



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Evaluación Hidrodinámica en una
Olla de Desgasificado de Aluminio
mediante Modelado Físico y el uso
de Técnicas PIV”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA:

MARY DE JESÚS BARRERA MIRELES





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Dr. Carlos González Rivera
VOCAL: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez
SECRETARIO: M. en I. Agustín Gerardo Ruíz Tamayo
1^{er}. SUPLENTE: M. en I. Gerardo Sanjuan Sanjuan
2^{do}. SUPLENTE: I.Q.M. Diego Alberto Abréu López

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

Facultad de Química, UNAM
Edificio D
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Laboratorio de Solidificación y Simulación Matemática

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

SUSTENTANTE:

Mary de Jesús Barrera Mireles

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento en especial a la beca recibida para la realización de esta tesis por parte del **Proyecto PAPIIT** clave **IN114115**, Título: "Diseño de un rotor y optimización en una olla de desgasificado de Aluminio mediante modelado físico y matemático", dirigido por el Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.

ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS	6
INDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	
Generalidades e Importancia del Aluminio	10
Tratamientos al metal líquido	10
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	
1.1 Historia del Aluminio	13
1.2 Obtención y producción del Aluminio	15
1.2.1 Aluminio primario	15
1.2.2 Aluminio secundario (reciclado).....	17
1.3 Propiedades del Aluminio	19
1.4 Influencia de los elementos aleantes en el Aluminio	21
1.5 Procesos de manufactura para aleaciones de Aluminio y su clasificación	22
1.6 Aplicaciones	24
1.7 Tratamientos al metal líquido	25
1.8 Modelado físico	27
1.9 Planteamiento del problema	32
1.9.1 Generalidades.....	32
1.9.2 La porosidad	33
1.9.3 Solubilidad del Hidrógeno en Aluminio	35
1.9.4 Efectos de la porosidad (sopladuras) en las propiedades mecánicas del Al.....	38
1.9.5 Métodos de desgasificación.....	39
OBJETIVO	46
HIPÓTESIS	46

CAPITULO II: METODOLOGÍA

2.1 Descripción del sistema	48
2.1.1 Equipo y arreglo experimental	48
2.1.2 Condiciones del proceso.....	51
2.1.3 Diseño del modelo físico.....	52
2.1.4 Diseño del rotor.....	53
2.2 Procedimiento experimental	55

CAPITULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Rotor Estándar	60
3.2 Rotor Nuevo	64
3.3 Rotor Muescado	69
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	73

CAPITULO IV: CONCLUSIONES

Conclusiones	78
BIBLIOGRAFÍA	80
APENDICE A	83

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1. Aluminio en estado líquido.....	13
Figura 2. Proceso Bayer.....	17
Figura 3. Diferencias en la producción de Aluminio a partir de Aluminio secundario y Aluminio primario.....	18
Figura 4. Normas estándar comparativas de una aleación A356 de Aluminio para medir densidades de porosidad por gas por área, medidos a 100mm de presión reducida.....	34
Figura 5. Solubilidad de Hidrógeno en Aluminio en función de la temperatura.....	37
Figura 6. Algunas de las propiedades mecánicas del Aluminio colado en función de la concentración de Hidrógeno disuelto y la velocidad de solidificación.....	39
Figura 7. Cinéticas de desgasificado usando los métodos de lanza, tapón poroso y rotor-inyector.....	43

CAPITULO II

Figura 8. Fotografía del arreglo experimental usado.....	49
Figura 9. Pruebas experimentales usando la técnica en 2D del PIV.....	50
Figura 10. Diseño del modelo físico.....	52

Figura 11. Rotores de Nylamid® utilizados durante la experimentación; a)rotor estándar, b)rotor muescado y c)rotor nuevo.....54

Figura 12. Vista lateral de los rotores utilizados; a)rotor estándar, b)rotor muescado y c)rotor Nuevo.....54

Figura 13. Plano iluminado por el láser durante una prueba 2D.....56

Figura 14. Plano sin iluminación láser.....56

CAPITULO III

Figura 15. Escala de color.....59

Figura 16. Patrón de flujo medido del rotor estándar sin inyección.....60

Figura 17. Patrón de flujo medido del rotor estándar con inyección de aire.....61

Figura 18. Fotografía del rotor estándar con inyección de aire.....62

Figura 19. Patrones de flujo sin inyección de aire para el rotor nuevo.....64

Figura 20. Patrones de flujo obtenidos para el rotor nuevo con inyección de aire.....65

Figura 21. Fotografía del rotor nuevo en una prueba en 2D.....67

Figura 22. Patrón de flujo obtenido sin inyección de aire para el rotor muescado.....69

Figura 23. Patrón de flujo obtenido con inyección de aire del rotor muescado.....70

Figura 24. Fotografía durante una prueba 2D del rotor muescado.....71

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO I

Tabla 1. Propiedades del Aluminio.....	19
Tabla 2. Principales elementos aleantes del Aluminio.....	22
Tabla 3. Clasificación de Aluminio para procesos metal-mecánicos.....	23
Tabla 4. Dimensiones del reactor industrial y del modelo físico empleado.....	29
Tabla 5. Gases, polvos y escorias utilizadas para el desgasificado.....	42

CAPITULO II

Tabla 6. Pruebas experimentales.....	55
---------------------------------------------	-----------

CAPITULO III

Tabla 7. Tabla comparativa de los tres diseños de rotor.....	73
---------------------------------------------------------------------	-----------

APENDICES

Tabla A1. Propiedades físicas usadas en el modelo físico.....	83
----------------------------------------------------------------------	-----------

RESUMEN

Este trabajo de tesis se centra en el **desgasificado** (remoción de Hidrógeno) por la técnica de rotor-inyector, que forma parte del proceso de fabricación de Aluminio y sus aleaciones, específicamente en la parte referente a los tratamientos del metal líquido.

Para este estudio se trabajó con un modelo físico de agua a escala completa, 1:1, y se usó la técnica 2D del sistema PIV con el cual se obtuvieron mediciones de velocidad del flujo de fluidos en el desgasificado variando el diseño del rotor. Se estudiaron tres tipos diferentes de rotor, los cuales se nombraron: Rotor estándar, Rotor muescado y Rotor nuevo.

Basados en trabajos anteriores se utilizaron condiciones óptimas para la experimentación. Se utilizó aire como gas de purga, el cual fue inyectado de forma convencional, es decir, a través del rotor usando un flujo de 10 litros por minuto y una velocidad de rotación de 580rpm.

Con las pruebas realizadas se obtuvo la dinámica de fluidos del sistema con el fin de comparar los tres modelos de rotor y obtener el diseño óptimo y con mayor eficiencia para el proceso.

Generalidades e Importancia del Aluminio

Actualmente la sociedad mundial enfrenta el reto de trasladar las actividades económicas hacia una nueva era con mayor sustentabilidad, ésto con el objetivo de mejorar la calidad de vida y evitar el deterioro del medio ambiente, así como, fomentar su protección y restauración.

Específicamente, en la industria del Aluminio, la principal meta es minimizar las pérdidas económicas, sociales y evitar el deterioro ecológico, y al mismo tiempo, elevar la eficiencia tanto en los procesos de obtención del metal como en la producción de objetos de uso cotidiano.

El Aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, después del Oxígeno y el Silicio, y sus compuestos conforman aproximadamente el 8% de ésta (15% Al_2O_3), es considerado como una de las materias primas con mayor demanda mundial, principalmente en el ámbito industrial, por lo que se ha incrementado su demanda año con año, y en poco más de un siglo se ha convertido en el segundo metal más usado en el mundo, tan sólo después de las aleaciones base hierro y el acero.

El Aluminio es importante como material debido a que es uno de los metales con mejor resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica, baja densidad y es 100% reciclable.

Tratamientos al metal líquido

Por otra parte, para la producción de Aluminio y de sus aleaciones por cualquiera que sea su ruta de obtención, debe pasar por el proceso de fundición del mismo y por lo tanto debe ser sometido a una serie de tratamientos en estado líquido, tales como, refinación de grano, desgasificación, modificación y en algunos casos el filtrado.

Este trabajo está enfocado en el **desgasificado** de Aluminio que se utiliza principalmente para remover el Hidrógeno, elemento que presenta una gran solubilidad dentro de la fase líquida del metal, dicho tratamiento evita la formación de porosidades que pueden afectar las propiedades mecánicas del Aluminio, como pueden ser: la resistencia a la tensión, resistencia al impacto y a la fatiga, entre otras.

Los métodos de desgasificación más utilizados en la industria para este fin son: Desgasificado natural, Desgasificado al vacío y el Desgasificado mediante la inyección de gases o polvos. De los tres métodos anteriores nos basaremos en el último mencionado, el Desgasificado mediante inyección de polvos o gases, el cual puede ser realizado por medio de tapones porosos, lanzas o rotores.

En específico, este trabajo se basa en el desgasificado por la técnica de **rotor-inyector**, en donde el Aluminio es purgado con ayuda de un gas inerte, ya sea Argón o Nitrógeno principalmente, y tiene como fin remover el Hidrógeno que proviene principalmente del contacto del metal líquido con la humedad del medio ambiente.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Historia del Aluminio^{[1][2]}

El Aluminio se obtiene a partir de un mineral (Aluminio primario) o bien del material de Aluminio desechado tras concluir su vida útil, que se denomina chatarra (Aluminio secundario o reciclado).

En la Figura 1. se presenta una fotografía del Aluminio en estado líquido durante el proceso de obtención.

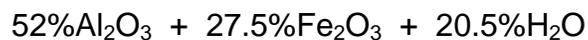


Figura 1. Aluminio en estado líquido

La metalurgia extractiva del Aluminio está sustentada en su comportamiento electroquímico. El Aluminio manifiesta una gran afinidad química por los no metales como el Oxígeno y el Cloro dada su fuerte inclinación electronegativa en la serie de potenciales electroquímicos, principal motivo que impidió aplicar procesos carbotérmicos para su reducción.

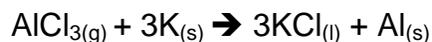
El mineral de Aluminio más común es la Bauxita, llamado así debido a que fue encontrado en 1821 en la región de Baux, al sur de Francia. La Bauxita es resultado de la descomposición y el intemperismo que sufren las rocas que contienen Aluminio, por ello los depósitos importantes de este mineral se encuentran en zonas con condiciones tropicales, tales como, Brasil, Venezuela, África del Norte, Australia, Jamaica, Sudáfrica, Guinea y al Noroeste de la India, principalmente, aunque también existen algunos depósitos en zonas de Europa y Norte América.

La composición típica del mineral (Bauxita) es:



Del procesamiento de la Bauxita se obtiene alúmina mediante el proceso Bayer. La alúmina es óxido de Aluminio hidratado ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) y por lo general contiene impurezas de óxidos de Hierro, así como compuestos de Fósforo y Titanio. La alúmina es posteriormente reducida por un proceso electrolítico de sales fundidas para la obtención de Aluminio metálico.

Los primeros intentos para separar el metal de sus compuestos estables fueron hechos por Sir Humphrey Davy, quién en 1807 utilizó una batería galvánica de mil celdas, sin embargo dicho experimento no tuvo buenos resultados. Tiempo después, en 1825, Orested informó que redujo cloruro de Aluminio con una amalgama de Potasio; y más tarde Wohler, en 1827, mejoró el proceso de reducción química de Aluminio empleando Potasio metálico en vez de su amalgama y usando como precursor el cloruro de Aluminio en estado vapor. La reacción de este último experimento es:



El Aluminio comenzó a producirse de manera comercial hace más de 155 años, cuando en 1854 el francés Henri Saint-Claire Deville sustituyó el cloruro de Aluminio por el cloruro doble de Aluminio y Sodio, que es mucho menos higroscópico y empleó Sodio ya que es mucho más económico que el Potasio.

En 1885 Hamilton Y. Cassner (USA) mejoró el proceso de Deville con una producción anual de 15 toneladas, sin embargo, fue hasta 1886, cuando Paul Louis Hèroult en Francia y Charles Martín Hall en Estados Unidos de America patentaron simultáneamente la invención de su proceso electrolítico para la reducción del óxido de Aluminio (alúmina) lo que abrió la posibilidad de reducir costos y así convertir al Aluminio en un metal comercial y de uso masivo. Las patentes tanto de Hall como de Hèroult incluían la electrólisis del óxido de Aluminio en un baño de sales de haluros fundidos y desde entonces la alúmina extraída de la Bauxita en un baño de criolita, se ha convertido en la fuente más importante de Aluminio.

1.2 Obtención y producción del Aluminio

1.2.1 Aluminio primario^[3]

Actualmente, la extracción de Aluminio a partir de Bauxita se efectúa en tres etapas: minería, refinación y reducción.

El **Proceso Bayer** para la obtención de óxido de Aluminio a partir de Bauxita es un proceso hidrometalúrgico de separación y extracción, el cual es muy eficaz y selectivo.

En dicho proceso la Bauxita es primeramente pasada por un proceso de tostación en un horno giratorio, para después ser llevada al proceso de pulverizado en un molino de bolas, en el siguiente paso el polvo se carga en autoclaves, donde a una temperatura de 165°C y a una presión de 6atm es transformado en aluminato de Sodio por la acción de la sosa cáustica utilizada con una concentración de 45°B¹ quedando las impurezas en el residuo insoluble. A continuación, en filtros prensa son separados los residuos insolubles, lodos rojos principalmente, llamados así debido a su alto contenido de óxido de Hierro, aunque también contiene cantidades pequeñas de óxidos de Aluminio, Calcio, Magnesio, Sodio y Titanio, mientras la lejía (NaOH) de aluminato se conduce a

¹ Escala de concentración Baumé

los reactores de descomposición en donde se diluye hasta aumentar varias veces su volumen, precipitando el hidróxido de Aluminio que se separa del agua madre por medio de filtros. La solución madre se vuelve a utilizar, la cual se concentra hasta 45°B en evaporadores y a continuación se lleva a la disgregación en autoclaves. A continuación, el hidróxido de Aluminio se calcina a 1400°C en hornos giratorios.

La alúmina purificada se prepara para el siguiente paso: la electrólisis, que se realiza por medio del proceso desarrollado por Hall y Heroult. Este proceso consiste en celdas electroquímicas que contienen criolita fundida (Na_3AlF_6) a 980°C donde se disuelve la alúmina, la cual al someterse a la electrólisis se divide en Aluminio y Oxígeno, el Aluminio baja al fondo de la celda donde se extrae periódicamente y el Oxígeno se combina con el carbono del ánodo para producir CO_2 .

Para una tonelada de Aluminio se necesitan dos toneladas de alúmina, que a su vez requiere cuatro toneladas de Bauxita.

En general, para producir un kilogramo de Aluminio se requieren 22KWh de energía. La pureza típica del Aluminio alcanzada con este proceso oscila entre 99 y 99.8%, que es aceptable para la mayoría de las aplicaciones, aunque para aplicaciones especiales de extrusión o ductilidad alta se requiere Aluminio con una pureza del 99.99%.

En la Figura 2. se presenta el diagrama general del Proceso Bayer.

