porosidades y defectos estructurales. La escoria, compuesta principalmente por óxidos de aluminio y contaminantes sólidos, debe ser retirada de forma continua hasta lograr una superficie limpia y estable.

Finalizado el proceso de limpieza superficial, se incorpora una varilla refinadora de grano de Ti-B, compuesta por una aleación maestra de aluminio con 5 % de titanio y 1 % de boro, dosificada a 80 gramos para la carga de 70 kg. Este aditivo actúa como modificador estructural, promoviendo la formación de granos finos en el sólido fundido y mejorando las propiedades mecánicas del producto final.

Finalmente, se añade un fundente de cobertura tipo “Coveral 8”, de color rosa, en una proporción de 100 gramos por carga. Este producto genera una capa protectora sobre el baño metálico, minimizando el contacto del aluminio líquido con la atmósfera circundante. Esta barrera térmica reduce la formación de nuevas escorias y limita la absorción de gases como el hidrógeno, asegurando la estabilidad química del sistema y aumentando la eficiencia del proceso de fundición en términos de pureza, fluidez y desempeño estructural del metal colado.

2.4 Desgasificación con tabletas de hexacloroetano

En la etapa de desgasificación del baño metálico de aluminio A356, se empleará una tableta de hexacloroetano como agente purificador, mostrada en la tabla 7. Para garantizar una aplicación segura y efectiva, se debe precalentar el bastón de

inmersión con campana perforada, mostrada en la tabla 7, evitando así la introducción de humedad o zonas frías que puedan generar choques térmicos dentro del crisol. La tableta, de color blanco, se fija cuidadosamente en el interior de la campana antes de su inmersión. Posteriormente, la campana se introduce suavemente en el baño metálico, deslizándola con control sobre la pared interna del crisol. Esta técnica permite mantener la tableta contenida en una posición estable entre la campana y el crisol, reduciendo el riesgo de desplazamientos que comprometan la eficacia del proceso.

La duración de la reacción del hexacloroetano se estima en 5 minutos, tiempo durante el cual se liberan gases que remueven el hidrógeno y otros contaminantes disueltos en el aluminio líquido. Finalizada la reacción, se extrae el bastón de inmersión y se realiza un segundo desescoriado para eliminar los subproductos generados. Este procedimiento contribuye a obtener un baño metálico de mayor pureza, mejorando la calidad final del colado y reduciendo defectos metalúrgicos asociados a la presencia de gases disueltos.

Tabla 7. Sistema de degasificación con tableta de hexacloroetano:

Tableta de Hexacloroetano (C_2Cl_6) utilizada como agente degasificante químico.	Bastón de inmersión con campana perforada para la aplicación controlada de tabletas de hexacloroetano (longitud 1.15 metros).
	

2.5 Desgasificación con lanza de grafito con variación de presión y tiempo de desgasificado

Para llevar a cabo la desgasificación del aluminio líquido, se empleará una lanza de grafito de longitud superior a la altura del crisol mostrada en la tabla 8, lo que permite su inserción completa hasta el fondo del mismo. Esta disposición garantiza una cobertura más eficiente del baño metálico durante la inyección de nitrógeno industrial de alta pureza (99.99 %), favoreciendo la eliminación de gases disueltos, principalmente hidrógeno.

La lanza de grafito propuesta está equipada con dos extremos funcionales: el extremo sumergible posee una boquilla perforada, por donde se distribuye el flujo de nitrógeno en el metal fundido; en el otro extremo, cuenta con una rosca de acoplamiento que permite conectar una tubería de acero inoxidable mediante una unión tipo media luna. Esta tubería se conforma en una configuración en “L”, diseñada para permitir la manipulación segura de la lanza desde un lateral del horno, manteniendo al operador a distancia del crisol (figura 20).



Fig. 20 Diseño de conexión en “L” para uso de lanza de grafito.

Del extremo externo de la conexión en “L”, se incorpora una manguera de grado industrial resistente a presión, que conecta directamente al sistema de suministro de

nitrógeno. Para regular el flujo gaseoso, se incluye un manómetro mostrado en la tabla 8, cuya lectura permite ajustar la presión de trabajo según los parámetros del proceso metalúrgico, manipulando la válvula del tanque de forma precisa.

Esta configuración asegura un proceso de desgasificación eficaz, disminuyendo la incidencia de porosidad en el producto final y promoviendo un baño metálico homogéneo y libre de contaminantes gaseosos, requisito esencial para componentes de alto desempeño mecánico.

Tabla 8. Sistema de desgasificación para la inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito:

Manómetro para el control y regulación de la presión de inyección de nitrógeno.	Lanza de grafito para la inyección de nitrógeno en el baño metálico: ➤ Longitud: 50 cm ➤ Circunferencia externa: 17.28 cm; $\varnothing=5.5$ cm ➤ Circunferencia interna: 3.45 cm, $\varnothing= 1.5$ cm
	

El procedimiento de desgasificación del aluminio líquido mediante inyección de nitrógeno se realiza utilizando una lanza de grafito propuesta, cuya longitud excede la altura del crisol, permitiendo una inmersión completa hasta el fondo del baño metálico. Previamente, la lanza debe ser precalentada cuidadosamente, con el objetivo de evitar la introducción de humedad y minimizar riesgos de choque térmico, que podrían comprometer la integridad del baño o generar absorción indeseada de hidrógeno.

Durante el desarrollo experimental, se efectuarán tres pruebas con distintas presiones de inyección de nitrógeno: 10, 15 y 20 psi manteniendo constante el tiempo de aplicación en 5 minutos por prueba. Antes de introducir la lanza en el baño metálico, se debe abrir el flujo de nitrógeno correspondiente a cada ensayo, utilizando un manómetro calibrado para ajustar la presión requerida. Este paso previo es crucial para evitar la solidificación del aluminio fundido dentro del ducto interno de la lanza, lo cual podría ocasionar obstrucciones irreversibles o interferencias operativas.

Con el flujo activo, la lanza se introduce suavemente hasta el fondo del crisol, ejecutando movimientos controlados de tipo circular-horizontal. Esta técnica facilita una distribución eficiente de las burbujas de nitrógeno, favoreciendo el contacto directo con el hidrógeno disuelto en el aluminio líquido, y promoviendo una desgasificación homogénea.

Finalizado el intervalo de aplicación, se retira cuidadosamente la lanza del baño metálico, se interrumpe el flujo de nitrógeno, y se procede al desescoriado con cucharón perforado, eliminando residuos de escoria generados durante el tratamiento de desgasificación. Esta metodología promoverá un baño metálico más limpio, libre de contaminantes gaseosos.

2.6 Evaluación de porosidad con ambos métodos de desgasificado

Para realizar la prueba de vacío en el baño metálico de aluminio A356, es esencial precalentar el probetero de acero, mostrado en la tabla 9, con el fin de evitar choques térmicos que puedan distorsionar los resultados del análisis o inducir absorción de

humedad en la muestra. Una vez concluido el proceso de desgasificación, se toma una muestra representativa del aluminio fundido, y se protege el baño metálico residual añadiendo 100 gramos de fundente de cobertura para minimizar el contacto con la atmósfera y preservar la calidad del fundido.

