



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“VALIDACIÓN DE UN NUEVO DISEÑO DE  
ROTOR PARA EL DESGASIFICADO DE  
ALUMINIO EN LABORATORIO DE  
FUNDICIÓN”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**P R E S E N T A:**

**LUIS ALBERTO RODRÍGUEZ JUÁREZ**



**CDMX**

**2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## **H. JURADO ASIGNADO**

<i>Presidente</i>	González Rivera Carlos
<i>Vocal</i>	Cruz Mejía Héctor
<i>Secretario</i>	Ramírez Argáez Marco Aurelio
<i>Suplente 1</i>	Delgado Álvarez José Alfredo
<i>Suplente 2</i>	Amaro Villeda Adrián Manuel

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA**

Laboratorio de Fundición, Edificio D, Facultad de Química, UNAM.

## **ASESOR DEL TEMA**

---

DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ

## **SUPERVISOR TÉCNICO**

---

DR. ADRIÁN M. AMARO VILLEDA

## **SUSTENTANTE**

---

LUIS ALBERTO RODRÍGUEZ JUÁREZ

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a mi familia por el apoyo que me brindaron durante toda la carrera y vida académica, en especial a mi mamá Patricia Beatriz Juárez Solís, mi papá Olegario Rodríguez Morales y mi hermano Carlos Alejandro Rodríguez Juárez.

Agradezco al Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez por brindarme la oportunidad de realizar este tema de tesis y su orientación en la misma.

A los profesores Dr. Adrián M. Amaro Villeda, M. en I. Agustín Gerardo Ruíz Tamayo, M. en C. Arturo Alejandro Sánchez Santiago y M. en M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco por su apoyo, contribución y colaboración durante la fase de experimentación en el laboratorio de fundición.

Así como también agradecer el valioso apoyo del profesor M. en I. José Guadalupe Ramírez Vieyra tanto en los ensayos de tensión realizados en esta tesis como a lo largo de la carrera como mi tutor. De igual forma, agradezco a la profesora M. en M. Balbina Ojeda Ramírez por los consejos que me proporcionó durante los últimos semestres de la carrera.

Finalmente, agradezco a mis amigos que me ayudaron a lo largo de la carrera y a aquellos que me apoyaron para que esta tesis pudiera ser concluida de la mejor manera posible.

## RESUMEN

La desgasificación del aluminio líquido mediante la técnica del rotor inyector es empleada para mejorar sustancialmente las propiedades mecánicas de las piezas de aluminio libres de porosidades. Un elemento clave, además del flujo de gas de purga y la velocidad angular del rotor en reactores tipo batch, es el diseño de los rotores que puede mejorar significativamente la cinética de desgasificación. En los últimos años se han probado diversos rotores de nuevo diseño que presentan un mejor desempeño que aquellos con diseños comerciales a través de una ruta de diseño que usa las herramientas de ingeniería de procesos y que incluyen modelado matemático, modelado físico y pruebas en laboratorio de fundición (planta piloto). Los rotores de nuevo diseño han ido evolucionando hasta llegar al diseño propuesto de máximo desempeño en esta tesis, el cual fue evaluado mediante modelado matemático y físico en una tesis anterior realizada por Efraín Hernández Juárez. Por lo tanto, en esta tesis se ratificó, en baños reales de aluminio a nivel laboratorio de fundición, la superioridad definitiva de esta nueva propuesta de rotor comparándola contra los diseños anteriores para deshidrogenar aluminio de pureza comercial.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I. ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>II. ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1 EL ALUMINIO A NIVEL MUNDIAL .....	9
1.2 PROBLEMA A SOLUCIONAR .....	10
1.3 SOLUBILIDAD DE HIDRÓGENO Y DESGASIFICACIÓN .....	11
1.4 MÉTODOS DE DESGASIFICACIÓN .....	13
1.5 MECANISMO PARA LA DESGASIFICACIÓN DE HIDRÓGENO .....	14
1.6 DESGASIFICACIÓN MEDIANTE EL USO DE ROTORES.....	15
1.6.1 VÓRTICE.....	16
1.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE HIDRÓGENO.....	18
1.7.1 MÉTODOS CUANTITATIVOS DE LABORATORIO .....	18
1.7.2 MÉTODOS CUANTITATIVOS IN - SITU .....	20
1.7.3 MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS.....	23
1.8 MÉTODO AISCAN .....	25
1.8.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN.....	25
1.8.2 SONDA UTILIZADA .....	28
1.8.3 PROCESO DE MEDICIÓN .....	28
1.9 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA: TRABAJO PREVIO.....	31
1.10 OBJETIVOS .....	33
1.11 HIPÓTESIS .....	33
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>34</b>
2.1 PREPARACIÓN DE MOLDES DE SILICATO – CO <sub>2</sub> .....	35
2.2 PREPARACIÓN DE LA PLANTA PILOTO .....	36
2.3 CONDICIONES DE TRABAJO .....	37
2.4 PREPARACIÓN DE DISPOSITIVOS .....	37
2.5 PREPARACIÓN DEL METAL LÍQUIDO .....	38
2.6 MEDICIÓN UTILIZANDO AISCAN .....	39
2.7 DESGASIFICACIÓN CON ROTOR INYECTOR .....	40
2.8 PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCIÓN .....	40
2.9 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	41

<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>42</b>
3.1 ROTOR DE 3 ASPAS .....	42
3.2 ROTOR DE 5 ASPAS .....	50
3.3 COMPARACIÓN .....	54
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	56
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>60</b>
<b>6. ANEXO: COMPOSICIÓN QUÍMICA.....</b>	<b>62</b>