PROCESO QUIMICO (BAYER) EXTRACCION DE ALUMINIO

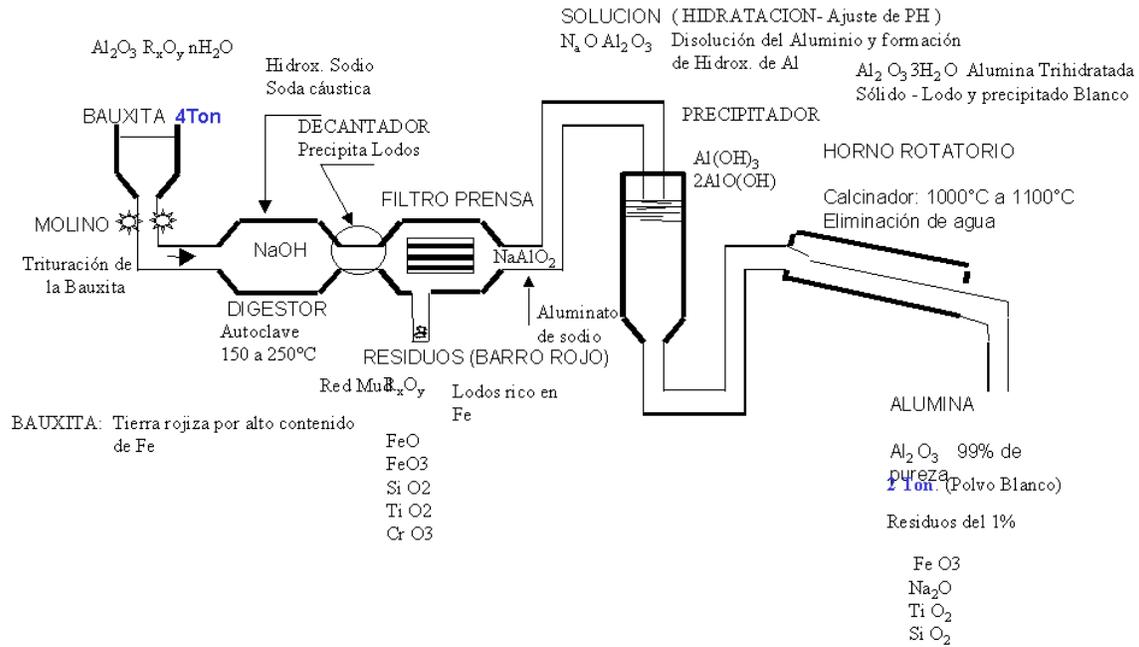


Figura 2. Proceso Bayer

1.2.2 Aluminio secundario (reciclado)

Hoy en día, la principal fuente de Aluminio en el mundo es el reciclado o Aluminio secundario, debido al ahorro en su producción, la sencillez del proceso y los beneficios medioambientales que conlleva.

El reciclaje de Aluminio es sumamente rentable para la industria, dado que se aprovecha el desecho casi en su totalidad y además significa un ahorro energético del 94% a comparación de su obtención a partir del mineral.

El Aluminio reciclado no afecta las características ni las propiedades del material y puede reciclarse indefinidamente sin disminuir su calidad.

El Aluminio recuperado es seleccionado, prensado y finalmente fundido, repitiendo de nuevo el proceso completo para la fabricación de lingotes que pueden ser utilizados en cualquiera de sus aplicaciones. Básicamente, la principal diferencia consiste en no usar el Aluminio proveniente del proceso electrolítico y en su lugar tomar como materia prima la chatarra de Aluminio.

En la Figura 3. se muestran las rutas de obtención de Aluminio a partir de Aluminio primario y secundario como materia prima.

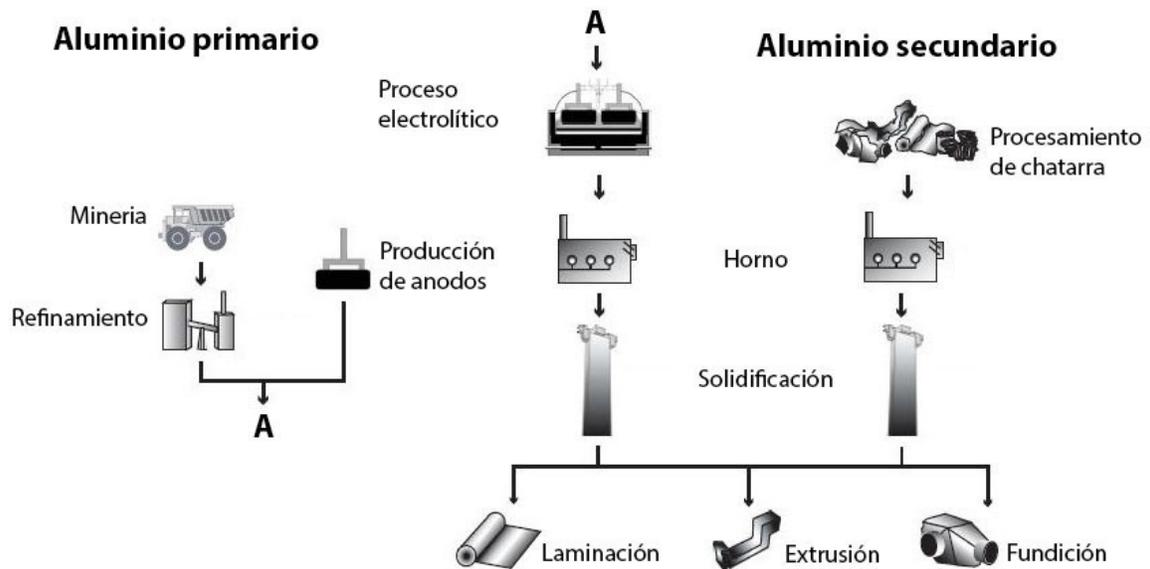


Figura 3. Diferencias en la producción de Aluminio a partir de Aluminio secundario y Aluminio primario

1.3 Propiedades del Aluminio^{[4] [5]}

En general, el Aluminio posee una enorme importancia económica dadas las propiedades específicas que lo caracterizan, propiedades que lo han posicionado como uno de los materiales más usados por la humanidad.

En la Tabla 1. se presentan algunas de las principales propiedades del Aluminio.

Tabla 1. Propiedades del Aluminio

Simbolo	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26.98154 u.m.a.
Volumen atómico	$9.996 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
Estructura cristalina	FCC
Densidad de empaquetamiento	74 %
Número de coordinación	12
Parámetro de red	0.40496 nm
Distancia interatómica mínima	0.28635 nm
Modulo de Young	66.6 GPa ó $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Resistencia a la tracción	230-570 MPa
Límite elástico	215-505 MPa
% Elongación	10-25 %
Coefficiente de expansión (entre 20°C y 100°C)	1.85 %
Módulo de Poisson	0.35
Temperatura de fusión	660.2 °C
Calor latente de fusión	$390 \text{ kJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$
Energía de activación para la autodifusión	$120 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Tensión superficial (660°C)	$0.86 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$
Viscosidad (700°C)	$1.1 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Calor de combustión	$31 \text{ MJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$
Punto de ebullición	2467 °C

A continuación, se enlistan algunas de las ventajas que ofrece el Aluminio y sus aleaciones con respecto a otros materiales y algunas características generales del mismo:

- Se ubica en la familia III-A de la Tabla Periódica, junto con el Boro, el Galio y el Indio.

- Está en el segundo periodo después del Sodio y del Magnesio, seguido por el Silicio.
- Su **densidad** ronda entre 2.6 y 2.8g/cm³, siendo 2.7g/cm³ para el Aluminio puro, 2.55g/cm³ para el sólido a 660°C justo por debajo de la temperatura de fusión y 2.38g/cm³ para el metal líquido, lo cual representa una tercera parte de la densidad del acero.

Su bajo peso permite el desarrollo de industrias como la aeronáutica y la automotriz, y facilita el conformado de piezas, reduciendo los costos de transportación y mano de obra.

- Durante la fusión existe un aumento de volumen de entre 6.5 y 6.7% dependiendo de la pureza del metal.
- La **conductividad térmica** de las aleaciones normalizadas de Aluminio es alta, ya que comprenden valores entre 80 y 230W/mK, que solo es superada por el Cobre, siendo además cuatro veces más grande que la conductibilidad del acero.

Además las superficies desnudas de Aluminio se caracterizan por poseer un alto índice de reflexión de las radiaciones luminosas y térmicas (refleja de 80 a 85% de radiación visible incidente). Esta buena conductividad del Aluminio lo hace un material de uso adecuado en piezas donde se requiere una alta rapidez de disipación del calor.

- Posee una buena **conductividad eléctrica**, que se encuentra entre los 34 y 38m/Ωmm², la cual puede llegar a representar el 63.8% de la del Cobre. Para conductores eléctricos se utiliza Al puro y aleaciones Al-Mg-Si.
- No es magnético.
- No es tóxico.
- Tiene una buena **resistencia mecánica**.
- Es **resistente a la corrosión** (Aluminio puro y de alto grado de pureza, así como las aleaciones libres de Cobre), resistente a los productos químicos, y es empleado en industrias como son: la de la construcción, la química, y de alimentos, así como, en artículos de consumo cotidiano y para la construcción de vehículos, barcos y aviones.

- Tiene una excelente capacidad para ser **conformado mecánicamente** haciendo posible la fabricación de perfiles y tubos con secciones transversales complejas mediante extrusión.
- Se les puede aplicar la mayoría de los procesos superficiales convencionales (pulido, anodizado y pintado) para modificar sus propiedades, tales como, dureza superficial, resistencia al desgaste, etc.
- Gracias a su posición en la serie electromotriz de los elementos y al calor de formación de su óxido, el cual es de $1.606 \times 10^2 \text{ J/mol}$ ($383,900 \text{ cal/mol}$), es considerado como un elemento muy reactivo, por lo cual se oxida con facilidad.
- Su **resistencia química** se debe a la formación espontánea de una capa protectora de óxido muy delgada (espesor de 4 a $5 \times 10^{-6} \text{ mm}$), compacta y que se adhiere con firmeza, insoluble en agua y en muchos otros disolventes. Esta película protege al metal del medio ambiente y la corrosión.
- Los **disolventes** más poderosos del Aluminio son los ácidos halogenados (ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico), el ácido sulfúrico concentrado y las soluciones acuosas de hidróxidos alcalinos y carbonatados de Sodio y Potasio.

1.4 Influencia de los elementos aleantes en el Aluminio^[6]

Gracias a la gran demanda de Aluminio se requirió el desarrollo de nuevas aleaciones con composiciones y propiedades especializadas que satisficieran específicos requerimientos ingenieriles.

Las propiedades de las aleaciones de Aluminio dependen directamente de los elementos que contengan y del porcentaje presente en cada una.

La Tabla 2. muestra el uso y los efectos de los elementos aleantes en el Aluminio.

Tabla 2. Principales elementos aleantes del Aluminio

Aleantes más importantes	Cu Si Mg Zn
Refinadores de grano	Ti B Zr TiC
Modificadores de Silicio eutéctico	Sr Na Sb
Refinadores (modificadores) de Silicio primario	P
Aleantes poco comunes	Ni Cr Bi Cd Be Mn Ag Pb Sn
Impurezas	Fe Ca Hg Bi

1.5 Procesos de manufactura para aleaciones de Aluminio y su clasificación^[7]

Las piezas de Aluminio fabricadas pueden ser trabajadas mecánicamente por laminado o extrusión o pueden ser coladas en moldes de arena o moldes permanentes inyectados a presión.

En la Tabla 3. se presenta la clasificación usada en las aleaciones de Aluminio para procesos metal-mecánicos.

Tabla 3. Clasificación de Aluminio para procesos metal-mecánicos

SERIE	ELEMENTO MAYOR PROPORCIÓN	PROPIEDADES	EJEMPLOS
1XXX	99% Al mínimo	Alta resistencia a la corrosión. Alta conductividad eléctrica y térmica. Baja maquinabilidad.	AA1100 AA1060
2XXX	Cobre	Relativamente baja resistencia a la corrosión. Tratable térmicamente.	AA2024
3XXX	Manganeso	De baja a mediana resistencia. Buena resistencia a la corrosión. Pobre maquinabilidad.	AA3003
4XXX	Silicio	No extruible.	
5XXX	Magnesio	De baja a media resistencia. Excelente resistencia a la corrosión. Muy buena soldabilidad.	AA5083
6XXX	Magnesio y Silicio	La más popular del grupo de aleaciones para extrusión. Buena resistencia a la corrosión. Buena maquinabilidad. Buena soldabilidad. Tratable térmicamente.	AA6063 AA6261 AA6005 AA6351 AA6463
7XXX	Zinc	Muy alta resistencia. Buena maquinabilidad. Tratable térmicamente.	AA7075 AA7005
8XXX	Otros elementos. Por ejemplo: Hierro y Silicio		AA8006 AA8079 AA8011 AA8111

La gran diferencia entre ambas rutas de fabricación, es decir, entre la fabricación de aleaciones de Aluminio por fundición y la ruta de conformado mecánico, es la etapa de solidificación.

Para la clasificación e identificación de las aleaciones de Aluminio para conformado se usa un sistema de cuatro dígitos, donde el primer dígito indica el grupo de aleación y elemento aleante en mayor proporción.

Las piezas forjadas generalmente son aleaciones de Aluminio con una cantidad muy baja de elementos aleantes. Destacan por su importancia económica la serie 3XXX y la serie 4XXX, cuyos elementos aleantes son Mn y Si respectivamente y cuyos contenidos de soluto no rebasan el 1% en peso.

Para la fabricación de las aleaciones de Aluminio por extrusión tales como perfiles o escaleras, y por laminación como hojas de Aluminio o papel Aluminio, se parte de materia prima que incluye Aluminio primario (proveniente del proceso electrolítico) y de chatarra de Aluminio.

1.6 Aplicaciones

A continuación se presentan algunas de las principales aleaciones y sus aplicaciones.

- **AA1060**

Aleación con un mínimo de 99% Aluminio. La cual es sumamente blanda y es utilizada principalmente en la industria de cables y alambres.

- **AA1350**

Aleación con 90% de Aluminio. Empleada en embobinados para transformadores eléctricos gracias a su alta conductividad y resistencia mecánica.

- **AA3003**

Aleación con 1% de Manganeso. Cuenta con una buena resistencia a la corrosión, buena soldabilidad y presenta mejores propiedades mecánicas que la

AA1100. Es usada en fabricación de intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos y condensadores.

- **AA8112**

Es similar a la AA1100 pero con mayores contenidos de Hierro, Manganeso y Silicio. Es utilizada para la fabricación de tejas, laminas de alfajor, laminas lisas y rollos

- **AA8006**

Usada para la fabricación de papel Aluminio y contenedores rígidos.

- **AA6063**

Esta aleación es la más popular pen el proceso de extrusión. Presenta un buen acabo superficial y es muy usada en el ámbito arquitectónico.

- **AA6261**

Principalmente utilizada en aplicaciones estructurales.

Otras aplicaciones del Aluminio se da en las áreas automotriz y aeroespacial, aeronáutica y militar, donde las piezas siguen la ruta de fundición para su obtención.

1.7 Tratamientos al metal líquido^[7]

En el proceso de obtención y purificación del metal (Aluminio) por la vía de fundición, el metal líquido sufre una serie de procesos de fusión y de tratamientos en estado líquido que comprende la siguiente secuencia:

- Desgasificado
- Refinación de grano
- Modificación
- Filtrado

La materia prima, en primer lugar, es fundida en hornos de reverbero o en algunas ocasiones pueden utilizarse hornos de inducción.

Dependiendo de los requerimientos y propiedades del producto, la carga es ajustada agregando elementos aleantes. Después la composición química es medida para garantizar el cumplimiento de la norma química de cada aleación.

Cuando se alcanza la composición química y la temperatura adecuadas en los hornos de fusión, el metal líquido es sometido a los tratamientos antes mencionados.

Una vez concluidos estos tratamientos en estado líquido, los cuales garantizan una adecuada calidad de las piezas, el Aluminio es solidificado en máquinas de colada semi-continua o continua, en moldes de arena, en moldes permanentes o colados a presión.

Dentro de los procesos metalúrgicos previos al trabajo metalmecánico se obtienen productos primarios (lingotes, rollos, alambres, tochos, etc.)