La muestra se vierte en el probetero previamente precalentado, el cual se posiciona sobre la base de la estación de vacío. A continuación, se cubre con una campana de cristal y se activa la bomba de vacío, mostrada en la tabla 9, generando una presión negativa controlada de 50 cm Hg durante cinco minutos. Este entorno simulado permite evaluar la presencia de gases disueltos, particularmente hidrógeno, mediante la inspección de posibles porosidades internas en la muestra.

Finalizado el tiempo de exposición, se apaga la bomba y se extrae la probeta, sumergiéndola en agua para facilitar su manipulación. Finalmente, se procede a realizar un corte transversal en la probeta, con el objetivo de observar su estructura interna y determinar la calidad del baño metálico y la eficacia del proceso de desgasificación.

Tabla 9. Equipo a utilizar para realizar la prueba de vacío (Prueba Straube-Pfeiffer):

Bomba de vacío utilizada para la realización de la prueba de Straube-Pfeiffer. Voltaje 110V-115V/60Hz. Potencia 1/2HP.	Probetero de acero para la toma de muestras en la prueba de Straube-Pfeiffer. Volumen de capacidad 57.32 cm³.
	

Evaluación de porosidad

Una vez obtenida la probeta seccionada mediante corte transversal, se procede a realizar la evaluación estructural del patrón de porosidad inducido por la solubilidad del hidrógeno presente en el baño metálico durante el proceso de fusión. Este análisis visual y dimensional permite identificar la distribución y concentración de microporos en la muestra, los cuales son indicativos del contenido de hidrógeno disuelto en el aluminio fundido. Para cuantificar dicha presencia gaseosa, (se recurre al uso de la *Figura 6*. Tabla de referencia de los patrones estandarizados para la evaluación visual de la porosidad por hidrógeno de las probetas seccionadas), referenciando la tabla estándar de patrones de porosidad por solubilidad de hidrógeno, herramienta técnica que clasifica los niveles de porosidad conforme a parámetros preestablecidos de calidad metalúrgica.

Mediante la comparación directa entre la muestra obtenida y los patrones de referencia, se determina el número estándar de solubilidad de hidrógeno, el cual refleja la eficacia del proceso de desgasificación aplicado anteriormente. Un valor dentro del rango aceptable indica una buena calidad del baño metálico y una baja propensión a defectos estructurales en el producto final. Por el contrario, la presencia excesiva de poros sugiere la necesidad de ajustar variables críticas del proceso, como tiempo de desgasificación, tipo de fundente o condiciones atmosféricas. Esta etapa resulta fundamental para validar la integridad y pureza metalúrgica antes de proceder con operaciones posteriores de colada o moldeo.

2.7 Análisis comparativo

Con el objetivo de determinar la eficiencia y viabilidad técnica de distintos métodos de desgasificación en aluminio líquido tipo A356, se realizará un análisis comparativo entre dos técnicas: inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito y el uso tradicional de tabletas de hexacloroetano. Para ello, se evaluarán las muestras obtenidas antes de cualquier tratamiento y posteriormente a la aplicación de cada

método propuesto, mediante la observación del patrón de porosidad en probetas seccionadas y análisis estructural interno.

Los resultados permitirán identificar la capacidad de cada técnica para reducir la concentración de hidrógeno disuelto y mejorar la pureza del baño metálico. El método con lanza de grafito será considerado viable si demuestra una reducción significativa de porosidad y estabilidad operativa sin generar residuos sólidos adicionales, mientras que el método con hexacloroetano, aunque tradicionalmente usado como tratamiento de degasificación, será reevaluado debido a sus implicaciones ambientales y mayor generación de subproductos reactivos.

El análisis técnico busca establecer si la inyección de nitrógeno puede sustituir al hexacloroetano como práctica estándar en procesos de fusión de aluminio A356, aportando una alternativa más limpia, segura y eficiente en términos metalúrgicos, operacionales y medioambientales.

Capítulo 3. Análisis de resultados

3.1 Preparación del metal liquido (aleación A356)

Durante la jornada de trabajo en el área de fundición, se llevó a cabo la preparación del baño metálico de aluminio A356, siguiendo una secuencia rigurosa de parámetros operativos. El objetivo fue obtener un metal líquido homogéneo, libre de impurezas, y alteraciones químicas.

La operación comenzó con la selección de la carga metálica, compuesta por piezas de retorno de aluminio A356 provenientes de ciclos anteriores. Estas piezas, aunque rechazadas por el departamento de calidad por defectos superficiales o dimensionales (mostradas en la figura 21), conservaban una composición química adecuada. También se incorporaron mazarotas de fundiciones pasadas (mostradas en la figura 22). Todo el material fue inspeccionado minuciosamente para asegurar que estuviera libre de residuos cerámicos, humedad, contaminantes superficiales o restos de moldes. Esta inspección fue clave para evitar la introducción de escorias al sistema y preservar la estabilidad térmica del crisol durante la fusión.



Figura 21. Material de retorno de aluminio A356: Piezas rechazadas por defectos superficiales.



Figura 22. Material de retorno de aluminio A356: Mazarotas de fundiciones realizadas.

Con la materia prima validada, se procedió al precalentamiento del horno de crisol basculante, estableciendo un ciclo de 30 minutos para estabilizar la temperatura interna. Este paso fue esencial para evitar choques térmicos al introducir el aluminio sólido, además de contribuir a prolongar la vida útil del crisol de grafito y establecer

un equilibrio térmico adecuado para iniciar la fusión. La figura 23 muestra la etapa descrita.



Figura 23. Precalentamiento del horno de crisol.

Una vez alcanzada la temperatura de precalentamiento, se realizó la carga del crisol, introduciendo los 70 kg de aluminio A356 de forma compacta y ordenada. La distribución fue optimizada para maximizar el volumen útil del crisol y asegurar una fusión uniforme. La figura 24 muestra el comienzo del proceso de fusión.

La fusión del metal se desarrolló bajo monitoreo térmico continuo, utilizando un termopar para registrar la temperatura del baño metálico (Figura 25). Se mantuvo el rango operativo entre 690 °C y 710 °C, considerado óptimo para esta aleación. Este intervalo permitió la licuefacción completa del aluminio, evitando el



Figura 24. Proceso de fusión.

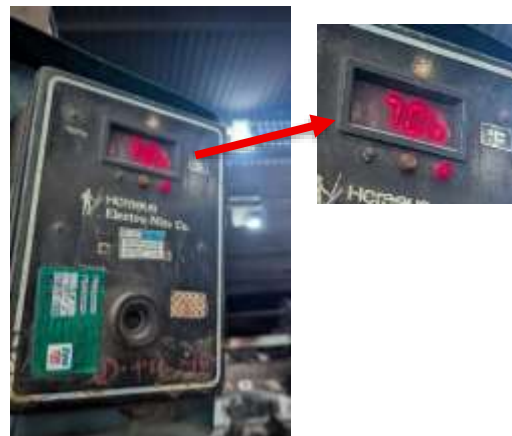


Figura 25. Lectura de temperatura.

sobrecalentamiento que podría inducir la absorción de gases como el hidrógeno o la formación de óxidos superficiales.