# I. ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ALUMINIO MENSUAL DE 2009 A 2019. ....	9
FIGURA 2. PRODUCCIÓN DE ALUMINIO ENTRE 2018 Y 2019 POR REGIÓN EN EL MUNDO.....	10
FIGURA 3. POROSIDAD MACROSCÓPICA SIN TRATAMIENTO DE REMOCIÓN EN PIEZAS DE ALUMINIO PROVENIENTES DE FUNDICIÓN.....	11
FIGURA 4. SOLUBILIDAD DE HIDRÓGENO EN FUNDICIÓN DE ALUMINIO PURO A PRESIÓN CONSTANTE DE HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. (ABB INC., 2003) .....	12
FIGURA 5. RELACIÓN DEL DIÁMETRO DE LAS BURBUJAS CON LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE DESGASIFICACIÓN (GRUPO INFRA, S.F.).....	14
FIGURA 6. MECANISMO DE DESGASIFICACIÓN CON GAS DE PURGA. ....	15
FIGURA 7. ESQUEMA DE LA INFLUENCIA DEL VÓRTICE SOBRE EL PROCESO DE DESGASIFICADO DE ALUMINIO LÍQUIDO.....	17
FIGURA 8. REPRESENTACIÓN DE LAS FUERZAS BOYANTES (NARANJA) Y LAS FUERZAS INERCIALES (AZUL) EXPERIMENTADAS POR LAS BURBUJAS DE GAS DE PURGA – HIDRÓGENO EN EL PROCESO DE DESGASIFICADO. ....	18
FIGURA 9. DIAGRAMA SOBRE LA DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL ALSCAN. ....	27
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN DE LA Sonda UTILIZADA EN EL ALSCAN: (1) ENCHUFES, (2) TUBOS DE ACERO INOXIDABLE DE 1/16, (3) REVESTIMIENTO CERÁMICO, (4) Sonda CERÁMICA.....	28
FIGURA 11. PROCESO DE MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE HIDRÓGENO EN ALUMINIO LÍQUIDO MEDIANTE EL EQUIPO ALSCAN. ....	29
FIGURA 12. EJEMPLO DEL RESULTADO FINAL OBTENIDO CON EL SOFTWARE DEL ALSCAN: CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO (AZUL), TEMPERATURA (ROSA). ....	30
FIGURA 13. ROTORES INYECTORES UTILIZADOS PARA DESGASIFICAR ALUMINIO PURO (VISTA INFERIOR Y LATERAL RESPECTIVAMENTE): (A) ROTOR DE 3 ASPAS, (B) ROTOR DE 5 ASPAS.....	34
FIGURA 14. EJEMPLAR DE MOLDE DE SILICATO - CO <sub>2</sub> .....	35
FIGURA 15. MOLDE PARA PRUEBA DE TRACCIÓN COMPLETO Y SUJETADO POR UNA PINZA DE PRESIÓN.....	36
FIGURA 16. FOTOGRAFÍA DE LA PLANTA PILOTO CON MATERIAL UTILIZADO: (A) TANQUE DE NITRÓGENO CON 99.997% DE PUREZA CONECTADO AL ALSCAN, (B) ALSCAN, (C) COMPUTADORA CON SOFTWARE DE ALSCAN INSTALADO, (D) MOTOR CON JUNTA ROTATIVA, LANZA Y ROTOR INYECTOR ENSAMBLADO, (E) FLUJÓMETRO, (F) TANQUE DE NITRÓGENO DE LÍNEA INDUSTRIAL, (G) CONTROLADOR DE TEMPERATURA DEL HORNO, (H) HORNO DE RESISTENCIAS UTILIZADO CON CRISOL DE GRAFITO CONTENIENDO ALUMINIO LÍQUIDO EN SU INTERIOR, (I) SOPORTE PARA CONTROLAR LA ALTURA DEL HORNO.....	36
FIGURA 17. AGITACIÓN Y ATOMIZACIÓN DE AGUA PRECALENTADA EN EL ALUMINIO LÍQUIDO.....	39
FIGURA 18. MÉTODO PARA CAMBIAR NOMBRE A LA PRUEBA. ....	40
FIGURA 19. VELOCIDAD DE ROTACIÓN DEL ROTOR CON UN TACÓMETRO DIGITAL MARCA MEM.....	40
FIGURA 20. OBTENCIÓN DE PROBETAS DE TENSIÓN.....	41
FIGURA 21. PROCESO DE ENSAYO DE TRACCIÓN: (A) MÁQUINA DE TENSIÓN UNIVERSAL, (B) FOTOGRAFÍA DE PROBETA EQUIPADA CON EL EXTENSÓMETRO DURANTE EL ENSAYO. ....	42
FIGURA 22. EJEMPLO DE GRÁFICO OBTENIDO CON EL SOFTWARE DE ALSCAN PARA UN ROTOR DE 3 ASPAS. ...	43
FIGURA 23. CINÉTICA DE DESGASIFICADO DEL ROTOR DE 3 ASPAS. ....	44
FIGURA 24. ZONA DE FRACTURA DE LAS PIEZAS C, E Y F.....	47
FIGURA 25. INICIO DE FRACTURA EN LA PIEZA E.....	47

FIGURA 26. ESCORIA DENTRO DE LA PIEZA F. ....	47
FIGURA 27. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN RESULTANTES DEL DESGASIFICADO CON ROTOR DE 3 ASPAS. ....	49
FIGURA 28. EJEMPLO DE GRÁFICO OBTENIDO CON EL SOFTWARE DE ALSCAN PARA UN ROTOR DE 5 ASPAS. ....	50
FIGURA 29. CINÉTICA DE DESGASIFICADO DEL ROTOR DE 5 ASPAS. ....	51
FIGURA 30. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN RESULTANTES DEL DESGASIFICADO CON ROTOR DE 5 ASPAS. ....	54
FIGURA 31. COMPARATIVO ENTRE LA CINÉTICA DE DESGASIFICACIÓN PRESENTADA POR LOS ROTORES DE 3 Y 5 ASPAS. ....	54
FIGURA 32. GRÁFICO ESFUERZO - DEFORMACIÓN COMPARATIVO DE LOS TIEMPOS DE DESGASIFICADO DE AMBOS ROTORES. ....	55
FIGURA 33. TABLAS DE COMPOSICIÓN DEL ALUMINIO COMERCIAL UTILIZADO. ....	62

## II. ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MÉTODOS CUANTITATIVOS DE LABORATORIO. ....	19
TABLA 2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS CUANTITATIVOS DE LABORATORIO. ....	20
TABLA 3. MÉTODOS CUANTITATIVOS IN - SITU. ....	21
TABLA 4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS CUANTITATIVOS IN - SITU. ....	22
TABLA 5. MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS. ....	23
TABLA 6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS. ....	24
TABLA 7. CONCENTRACIONES INICIALES Y FINALES DE HIDRÓGENO; Y RELACIÓN DE HIDRÓGENO PARA UN ROTOR DE 3 ASPAS. ....	43
TABLA 8. PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS POSTERIOR AL DESGASIFICADO CON UN ROTOR DE 3 ASPAS DE MANERA GENERAL. ....	44
TABLA 9. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE FRACTURA DE LAS PROBETAS DE TENSIÓN DEL ROTOR DE 3 ASPAS. ....	45
TABLA 10. METALOGRAFÍAS REALIZADAS A LAS PROBETAS OBTENIDAS. ....	48
TABLA 11. CONCENTRACIONES INICIALES Y FINALES DE HIDRÓGENO; Y RELACIÓN DE HIDRÓGENO PARA UN ROTOR DE 5 ASPAS. ....	50
TABLA 12. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE FRACTURA DE LAS PROBETAS DE TENSIÓN DEL ROTOR DE 5 ASPAS DE MANERA GENERAL. ....	51
TABLA 13. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE FRACTURA DE LAS PROBETAS DE TENSIÓN DEL ROTOR DE 5 ASPAS. ....	52

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 EL ALUMINIO A NIVEL MUNDIAL

La industria del aluminio ha experimentado un crecimiento y desarrollo constante en la última década en el mundo, siendo un metal de vital importancia para las industrias automotriz y aeroespacial (Figura 1). En México ha obtenido un impulso con la llegada de un gran número de empresas automotrices, pues en promedio, cada automóvil contiene alrededor de 180 kilogramos de este metal, por lo cual en nuestro país se pronostica un crecimiento en la demanda y producción de este metal en los próximos 10 años (El Economista, 2019).



Figura 1. Producción Mundial de Aluminio Mensual de 2009 a 2019.

Asimismo, como se muestra en la Figura 2 (Aluminium, 2019), China es el principal productor de aluminio primario en el mundo, ocupando un 51.68% del mercado, mientras que es seguido muy por debajo de él por Norteamérica (8.05%), la Península Arábiga (7.95%) y Europa de Central y del Este (7.40%).



*Figura 2. Producción de Aluminio entre 2018 y 2019 por región en el mundo.*

Se pronostica que hasta 2028 la demanda de aluminio aumentará en promedio 2.8% anual, por lo que se puede observar la gran importancia de este metal (Minería en Línea, 2019). El incremento en la demanda de este metal se puede deber a la exigencia de autopartes más ligeras para aumentar la eficiencia y lograr satisfacer la demanda de automóviles híbridos a la sociedad actual (El Economista, 2019).