El proceso de colada continua o semi-continua genera productos intermedios para los procesos metalmecánicos^{II} (laminación, extrusión, estirado, etc.).

Regresando a los tratamientos del metal líquido, el primero que se realiza es el **desgasificado**, motivo de esta tesis y que se abordará con mayor detalle más adelante.

El segundo tratamiento en estado líquido es el de **refinación de grano**, que consiste en agregar sustratos sólidos (aleaciones maestras de Ti-B) al baño metálico para favorecer la nucleación heterogénea masiva que provocará un tamaño de grano fino y homogéneo en el metal solidificado.

El tratamiento de **modificación** sirve para globulizar las partículas de Silicio eutéctico acicular (para aleaciones con alto contenido de silicio), el cual es nocivo para las propiedades mecánicas de las piezas coladas, para lo cual se adiciona Sr.

^{II} También llamados procesos secundarios

Finalmente, en muchos de los casos para asegurarse de obtener una buena calidad en las piezas, se colocan **filtros** cerámicos en los moldes para evitar el paso de inclusiones.

Cada una de estas operaciones es de suma importancia para la obtención de una pieza con alta calidad, lo que a su vez es sinónimo de buenas propiedades mecánicas.

1.8 Modelado físico^{[8] [9] [10]}.

Un modelo físico se basa en el análisis de una representación o aproximación de un proceso o sistema real utilizando otros materiales cumpliendo con estrictos criterios de similitud expresados en términos de relaciones adimensionales, desde el punto de vista de la fluidinámica estos criterios de similitud son: geométrica, dinámica y cinemática.

Los modelos físicos son una herramienta utilizada en la rama de ingeniería de procesos metalúrgicos, ya que con estos se obtienen resultados acerca de lo que pasa dentro de un reactor, resultados que pueden ser trasladados a condiciones industriales, así mismo, se pueden estudiar los fenómenos de flujo de fluidos y fenómenos de transporte, con lo cual se puede controlar, diseñar, predecir, optimizar y analizar el proceso simulado. Los resultados del modelado físico validan lo obtenido en los modelos matemáticos, por lo que pueden ser utilizados conjuntamente.

Una de las principales causas de la construcción de un modelo físico es la seguridad, dadas las altas temperaturas de operación, y el bajo costo que representa a comparación de los experimentos realizados en la industria metalúrgica, ya que busca representar el sistema real utilizando diferentes materiales y dimensiones, para que el nuevo sistema experimental sea de fácil manejo.

Debido a que es imposible medir u observar lo que pasa dentro del metal fundido, la modelación física a escala completa es de gran utilidad para el estudio de una amplia gama de parámetros operacionales, en este trabajo el estudio está enfocado al proceso de refinación de Aluminio líquido en donde es posible observar los patrones de flujo que determinan la eficiencia del proceso de desgasificado mediante la técnica de rotor-inyector. Los parámetros medidos son: la evaluación de diferentes tipos de geometrías de rotor, estudio del comportamiento y distribución de las burbujas de gas provenientes de la inyección, tiempos de residencia y tamaño de las mismas, tiempos y eficiencias del mezclado y la cinética y eliminación de gases disueltos mediante la inyección de un gas inerte.

Cabe señalar el enfoque dado en este trabajo principalmente al diseño del rotor, que es un área poco estudiada hasta el momento y que creemos firmemente en que es necesario un estudio que caracterice la hidrodinámica del sistema y el efecto real que tiene en la eficiencia dentro del proceso de desgasificado.

En este caso utilizando agua simulando el Aluminio líquido (fundido) y aire en sustitución del Argón inyectado, se obtiene la medición continua e inmediata de la concentración de Oxígeno disuelto en agua y se puede visualizar la dinámica de fluidos dentro del sistema.

Para comprobar la validez del modelo físico antes mencionado, es necesario cumplir con estrictos criterios de similitud, los cuales son la comparación específica de los números adimensionales que presentan los fluidos involucrados en ambos casos, es decir, tanto en el modelo físico como en el proceso real. Específicamente para un reactor tipo batch, los criterios de la teoría de similitud a satisfacer son: los geométricos, cinemáticos y dinámicos.

Se sabe que el mecanismo que prevalece en el sistema es el de convección, por lo que la cinética de la transferencia de masa es de suma importancia para poder satisfacer dichos criterios de similitud en la dinámica de flujo de fluidos.

A continuación se presentan las características comparadas para que dichas similitudes existan y el modelo pueda ser considerado como una buena representación aproximada del fenómeno:

- Similitud Geométrica:

El sistema de estudio es un modelo con un factor de escalamiento unitario, ya que tiene una escala 1:1, lo que significa que tanto las proporciones del modelo físico como las del reactor real conservan la misma relación.

La Tabla 4. muestra la similitud geométrica en cuanto a dimensiones se refiere.

Tabla 4. Dimensiones del reactor industrial y del modelo físico empleado

	Reactor Industrial	Modelo Físico
Altura del reactor (cm)	106	63
Radio interno del reactor (cm)	25	25
Radio externo del reactor (cm)	65	27
Altura del rotor (cm)	15	15
Radio del rotor (cm)	8	8
Altura del líquido (cm)	50	50

El modelo físico cumple con el criterio de geometría de escala completa 1:1, ya que tiene las mismas dimensiones y utiliza el mismo volumen de líquido.

En cuanto a la altura del reactor y el radio externo, son factores de seguridad y revestimientos que requiere el reactor para su correcto y seguro funcionamiento, y no afectan en las mediciones del modelo físico.

- Similitud dinámica:

Existen dos principales números adimensionales que deben cumplirse para satisfacer este criterio, los cuales describen la relación que hay entre las fuerzas involucradas en el flujo de fluidos dentro de una olla agitada por rotor-inyector.

Los números requeridos se describen a continuación:

$$\text{Número de Reynolds } Re = \frac{\rho V d_b}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (1)$$

Donde:

ρ es la densidad del líquido [Kg/m³]

V es la velocidad característica (promedio) del líquido [m/s]

d_b es el diámetro promedio del reactor [m]

μ es la viscosidad del líquido [Kg/ms]

$$\text{Número de Froud Modificado } Fr = \frac{\rho_g V^2}{(\rho_l - \rho_g) g d_b} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerza de gravedad}} \quad (2)$$

Donde:

ρ_g es la densidad del gas inyectado [Kg/m³]

ρ_l es la densidad del líquido [Kg/m³]

V^2 es la velocidad de ascenso del gas [m²/s²]

g es la aceleración de la gravedad [m/s²]

d_b es el diámetro promedio del reactor [m]

Estos números adimensionales gobiernan la dinámica de fluidos del proceso de desgasificado. Cuando el rotor gira las fuerzas inerciales y las viscosas son las determinantes, mientras que las fuerzas boyantes o gravitacionales intervienen cuando se inyecta la fase gaseosa.

Se debe considerar la diferencia de la tensión superficial entre el agua y el Aluminio líquido por lo que es considerado además el número de Weber, el cual

relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas de tensión superficial para determinar la estabilidad de las burbujas del gas inerte inyectado, sin embargo, es importante aclarar que como las burbujas se forman justo debajo del punto de inyección y chocan directamente con el líquido o metal fundido en movimiento, la estabilidad de las burbujas también depende del tamaño y forma de las mismas, relación que se da entre las fuerzas centrífugas y las fuerzas de tensión superficial.

$$\text{Número de Weber } We = \frac{\rho V^2 d_b}{\sigma} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas de tensión superficial}} \quad (3)$$

- Similitud cinemática:

La similitud cinemática se cumple si las velocidades en los puntos correspondientes de ambos sistemas se encuentran en la misma relación fija y deriva de la propiedad intrínseca de los líquidos a fluir, o también llamada viscosidad cinemática. La definición matemática de la viscosidad cinemática es:

$$\text{Viscosidad cinemática } V = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

Donde:

V esta expresada en [m²/s]

μ es la viscosidad dinámica expresada en [Kg/ms]

ρ es la densidad expresada en [Kg/m³]

Para satisfacer la similitud cinemática es necesario que el modelo físico utilice un fluido con un valor similar de viscosidad cinemática del fluido real. Dado que la viscosidad cinemática del agua a temperatura ambiente es de 10x10⁻⁶m²/s y la del Aluminio líquido a 800°C^{III} es de 5.5x10⁻⁷m²/s, es necesario hacer un escalamiento de números adimensionales para la velocidad de rotación del rotor

^{III} Temperatura utilizada debido al sobrecalentamiento que debe existir para la realización adecuada de los tratamientos en la fase líquida del metal.

y el flujo de inyección para el gas de purga, aunque no son completamente similares, son un orden de magnitud cercano y puede asumirse que en caso de cumplirse la similitud dinámica los movimientos generados en ambos sistemas son similares. Sin embargo, para evitar este problema, se ha optado por utilizar sistemas a escala completa donde el número de Reynolds y el de Froude modificado es similar, por lo que el número de Weber es excluido.

En cuanto a los criterios de similitud térmica y química no aplican en este caso, ya que no intervienen en el proceso.

Finalmente puede decirse que el modelo físico cumple con los criterios de similitud y por lo tanto es validado correctamente para simular el proceso industrial. Las propiedades físicas utilizadas para calcular los números adimensionales mostrados se presentan en el Apéndice A.

1.9 Planteamiento del problema^[11-22]

1.9.1 Generalidades

El aumento exponencial en el consumo de Aluminio es prueba de lo que este metal significa en la industria moderna. El Aluminio es el más importante de los metales no ferrosos y ocupa el segundo lugar de consumo, tan solo después del Hierro a nivel nacional y mundial. El Aluminio se presenta en diversas formas que van desde planchas gruesas (250mm) hasta hojas delgadas (0.005mm); el cual puede ser usado en diversas aplicaciones industriales.

La refinación del metal líquido se utiliza principalmente para quitar las impurezas, tales como, elementos y compuestos indeseables que generan inclusiones, así como los gases atrapados en este, principalmente el Hidrógeno, el cual genera sopladuras (poros) en la piezas de colada que a su vez debilitan y afectan las propiedades mecánicas y disminuyen la calidad de las piezas.

Existen diversas técnicas de fusión para el Aluminio secundario que dependen directamente del tipo de horno utilizado, siendo tres los más comunes: reverbero, inducción y crisol.

Los elementos indeseables en el Aluminio son Litio, Sodio y Calcio (alcalinos) de los cuales el Sodio proviene de su obtención en proceso electrolítico de las celdas Hall-Heroult y los demás provienen desde el mineral de Aluminio (Bauxita) debido a su facilidad de formar compuestos. Las inclusiones se generan debido a la exposición de la superficie del metal al ambiente, lo que genera óxidos o puede ser debidos también a la mala calidad de los refractarios del horno, o por una mala selección o mal uso de los fundentes (fluxes) que contienen cloro.

1.9.2 La porosidad

La principal causa de la aparición de porosidades pueden ser dadas tanto por contracción durante la solidificación, como por la presencia de gas, y puede ocurrir separadamente o juntas, produciendo defectos en las piezas coladas.

El mayor y más frecuente de los problemas para las aleaciones de Aluminio obtenidas mediante el proceso de fundición es la formación de cavidades micrométricas, llamadas microporosidades, las cuales causan la reducción de las propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a la fatiga, a la tensión y un desgaste de la superficie en las piezas vaciadas. La formación de microporosidad se atribuye a dos factores, el primero, la contracción acompañada de una falta de alimentación interdendrítica durante la solidificación de la zona pastosa (poros por contracción); y la segunda, la evolución de burbujas de Hidrógeno gaseoso debido a la una repentina disminución en la solubilidad del mismo en el metal durante la solidificación.

En la Figura 4. se presentan algunos de los patrones estándar comparativos para pruebas de Aluminio obtenido a partir de pruebas con presión reducida. En ella se pueden observar distintos patrones comparativos de una aleación de Aluminio A356, en donde se muestran distintas concentraciones de Hidrógeno y la densidad de poros presente en cada una de ellas, es observable que a mayor contenido de Hidrógeno, la cantidad y el tamaño de poros aumenta, lo que repercute directamente en la calidad de las piezas.

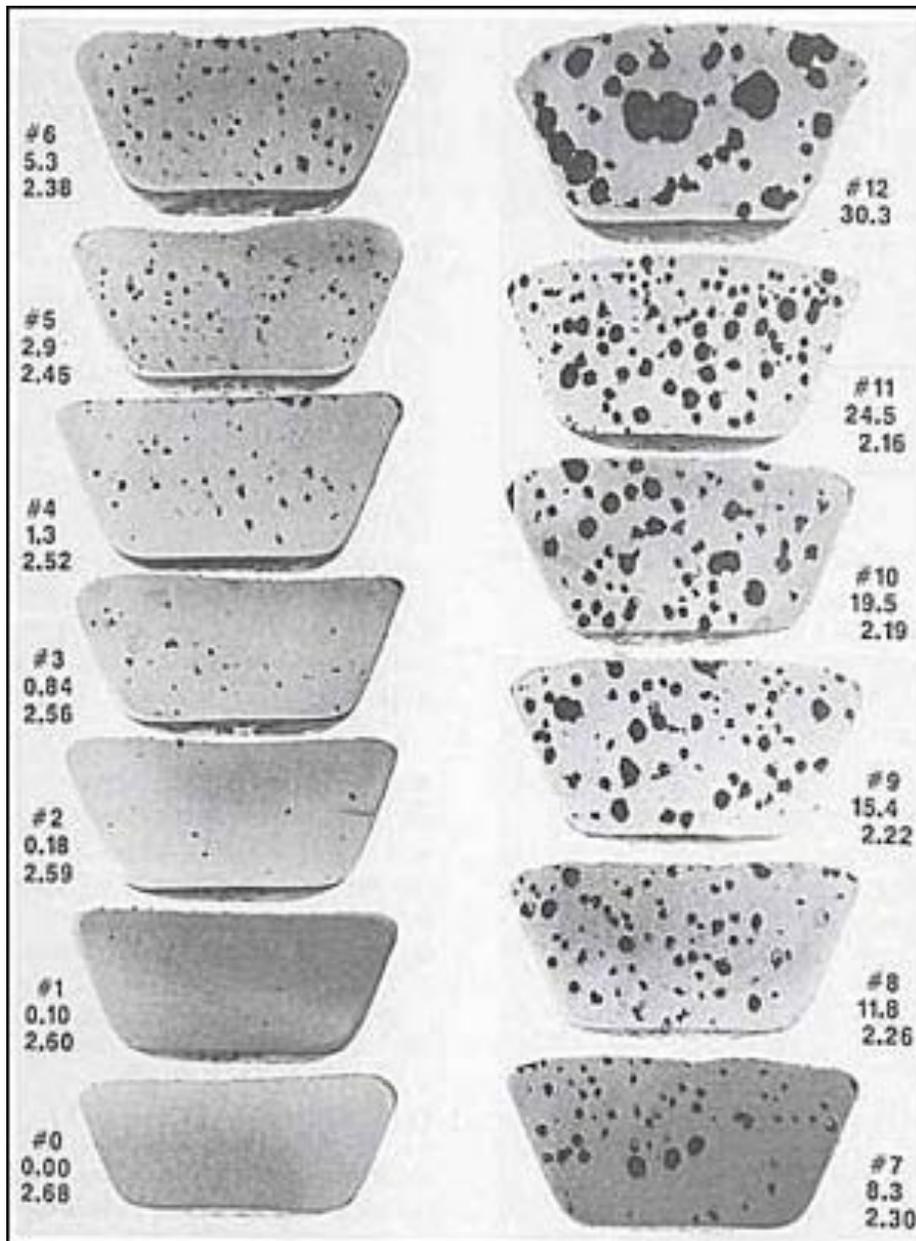
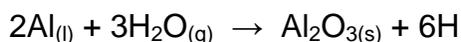


Figura 4. Normas estándar comparativas de una aleación A356 de Aluminio para medir densidades de porosidad por gas por área medidos a 100mm de presión reducida^[28]

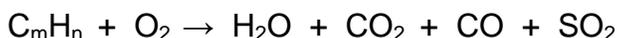
1.9.3 Solubilidad del Hidrógeno en Aluminio

El Hidrógeno es el único gas que tiene una considerable solubilidad en el Aluminio y sus aleaciones, dicha solubilidad depende directamente de la temperatura. En el Aluminio puro, el Hidrógeno presenta un incremento de solubilidad para el punto de fusión que es aproximadamente de 0.02ml por cada 100g de Al para la fase sólida y de 0.7ml por cada 100g de Al en la fase líquida. En estado líquido el Aluminio presenta una fuerte tendencia a absorber Hidrógeno gaseoso proveniente del medio ambiente.