Al alcanzar la temperatura deseada, se interrumpió temporalmente el calentamiento para realizar el primer desescoriado. Con ayuda de una cuchara perforada previamente precalentada, se removió la capa superficial de escoria compuesta por óxidos de aluminio y residuos flotantes. Esta operación se muestra en la figura 26, fue fundamental para depurar el baño metálico, estabilizar su química y mejorar su fluidez.



Figura 26. Desescoriado del baño metálico utilizando cuchara perforada.

Con el baño limpio y estabilizado, se procedió al refinamiento de grano mediante la introducción de una varilla de aleación maestra de titanio-boro ($\text{Al-5\%Ti-1\%B}$). La varilla fue precalentada antes de su inserción para evitar alteraciones térmicas. Una vez en el baño, el Ti-B promovió la nucleación heterogénea, reduciendo el tamaño de grano del aluminio solidificado y mejorando sus propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a la tracción y la ductilidad.

A continuación, se realizó la toma de muestra para evaluación de hidrógeno disuelto. Utilizando una cuchara de colada precalentada, se extrajo una alícuota del aluminio líquido y se vertió en un probetero de acero, también precalentado, ubicado sobre la base de una estación de vacío. Esta operación se muestra en la figura 27 y sería utilizada para la prueba Straube-Pfeiffer.



Figura 27. Toma de muestra del aluminio líquido para prueba de vacío.

Antes de continuar con el análisis, se aplicó fundente de cobertura tipo “Coveral 8”, en una dosificación de 100 gramos por carga. El fundente, de color rosa, fue distribuido uniformemente sobre la superficie del baño metálico, formando una película protectora que redujo el contacto con la atmósfera, limitó la absorción de humedad y facilitó la recolección de escorias en etapas posteriores.

Finalmente, se ejecutó la prueba de solubilidad de hidrógeno Straube-Pfeiffer sobre la muestra extraída (Figura 28). Se activó la bomba de vacío y se ajustó la presión negativa a 50 cm Hg durante cinco minutos (Figura 29). Esta técnica, basada en presión negativa controlada, permite evaluar la presencia de hidrógeno disuelto en el metal líquido. Durante la solidificación, la solubilidad del hidrógeno disminuye drásticamente, generando poros internos que pueden observarse macroscópicamente. Cuanto mayor la presencia de microporos, mayor será el contenido de hidrógeno residual, lo que indica la gasificación presente del baño metálico.



Figura 28. Prueba de vacío.



Figura 29. Presión del vacío.

Los resultados obtenidos serán utilizados para la evaluación de del hidrogeno disuelto antes de desgasificar y después de desgasificar, analizando los parámetros de operación y eficiencia de los tratamientos de desgasificación, optimizar el tratamiento de desgasificación y garantizar la calidad metalúrgica del aluminio A356 en procesos de fundición crítica.

3.2 Desgasificación con tableta de hexacloroetano

Después del ciclo de fusión de la aleación de aluminio A356, se ejecutó una operación de desgasificación empleando tableta de hexacloroetano como agente reactivo (Figura 30), seguido de una inspección del contenido residual de hidrógeno mediante la técnica de presión reducida. El objetivo fue validar la eficiencia del tratamiento de desgasificación para minimizar la porosidad.



Figura 30. Tableta de hexacloroetano usada.

La operación de desgasificación comenzó con la preparación del dispositivo de inmersión, compuesto por un bastón conectado a una campana perforada. El dispositivo de inmersión fue sometido a precalentamiento controlado, con el fin de eliminar humedad y evitar zonas frías que pudieran generar choques térmicos o turbulencias en el crisol. Este paso resultó fundamental para conservar la estabilidad térmica del baño metálico.

Posteriormente, se procedió a la selección y dosificación del hexacloroetano, siguiendo especificaciones técnicas del fabricante: una tableta de hexacloroetano de color blanco por carga de 70 kg de aluminio fundido. La tableta fue fijada con firmeza dentro de la campana de inmersión, cuya geometría asegura una trayectoria descendente controlada y reduce el riesgo de escape del reactivo durante la operación. La inmersión del dispositivo se realizó apoyando la campana hacia la pared interna del crisol, guiando la campana hasta el fondo del baño metálico mediante desplazamiento suave y progresivo, proceso ilustrado en la figura 31. Este movimiento evitó agitación superficial y facilitó el contacto directo del desgasificante con el aluminio líquido evitando la fuga de la tableta al reaccionar con el baño metálico.

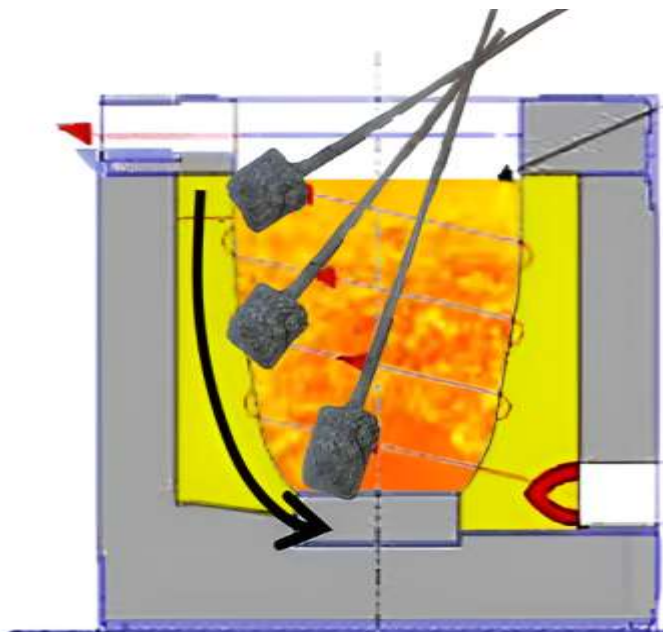


Figura 31. Esquema de la etapa de inmersión de la tableta de hexacloroetano en el baño metálico.

Una vez en posición, se mantuvo la tableta en reacción durante cinco minutos, tiempo en que se observó un burbujeo activo provocado por la liberación de cloro gaseoso. Esta reacción promueve la unión química entre el cloro y el hidrógeno disuelto, generando compuestos volátiles que se eliminan por flotación.

Finalizada la reacción, el bastón fue retirado lentamente del crisol, cuidando no perturbar el equilibrio del baño. Acto seguido, se realizó un segundo desescoriado con cuchara perforada precalentada, extrayendo la escoria residual que se acumuló durante la etapa de desgasificación.

Para validar el efecto del tratamiento, se llevó a cabo una prueba de solubilidad de hidrógeno tipo Straube-Pfeiffer. Se colocó un probetero de acero previamente precalentado en el centro de la base de la cámara de vacío, asegurando condiciones térmicas óptimas para evitar solidificación prematura y favorecer una distribución homogénea del contenido gaseoso.

La muestra de aluminio fue tomada con cuchara de colada precalentada y vertida cuidadosamente en el probetero. Una vez lleno, se procedió al sellado hermético de

la cámara de vacío utilizando una campana de cristal refractaria, como se muestra en la figura 32. Este aislamiento permitió crear un entorno controlado para el análisis.