## **1.2 PROBLEMA A SOLUCIONAR**

El aluminio en estado líquido es un metal que reacciona con la humedad del medio que lo rodea, para formar alúmina e hidrógeno que se absorbe hacia el seno del metal líquido. Entonces, parte de la porosidad presente en la pieza final producida por fundición se debe a hidrógeno encapsulado durante la solidificación del metal (Figura 3), entre otras causas; lo cual actúa en detrimento de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio. Por ello, es de interés ingenieril mejorar los procesos de desgasificado de aluminio y por eso, en esta tesis se realizó la validación o confirmación de los estudios previos con modelado físico y matemático, a través de pruebas de laboratorio de

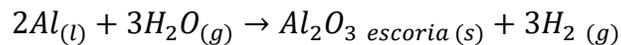
fundición, de una nueva propuesta de rotor para el desgasificado de aluminio mediante la técnica del rotor inyector, con el objeto de mejorar el desempeño del sistema de desgasificado de manera significativa y poder producir piezas de aluminio con bajo contenido de hidrógeno.



*Figura 3. Porosidad macroscópica sin tratamiento de remoción en piezas de aluminio provenientes de fundición.*

### **1.3 SOLUBILIDAD DE HIDRÓGENO Y DESGASIFICACIÓN**

El aluminio líquido tiende a tener una alta reactividad dado que absorbe gran cantidad de hidrógeno del medio ambiente (Figura 4). La fuente principal de este hidrógeno es la humedad ambiental, la cual entra en contacto con la superficie del baño de aluminio y da como resultado la siguiente reacción:



En esta reacción se aprecia el comportamiento del hidrógeno al exponerse a la superficie líquida del aluminio, el cual primero se disociará para posteriormente ser disuelto en forma atómica produciendo defectos al momento de solidificarse y provocando el rechazo del lote. La presencia de estos defectos, porosidades, se crean a partir del rechazo del hidrógeno durante la solidificación y la incapacidad del líquido para subsanar la contracción volumétrica; tienen un impacto negativo en las propiedades mecánicas como fatiga y ductilidad del aluminio.

La disolución de hidrógeno en aluminio líquido obedece la Ley de Sieverts, la cual involucra:

- Disociación de  $H_2$  a forma atómica en interfase líquido – gas.
- Disolución de H atómico en la interfase del baño líquido.
- Transporte por difusión de H hacia el seno del metal.

Se deben considerar 2 condiciones para el control de la cantidad de hidrógeno disuelto:

- Evaluar y retirar el hidrógeno antes de la colada.
- Disminuir la cantidad de hidrógeno que se disuelve en el metal fundido.

Entonces se tiene que la solubilidad de hidrógeno en fundiciones de aluminio dependerá de la temperatura, la composición de la aleación en cuestión y de la presión parcial de hidrógeno presente en el ambiente (Figura 4).

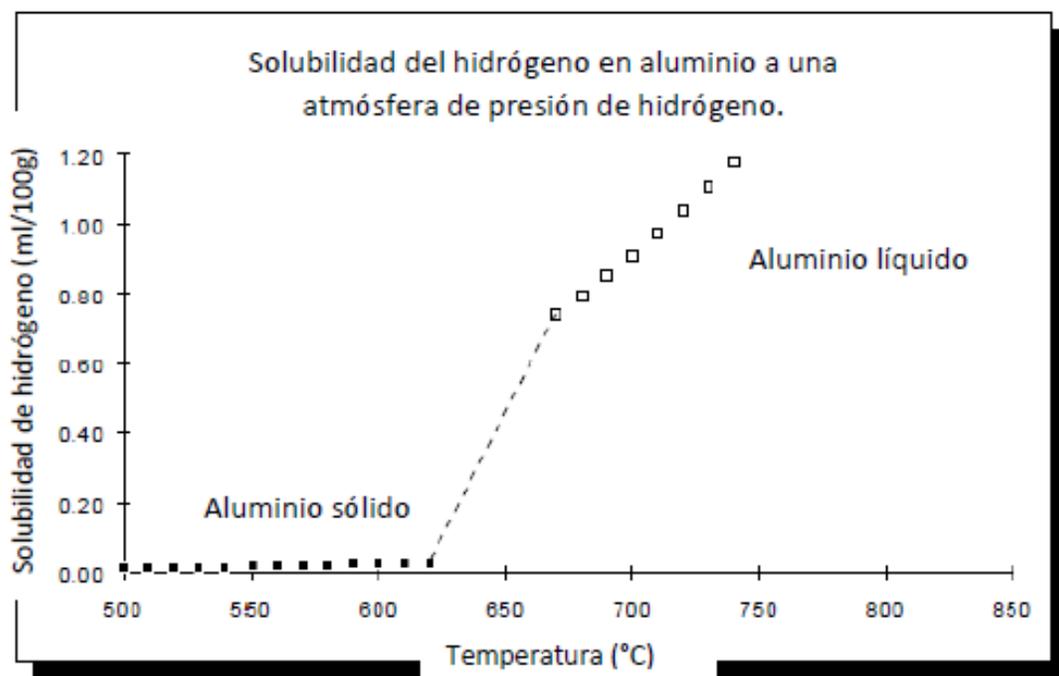


Figura 4. Solubilidad de hidrógeno en fundición de aluminio puro a presión constante de hidrógeno en función de la temperatura. (ABB Inc., 2003)

La solubilidad del hidrógeno en aluminio y su contenido se expresan a temperatura y presión constantes de 20°C y 1atm respectivamente, en unidades de mililitros por cada 100g de metal o partes por millón (ppm):

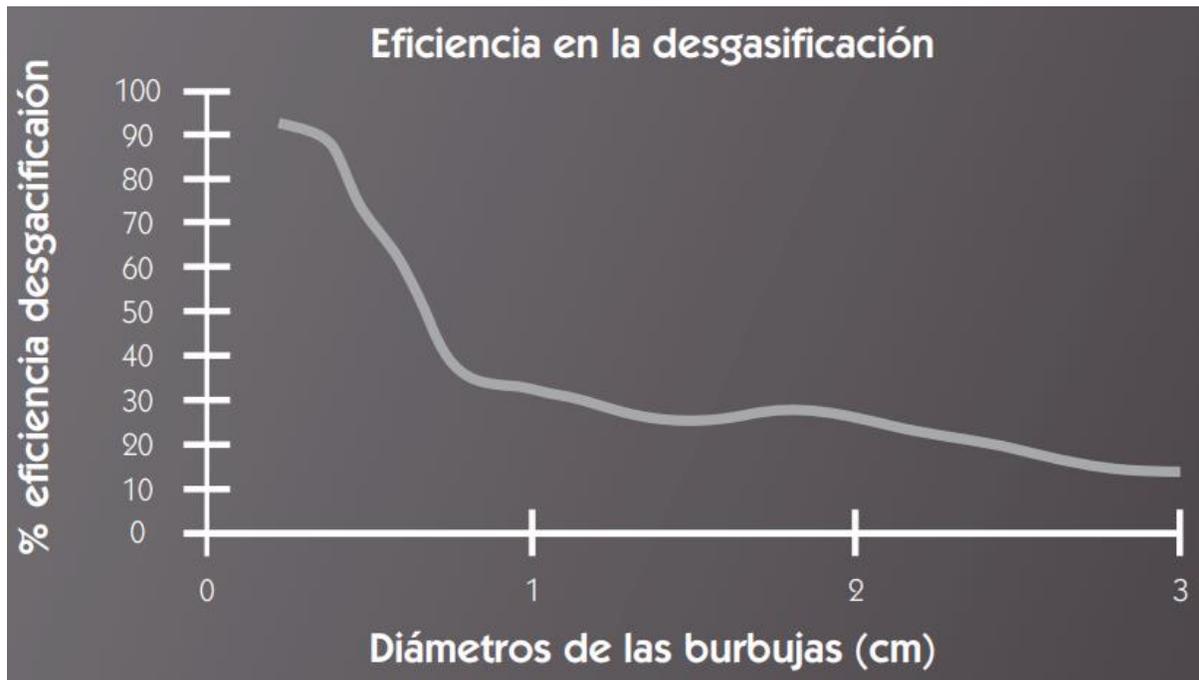
$$\frac{1 \text{ mL}}{100\text{g}} = 0.9\text{ppm} = 0.00009 \%$$