La fuente más común de dicho gas es la humedad del aire, la cual al entrar en contacto con la superficie del metal fundido reacciona produciendo óxido de Aluminio e Hidrógeno en forma atómica de acuerdo con la siguiente reacción:



El Hidrógeno restante es fácilmente absorbido por el metal caliente, manteniéndose en solución mientras el Aluminio se encuentra en fase líquida. Dicho Hidrógeno queda en solución líquida, sin embargo, al enfriarse y solidificar casi todo el Hidrógeno disuelto en el líquido es rechazado por el sólido en formación, el cual forma una fase gaseosa que genera porosidades dentro de los productos solidificados. Poco Hidrógeno es absorbido de la atmósfera, la mayor parte de él se obtiene de la disociación del vapor de agua en la superficie del metal líquido o de la humedad de los aditivos de fusión como crisoles o herramientas. Los gases de combustión de los hornos que usan quemadores de gas, como los hornos de reverbero, también pueden ser una fuente importante de Hidrógeno, los cuales provienen de la reacción entre el combustible y el comburente, la cual se describe en la siguiente reacción^{IV}:



Ya que el Hidrógeno atómico es muy reactivo es rápidamente absorbido por el Aluminio fundido en donde queda disuelto, por lo cual, los tratamientos en

^{IV} Dado el contenido de azufre en el combustible

estado líquido de algunas aleaciones de Aluminio tienen un gran efecto en la presencia de poros.

En condiciones de fundición normales se usa la modificación con Sr o Na en las aleaciones coladas base Al-Si para modificar la morfología del Si eutéctico de laminar a fibroso. Se ha reportado que la modificación morfológica del eutéctico incrementa la porosidad, donde grandes áreas de macroporosidad son reemplazadas por porosidad más fina y ampliamente distribuidas.

Cuando se utiliza Na como elemento modificador se deben tener en cuenta las siguientes características: El Na metálico tiene una dificultad en el manejo, elevada reactividad, generación elevada de gases contaminantes, mientras que las sales son higroscópicas por lo que pueden introducir humedad e Hidrógeno al baño metálico.

La temperatura afecta de manera importante la solubilidad, ya que por cada 110°C de sobrecalentamiento la solubilidad del Hidrógeno en el Aluminio líquido se incrementa al doble aproximadamente (ver Figura 5).

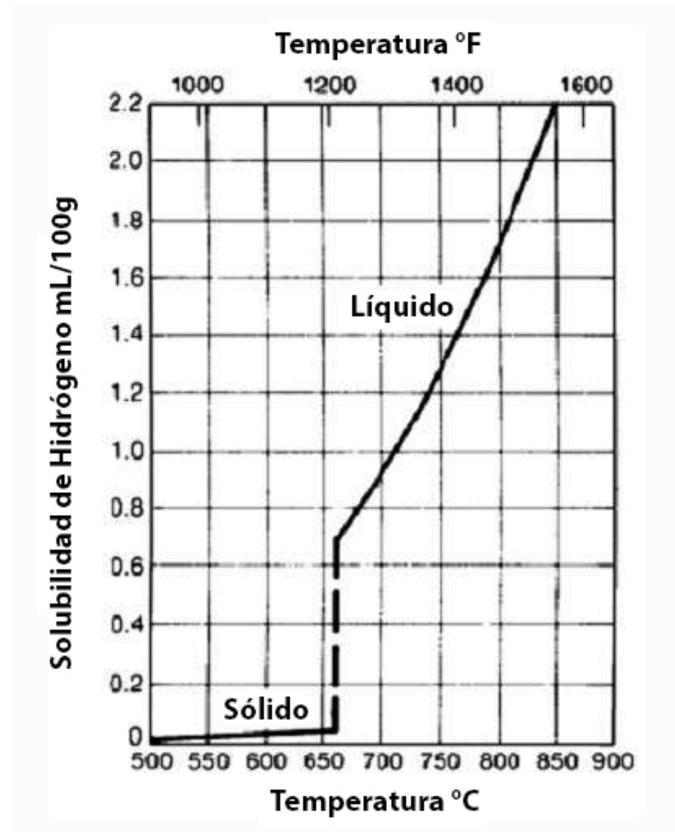


Figura 5. Solubilidad de Hidrógeno en Aluminio en función de la temperatura^[25]

La solubilidad del Hidrógeno en Aluminio puro a 1atm de presión se efectúa por la siguiente ecuación:

$$\log_{10} S = -2550/T + 2.62 \quad (5)$$

En la ecuación 5, la solubilidad S está dada en mililitros de Hidrógeno a temperatura (K) y presión (atm) estándar por cada 100g de Aluminio.

La absorción del Hidrógeno se puede minimizar mediante técnicas de fusión apropiadas, y el Hidrógeno disuelto se puede remover del Aluminio líquido por medio del uso de técnicas de desgasificación.

1.9.4 Efectos de la porosidad (sopladuras) en las propiedades mecánicas del Aluminio.

La presencia de porosidades generadas por el contenido de Hidrógeno en el Aluminio repercute directamente en las propiedades mecánicas del mismo.

Algunas de las propiedades que se ven afectadas en mayor proporción son:

- **Propiedades de resistencia a la tensión.**

Datos recabados demuestran el efecto negativo del Hidrógeno dada la formación de porosidades que afectan las propiedades de resistencia a la tensión.

Una de las principales variables en la fundición es la velocidad de enfriamiento. Datos experimentales obtenidos por Frang y Gragner muestran que a incrementos en la velocidad de enfriamiento, disminuye la cantidad y el tamaño de los poros.

Es decir, que tanto la resistencia a la tensión, como el porcentaje de elongación disminuyen en gran manera dado el incremento de la concentración de Hidrógeno.

- **Fatiga y Propiedades de impacto.**

Los poros pueden llegar a ser núcleos de formación de grietas en ciertas condiciones de carga, lo que promueve que disminuya la resistencia a la fatiga por la presencia de las porosidades. Así mismo, los poros ya sean internos o superficiales pueden actuar como concentradores de esfuerzos durante una carga de impacto, disminuyendo la resistencia al impacto de la aleación.

En la Figura 6. se muestra como el Hidrógeno afecta directamente las propiedades mecánicas del Aluminio.

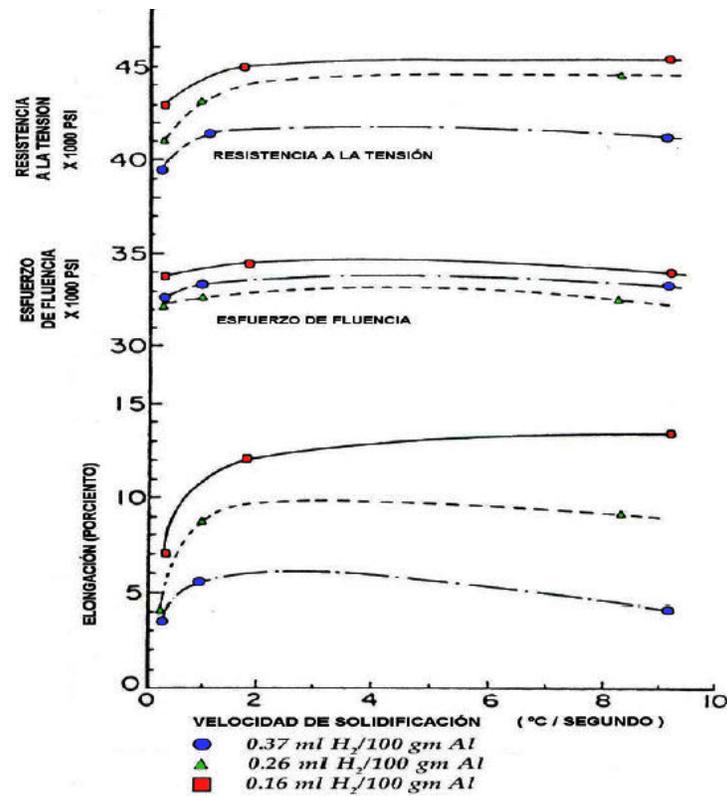


Figura 6. Algunas propiedades mecánicas del Aluminio colado en función de la concentración de Hidrógeno disuelto y la velocidad de solidificación^[26]

1.9.5 Métodos de desgasificación

La desgasificación es un tratamiento al metal líquido. Todos los métodos existentes para lograr la remoción de Hidrógeno entran dentro de tres categorías principales las cuales son:

- a) Desgasificación natural
- b) Desgasificación al vacío
- c) Desgasificación mediante la inyección de gases o polvos^v

^v Los gases o polvos pueden ser reactivos o no reactivos

El desgasificado con gas de purga es el más utilizado en la industria de la fundición de Aluminio y sus aleaciones y por lo tanto es en el que se centra este trabajo.

A continuación se describen cada una de las categorías más a detalle:

a) Desgasificación Natural: Se presenta cuando el Hidrógeno se encuentra sobresaturado en el Aluminio y se libera a la atmósfera al bajar las temperaturas de operación para disminuir su solubilidad. Esta técnica no es muy conveniente ya que suele ser lenta y no se logra disminuir el contenido de Hidrógeno en el líquido a niveles aceptables para ciertas aplicaciones. Por esto, el desgasificado natural es recomendable únicamente si se opera a bajas temperaturas.

b) Desgasificación al vacío: La eliminación de la presión atmosférica sobre el metal fundido estimula la formación de burbujas de Hidrógeno las cuales son removidas a través de un sistema de bombeo. Para disminuir el tiempo de este proceso se introduce una lanza en el fondo del horno para promover la agitación, lo que aumenta la cinética de las burbujas de Hidrógeno ayudándolas a subir a la superficie libre. Con este método se llega a obtener niveles de Hidrógeno de $0.08\text{mlH}_2/100\text{gAl}$. Sin embargo, el costo de instalación de un desgasificador al vacío industrial es muy alto y por lo tanto solo se instala donde la calidad de las piezas es muy importante y el valor agregado de éstas justifica la inversión.

c) Desgasificación con purga de gases: Este tratamiento se lleva a cabo mediante el uso de gases inertes, reactivos o una mezcla de ambos.

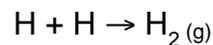
La desgasificación de un baño de Aluminio involucra tres etapas cinéticas que siguen la siguiente secuencia:

1. Hidrógeno monoatómico disuelto dentro del Aluminio fundido proveniente de la humedad.
2. Inyección del gas inerte de purga en el metal líquido.
3. Expulsión del Hidrógeno molecular (H_2) dentro del Aluminio fundido.

Las etapas de transporte involucradas en la cinética de remoción del Hidrógeno, es decir, de la etapa de expulsión de Hidrógeno, son:

1. Transporte de Hidrógeno atómico a través del Aluminio fundido hacia la interfase Aluminio fundido-burbujas de gas inerte (el mecanismo de transporte predominante es convectivo).
2. Transporte difusivo a través de la capa límite metal-gas del lado del líquido.
3. Adsorción de los átomos de Hidrógeno en la superficie de la burbuja.
4. Reacción entre dos átomos de Hidrógeno para la formación de Hidrógeno molecular (H_2) dentro de la burbuja de Argón o gas inerte.
5. Transporte difusivo del Hidrógeno molecular hacia el seno de la burbuja.
6. Expulsión del H_2 hacia la atmósfera cuando la burbuja abandona al fundido ya que asciende por fuerzas de flotación hacia la superficie libre.

El Hidrógeno existe en el Aluminio en forma atómica (H), y no forma Hidrógeno molecular (H_2), por lo que se requiere para la remoción de Hidrógeno que los átomos de Hidrógeno se combinen para formar moléculas, sin embargo, la formación de burbujas de gas en el metal líquido no es materia fácil, ya que implica la nucleación homogénea, lo que es termodinámicamente difícil, es decir, energéticamente desfavorable, por lo que se tienen que introducir burbujas libres de Hidrógeno para que los átomos de Hidrógeno puedan difundirse desde el seno del metal líquido hacia las burbujas y entonces se pueda generar la formación de las moléculas de H_2 de acuerdo siguiente reacción en la intercara burbuja-líquido:



Las diferencias en las técnicas de desgasificación se deben al tipo de gas y a la forma en como son introducidas las burbujas al baño. La eficiencia del desgasificado depende del tamaño de burbuja. Los gases o mezclas de ellos

que son empleados deben estar completamente libres de vapor de agua, siendo los más comunes Nitrógeno y Argón seco. El Cloro puro fue usado extensivamente con anterioridad, pero con el paso del tiempo se ha ido eliminando su uso debido a la toxicidad y los efectos corrosivos en los equipos y ductos de ventilación.

Los gases, polvos y escorias utilizados actualmente para dicho fin son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Gases, polvos y escorias utilizados para el desgasificado

	Gases	Polvos	Escoria
No reactivos	N ₂ Ar	KCl MgCl ₂	NaCl KCl MgCl ₂
Reactivos	SF ₆ Cl ₂	AlF ₃ AlCl ₃	NaCl KCl MgCl ₂

De las técnicas antes mencionadas la más eficiente y estudiada es la de inyección de gases, polvos o escorias realizada mediante tapones porosos, lanzas o rotores.

El más simple pero menos efectivo es la inyección de gas a través de una lanza de grafito, ya que produce burbujas grandes de aproximadamente de 2 a 3cm de diámetro, las cuales tienen poca superficie de reacción y poco tiempo de residencia dentro del líquido ya que ascienden rápidamente a la superficie.

La desgasificación con tabletas o fluxes también es utilizada. Este proceso trata de introducir las tabletas dentro del líquido a través de una campana perforada, el más común de estos desgasificadores sólidos es el hexacloretano (C₂Cl₆) el cual se descompone a una temperatura cercana a 700°C, el inconveniente de este método es que los fluxes promueven espuma la cual genera humos indeseables, además, estas tabletas son higroscópicas y muchas veces en lugar de remover Hidrógeno puede introducirlo.

El tratamiento de desgasificación de Aluminio líquido con el método de **Rotor Inyector** es el mejor método de desgasificación de Aluminio, ya que su eficiencia es muy alta comparada con los métodos anteriores. Los rotores son de grafito, que usualmente miden 15cm de diámetro, los cuales van enroscados en una lanza hueca del mismo material, medio por donde viaja el flujo de gas Argón, gas Nitrógeno o una mezcla de ambos. Cuando llegan al rotor, las burbujas se rompen rápidamente dando como resultado burbujas mucho más finas que con la lanza sola o con los fluxes. Dichas burbujas son de 3 a 6mm de diámetro y se dispersan a través de todo el cuerpo del líquido. Con este método se pueden alcanzar niveles de Hidrógeno de 0.05mlH/100gAl.

La Figura 7. muestra las eficiencia de los diferentes métodos de desgasificación utilizados actualmente: lanza, tapón poroso y rotor inyector, figura en la que es observable que el rotor inyector es por mucho el más eficiente.