Figura 32. Probetero colocado en la estación de vacío para la prueba de Straube-Pfeiffer.

Se activó la bomba de vacío y se ajustó la presión de vacío a 50 cm Hg (Figura 33) durante cinco minutos. Este gradiente de presión facilitó la nucleación de burbujas de hidrógeno aún presente en el fundido, proceso que permite visualizar la eficacia del tratamiento mediante formación de poros internos durante la solidificación.



Figura 33. Lectura de la presión de vacío, ejecutada en la prueba de vacío.

Al concluir el intervalo, se apagó la bomba y se retiró cuidadosamente la campana de cristal. La probeta caliente fue sumergida en agua para lograr un enfriamiento rápido y uniforme, esencial para preservar las características internas de la muestra. Una vez enfriada, la probeta fue seccionada transversalmente. En el análisis macroscópico, se evaluó la estructura interna en busca de signos de porosidad.

Esta sesión proporcionó información valiosa sobre el comportamiento del agente químico bajo condiciones térmicas controladas y su capacidad para la evaluación de la eficiencia de desgasificación.

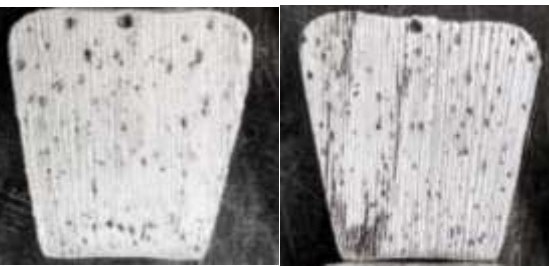
3.2.1 Evaluación de eficiencia de desgasificación con tableta de hexacloroetano

Para evaluar el efecto del tratamiento de desgasificación con hexacloroetano (C_2Cl_6) sobre la porosidad en la aleación A356, se compararon dos probetas: una de referencia, obtenida directamente del baño metálico sin tratamiento, y otra extraída posterior a la incorporación de una tableta desgasificante mostradas en la tabla 10.

Respecto a la morfología de los poros, la probeta sin tratamiento presentó microporos distribuidos homogéneamente a lo largo de toda su sección transversal. En contraste, la probeta tratada exhibió una menor dispersión de poros, pero con un incremento significativo en su tamaño, particularmente en las zonas media y superior. Esta concentración sugiere una acumulación de gases durante las etapas finales de solidificación, fenómeno exacerbado por el tratamiento aplicado.

El análisis comparativo reveló un aumento en la densidad de porosidad superficial en la probeta tratada. Este resultado sugiere un efecto contraproducente del tratamiento, posiblemente asociado a una concentración excesiva de gases residuales o a una reacción incompleta del agente desgasificante. Este comportamiento indica que, lejos de reducir la porosidad, el hexacloroetano podría estar induciendo una sobregasificación del aluminio bajo las condiciones operativas empleadas.

Tabla 10. Probetas obtenidas antes y después de desgasificar con C_2Cl_6 .

	Probeta antes de la desgasificación para la referencia de la solubilidad del hidrogeno en el baño metálico.		Probeta solidificada después de la prueba de vacío para el tratamiento con hexacloroetano.	
				
Numero de control de calidad relacionado	#5		#6	

Con el objetivo de evaluar la eficiencia del tratamiento de desgasificación mediante tabletas de hexacloroetano, se llevó a cabo en una segunda prueba comparativa para validar la capacidad del hexacloroetano en la reducción de porosidad, de igual forma se usó la prueba de vacío con muestras obtenidas una directamente del baño metálico sin tratamiento, y otra extraída posterior a la incorporación de una tableta desgasificante mostradas en la tabla 11. Se observó una deformación superficial distintiva en la parte superior de la probeta tratada con hexacloroetano, manifestada como una curvatura abombada. Este fenómeno estuvo ausente en la probeta sin desgasificar, indicando una alteración en la dinámica de solidificación probablemente vinculada a la liberación de gases residuales durante el proceso.

Adicionalmente, la probeta tratada con hexacloroetano presentó un leve incremento en el tamaño promedio de los poros y una mayor densidad de formación de poros en comparativa con la probeta extraída del baño metálico antes del tratamiento. Estos hallazgos confirman que, bajo las condiciones específicas de esta prueba, el uso de tabletas de hexacloroetano no solo no mejoró significativamente la reducción de

porosidad, sino que pudo contribuir a una redistribución o expansión de los gases atrapados en la matriz metálica.

Tabla 11. Probetas obtenidas antes y después de desgasificar con C_2Cl_6 .

	Probeta antes de la desgasificación para la referencia de la solubilidad del hidrogeno en el baño metálico.	Probeta solidificada después de la prueba de vacío para el tratamiento con hexacloroetano.
		
Numero de control de calidad relacionado	#4 	#6 

3.3 Desgasificación por inyección de nitrógeno con lanza de grafito

Durante la sesión de trabajo en el área de fundición, después del ciclo de fusión de la aleación de aluminio A356, se llevó a cabo el tratamiento de desgasificación del aluminio líquido A356 mediante inyección de nitrógeno (N_2) utilizando una lanza de grafito propuesta, con el objetivo de remover el hidrógeno disuelto en el baño metálico y evaluar la eficiencia del proceso mediante la prueba de vacío Straube-Pfeiffer.

La jornada comenzó con el precalentamiento de la lanza de grafito propuesta, exponiéndola a la radiación térmica emitida por la parte superior del horno basculante durante la fase de fusión. Este paso fue esencial para evitar la introducción de humedad o zonas frías que pudieran generar choques térmicos o afectar la estabilidad del baño.

Una vez estabilizado el sistema, se aplicaron 100 gramos de fundente de cobertura tipo “Coveral 8” (color rosa) sobre la superficie del baño metálico. Esta capa protectora ayudó a mitigar la absorción de humedad ambiental y facilitó la recolección de impurezas superficiales durante el tratamiento.

Antes de introducir la lanza de grafito propuesta, se verificó que el flujo de nitrógeno estuviera activo, ya que sumergir la lanza sin presión de gas podría provocar la solidificación de aluminio en la boquilla, obstruyendo el conducto interno. Se habilitó el suministro de nitrógeno desde el tanque, ajustando la presión mediante el manómetro a 10 psi para la primera prueba de inyección de nitrógeno, 15 psi para la segunda prueba (Figura 34) y 20 psi para la tercera prueba, siguiendo el protocolo experimental diseñado para evaluar el comportamiento de la desgasificación en distintas presiones.



Figura 34. Lectura del manómetro ajustada a 15 psi.



Figura 35. Etapa de inyección de nitrógeno con lanza de grafito.

Con el flujo estabilizado de acuerdo a la prueba realizada, se procedió a la inmersión controlada de la lanza de grafito propuesta, dirigiéndola hacia el fondo del crisol

(Figura 35). Durante los 5 minutos de aplicación, el operario mantuvo un movimiento lento y constante en patrón circular-horizontal con la lanza de grafito propuesta, asegurando una cobertura uniforme del volumen metálico y maximizando la interacción entre las burbujas de nitrógeno y el hidrógeno disuelto.