## 1.4 MÉTODOS DE DESGASIFICACIÓN

Para lograr la desgasificación se pueden utilizar métodos tradicionales o más tecnológicos para elevar la eficiencia del proceso. Se enlistan algunos de los medios de desgasificación más comunes:

- Desgasificación natural.  
Tiene por concepto la reducción de la solubilidad del hidrógeno en aluminio líquido al disminuir la temperatura, es decir, al decrecer la temperatura del metal fundido se produce su desgasificación; sin embargo, el proceso es tardado y por ello, poco eficiente.
- Tabletas de desgasificación.  
Técnica en desuso debido a su baja eficiencia -pues produce burbujas de gran tamaño- y al gas que desprende la reacción del hexacloruroetano ( $C_2Cl_6$ ) con el aluminio líquido, produciendo cloruro de aluminio. Este último transporta el hidrógeno en disolución hasta la superficie del metal fundido.
- Inyección de gas de purga mediante una lanza.  
Se utiliza una lanza recubierta con refractario para inyectar algún gas de purga. Generalmente va acompañada de agitación continua para distribuir las burbujas, lo cual no quiere decir que sea homogéneo. Además de que el tamaño de burbuja es demasiado grande e impide una buena desgasificación.
- Inyección de gas de purga mediante tapones porosos.  
Estos tapones porosos son utilizados para mejorar la distribución de burbujas y son de carbón grafito; esta técnica requiere de agitación. Sin embargo, no es muy efectiva pues no brinda una buena distribución de burbujas y esto conlleva a una mala homogeneidad.
- Inyección de gas de purga mediante rotores inyectoros.  
Esta técnica utiliza rotores de carbón grafito y una lanza que haga girar el rotor y que transporte el gas de purga hacia el metal fundido. El propósito de esta técnica es producir y suscitar un flujo turbulento y de esta manera promover la creación de burbujas pequeñas óptimas para el transporte del hidrógeno desde el seno del metal fundido hacia la superficie de la burbuja e incrementar la eficiencia del proceso de desgasificado (Figura 5). Se requiere controlar variables como la geometría del rotor, las rpm, el flujo del gas de purga y el tiempo del proceso (Uribe Antonio, 2017).

Las condiciones ideales para la desgasificación utilizando rotores sería poder producir burbujas de pequeño tamaño uniformemente distribuidas, saturándose completamente de hidrógeno; así como, reducir el tiempo del proceso y lograr reducir el consumo de gas de purga (Cruz Méndez, 2017).



*Figura 5. Relación del diámetro de las burbujas con la eficiencia del proceso de desgasificación (Grupo INFRA, s.f.).*

## 1.5 MECANISMO PARA LA DESGASIFICACIÓN DE HIDRÓGENO

El mecanismo de la remoción de hidrógeno, desde su transporte a través del metal fundido hasta su eliminación hacia la superficie, se puede representar por medio de las siguientes etapas (Figura 6):

- Transporte de hidrógeno disuelto en el metal líquido, desde el seno del fluido a la burbuja del gas de purga por difusión y también por convección (a).
- Transporte difusivo de hidrógeno a través de la capa límite de metal líquido cercana a la interfase líquido-gas de purga (b).
- Proceso de adsorción – desorción en la superficie de la burbuja del gas de purga (c).
- Difusión de hidrógeno dentro de la burbuja del gas de purga (d).
- Remoción de hidrógeno del baño de aluminio (e).

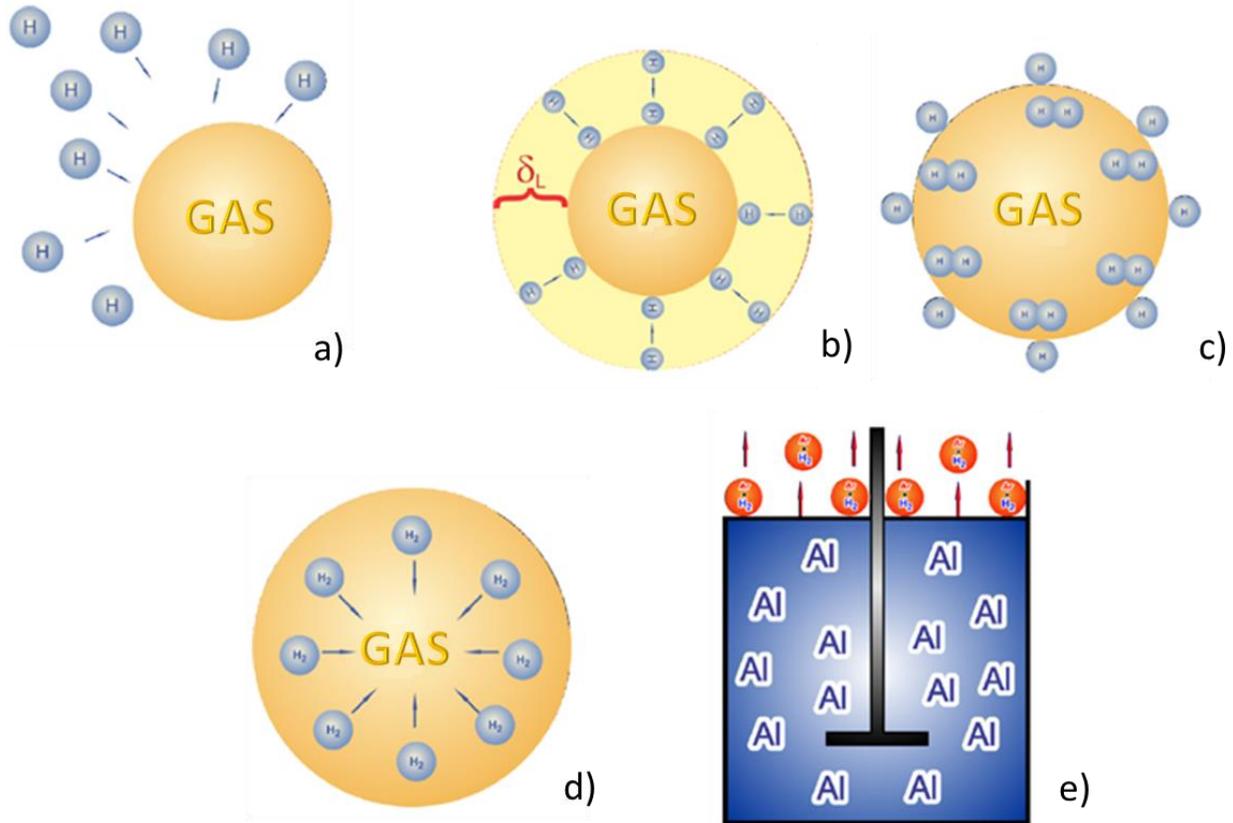


Figura 6. Mecanismo de desgasificación con gas de purga.