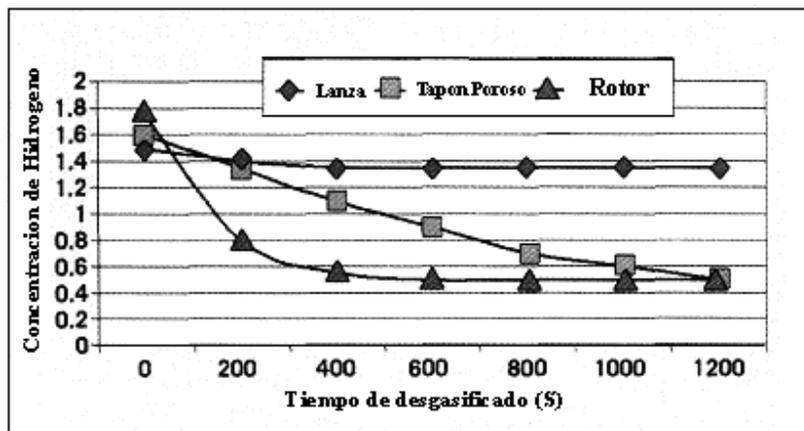


Figura 7. Cinéticas de desgasificado usando los métodos de lanza, tapón poroso y rotor inyector^[27]

En este trabajo se estudió el proceso por rotor inyector en una olla en proceso batch, la cual es una tecnología bastante estudiada, sin embargo, aún hay espacio para mejorarlo y optimizarlo.

Acelerar el desgasificado repercute en la productividad de la planta y en el ahorro de energía que se usa para mantener líquido al Aluminio. De acuerdo a trabajos anteriores, se sabe que el proceso de desgasificado puede ser acelerado si se utiliza un baño bien agitado y burbujas finas bien distribuidas en la olla de desgasificado.

Una investigación previa indica que de entre las variables del proceso y el diseño del mismo, destacan las revoluciones por minuto del rotor, el flujo de gas y el diseño del rotor. También se cree que el corazón del proceso es el diseño del rotor, ya que éste juega un papel importante en la transferencia de cantidad de movimiento desde el rotor hacia el líquido, lo cual determina el tamaño y distribución de las burbujas. El tamaño de burbujas a su vez define el tiempo de residencia que éstas tendrán en contacto con el Aluminio. Una burbuja fina en un fluido agitado con un rotor permanecerá más tiempo y podrá absorber más Hidrógeno, lo cual redundará en una mayor eficiencia de desgasificado.

Se entiende como eficiencia de desgasificado a la cantidad de gas de purga necesitado para eliminar una cantidad de gas fija. Además el rotor define la fluido dinámica en la olla y la estructura turbulenta.

Estas características definen la agitación y en buena medida determinan la velocidad o cinética de desgasificado. El rotor define estas características hidrodinámicas.

En este trabajo se estudió la hidrodinámica, a través de modelado físico mediante la técnica PIV^{VI}, para un proceso con la técnica de rotor inyector en una olla en proceso batch. Se analizó el efecto del diseño del rotor sobre el grado de agitación en la olla, así como, los patrones de flujo de cada uno.

Se utilizaron dos rotores de diseño comercial y un rotor desarrollado en la Facultad de Química, los cuales fueron comparados entre si con los patrones de flujo obtenidos.

^{VI} Velocimetría de imágenes por partículas

HIPÓTESIS

El diseño del rotor en un equipo de desgasificado por lotes juega un rol sumamente importante ya que determina la hidrodinámica del sistema y por lo tanto controla la cinética de desgasificado.

OBJETIVOS

- Medir la hidrodinámica de un equipo batch de desgasificado de aluminio a través de mediciones con la técnica PIV en un modelo físico de agua.
- Comparar la hidrodinámica medida con la técnica PIV variando el diseño del rotor, empleando dos diseños comerciales y un diseño desarrollado en la Facultad de Química.

CAPITULO II METODOLOGÍA

2.1 Descripción del sistema

2.1.1 Equipo y Arreglo Experimental

Los componentes que se emplearon para la realización de la parte experimental de este proyecto, y que constituyen todos los componentes del modelado físico requeridos para medir la fluido dinámica del desgasificador batch analizado se enlistan a continuación:

1. Modelo físico escala completa 1:1 de una olla de desgasificado batch de aluminio mediante la técnica de rotor-inyector^{VII}.
2. Junta rotativa de Deublin[®].
3. Modelo de rotor de Nylamid[®] (3 distintos diseños).
4. Flecha de Nylamid[®].
5. Compresor de aire.
6. Flujómetro de 0-150 NI/min de flujo marca Cole Parmer[®].
7. Motor de bandas de C. A. de $\frac{3}{4}$ de H.P. Surtek[®].
8. Conexiones para flujo de aire.
9. Chaqueta del modelo físico^{VIII}
10. Sistema PIV de Dantec Dynamics[®].

^{VII} Diseño en base al reactor industrial utilizado en *Cooper Crouse Hinds*.

^{VIII} Para evitar aberraciones ópticas producidas por el reactor cilíndrico.

El arreglo experimental se muestra en la Figura 8, donde se presentan todos los componentes utilizados durante la experimentación. Los números que se observan en la imagen corresponden a los componentes enlistados anteriormente.

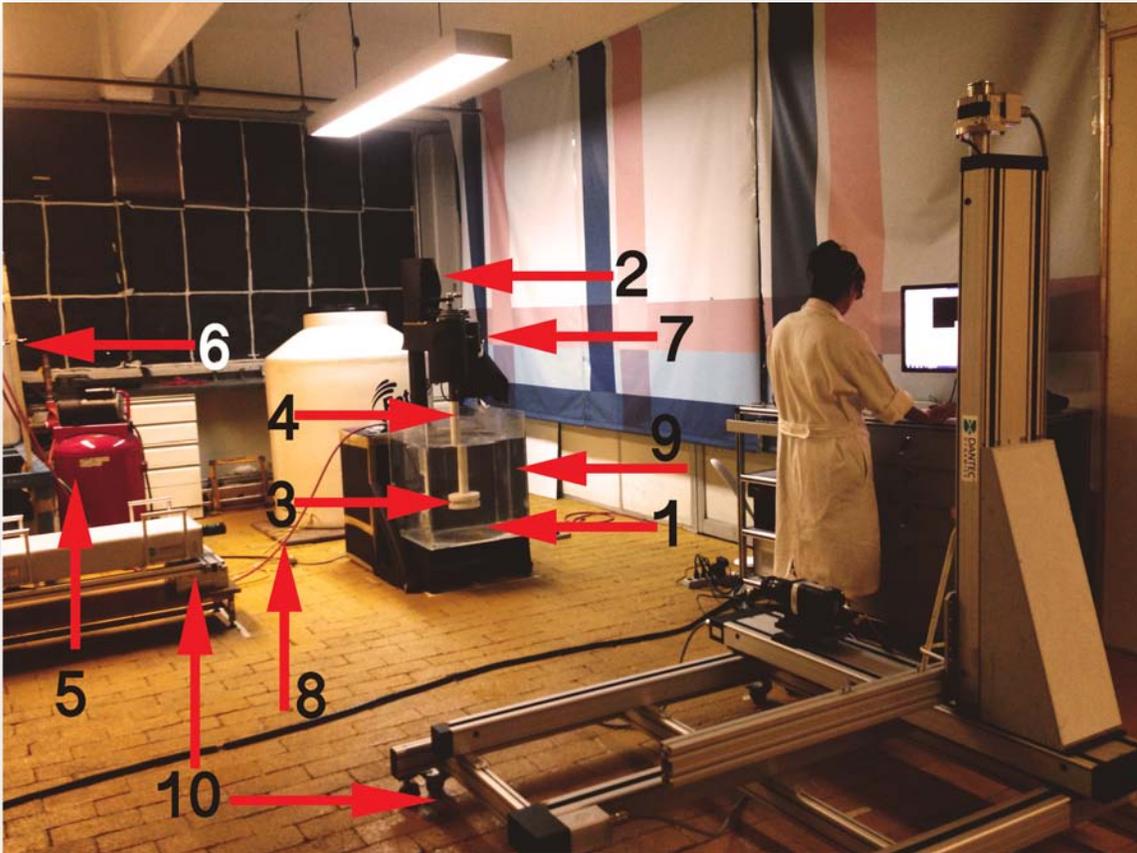


Figura 8. Foto del arreglo experimental

La Figura 9. es una fotografía de uno de los experimentos realizados con la técnica 2D usando el sistema PIV de Dantec Dynamics®. En ella se aprecian tanto el modelo físico, como el sistema PIV el cual se conforma principalmente de:

- a. Sistema de movimiento milimétrico “traverse system”.
- b. Generador (no visible en la foto).
- c. Cabeza láser de alta potencia.
- d. Cámara de alta velocidad (no visible en la foto).
- e. Sincronizador (no visible en la foto).
- f. Sistema de cómputo con el software DinamicStudio 4.0®^{IX}.

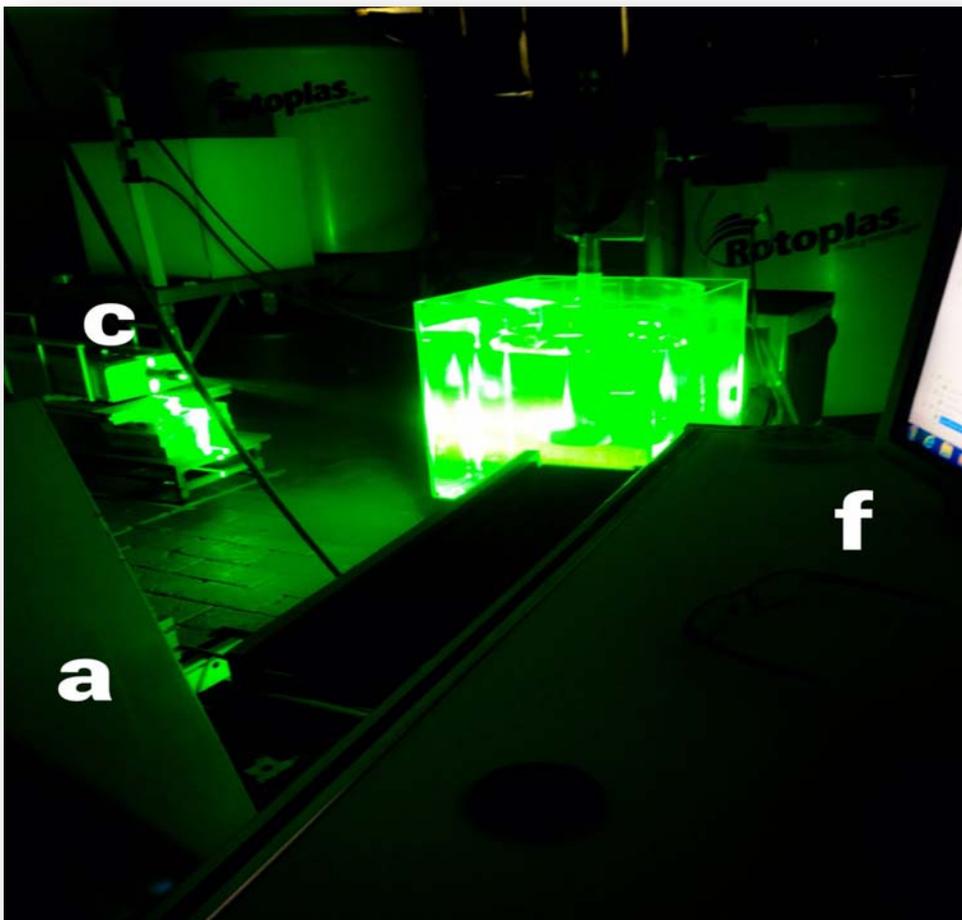


Figura 9. Pruebas experimental usando la técnica en 2D del PIV

^{IX} Controla todo el hardware del sistema PIV.

El PIV 2D es una técnica de medición de velocidades en flujo de fluidos transparentes en un plano de un sistema de flujo. Consiste en adicionar al fluido partículas micrométricas esféricas que son arrastradas por el flujo generado por el rotor. Cuando un pulso de haz de luz láser de alta intensidad incide sobre un plano del sistema, ilumina las partículas y éstas emiten luz que es captada por una cámara de alta velocidad que dispara simultáneamente con el pulso láser, lo que se consigue con un sincronizador (entre el pulso y el disparo de la cámara). Dos pulsos láser producidos en una diferencia en tiempo conocida sirven para medir los desplazamientos de las partículas entre las fotos y esos desplazamientos divididos entre el delta de tiempo, los cuales sirven para conocer las velocidades en el plano fotografiado. Correlaciones cruzadas estadísticas en áreas de correlación adecuadas son usadas para identificar las mismas partículas entre el par de fotos. Filtros numéricos y otras herramientas numéricas son empleadas para refinar la medición. Estos algoritmos se hacen a través del software Dantec Dynamics 4.0.

2.1.2 Condiciones del proceso^x

Las condiciones utilizadas durante la experimentación se describen a continuación:

- Punto de inyección del gas: Convencional, es decir, a través del rotor.
- Velocidad de rotación: 580 rpm.
- Flujo de gas: 10 L/min y 0 L/min (con y sin agitación).

La velocidad de rotación y el flujo del gas de purga, que en este caso fue aire, fueron medidos y controlados mediante un tacómetro digital de la marca Lutron[®] modelo CT-2236 y un flujómetro de 0-150NI/min de flujo de la marca Cole Parmer[®] respectivamente.

^x Condiciones óptimas del proceso, tomadas de experimentaciones anteriormente realizadas.

2.1.3 Diseño del modelo físico

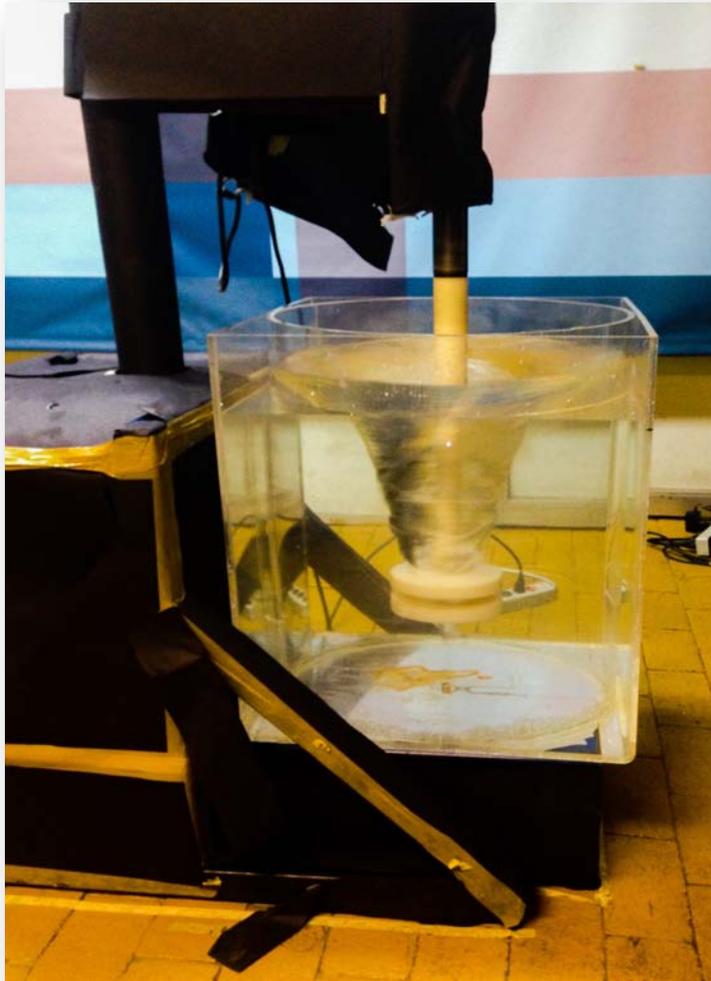


Figura 10. Diseño del Modelo Físico

El modelo físico (Figura 10) a escala completa 1:1 de un horno industrial tipo batch que se usó en la parte experimental, consta de una estructura de acero que tiene la función de soportar el motor, el sistema de inyección y el rotor, así mismo, cuenta con un cilindro de acrílico de 52cm de diámetro interno, el cual es llenado con agua hasta una altura de 50cm, la cual es la misma altura usada en el reactor industrial; Al cilindro se le adaptó un cubo de acrílico de 50x50cm que contiene el cilindro, esto con la finalidad de evitar la distorsión en las mediciones al cumplir la función de chaqueta (Véase referencias [23] y [24]).