Al concluir el tiempo establecido, se realizó la retirada cuidadosa de la lanza de grafito propuesta, evitando perturbar la superficie del baño metálico para no reintroducir gases ni generar óxidos. La lanza fue colocada en su base de soporte y se procedió a su limpieza manual, retirando residuos adheridos con una espátula metálica. Seguidamente se efectuó el desescoriado final utilizando una cuchara perforada previamente precalentada (Figura 36). Se eliminó la escoria superficial generada durante el tratamiento, dejando el baño metálico limpio y estable para el siguiente paso.



Figura 36. Desescoriado post tratamiento de desgasificación.

Para validar la eficacia del proceso, se extrajo una muestra del aluminio líquido con cuchara de colada precalentada. Esta alícuota fue vertida en un probetero de acero previamente precalentado, colocado sobre la base de la estación de vacío.

Finalmente, se realizó la prueba Straube-Pfeiffer (Figura 37), aplicando presión negativa controlada para inducir la nucleación de burbujas de hidrógeno en la muestra solidificada. Se activó la bomba de vacío y se ajustó la presión negativa a

50 cm Hg durante cinco minutos. Este ensayo permitió cuantificar el contenido residual de hidrógeno y evaluar la eficiencia del tratamiento por inyección de nitrógeno.



Figura 37. Aplicación de la prueba Straube-Pfeiffer.

3.3.1 Evaluación de eficiencia de la desgasificación mediante inyección de nitrógeno con lanza de grafito

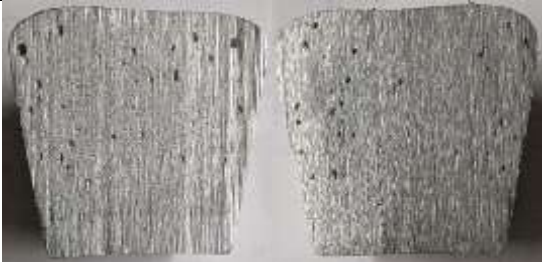
Para determinar la eficiencia del proceso en la aleación A356, se realizaron pruebas con inyección de nitrógeno a presiones de 10 psi, 15 psi y 20 psi. En cada condición, se extrajeron probetas antes y después del tratamiento, evaluando la porosidad mediante prueba de vacío para establecer una comparación directa del estado del baño metálico y posterior a la desgasificación.

Análisis específico para el tratamiento de desgasificación a 10 psi:

Probeta antes de desgasificar: La muestra obtenida del baño metálico se observa en la tabla 12, presentó una curvatura hundida leve en la superficie, indicativa de una concentración moderada de gases disueltos (principalmente hidrógeno). Se observó porosidad distribuida más pronunciadamente en los laterales, con tamaño visible y mayor concentración en estas zonas. El centro de la probeta mostró menor densidad de poros, sugiriendo una distribución heterogénea de gases en el baño previo al tratamiento.

Probeta desgasificada con nitrógeno (10 psi, 5 minutos): La muestra tratada se observa en la tabla 12, evidenció una curvatura hundida más acentuada, interpretada como una reducción significativa en la solubilidad del hidrógeno. Se constató una disminución en el tamaño de los poros y una menor densidad de distribución en toda la probeta. Esta mejora morfológica interna indica una eficiencia sustancial en la remoción de gases, atribuible al tratamiento con nitrógeno a baja presión.

Tabla 12. Probetas obtenidas antes y después de desgasificar con nitrógeno.

	Probeta antes de la desgasificación para la referencia de la solubilidad del hidrogeno en el baño metálico.	Probeta solidificada después de la desgasificación por inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito a 10 psi.
		
Numero de control de calidad relacionado	#4 	#3 

Análisis específico para el tratamiento de desgasificación a 15 psi:

Probeta antes de la desgasificación: La muestra obtenida del baño metálico se observa en la tabla 13, presentó una hendidura en la parte superior, sugiriendo una disolución moderada de hidrógeno. Sin embargo, el análisis interno reveló una distribución uniforme de microporos y poros finos, evidenciando que el metal contenía una cantidad significativa de hidrógeno disuelto en solución sólida.

Probeta desgasificada con nitrógeno (15 psi, 5 minutos): La muestra tratada se observa en la tabla 13, mostró una estructura sólida y homogénea, en la parte superior de la probeta se observa una curvatura ligeramente hundida (indicativa de liberación efectiva de gases durante solidificación). La presencia de poros fue prácticamente nula, detectándose apenas un microporo. Esto refleja una mejora sustancial en la calidad metalúrgica, con una eficiencia estimada del 97-99% y una reducción en densidad de poros comparable con el estándar del número de control de calidad relacionado #1 y #0.

Tabla 13. Probetas obtenidas antes y después de desgasificar con nitrógeno.

	Probeta antes de la desgasificación para la referencia de la solubilidad del hidrogeno en el baño metálico.	Probeta solidificada después de la desgasificación por inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito a 15 psi.
		
Numero de control de calidad relacionado	#5 	#1 

Análisis específico para el tratamiento de desgasificación a 20 psi:

Probeta antes de desgasificar: La muestra obtenida del baño metálico se observa en la tabla 14 y exhibió en la parte superior una superficie abombada, indicativa de alta solubilidad de hidrógeno en el fundido. Se observó una distribución generalizada de poros finos y microporos en toda la probeta, confirmando la presencia significativa de hidrógeno disuelto.

Probeta después de desgasificar con nitrógeno (20 psi, 5 minutos): La muestra tratada se observa en la tabla 14, mostró una ligera hendidura en la parte superior, pero en su interior se evidenció un incremento en el tamaño promedio de los poros, con formación de macroporos semicirculares y poros finos concentrados principalmente en la zona media. Las regiones superior e inferior permanecieron libres de porosidad. Este patrón sugiere que el tratamiento a 20 psi generó una sobregasificación del aluminio, atribuible a dos factores:

1. **Turbulencia excesiva:** La presión elevada provocó la formación de burbujas de mayor tamaño, generando turbulencias que favorecieron el reingreso de hidrógeno al baño metálico.
2. **Posible disolución de nitrógeno:** La morfología semicircular y de bordes suaves de los macroporos contrasta con los poros irregulares previos al tratamiento, lo que podría indicar la presencia de nitrógeno disuelto.

Tabla 14. Probetas obtenidas antes y después de desgasificar con nitrógeno.

Probeta antes de la desgasificación para la referencia de la solubilidad del hidrogeno en el baño metálico.	Probeta solidificada después de la desgasificación por inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito a 20 psi.
	
Numero de control de calidad relacionado	#6  #7 

3.4 Comparación de eficacia y factibilidad con ambos métodos de desgasificación en aleación de aluminio A356

El análisis comparativo entre los tratamientos de desgasificación mediante tabletas de hexacloroetano (C_2Cl_6) y la inyección de nitrógeno con lanza de grafito propuesta en aleación de aluminio A356 revela contrastes significativos en términos de eficiencia metalúrgica, control operativo y viabilidad técnica. Las observaciones se basan en probetas seccionadas transversalmente tras ensayos de vacío, permitiendo evaluar la concentración de hidrógeno, principal gas soluble en fundiciones de aluminio, antes y después de cada tratamiento.