## 1.6 DESGASIFICACIÓN MEDIANTE EL USO DE ROTORES

Las variables más importantes en el proceso de desgasificación con rotores son el diseño y tamaño del tanque, el diseño del rotor, la localización del rotor en el tanque o crisol, la velocidad angular del rotor, flujo y tipo de gas de purga, tiempo total de inyección y finalmente los accesorios que se le puedan incorporar a la forma del tanque o crisol (Camacho Martínez, y otros, 2010). Para una remoción eficiente del hidrógeno disuelto en el baño de aluminio son necesarios una serie de requisitos que se enlistan a continuación:

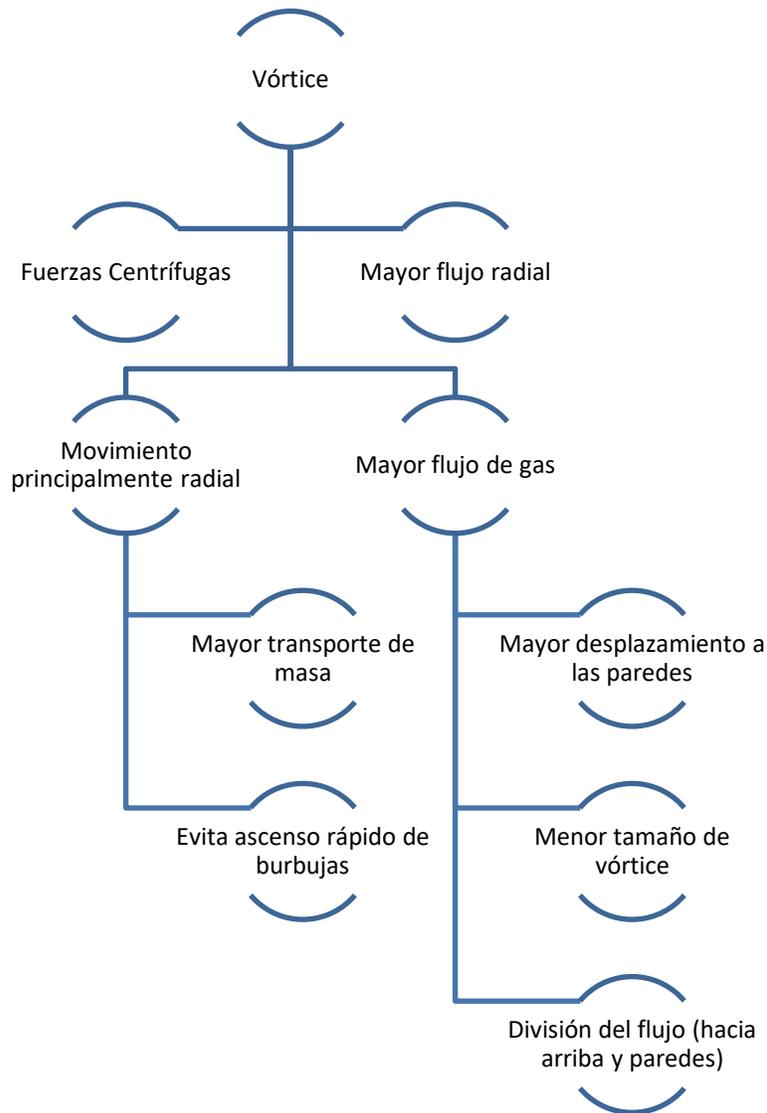
- Área interfacial grande, es decir, pequeñas burbujas en gran cantidad, esto ayuda a tener una mayor dispersión dentro del baño líquido, a tener un mayor tiempo de residencia de las burbujas y a tener un mejor transporte de masa por convección turbulenta por la presencia de más burbujas.
- Distribución uniforme de burbujas en el tanque o crisol.

- Tiempo de residencia largo de las burbujas en el metal fundido para que se saturen de hidrógeno, es decir, que antes de salir del baño líquido, las burbujas logren alcanzar el equilibrio químico de hidrógeno en su interior.
- Buena agitación (incrementando la velocidad del rotor) en el tanque-crisol para promover la transferencia de masa por convección de los átomos de hidrógeno disueltos en el líquido e impulsar la competencia entre fuerzas boyantes y fuerzas inerciales.
- Presencia de turbulencia para acelerar el intercambio de masa en la interfase líquido-burbuja.
- Reducción del vórtice en la superficie para prevenir el ingreso de aire en la fundición y también prevenir la reabsorción de hidrógeno.

Para que la desgasificación sea efectiva, los anteriores puntos deben ser contemplados en conjunto, pues se ha documentado (Hernández Hernández, Cruz Mendez, González Rivera, & Ramírez Argáez, 2014) que estos crean una acción sinérgica que producen mejores resultados juntos que cada uno por separado.

### **1.6.1 VÓRTICE**

Se entiende como vórtice al remolino ocasionado por el flujo radial que es producto del movimiento del rotor en el líquido, siendo su centro el rotor mismo. El vórtice es un parámetro que se debe tener en cuenta puesto que puede ser benéfico para nuestro proceso produciendo un mayor flujo radial, promoviendo la creación de burbujas de pequeño tamaño, así como un mayor transporte de masa. Sin embargo, debe ser controlado su tamaño, pues también podría ser perjudicial al proceso introduciendo hidrógeno indeseado al baño de metal líquido, por ello se busca que el vórtice sea pequeño y que su origen no llegue hasta la altura donde se encuentra el rotor, para ello es posible hacer uso de baffles de superficie y de pared. Los baffles son placas que sirven para perturbar o redireccionar el fluido (Cruz Méndez, 2017). En la Figura 7 se presenta de manera resumida la influencia del vórtice en el proceso de desgasificado.



*Figura 7. Esquema de la influencia del vórtice sobre el proceso de desgasificación de aluminio líquido.*

En la Figura 8 se representan las fuerzas que son ocasionadas por el uso de rotores y el vórtice que es creado. Se muestra con una línea de color azul de forma helicoidal la fuerza inercial ocasionada por la rotación-agitación del baño de metal fundido; mientras que con una flecha vertical hacia arriba la fuerza boyante experimentada por las burbujas del gas de purga en su camino hacia la superficie (Mancilla, y otros, 2017).



*Figura 8. Representación de las fuerzas boyantes (naranja) y las fuerzas inerciales (azul) experimentadas por las burbujas de gas de purga – hidrógeno en el proceso de desgasificado.*

## **1.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE HIDRÓGENO**

Las distintas formas de medir y conocer la cantidad de hidrógeno en aluminio fundido se han desarrollado para satisfacer la misma necesidad a lo largo del tiempo intentando mejorar la eficiencia y efectividad del proceso. (American Foundrymen's Society, Inc., 1998)

Estos métodos de cuantificación de hidrógeno se pueden clasificar en 3 grupos, los cuales se explicarán más adelante:

- Métodos Cuantitativos de Laboratorio.
- Métodos Cuantitativos In-Situ.
- Métodos Semi-Cuantitativos.

### **1.7.1 MÉTODOS CUANTITATIVOS DE LABORATORIO**

Estos métodos generan una medida cuantitativa de la concentración de hidrógeno en las fundiciones de aluminio; sin embargo, su uso solo se limita a nivel laboratorio. Los métodos pertenecientes a esta categoría se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos Cuantitativos de Laboratorio.