2.1.4 Diseño del rotor

Durante la experimentación se corrieron pruebas con 3 diferentes diseños de rotor, los cuales fueron nombrados de la siguiente manera:

- a. Rotor estándar^{XI}
- b. Rotor muescado^{XII}
- c. Rotor nuevo^{XIII}

Los dos primeros son rotores de diseño comercial, mientras que el último rotor fue propuesto en la Facultad de Química.

En la Figura 11 y 12. se observa la geometría y diseño de cada uno de los rotores empleados en la experimentación con diferentes vistas.

^{XI} Diseño de FOSECO™ modelo FDU-SPR.

^{XII} Diseño de FOSECO™.

^{XIII} Diseño propio de un trabajo de doctorado^[1].

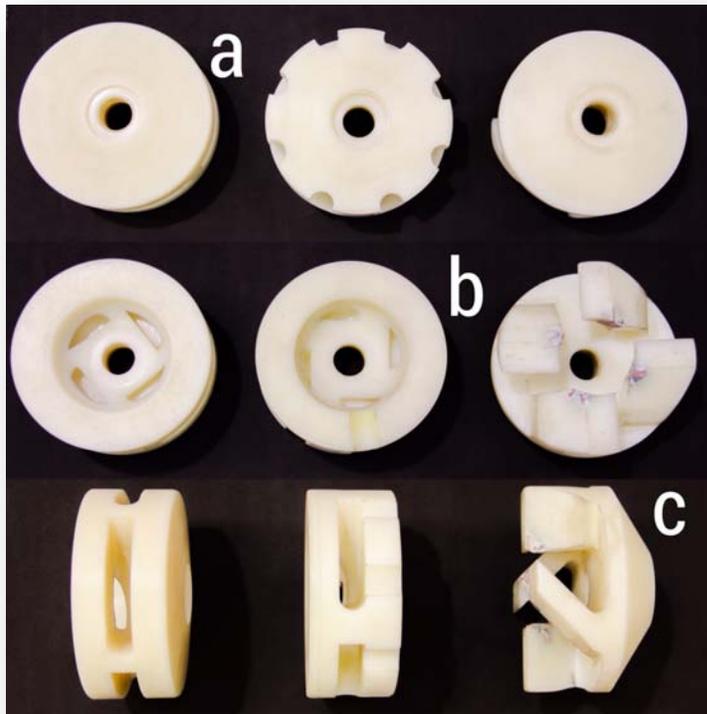


Figura 11. Rotores de Nylamid® utilizados durante el experimento; a) rotor estándar, b) rotor muescado y c) rotor nuevo

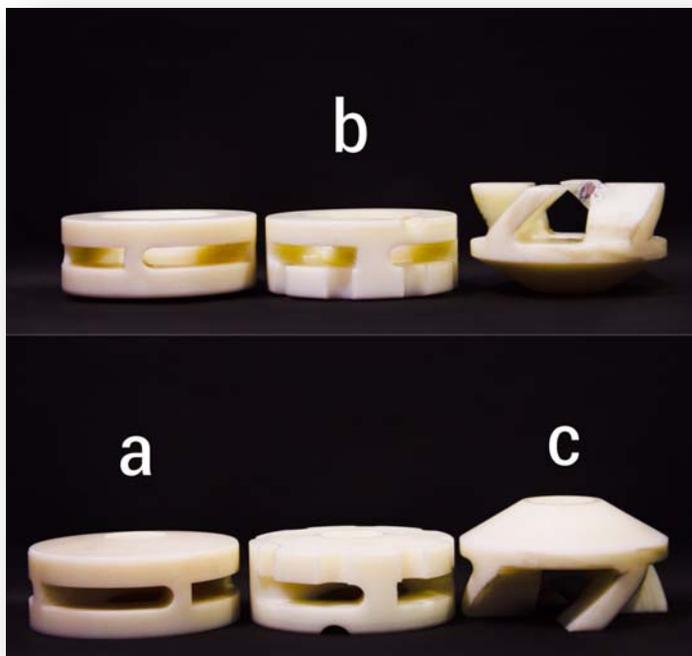


Figura 12. Vista lateral de los rotores utilizados; a) rotor estándar, b) rotor muescado y c) rotor nuevo

2.2 Procedimiento experimental

Se llevaron a cabo mediciones de velocidad en 2D de los patrones de flujo mediante el uso de la técnica de PIV (Particle Image Velocimetry) en un modelo físico de agua con escala geométrica de 1:1.

Las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones para cada uno de los rotores estudiados, teniendo así un total de 6 pruebas experimentales, resumidas en la Tabla 6 y que corresponden a mediciones tomadas sin inyección de gas y con 10 LPM de gas inyectado.

Tabla 6. Pruebas experimentales

	SIN inyección (0L/min)	CON inyección (10L/min)
Rotor Estándar	Prueba 1	Prueba 2
Rotor Nuevo	Prueba 3	Prueba 4
Rotor Muescado	Prueba 5	Prueba 6

Para la realización de las pruebas se utilizó el sistema PIV con las siguientes condiciones:

- Modo: "single frame"
- Frecuencia: 100Hz
- Potencia utilizada del láser: 35%

Para las pruebas se utilizó un láser de energía dual (LDY203 Litron laser) de 10mJ.

En la Figura 13. se presenta una fotografía del plano longitudinal iluminado con el láser durante una de las pruebas en donde se midieron los patrones de flujo, mientras que en la Figura 14. se observa la misma prueba pero sin láser.

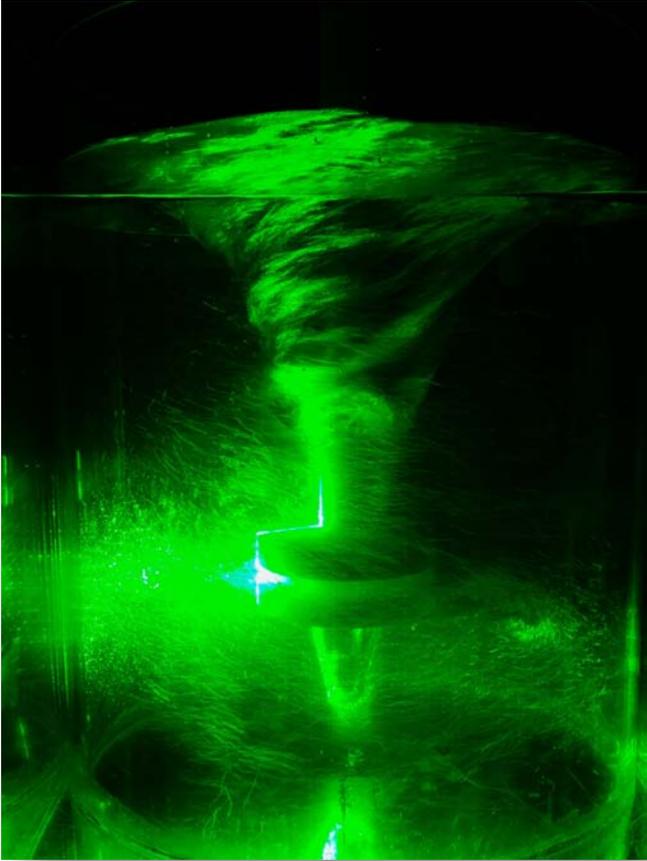


Figura 13. Plano iluminado por el láser durante una prueba 2D

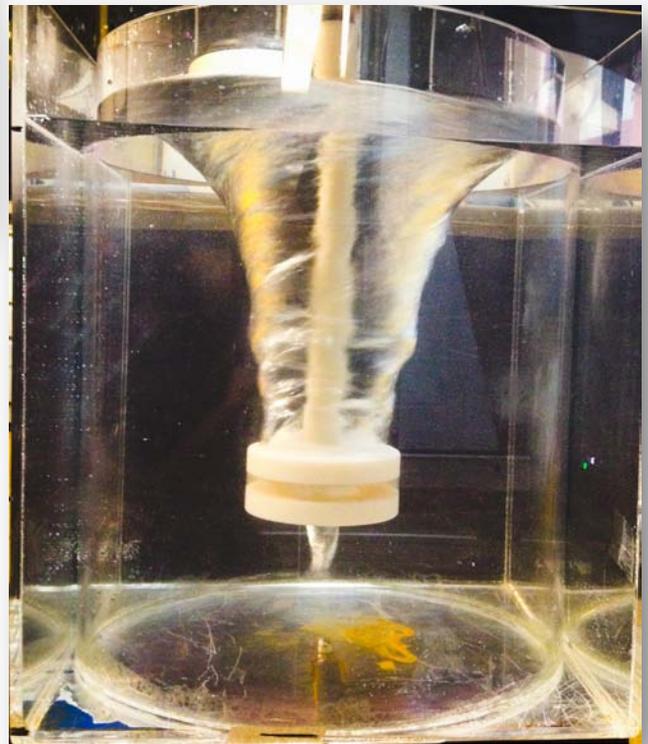


Figura 14. Plano sin iluminación láser

Las imágenes fueron capturadas con una cámara de alta velocidad (Speedsense M320, MP, AMETEK) con una resolución de 1920x1920 píxeles. A su vez, se utilizó un filtro naranja paso alto de 550nm para el objetivo de la cámara que permite el paso de luz visible con una longitud de onda que va de 550 a 680nm, luz que es emitida por las partículas esféricas trazadoras de color rosa de poliamida 12 de 20 μ m, las cuales fueron pintadas con pintura de Rodamina B. Finalmente un total de 150 fotografías fueron procesadas estadísticamente para obtener los patrones de flujo con ayuda del software Dynamic Studio[®] versión 4 mediante el uso de la técnica de correlación cruzada con una transposición del 50% y una zona de interrogación de 32x32 píxeles, que equivalen a un 2.1x2.1mm.

CAPITULO III RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los mapas vectoriales obtenidos a partir de la técnica PIV de cada una de las 6 pruebas experimentales realizadas, así como, las fotografías de los patrones de flujo^{XIV} obtenidos de las pruebas con inyección de aire para cada uno de los tres modelos de rotor.

A continuación se muestran los patrones de flujo obtenidos para los tres distintos diseños de rotor, los cuales utilizaron la misma velocidad de giro de rotor (580rpm) y el mismo flujo de gas (aire) de purga (10L/min).

En primer lugar, es importante mencionar que se utilizó una escala de color^{XV} para la descripción de la magnitud de velocidad de los vectores obtenidos en el fluido.

La Figura 15. muestra la escala en la que se basa el análisis hidrodinámico.



Figura 15. Escala de color

^{XIV} Se presenta únicamente la mitad del plano, ya que la flecha y el rotor impiden el paso del láser hacia la otra mitad del sistema.

^{XV} La escala abarca desde 0 hasta 0.8 m/s aproximadamente.

3.1 Rotor ESTÁNDAR

En las Figura 16 y 17. se muestran los patrones de flujo generados por el rotor estándar, sin inyección de gas y con ella, respectivamente. Este rotor es utilizado actualmente en el proceso de desgasificado de Aluminio a nivel industrial.

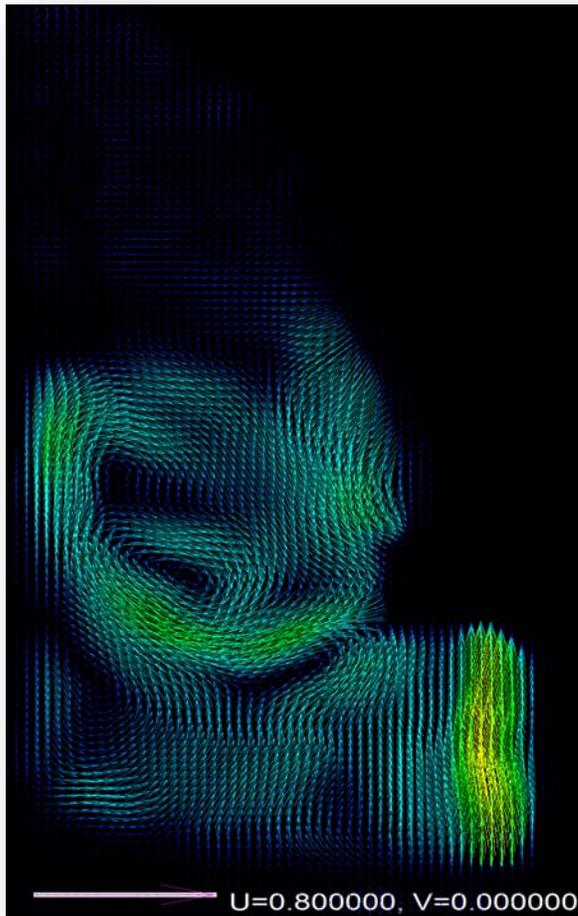


Figura 16. Patrón de flujo medido del rotor estándar sin inyección

En la Figura 16, sin inyección de aire, se observa en la parte baja del rotor un “efecto bombeo”, el cual es generado por el balance de fuerzas que se da entre la centrifuga y el gradiente de presión en dirección radial. En este caso, la caída de presión debajo del rotor absorbe el fluido que se encuentra en esa zona y lo expulsa por medio de las aspas en dirección radial. Este mismo efecto también da explicación a la formación del vórtice.

Gracias a dicho efecto, se origina a su vez la formación de recirculaciones pronunciadas,

las cuales se pueden observar en la imagen.

Aunque se presenta un gran número de recirculaciones dentro del baño, estas no presentan un patrón simple, sino más bien complejo y por lo tanto es difícil mencionar un patrón de flujo definido en este plano.

El tamaño de las zonas con velocidades axiales y radiales bajas aumenta al no inyectar un gas de purga, principalmente en la parte alta del baño.

En la Figura 17, la cual tiene inyección de aire, se observan velocidades altas en las zonas cercanas al rotor, las cuales son generadas por la transferencia de cantidad de movimiento gracias a la acción mecánica del giro del rotor, lo que resulta en un buen mezclado en el baño.

Por otro lado, se observan zonas de baja velocidad axial y radial en la parte superior del reactor y en la esquina inferior izquierda, sin embargo, se observa la presencia de tres recirculaciones: dos debajo de la línea del rotor (una en contra y otra en sentido de las manecillas del reloj) y la tercera arriba del nivel del rotor en sentido de las manecillas del reloj. Estas recirculaciones ayudan a una rápida transferencia de masa.

Las altas velocidades alcanzadas en la parte inferior del rotor se deben al gas inyectado y que es succionado al fondo del reactor. Este gas succionado hacia el fondo del reactor también es producido por el “efecto de bombeo” del rotor y puede erosionar el refractario en la olla de desgasificado.