Hexacloroetano (C_2Cl_6): Baja eficiencia y alta penalización metalúrgica

El uso de tabletas de hexacloroetano mostró resultados adversos en la mayoría de los casos. Las probetas tratadas presentaron un incremento notable en el tamaño

promedio de los poros, especialmente en las zonas medias y superiores, junto con una mayor densidad de porosidad interna. La morfología evidenció coalescencia de microporos en macroporos, así como deformaciones superficiales abombadas, indicativas de liberación descontrolada de gases durante la solidificación dentro de la prueba de vacío.

Estos efectos se atribuyen a la descomposición térmica incompleta del C_2Cl_6 , que genera cloro gaseoso (Cl_2), cloruro de aluminio ($AlCl_3$) y cloruro de hidrógeno (HCl). Estos compuestos actúan como núcleos de nucleación generando nucleación secundaria de poros por el hidrógeno disuelto o generan volúmenes gaseosos adicionales, exacerbando la porosidad. La reacción exotérmica induce turbulencia en el baño metálico, impidiendo un barrido homogéneo y favoreciendo la redistribución de los poros en lugar de su eliminación.

Además, se identificaron riesgos críticos de contaminación por cloruros residuales y emisión de humos tóxicos, que comprometen tanto la calidad metalúrgica como la seguridad ocupacional y ambiental. La imposibilidad de controlar parámetros clave como la dosificación y la cinética de reacción, junto con los costos ocultos asociados a la gestión de residuos sólidos y sistemas de extracción de gases tóxicos, limitan severamente la factibilidad técnica del método.

Inyección de nitrógeno (N_2): Alta eficiencia y control operativo

En contraste, la inyección de N_2 mediante lanza de grafito propuesta (figura 38) demostró una eficiencia significativamente superior, condicionada por la correcta parametrización del proceso. A 10 psi durante 5 minutos, se observó una reducción sustancial en el tamaño y densidad de poros, acompañada de curvaturas hundidas en la parte superficial de la probeta que evidencian una disminución efectiva en la solubilidad del hidrógeno.



Figura 38. Lanza de grafito propuesta utilizada en el proceso de desgasificación.

El punto óptimo se alcanzó a 15 psi, donde las probetas mostraron una estructura prácticamente libre de poros (97-99% de eficiencia), homogénea y densa, con presencia mínima de microporos residuales, cumpliendo con el número de estándar de calidad #1 y #0. Este resultado se atribuye al mecanismo físico de barrido por burbujas inertes, que reduce la presión parcial del hidrógeno (Ley de Sieverts), lo que disminuye su solubilidad. Esto provoca que el hidrógeno deje de estar disuelto y promoviendo su nucleación heterogénea como burbujas, arrastre y evacuación sin reacciones secundarias.

La homogeneización del baño fue evidente, eliminando la distribución heterogénea de gases observada en las probetas de referencia. Sin embargo, a 20 psi se detectó sobregasificación: la turbulencia excesiva provocó reingreso de hidrógeno y posible disolución de N_2 , manifestada en macroporos semicirculares de bordes suaves, típicos de gases atrapados.

Desde el punto de vista de factibilidad, el método ofrece control preciso sobre presión, caudal y tiempo, permitiendo alta repetibilidad y adaptabilidad a distintas condiciones de fundición. El N_2 no genera residuos químicos ni humos tóxicos, lo que reduce los requerimientos de seguridad a ventilación básica. Aunque requiere inversión inicial en tanques de nitrógeno grado industrial con alta pureza y lanzas de grafito, su bajo costo operativo se compensa con la reducción drástica de piezas rechazadas por porosidad, mejorando propiedades mecánicas como tenacidad y resistencia a la fatiga.

3.5 Factibilidad y beneficios potenciales al usar la técnica de desgasificación por inyección con lanza

La evidencia técnica, económica, ambiental y operativa consolida la inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito propuesta a 15 psi como el método óptimo para la desgasificación de aluminio A356 (tabla 15). Supera al hexacloroetano en eficiencia de porosidad residual, rentabilidad (menor rechazo de piezas y confiabilidad de los clientes), seguridad (cero emisiones tóxicas) y practicidad (control preciso y eficiente maniobrabilidad del operador al usar la lanza de grafito).

Tabla 15. Resume los hallazgos centrales derivados del análisis de resultados, sentando la base para las conclusiones detalladas de esta investigación.

Criterio de evaluación.	Desgasificación con hexacloroetano (C ₂ Cl ₆).	Desgasificación con inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito propuesta.
Evaluación de la porosidad (Prueba Straube-Pfeiffer).	Resultado contraproducente: • Aumento del tamaño promedio y la densidad de poros. • Formación de macroporos por coalescencia. • Deformación superficial abombada, indicativa de liberación descontrolada de gases. • El método exacerba la nucleación de poros en lugar de eliminarlos.	Resultado óptimo (a 15 psi): • Reducción de porosidad del 97-99%. • Estructura homogénea y densa, prácticamente libre de poros. • Superficie ligeramente hundida, señal de una eficiente desgasificación. • La efectividad es dependiente de la presión: 10 psi (mejora insuficiente), 20 psi (sobregasificación por turbulencia).

Comparación de eficacia, factibilidad y beneficios	Eficacia: Baja y no confiable. El proceso químico es impredecible y genera subproductos que agravan el problema. Factibilidad operativa: Limitada. Dosificación imprecisa, dependencia de la habilidad del operador y generación de escorias secundarias que requieren limpieza. Beneficios: Nulos o negativos. Alto riesgo de rechazo de piezas, costos ocultos por gestión de residuos tóxicos y riesgos para la salud y el medio ambiente.	Eficacia: Muy Alta y Confiable. El mecanismo físico de barrido con gas inerte es controlable y reproducible, logrando la máxima pureza del baño. Factibilidad operativa: Alta. Control preciso de parámetros (presión/tiempo), fácil manejo de la lanza y no genera residuos sólidos adicionales. Beneficios: Significativos. Reducción drástica del rechazo interno, ahorro económico a mediano plazo, ambiente de trabajo seguro y proceso ambientalmente sostenible.
---	---	---

Para escalar industrialmente esta solución, se recomienda:

- Monitorizar parámetros clave: presión a 15 psi, tiempo de aplicación 5 minutos, temperatura 690-710°C.
- Validar con análisis complementarios: densidad relativa, pruebas mecánicas y metalografía.
- Capacitar al personal en el manejo del sistema de inyección de nitrógeno para emplear la lanza de grafito.

La transición urgente del hexacloroetano a la inyección de nitrógeno no representa únicamente una mejora técnica: constituye un imperativo ético para proteger la salud

humana, cumplir con las normativas ambientales y asegurar la competitividad industrial mediante fundiciones libres de defectos.