<b>MÉTODOS CUANTITATIVOS DE LABORATORIO</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
	MÉTODO DE SUB-FUSIÓN DE RANSLEY	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Temperatura de proceso menor a temperatura de fusión.</li> <li>▪ El <math>H_2</math> es extraído por difusión.</li> <li>▪ Se mide volumen y presión de <math>H_2</math> extraído para calcular la cantidad contenida en la muestra.</li> <li>▪ La segregación de <math>H_2</math> produce inconsistencias en piezas metalúrgicas.</li> </ul>
	MÉTODO DE FUSIÓN DE PORTADORES DE NITRÓGENO	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La muestra se funde con ayuda de una corriente de <math>N_2</math>, el cual funge como gas portador.</li> <li>▪ El <math>H_2</math> es extraído de la fusión, se mezcla con el <math>N_2</math> y éste último lo transporta hacia la superficie.</li> <li>▪ El principio de medición consiste en que la conductividad térmica del hidrógeno gaseoso es siete veces mayor que el nitrógeno gaseoso.</li> <li>▪ Posee una precisión satisfactoria; no obstante, esta es menor que el método de Sub-fusión de Ransley.</li> </ul>
	MÉTODO DE FUSIÓN AL VACÍO	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Determina la existencia de otros elementos gaseosos aparte del hidrógeno, como son el oxígeno y nitrógeno, pero sin cuantificar precisamente cada uno.</li> <li>▪ Se ingresa la muestra a una cámara de alto vacío donde solidifica a la vez que la presión de vacío aumenta gradualmente, liberando los gases contenidos en la muestra.</li> <li>▪ La muestra debe estar limpia, pesada y seca antes de su estudio.</li> </ul>

En la Tabla 2 se analizan las ventajas y desventajas de cada técnica de esta categoría.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos cuantitativos de laboratorio.

<b>MÉTODO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<i>MÉTODO DE SUB-FUSIÓN DE RANSLEY</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Técnica de referencia para calibración o comparación de otras técnicas</li> <li>Alta precisión y estabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere personal capacitado y mantenimiento continuo.</li> </ul>
<i>MÉTODO DE FUSIÓN DE PORTADORES DE NITRÓGENO</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La humedad ambiental no entra en contacto con la muestra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El H<sub>2</sub> superficial y el ingreso de humedad en el gas portador de N<sub>2</sub> alteran su precisión.</li> <li>Requiere personal capacitado y mantenimiento continuo.</li> <li>Menor precisión que el método de sub-fusión.</li> </ul>
<i>MÉTODO DE FUSIÓN AL VACÍO</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina los gases disueltos y atrapados en la muestra cualitativamente.</li> <li>Método simple, rápido y relativamente barato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No cuantifica los gases encontrados.</li> <li>Preparación de la muestra antes de su estudio.</li> </ul>

### 1.7.2 MÉTODOS CUANTITATIVOS IN - SITU

Estos métodos se realizan en el sitio donde se encuentre la muestra. Los métodos de esta categoría se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Métodos Cuantitativos In - Situ.

MÉTODOS CUANTITATIVOS IN - SITU		CARACTERÍSTICAS
MÉTODO TELEGAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Consiste en dos tubos (por donde ingresa el gas portador a la fusión y por donde es extraído) y una campana de cerámica. Al entrar el gas comienza a difundir el hidrógeno del seno del metal hacia la burbuja del portador para posteriormente extraerlo y recircular el portador.</li> <li>▪ Principio: consiste en la recirculación de gas de nitrógeno a través de una probeta porosa (carbón grafito) hacia aluminio líquido. Este gas se enriquece de hidrógeno monoatómico hasta alcanzar el equilibrio (Ley de Sieverts).</li> <li>▪ Esta decreta que la concentración de hidrógeno (<math>H_2</math>) será proporcional a la raíz cuadrada de su presión parcial en contacto con el metal líquido multiplicado por una constante de proporcionalidad.</li> <li>▪ El contenido de hidrógeno se determina con la conductividad térmica resultante de la mezcla gaseosa <math>N_2/H_2</math>.</li> </ul>	
MÉTODO AISCAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Comparte con el método TELEGAS el principio de funcionamiento.</li> <li>▪ Se determina el hidrógeno con el uso de una sonda porosa que contiene un tubo que transporta el nitrógeno hacia el metal fundido y un tubo que retira la mezcla <math>N_2/H_2</math>.</li> <li>▪ Utiliza la Ley de Sieverts y la conductividad térmica de la mezcla gaseosa para determinar la concentración de hidrógeno como se explicó en el método TELEGAS.</li> <li>▪ Además, posee un sistema de agitación que renueva la interfase sonda-metal líquido, mejorando la eficiencia de esta técnica.</li> </ul>	

**MÉTODOS CUANTITATIVOS IN - SITU**

MÉTODO DE CHAPEL	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Es el acrónimo de "Continuous Hydrogen Analysis by the Pressure Evaluation in Liquids".</li> <li>▪ El método es parecido a los anteriores puesto que también utiliza una sonda porosa, la cual contiene un tubo. Ambos se encuentran conectados a un sistema de vacío, que al funcionar disminuye la presión que produce la difusión del hidrógeno de la fusión al sistema de vacío.</li> <li>▪ Al alcanzar el vacío el sistema, el sensor determina la presión de hidrógeno al equilibrio.</li> <li>▪ Mediante el volumen utilizado y la temperatura del baño se obtiene la concentración de hidrógeno.</li> </ul>
MÉTODO ELECTROQUÍMICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Requiere de una celda con dos electrodos, conocer el potencial al equilibrio y el potencial químico del material a estudiar.</li> <li>▪ La celda utilizada funge a su vez de sonda de hidrógeno y el metal líquido como electrodo del cual se determinará el hidrógeno.</li> <li>▪ Se necesita un electrolito con propiedades constantes (térmicamente estable y estable al contacto con los electrodos: hidruro de aluminio) durante todo el proceso y como es una técnica electroquímica, electrodos apropiados para el proceso.</li> </ul>

Como se realizó en la categoría pasada se analizarán ventajas y desventajas de cada técnica anteriormente mencionadas. Esto se presenta en la Tabla 4.

*Tabla 4. Ventajas y desventajas de los métodos cuantitativos in - situ.*

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>MÉTODO TELEGAS</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Más rápido que el método de sub-fusión de Ransley.</li> <li>▪ Produce burbujas pequeñas y de tamaño controlado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sonda desechable.</li> </ul>
<i>MÉTODO AISCAN</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mismas ventajas de TELEGAS.</li> <li>▪ Tiempo de respuesta corto.</li> <li>▪ Buena reproducibilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sonda desechable.</li> </ul>

<i>MÉTODO DE CHAPEL</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Implementación extremadamente simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No se debe utilizar si existen sales fundidas presentes ya que dañan la sonda.</li> <li>▪ Conocimientos y aplicaciones limitadas.</li> </ul>
<i>MÉTODO ELECTROQUÍMICO</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estabilidad térmica deficiente de la sonda: vida corta y lecturas no representativas.</li> <li>▪ Conocimientos limitados.</li> <li>▪ Exactitud desconocida.</li> </ul>

### 1.7.3 MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS

Brindan medidas semicuantitativas sobre la concentración de hidrógeno en fundiciones de aluminio. Los métodos que comprenden esta categoría se explican en la Tabla 5; mientras las ventajas y desventajas de cada técnica en la Tabla 6.