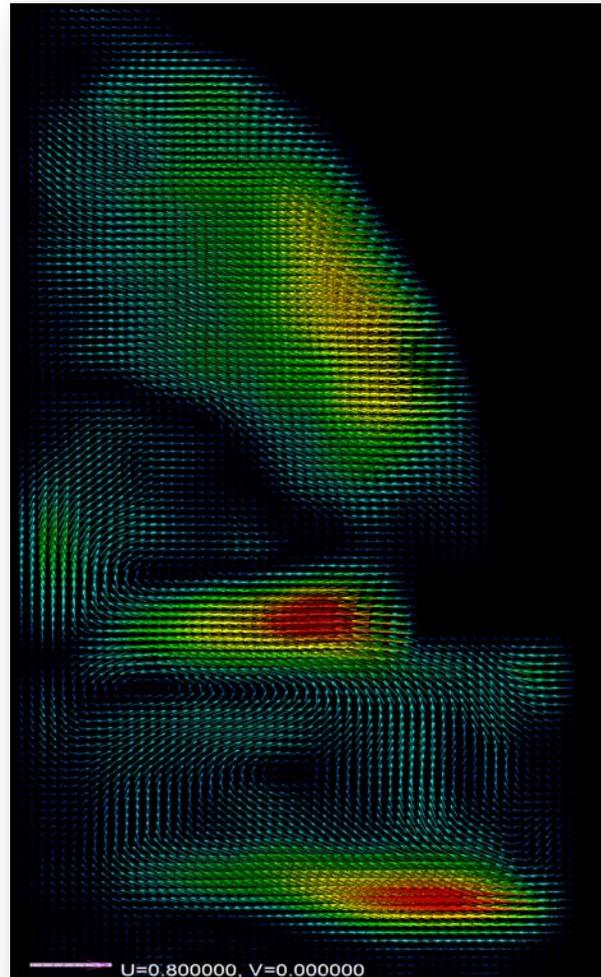


Figura 17. Patrón de flujo medido del rotor estándar con inyección de aire

La Figura 18. es una fotografía del rotor en funcionamiento con una inyección de aire de 10L/min. En esta figura se observa el plano iluminado por el láser, donde se aprecia en primer lugar una buena dispersión radial de burbujas en el baño, asimismo, se puede apreciar que la cantidad de burbujas es considerable y que tenemos burbujas pequeñas que se sitúan en las mismas zonas donde están presentes las recirculaciones (ver Figura 17).

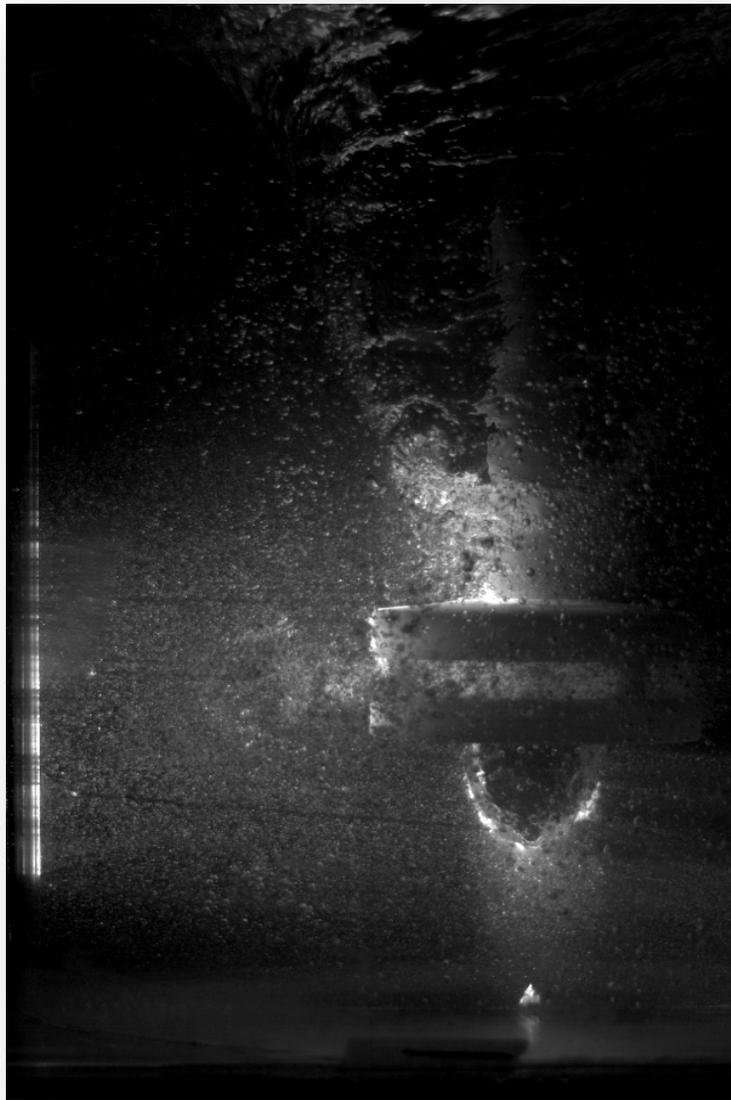


Figura 18. Fotografía del rotor estándar con inyección de aire

Se observa también una masa de gas en la zona cercana al eje, la cual es generada por el “efecto bombeo” generado durante la agitación del baño.

Finalmente, se aprecia la formación de una pluma de gas en la parte de las aspas del rotor, la cual corrobora las altas velocidades debida a la expulsión de fluido por las aspas del rotor obtenidas en los patrones de flujo con PIV. También, es posible detectar el tamaño de un vórtice pronunciado hasta la altura del rotor.

3.2 Rotor NUEVO

En la Figura 19, se presenta el patrón de flujo de la prueba 3, la cual no tiene inyección de gas usando el rotor nuevo. Se observa que el efecto re-circulatorio aumenta con este diseño rotor, es decir, el baño es mucho mejor agitado con componentes mayores de velocidad radial y axial aunque el patrón de flujo sigue siendo sumamente complejo. Asimismo, disminuyen las zonas de baja velocidad y el “efecto bombeo” es imperceptible en los patrones de flujo pero si existe ya porque esa zona es ocupada por gas succionado cuando hay inyección (ver Figura 21). De hecho, este rotor es el que más gas succiona como se verá a continuación.

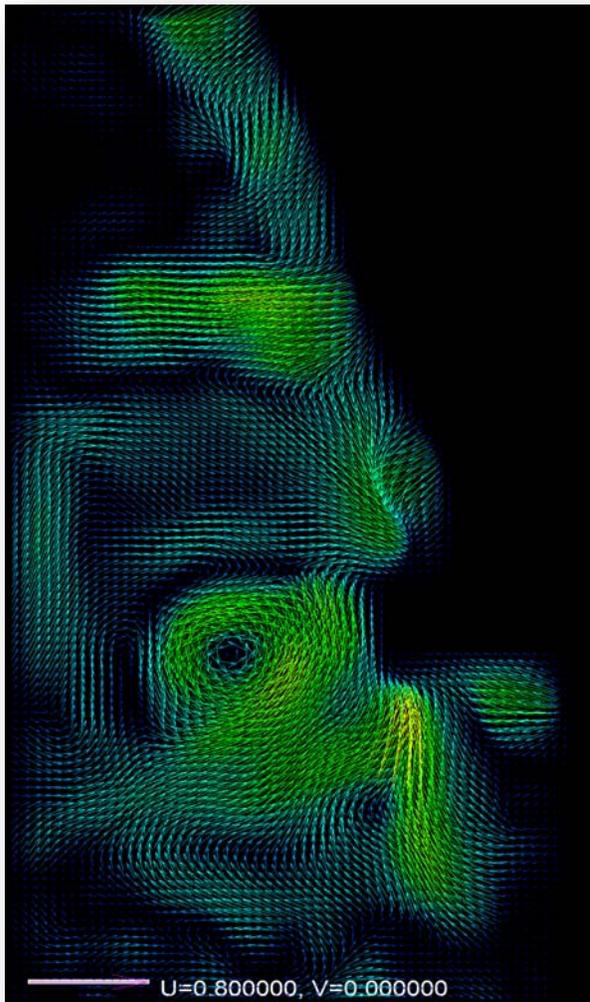


Figura 19. Patrones de flujo sin inyección de aire para el rotor nuevo

La velocidad del flujo es considerable tanto en la línea del rotor, como por encima y por debajo de ella. Esta magnitud está dada por la energía mecánica producida por el rotor, la cual es transformada en energía cinética, generando los patrones de flujo turbulento que son observables en la imagen. Estos patrones turbulentos son los que promueven el mezclado del baño.

Se observa también, que las recirculaciones presentes no siguen la misma dirección, lo cual confirma lo complejo del flujo de fluidos generado con este rotor.

Por otra parte, en la Figura 20, con inyección de gas, se puede apreciar que la magnitud de los vectores de velocidad aumenta en gran manera, lo que deriva en un baño mucho mejor agitado. La buena agitación además de ayudar al correcto desgasificado provoca una homogeneidad en el baño lo que hace que los tiempos de tratamiento al metal líquido disminuyan y la eficiencia del proceso se eleve.

Igualmente se observa la presencia de zonas de baja presión debajo del rotor, generadas por la acción de las aspas y que succionan fluido gas y líquido. Este “efecto bombeo” resultó ser el mayor con este diseño rotor que con los otros diseños comerciales. Estas zonas crean gradientes de presión que además de participar en la agitación del baño crean recirculaciones. Hay dos zonas de recirculación identificadas: una debajo de la línea del rotor en contra de las manecillas del reloj y otra arriba de la línea del rotor en dirección de las manecillas del rotor. Estas recirculaciones favorecen al desgasificado.

La eficiencia de este diseño de rotor está relacionada de igual manera al alcance que tiene el gas inyectado, dado que los vectores del líquido cercanos al rotor presentan una componente de velocidad axial con dirección a la superficie del metal líquido, lo que supone un

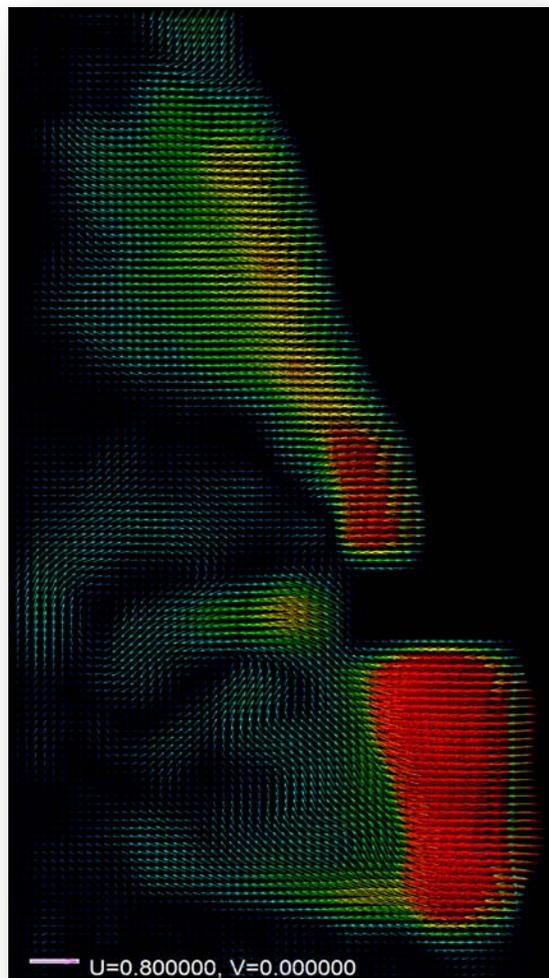


Figura 20. Patrones de flujo obtenidos para el rotor nuevo con inyección de aire

mejor arrastre del gas y por lo tanto una mejor eliminación de Hidrógeno disuelto.

La forma del rotor facilita la distribución del gas por todo el reactor y aumenta el tiempo de residencia de éste, es decir, el contacto metal-burbuja y por consiguiente consigue arrastrar una mayor cantidad de gas hacia la superficie del baño.

En la Figura 21. Se tiene una fotografía de la hidrodinámica del sistema con inyección de aire del nuevo diseño de rotor.



Figura 21. Fotografía del rotor nuevo en una prueba en 2D

Se observa que el tamaño de las burbujas es pequeño, lo que beneficia el proceso de desgasificado, ya que aumenta la superficie de contacto burbuja-líquido. Se aprecia una buena distribución de las burbujas, llegando inclusive hasta las paredes del reactor abarcando una mayor zona activa para la acción de gas purgante.

Finalmente, se aprecia que la succión de gas es mucho más pronunciada que en los otros rotores (inclusive el gas llega hasta el fondo de la olla) y también se observa el enorme vórtice generado, lo que ratifica el “efecto de bombeo” de mayor magnitud para este diseño comparado con los otros dos rotores (estándar y muescado).

Es claro en esta imagen que el ángulo de descarga es menor a los 90° (se dirige ligeramente hacia abajo) lo que permite un mayor alcance, dado que la pluma de burbujas sigue la misma dirección por ser arrastrada por el líquido. Este ángulo propicia que el gas de purga alcance zonas muy por debajo de la línea del rotor.

Esta imagen muestra también la homogeneidad en cuanto al tamaño de las burbujas, las cuales se localizan en las recirculaciones presentadas en los patrones de flujo anteriores (ver Figura 20).

3.3 Rotor MUESCADO

La Figura 22, muestra el patrón de flujo sin inyección de aire usando el rotor muescado, en ella se observa el “efecto bombeo” por debajo del rotor, sin embargo, este efecto no es tan marcado como con otros rotores.

La velocidad de los vectores es alta, sobre todo sobre la línea del rotor, ya que el líquido absorbido es empujado con gran fuerza por las muescas del mismo, se observa que el gas tiene un gran alcance, sin embargo, no alcanza la homogeneidad, por lo que los patrones de flujo son complejos y solo se presenta una recirculación definida.

Otro de los aspectos que es observable en esta figura es la presencia de pequeñas zonas de baja velocidad axial y radial por todo el baño, lo que afecta directamente la eficiencia del proceso.

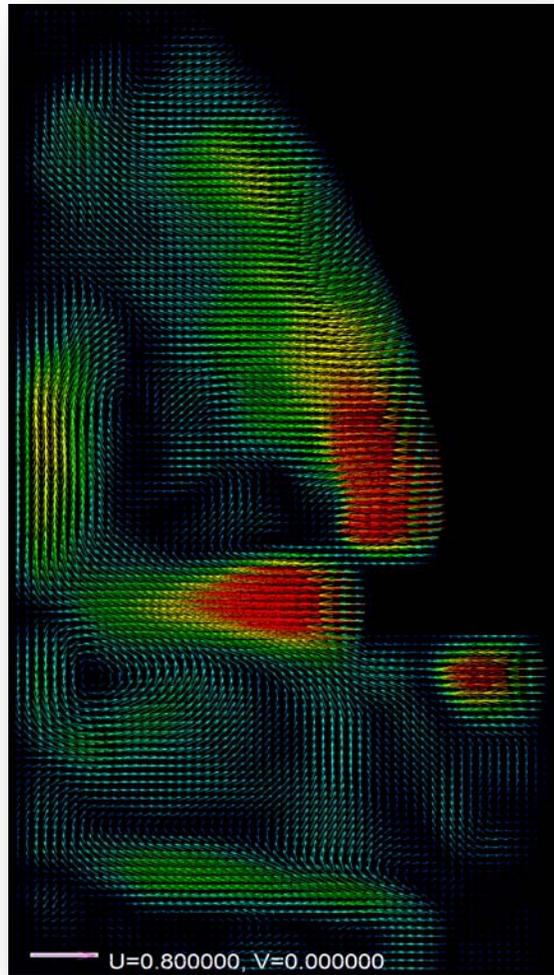
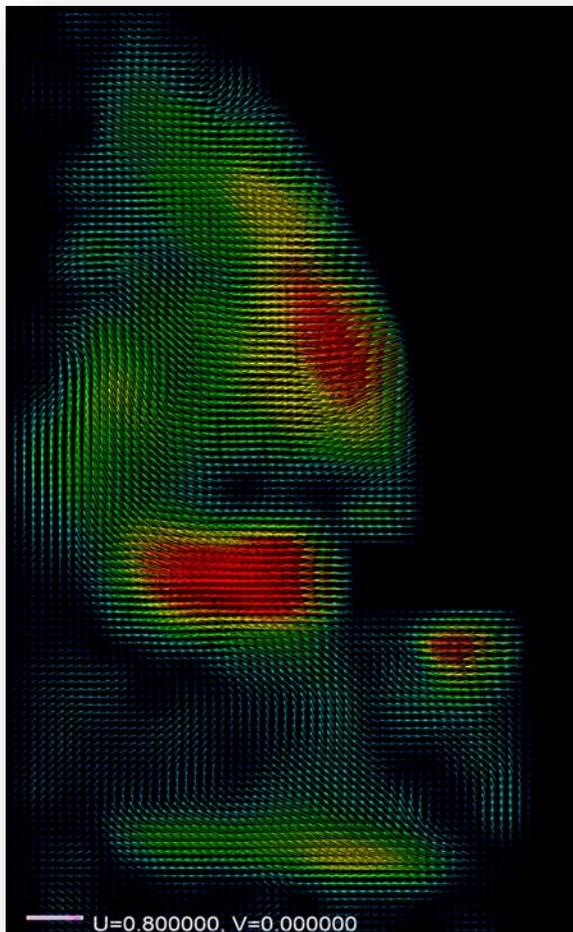


Figura 22. Patrón de flujo obtenidos sin inyección de aire del rotor muescado

En esta figura se observa una zona de alta velocidad en la parte superior de la olla que coincide con la presencia del vórtice y por lo tanto no se tomó en cuenta para este análisis.