3.5.1 Aspecto económico

La comparación entre métodos de degasificación evidencia impactos económicos determinantes. El uso convencional de hexacloroetano (C_2Cl_6) conlleva costos ocultos relevantes: la implementación de tabletas mostró resultados inconsistentes y un efecto contraproducente en la nucleación de poros, a su vez exigen tratamiento especializado de gases tóxicos y elevan los gastos asociados a inspección de calidad de las piezas producidas. En contraste, la inyección de nitrógeno con lanza de grafito propuesta a 15 psi ofrece una relación costo-beneficio superior, logrando una reducción de porosidad cercana al 97-99%, lo que minimiza reprocesos y asegura la integridad mecánica de las piezas A356.

Aunque el argón representa una alternativa de gas inerte, su costo operativo lo vuelve menos competitivo frente al nitrógeno. La inversión en un rotor inyector motorizado es de alto costo, pero potencia aún más la eficiencia: permite ajustes dinámicos de presión y flujo, distribuye el gas de forma uniforme y reduce el costo total de propiedad al eliminar defectos crónicos asociados a métodos químicos de degasificación. Complementariamente, el uso de lanza de grafito con inyección de nitrógeno propuesta constituye una solución de bajo mantenimiento, de bajo costo de inversión, evitando turbulencias excesivas (frecuentes a 20 psi) y prolongando la vida útil del equipo de fusión.

La sustitución representa una ventaja económica significativa a mediano y largo plazo. Si bien la inversión inicial en un sistema de nitrógeno (tanque de N_2 , reguladores, manómetro) y lanzas de grafito es necesaria, los ahorros operativos la compensan con:

- Reducción de costos por rechazos: La drástica disminución de la microporosidad se traduce directamente en una menor tasa de piezas rechazadas. Para una

fundición típica, esto implica ahorros sustanciales en costos de reprocesamiento, energía para refundir y mano de obra de inspección.

- Eliminación de costos asociados al C_2Cl_6 : Se elimina el gasto recurrente en la compra de tabletas de hexacloroetano.
- Reducción de costos de mitigación ambiental y de salud: Se eliminan los costos asociados a la instalación y mantenimiento de sistemas de extracción y neutralización de gases tóxicos, así como los potenciales costos por incumplimiento normativo o problemas de salud laboral.

En síntesis, la transición al nitrógeno no solo reduce costos directos, sino que mitiga pérdidas por mermas, reprocesos, evita sanciones establecidas por los clientes y las cuestiones ambientales, consolidándose como la alternativa técnico-económica más viable.

3.5.2 Aspecto ambiental y de salud

Los impactos ambientales y sanitarios marcan una diferencia sustancial entre ambos métodos. El hexacloroetano libera gases altamente tóxicos durante la desgasificación: cloro (Cl_2), cloruro de hidrógeno (HCl) y en algunos casos fosgeno ($COCl_2$); que contaminan el entorno laboral y exponen al personal a riesgos respiratorios agudos y crónicos. Además, las inclusiones de cloruros residuales comprometen la calidad del aluminio, generando piezas frágiles y defectuosas.

Estos compuestos requieren sistemas costosos de captación y neutralización, incrementando la huella ecológica del proceso. En cambio, el uso de nitrógeno, un gas inerte, elimina estos riesgos: no genera emisiones tóxicas, residuos químicos ni subproductos corrosivos, protegiendo la salud ocupacional y cumpliendo con normativas ambientales estrictas.

La sustitución de hexacloroetano (C_2Cl_6) por nitrógeno (N_2) no solo previene enfermedades laborales, sino que reduce la carga de tratamiento de emisiones, evita sanciones regulatorias y mejora la sostenibilidad del proceso. Esta transición representa un avance estratégico hacia fundiciones más seguras, limpias y responsables, donde la calidad del aire y la seguridad humana son prioritarias.

3.5.3 Aspecto práctico y operativo

Desde la perspectiva operativa, la eficiencia y el control del proceso de desgasificación son factores críticos. El hexacloroetano presenta limitaciones severas: su dosificación es imprecisa, la reacción térmica es difícil de controlar y genera defectos como inclusiones y porosidad localizada en zonas críticas, elevando el rechazo de piezas. Además, la dependencia de la habilidad del operador para distribuir las tabletas introduce variabilidad y errores humanos.

Por el contrario, la inyección de nitrógeno a 15 psi permite un control preciso: mediante lanza de grafito propuesta, se ajustan presión en tiempo real, asegurando una distribución homogénea del gas, reduciendo la turbulencia y evitando la reincorporación de hidrógeno al baño. Esto se traduce en una operación con un buen manejo del tratamiento para los fundidores y una drástica reducción de reprocesos.

Es fundamental mantener la presión a 15 psi, ya que valores superiores (como en el caso 20 psi) inducen turbulencia excesiva, porosidad localizada e inclusiones gaseosas. La combinación de parámetros óptimos (5 minutos de tratamiento de desgasificado, a una temperatura de 690-710°C) garantiza repetibilidad para la aleación de aluminio A356 o posibles aleaciones Al-Si, sin embargo, el nitrógeno no es recomendable para aleaciones de aluminio-magnesio (AlMg) debido a la posible formación de nitruros; el uso de lanza de grafito facilita la capacitación del personal, asegura la salud del operario y producción de piezas conformes en alta producción. Así, la inyección de nitrógeno con lanza de grafito no solo mejora la calidad, sino que simplifica la operación diaria.

Capítulo 4. Conclusiones

El presente estudio experimental permitió comparar dos métodos de desgasificación para la aleación de aluminio A356 en el proceso de fundición a la cera perdida.

A partir del diseño experimental planteado, se establecieron condiciones controladas logrando exitosamente la preparación del baño metálico de aleación A356 utilizando material de retorno (piezas rechazadas y mazarotas) en un horno de crisol basculante de 70 kg. El protocolo establecido que incluyó precalentamiento del horno y herramientas, fusión controlada entre 690-710 °C, desescoriado, refinamiento de grano con varilla Al - 5%Ti - 1%B y aplicación de fundente de cobertura, proporcionó un metal base consistente y reproducible para la evaluación comparativa de los métodos de desgasificación.

La evaluación del hidrógeno disuelto mediante la prueba de vacío (Prueba Straube-Pfeiffer) antes y después del tratamiento con pastillas de hexacloroetano (C_2Cl_6) reveló que este método no solo es ineficaz, sino contraproducente. Las probetas tratadas mostraron un incremento en el tamaño promedio de los poros y una mayor densidad de porosidad interna, en comparación con las probetas de referencia sin desgasificar. La morfología de poros coalescentes y las deformaciones superficiales abombadas presentes en las probetas indican una liberación descontrolada de gases, atribuida a la descomposición térmica del C_2Cl_6 que genera subproductos gaseosos (Cl_2 , $AlCl_3$, HCl) que actúan como núcleos de nucleación adicionales.

El análisis del hidrógeno disuelto antes y después de la inyección de N_2 con lanza de grafito propuesta, variando la presión (10, 15 y 20 psi), demostró una alta eficacia del método, la cual es dependiente de la presión aplicada.

- A 10 psi, se observó una mejora sustancial, con reducción en el tamaño y densidad de poros.
- A 15 psi, se alcanzó la efectividad óptima, logrando una reducción de porosidad del 97-99%. Las probetas resultantes presentaron una estructura homogénea y prácticamente libre de poros, alcanzando los estándares de calidad más exigentes (#1 y #0).