*Tabla 5. Métodos Semicuantitativos.*

<b>MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS</b>	<i>MÉTODO</i>	<i>CARACTERÍSTICAS</i>
	PRUEBA DE PRESIÓN REDUCIDA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ También conocida como <i>Prueba de Solidificación al Vacío</i> o <i>Prueba de Straube-Pfeiffer</i>.</li> <li>▪ Se solidifica la muestra a presión reducida controlada y se determina el contenido de gas presente evaluando la densidad o la porosidad de la muestra solidificada.</li> <li>▪ Para evaluar la cantidad de hidrógeno se utilizan ciertas características propias de la muestra como son: movimiento superficial, contenido de porosidad, densidad y la presión de formación del primer poro en la fusión.</li> </ul>

**MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS**

PRUEBA SEVERN	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se requiere una muestra exacta de 100g de fusión al que se somete a una cámara de alto vacío de volumen conocido y se permite que solidifique. La presión de hidrógeno es determinada por un calibrador, el cual digitaliza la presión de gas.</li> </ul>
PRUEBA INICIAL DE LA BURBUJA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se somete una muestra pequeña de aluminio líquido a presión baja (&lt;1atm). Las pequeñas burbujas nuclearán y se transportarán hacia la superficie.</li> <li>Se determina dependiendo diversos factores como contenido de hidrógeno, temperatura, presión, composición química, presencia de partículas exógenas, material del crisol y su estado superficial y la vibración.</li> </ul>
MÉTODO DE ATENUACIÓN ULTRASÓNICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se determina la concentración de hidrógeno mediante atenuación ultrasónica, estableciendo una relación contenido de hidrógeno – porcentaje de atenuación.</li> </ul>

*Tabla 6. Ventajas y desventajas de métodos semicuantitativos.*

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
PRUEBA DE PRESIÓN REDUCIDA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simple y rápido.</li> <li>Útil para control de calidad rutinario.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estimación aproximada del contenido de hidrógeno en una base comparativa.</li> </ul>
PRUEBA SEVERN	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simple y rápido.</li> <li>Alta resolución: concentraciones &lt;0.10mL/100g.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se requiere una muestra exacta de 100g de fusión.</li> </ul>
PRUEBA INICIAL DE LA BURBUJA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rápida si es una prueba individual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Técnica subjetiva, debido a la naturaleza de la primera burbuja.</li> <li>Baja precisión y se requieren al menos tres pruebas.</li> </ul>
MÉTODO DE ATENUACIÓN ULTRASÓNICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Detecta inclusiones, fallas (grietas) y porosidades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se requiere una superficie 100% lisa sin defectos.</li> </ul>

- Simple y rápido.
- Requiere operador experto.
- Eficiencia relativa respecto a la composición de la aleación.

## 1.8 MÉTODO AISCAN

Conociendo que la solubilidad del hidrógeno en aluminio líquido y sólido es dependiente de la temperatura, de la composición de la aleación y de la presión parcial de este en el metal, el AISCAN utiliza como constante de solubilidad 0.92mL/100g de aluminio puro a 700°C. Este método no requiere de una pieza patrón de aluminio sólido para su calibración.

Como ya se explicó en la Tabla 3, el AISCAN determina el hidrógeno con el uso de una sonda porosa que contiene un tubo que transporta el nitrógeno aproximadamente 99.998% puro hacia el metal fundido y un tubo que retira la mezcla N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>. Esta utiliza la Ley de Sieverts y la conductividad térmica de la mezcla gaseosa para determinar la concentración de hidrógeno como se explicó en el método TELEGAS.

Además, posee un sistema de agitación que renueva la interfase sonda-metal líquido, toma en cuenta factores de corrección tanto de composición química como de temperatura (donde el factor de corrección de composición química es seleccionado por el usuario, mientras el de temperatura es calculado mediante el comportamiento de la solubilidad como se muestra en la Figura 4), mejorando la eficiencia de esta técnica. (ABB Inc., 2003)

### 1.8.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN

La sonda AISCAN proporciona la interfaz necesaria para que el circuito cerrado intercambie gas con la masa fundida. El gas del circuito cerrado circula a través de la parte de cerámica porosa de la sonda, esta se sumerge en el metal líquido y recoge el hidrógeno, el cual se difunde fuera del metal. El circuito de gas alcanza un equilibrio aproximado con el contenido de hidrógeno de la masa fundida cuando todo el volumen del circuito se recircula varias veces a través de la sonda.

El gas fluye a través del sensor (dentro del analizador) a medida que sale de la bomba en su camino hacia la sonda. El sensor determina la presión parcial de hidrógeno midiendo la conductividad térmica del gas. Este parámetro está fuertemente afectado por la concentración de hidrógeno, gas mucho más conductor que el nitrógeno. Este proceso se ilustra en la Figura 9.

El analizador utiliza la Ley de Sievert (explicada en la sección 1.4 solubilidad de hidrógeno y desgasificación) para calcular la cantidad de hidrógeno disuelto en la masa fundida, en función de la presión parcial de hidrógeno presente en el circuito cerrado de gases del instrumento en equilibrio.

El AISCAN está equipado con un termopar que permite medir automáticamente la temperatura del baño. El  $CF(T_{\text{melt}})$  es el factor de corrección para la temperatura del metal, el cual se calcula fácilmente dado que se conocen las curvas de solubilidad del hidrógeno en función de la temperatura para aluminio puro. El usuario selecciona el valor de  $CF(A)$ , el cual es el factor de corrección para la composición de la aleación.

Antes y después de una prueba, el equipo se calibra de forma automática, es decir, se coloca en un valor de cero "Auto-Cero" (Figura 11) para evitar que se confundan o se junten las lecturas de las pruebas; por ello es de vital importancia que, al finalizar una prueba, esta se guarde, pues de lo contrario dicha prueba se perdería y no se almacenaría en la memoria de la computadora utilizada.

En la Figura 9 se muestra de manera breve la descripción del funcionamiento del AISCAN mediante un diagrama de flujo.

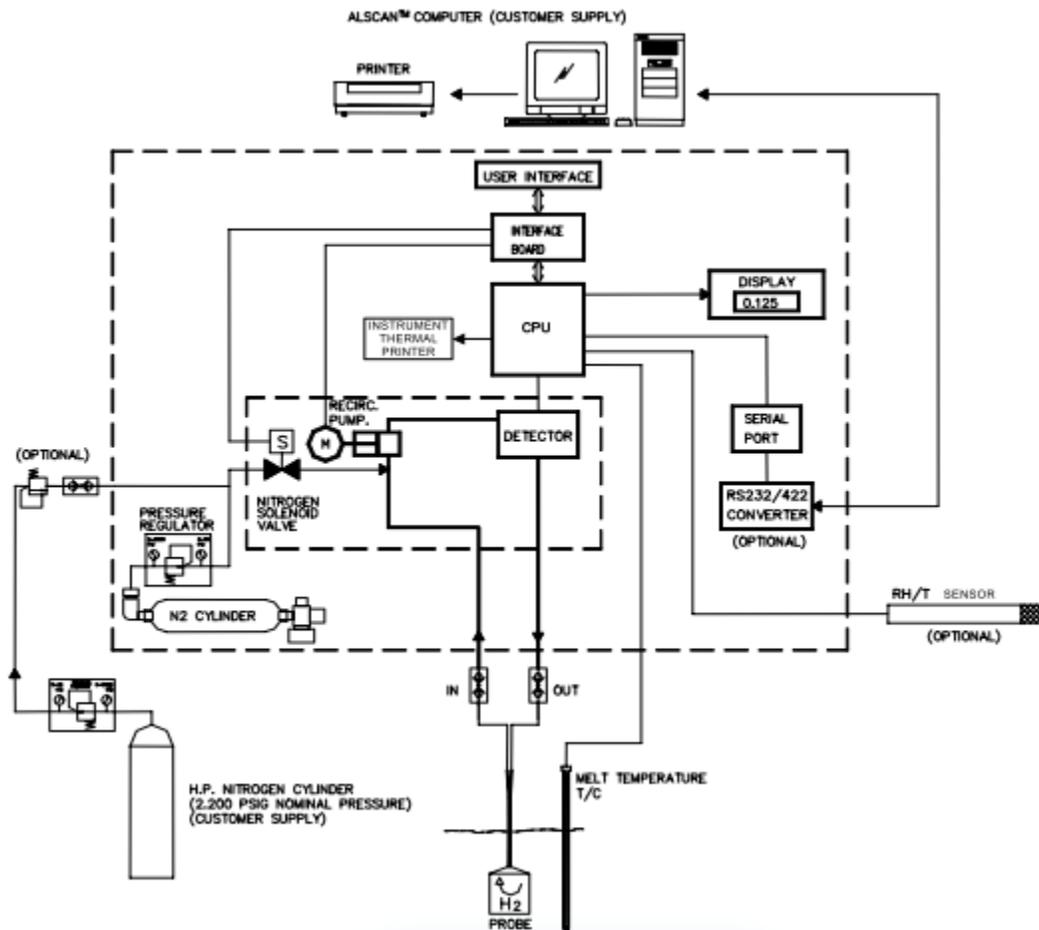
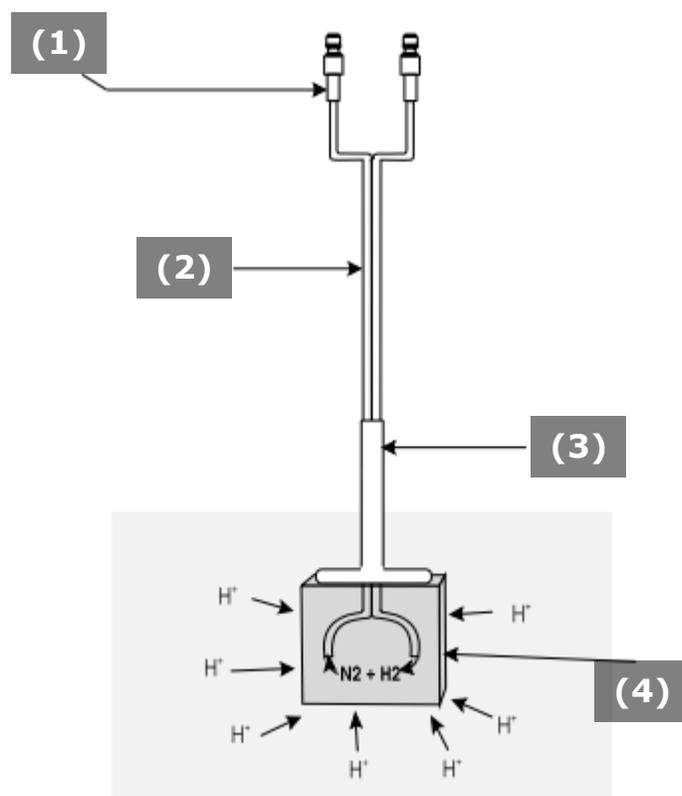