A continuación se presenta el patrón de flujo del experimento realizado con inyección de gas para el rotor muescado (Figura 23). En este caso, no se observan recirculaciones completas. Sin embargo, se observa una vigorosa expulsión de fluido desde el rotor en dirección radial y dirigida a la pared de la olla. Este chorro de fluido expulsado beneficia al proceso de desgasificación por promover el transporte de masa convectivo en 3D, y fomentar una mayor turbulencia.

Por otra parte, la velocidad de los vectores alcanzada dentro del sistema es elevada, por lo cual el gas es capaz de llegar hasta las paredes del reactor, lo que favorece la formación de ojos de recirculado.



El ángulo de descarga de este diseño de rotor es casi recto (90° de la horizontal).

Las zonas de baja velocidad en este caso son pocas, sin embargo la mayoría se presentan debajo de la línea del rotor, y esto podría perjudicar en la cinética de desgasificación.

Figura 23. Patrón de flujo con inyección de aire para el rotor muescado

Finalmente se presenta en la Figura 24, la fotografía del reactor muescado en funcionamiento con inyección de gas.

Se observa un gran número de burbujas de gran tamaño, las cuales no benefician el proceso de desgasificado, ya que reducen la superficie de contacto y el tiempo de residencia. Se aprecia gas succionado y arrastrado al fondo de la olla por el “efecto bombeo”. Este efecto es mayor que en el rotor estándar pero menor que en el roto de nuevo diseño.

Asimismo, se ve una gran masa de aire sobre el rotor y alrededor del eje, zona que contiene un 100% de gas, perteneciente al vórtice generado.



Figura 24. Fotografía durante una prueba en 2D del rotor muescado

Como se observa en la imagen el baño no tiene una buena distribución ni una homogeneidad aceptable, lo que repercute en la eficiencia y genera costos en términos de energía.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 7 se presenta una comparación cualitativa y semi-cuantitativa de las características hidrodinámicas de cada uno de los tres rotores analizados con inyección de gas.

Tabla 7. Comparación cualitativa y semi-cuantitativa de los tres diseños de rotor

Rotor	Magnitud general de velocidad	Número de recirculaciones	Efecto bombeo	Tamaño de burbujas	Ángulo de descarga
Estándar	0.8	3 (dos abajo y una arriba de rotor)	POCO	MEDIANO	90°
Muescado	0.8	0	MEDIO	GRANDE	90°
Nuevo	0.8	2 (una abajo y una arriba de rotor)	ALTO	PEQUEÑO	-90°

Comparando los 6 casos experimentales se puede decir que el rotor nuevo presenta la mejor distribución de gas, seguido por el rotor estándar y finalmente el rotor muescado, el cual es el que presenta la menor homogeneidad en el baño.

Se sabe que el líquido con mayor concentración de gas de purga (aire) se encuentra en los alrededores cercanos al rotor, sin embargo, en el proceso de desgasificado es importante que dicha concentración sea distribuida en todo el reactor para que la eficiencia del proceso se incremente y por lo tanto el tiempo de desgasificado disminuya, trayendo como consecuencia una disminución de costos de producción. En este punto el diseño del rotor es fundamental.

Comparando en primera instancia las figuras para el rotor nuevo, tanto sin flujo de gas (Fig. 19) como con inyección de aire (Fig. 20) se observa un cambio

considerable en el comportamiento del sistema, ya que sin inyección de aire las velocidades de flujo son bajas (0.5m/s) y se observan recirculaciones muy marcadas con un patrón de flujo muy complejo y caótico, teniendo velocidades homogéneas, mientras que con inyección de gas, se observa que al inyectar el gas las velocidades de flujo, sobretodo, debajo del rotor se incrementan llegando a establecerse hasta los 0.8m/s, así mismo, se observa una homogeneidad en el comportamiento del sistema, un flujo menos caótico predominantemente radial cerca de la flecha y el rotor, por otro lado, existen dos recirculaciones presentes cerca de la pared lateral.

Se presenta una recirculación debajo del nivel del rotor en dirección contraria a las manecillas del reloj y una más, por arriba del nivel del rotor en sentido de las manecillas del reloj, estas formaciones favorecen los tiempos de residencia de las burbujas, que resultan en un mayor tiempo de contacto burbuja-metal y por lo tanto la limpieza del baño se hace de manera más eficiente.

Por otro lado, las aspas del rotor nuevo impulsan con mayor inercia y gran intensidad el gas, llegando a alcanzar las paredes del sistema, así como el ángulo de descarga con el que trabaja, el cual por ser menor a los 90° permite alcanzar zonas por debajo de la línea del rotor, lo que da como resultado una mejor agitación y por lo tanto una mejor turbulencia a comparación de los otros rotores.

Otro punto visible en los patrones de flujo a favor del rotor nuevo es un tamaño de burbuja más pequeño y homogéneo, a comparación de las burbujas generadas por los otros rotores. Este tamaño pequeño favorece la interacción de las burbujas del gas purgante con el Hidrógeno disuelto en el sistema, dado que aumenta la superficie de contacto y la cinética de reacción. Se presenta el mayor “efecto de bombeo” con este rotor comparado con los otros dos diseños.

En el caso del rotor muescado (Figura 22 y 23), las velocidades máximas alcanzadas, con y sin inyección son de 0.8m/s en ambos casos. Sin inyección, el patrón de flujo presentan un comportamiento radial cerca del rotor y se aprecia

solo de manera clara una recirculación abajo del nivel del rotor en contra de las manecillas del reloj. Con la presencia del aire inyectado el sistema es agitado con igual magnitud de velocidad pero se aprecia un mayor desorden o turbulencia en el sistema, punto importante dentro del proceso de desgasificado. No hay recirculaciones definidas. El rotor muescado presenta un comportamiento similar al rotor nuevo pero con una menor intensidad, lo que puede significar una menor eficiencia del proceso. Se presenta un “efecto bombeo” mediano.

Por último, en el caso del rotor estándar, el patrón de flujo sin inyección (Fig. 17) presenta muchas recirculaciones, y además, presenta un flujo vertical desde el fondo de la olla hacia la parte inferior del rotor, lo que se conoce como “efecto bombeo”, el cual provoca un flujo radial del fluido que sale por los orificios o aspas del rotor y se dirige hacia la superficie de la pared lateral, creando el patrón de varias recirculaciones antes descrito. Para este diseño, las velocidades son bajas, es decir, menos de 0.5m/s. Analizando ahora el sistema con inyección de aire (Fig. 22), los patrones de flujo son similares, se elimina el “efecto bombeo” pero, en contraparte, aumenta la velocidad radial cerca del rotor, lo cual provoca una mejor distribución de gas de purga y por lo tanto un aumento en la eficiencia del proceso. Se presentan tres recirculaciones definidas y el “efecto bombeo” con gas es el menor de los tres rotores estudiados.

El patrón de flujo en el sistema, indistintamente del rotor empleado, específicamente en el plano longitudinal medido con componentes radial y axial, presenta un comportamiento similar, el cual se compone de un flujo radial, que va desde el rotor hasta la pared lateral del modelo y a su regreso generan diferente número de recirculaciones dependiendo el rotor usado.

Finalmente, se debe recordar que las componentes de velocidad analizadas en este trabajo corresponden a las axiales y radiales por analizar un plano longitudinal de la olla (plano r-z), pero la componente angular de la velocidad es

sin duda la mayor en magnitud ya que su movimiento se debe a la transferencia de momentum desde el rotor que gira con las mismas revoluciones por minuto en cada caso. Entonces, aunque el plano observado no permitió medir esta componente, asumimos que es la mayor y de igual magnitud en los tres rotores analizados.

CAPITULO IV CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo la hipótesis de que el diseño del rotor es una variable de diseño muy importante en términos de eficiencia del proceso, ya que determina la agitación en la olla de desgasificado y la rapidez de la transferencia de masa y cinética de desgasificado, lo que a su vez, se traducen en costos energéticos y económicos. Las conclusiones más importantes son:

- Los rotores estándar y nuevo presentan las mejores características hidrodinámicas, aunque con patrones de flujo más complejos, ya que presentan las mayores velocidades en los sistemas con inyección de gas (0.8m/s), al menos dos recirculaciones abajo y arriba de la línea del rotor y por lo tanto se presume tendrán mejor agitación y promoverán mayor convección, turbulencia, es decir, los menores tiempos de mezclado y la mayor cinética de desgasificado.
- El rotor de nuevo diseño es en apariencia el que mayor agitación del baño genera de acuerdo a los patrones de flujo medidos, tanto con, como sin inyección de gas y puede decirse que es el más eficiente y más recomendable, ya que presenta el menor tamaño de burbuja y mejor dispersión de burbujas, lo cual significa, que fomenta los mayores tiempos de residencia de las mismas y favorece, gracias al aumento en la superficie de contacto, la interacción metal-burbuja, así como la mejor homogeneidad del baño en cuanto a la distribución de burbujas por toda la olla.
- El “efecto bombeo” con inyección de gas de mayor a menor grado se da con el rotor nuevo, seguido del muescado y al último el estándar. El ángulo de descarga para los rotores estándar y muescado es de 90°, mientras que para el rotor de nuevo diseño es menor a 90° lo cual dirige líquido y gas hacia el fondo de la olla y beneficia en general el transporte de masa.

- Finalmente, en cuanto al número de recirculaciones presentadas en el plano longitudinal analizado para cada rotor es: estándar con 3, muescado con cero y el nuevo rotor con dos. Estas recirculaciones son benéficas porque promueven un mezclado turbulento 3D lo que ayuda a la agitación del sistema y presumiblemente acelera la cinética de desgasificado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Keyser, Carl. *Ciencia de Materiales para Ingeniería*. LIMUSA. Columbus, Ohio, 1979.
- [2] Pierre Barrand, Robert Badeau, André Dumas. *Enciclopedia del aluminio*. Vol. 1. Urmo. 1967.
- [3] Smith, William F. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Mc Graw Hill. España, 2004.
- [4] W. Hufnagel. *Manual del aluminio*. Reverte. Barcelona España, 1992.
- [5] Totten, George E. *Handbook of Aluminum, Vol 1. Physical Metallurgy and Process*. EUA, 2003.
- [6] J.R. Davis. *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International. 1993.
- [7] J.E. Gruzleski and B.M. Closset. *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon*. American Foundrymen's.
- [8] J. Szekely. *The Mathematical and Physical Modelling of Metals Processing Operations Metallurgical*. Treatises. TMS. 1987.
- [9] Camacho-Martinez, J. R.-A.-C.-H.-S.-M. (2010). *Physical Modelling of an Aluminium Degassing Operation with Rotating Impellers-A Comparative Hydrodynamic Analysis (Vol. 7)*. Materials and Manufacturing Processes.
- [10] Olusegun J. Ilegbusi, Manabu Iguchi, Walter Wahniedler. *Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations*. Chapman and Hall. 2000.

[11] Zhang, L., Taniguchi, S., & Matsumoto, K. *Water model study on inclusion removal from liquid steel by bubble flotation under turbulent conditions (Vol. 5)*. Ironmaking & Steelmaking . 2002.

[12] Geoffrey K. Singworth. *Practical Degassing of Aluminum*. Modern Casting. 1988.

[13] M., Makhlouf. *Measurement and Removal of Hydrogen in Aluminum Alloys*. American Foundrymen's Society. USA, 1998.

[14] P.K., N. M. *Gas Fluxing Operation in Aluminium Melt Refining Laboratory and Plant Investigations*. Light Metals, 1st ed., M. Bickert, Ed., Proc.119th TMS Annual Meeting, The Minerals Metals & Materials Society. 1990.

[15] Engh y Sigworth. *Chemical and Kinetics factors related to hydrogen removal from aluminum Vol 13B*. Metallurgical Transactions B. 1982.

[16] Zhang L., L. X. *Removal of Impurity Elements from Molten Aluminium Vol. 32*. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review. 2011.

[17] Sigworth, G. a. *Chemical and kinetic related to hydrogen remove from aluminum Vol. 3*. Metallurgical and Materials Transactions B. 1982

[18] Nilmani M., T. P. *A comparative study of impeller performance*. Light Metals. 1992.

[19] Hop, B. F. *The fluid mechanics in the H110*. Light Metals. 1997

[20] F. Boeuf, M. Rey and E. Wulloud Alusuisse. *Metal Batch Treatment Optimization of Rotor Running Conditions*. Light Metals. 1993.

[21] Chen, J. a. *Bubble distribution in a melt treatment water model*. Light Metals. 1995.

[22] Talbot, D.E.J. and P.N. Anyalebechi, *Solubility of hydrogen in liquid aluminium*. Materials Science and Technology, 1988.

[23] Torres Patiño, I.D., *Estudio de una nueva técnica de desgasificación con rotor-inyector asistido por modelado físico y matemático*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. México, 2010.

[24] Robles Flores, I., *Modelado físico de la fluidinámica durante la desgasificación de Al por la técnica del rotor-inyector*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. México, 2009.

[25] ASM Speciality Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys.

[26] Fang, Q.T. and D.A. Gagner. *Porosity Formation in Modified and Unmodified A356 Alloys Casting*. AFS Transactions, 97, 1989.

[27] David E. Neff. *Understanding Aluminum Degassing*. Modern Casting. 2002.

[28] <http://stahlspecialty.com/> Mayo, 2016.

APÉNDICE A

Los números adimensionales se calcularon utilizando las siguientes propiedades físicas presentadas en la Tabla A1.

Tabla A1. Propiedades físicas usadas en el modelado físico

		Temperatura de operación T (°C)	Viscosidad μ (Kg/ms)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)	Tensión superficial σ (N/m)	Densidad ρ (Kg/m ³)
Fase gaseosa	Ar	20	-	-	-	1.78
	Aire	20	1.2×10^{-3}	1.12×10^{-7}	-	1.18
	Ni	20	1.8×10^{-5}	3.22×10^{-7}	-	1.2
Fase líquida	Agua	20	1×10^{-3}	1×10^{-6}	0.073	998
	Aluminio	800	1.3×10^{-3}	5.48×10^{-7}	0.914	2345