- A 20 psi, se indujo sobregasificación debido a turbulencia excesiva, resultando en la formación de macroporos y posible disolución de nitrógeno, lo que confirma la criticalidad del control preciso de este parámetro.

La implementación de la técnica de desgasificación por inyección de nitrógeno mediante lanza de grafito propuesta demostró ser notablemente superior al método convencional con hexacloroetano en el tratamiento del aluminio A356. Bajo condiciones controladas de presión (15 psi), tiempo (5 minutos) y temperatura (690–710 °C), se logró una reducción de porosidad cercana al 97-99% (con el número de control de calidad estándar #1 y #0 en A356) en los ensayos en probetas, alcanzando niveles de calidad metalúrgica excepcionales según el estándar de la prueba de presión reducida (prueba Straube-Pfeiffer). La cámara de vacío empleando la presión negativa a 50 cm Hg, validó cualitativamente la remoción de hidrógeno disuelto.

Estos resultados demuestran que la inyección de nitrógeno mediante la lanza de grafito propuesta no solo purifica el baño, sino que preserva la composición química del aluminio, se promoverá la eliminación de defectos en piezas fundidas y garantizará propiedades mecánicas consistentes. A nivel industrial, esto se traduce en cero reprocesos respecto a rechazos internos de piezas producidas, ahorro en inspección minuciosa de parte del departamento de acabado y calidad, favoreciendo la confiabilidad en aplicaciones de alta exigencia.

La transición hacia la desgasificación con nitrógeno con lanza de grafito representa una oportunidad estratégica para la industria fundidora, al combinar alta eficiencia técnica con beneficios operativos, ambientales y económicos sustanciales. Este método elimina la emisión de gases tóxicos, reduce la dependencia de reactivos peligrosos, disminuye el rechazo de piezas y ofrece un mayor control sobre el proceso mediante parámetros ajustables y reproducibles. Su implementación a escala industrial no solo mejoraría la calidad del aluminio A356 en aplicaciones de precisión, sino que también contribuiría a la sostenibilidad y seguridad de los procesos metalúrgicos contemporáneos.

Comparación de Eficacia, Factibilidad y Beneficios:

La comparación directa entre ambos métodos establece de manera concluyente la superioridad técnica, operativa, económica y ambiental de la inyección de nitrógeno con lanza de grafito sobre el hexacloroetano.

Eficacia Técnica: El mecanismo físico de barrido por burbujas inertes de N_2 (15 psi, 5 min) es significativamente más eficiente y controlable que la reacción química impredecible del C_2Cl_6 .

Factibilidad Operativa: El método con inyección de N_2 permite un control preciso y reproducible de los parámetros (presión, tiempo), es fácil de operar con la lanza de grafito y no genera residuos sólidos que requieran limpieza adicional.

Beneficios Económicos: Aunque requiere una inversión inicial en equipo (tanque, manómetro, lanza), elimina el costo recurrente de las tabletas de C_2Cl_6 y, lo más importante, reduce drásticamente los costos asociados al rechazo de piezas y reprocesos.

Beneficios Ambientales y de Salud: La inyección de N_2 elimina por completo la generación de gases tóxicos (Cl_2 , HCl), creando un ambiente de trabajo más seguro y sostenible, en contraste con los riesgos inherentes al uso de hexacloroetano.

Bibliografía

1. Gasque Silva, L. (2003). *Aluminio*. *Educación Química*, 14(1), 52–53.
<https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2003.1.66272>
2. Magaña Rojas, J. (2009). *Estudio integral para la creación de una industria dedicada a la reutilización y extracción de aluminio para la producción de lingotes* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
3. Ros Moreno, A. (2015). *Metalurgia del aluminio*. *Metalurgia I*.
https://www.academia.edu/16364111/Metalurgia_del_Aluminio
4. Medina Ortiz, F. (2018). *Optimización del proceso de fundición de aluminio 356 en molde permanente vaciado por gravedad* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León].
5. Palas Zúñiga, M. A. del R. (2012). *Reconocimiento de fases en aleaciones de aluminio en estado modelado* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
6. Marín de la Puente, J. (2019). *Identificación de microconstituyentes en aleaciones de aluminio mediante metalografía óptica en color* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León].
7. Castro, P., & Luisa, F. (2014). *Aleaciones de aluminio y su importancia en la industria aeroespacial*. *Revista Metal Actual*, 1(31), 12–20.
8. Morales Ramírez, D. (2023). *Estudio de los parámetros críticos de los procesos de fundición de una empresa* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/19465>
9. ASTM International. (2015). *ASTM B26/B26M-15: Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Castings*. West Conshohocken, PA.
10. Hidalgo, R. (2019). *Desarrollo de aleaciones de aluminio de elevadas prestaciones mecánicas y método de predicción de vida a fatiga orientados a componentes de automoción* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].

11. Calvo, C. S. (2016). *Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas*. *Scientia*, 17(17), 143–160.
<https://doi.org/10.31381/scientia.v17i17.388>
12. Deaquino Lara, R. (1996). *Desarrollo de técnicas de fusión para la recuperación de chatarra de aluminio* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química].
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/ficha/desarrollo-de-tecnicas-de-fusion-para-la-recuperacion-de-chatarra-de-aluminio-3458435>
13. Murillo, J. J. (1987). *Desgasificación del aluminio con nitrógeno gaseoso* [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4527>
14. Fonseca Rodríguez, S. (2006). *Efecto de las diferentes variables de proceso de la desgasificación de aleaciones de aluminio por el método de rotor-inyector* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química].
15. Hernández Navarro, R. (2017). *Análisis del desempeño de dos rotores nuevos para el desgasificado de aluminio a nivel laboratorio de fundición* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/370642>
16. Ayala Cázares, J. (2014). *Estudio de la formación de porosidad en una aleación de aluminio 356* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica].
17. Oliva López, V., Mascherpa Villegas, A., Prado Uribe, I., & Muñoz Ávila, J. (1991). *La resistencia a la tracción de las fundiciones de aluminio en piezas desgasificadas con hexacloroetano* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química].
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/3450196>
18. Bautista Lujano, J. A., & Pasalagua Chávez, A. L. (2008). *Desgasificado en fundición de aluminio por medio de pastillas de hexacloroetano* [Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional].

19. Reynolds, J. (2022). *De vuelta a lo básico: Fundentes de aluminio 101 - Fundamentos de la limpieza del horno, manejo de escoria y limpieza de paredes*. HA-International LLC. <https://www.ha-international.com/es/blog/fundentes-de-aluminio-101-fundamentos-de-la-limpieza-del-horno-manejo-de-escoria-y-limpieza-de-paredes>
20. Escudero García, A. (2016). *Modelo matemático para la obtención de coeficientes de transferencia de calor en aleaciones de aluminio hipoeutécticas* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León].
21. Mora Reinozo, J. C. (2020). *Recuperación de aluminio del subproducto escoria para optimizar el rendimiento del proceso, generado en la empresa CEDAL SA de la ciudad de Latacunga* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi].
22. Paredes Jiménez, M. Á. (2023). *Análisis térmico de curvas de enfriamiento en el procesamiento semisólido de la aleación A356* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León].