Figura 9. Diagrama sobre la descripción del principio de funcionamiento del AISCAN.

El contenido de la mezcla de  $N_2/H_2$  es detectada por una celda de conductividad térmica o catarómetro cada 5 segundos. Un catarómetro es un bloque de acero inoxidable con cavidades pequeñas, dentro de las cuales contiene pequeños filamentos termistores.

### 1.8.2 SONDA UTILIZADA



La sonda es una de las partes más importantes del equipo. Se sumerge en el metal líquido y permite al hidrógeno difundir en el nitrógeno mientras éste circula a través del baño metálico. Esta pieza debe cumplir ciertas características indispensables: (a) debe ser porosa, (b) debe ser químicamente estable en aluminio líquido (evitar su degradación y no ser una fuente de hidrógeno) y (c) debe ser resistente a choques térmicos y mecánicos. Esta sonda se ilustra en la Figura 10.

*Figura 10. Representación de la sonda utilizada en el AISCAN: (1) conexiones, (2) tubos de acero inoxidable de 1/16, (3) revestimiento cerámico, (4) sonda cerámica.*

### 1.8.3 PROCESO DE MEDICIÓN

El proceso completo que realiza el AISCAN para determinar la concentración de hidrógeno contenida en la muestra puede ser representado de manera más sencilla mediante un diagrama (Figura 11).

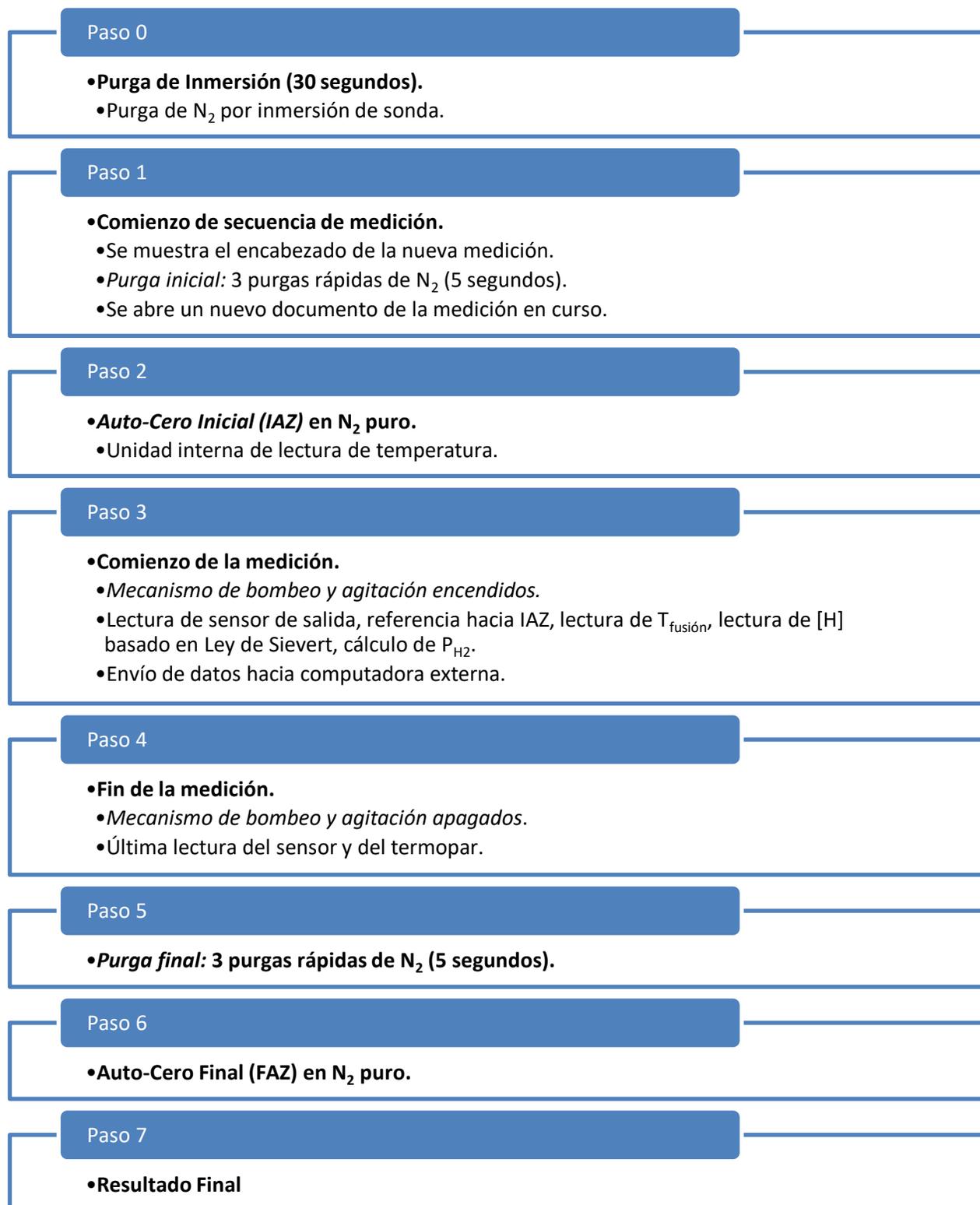


Figura 11. Proceso de medición del contenido de hidrógeno en aluminio líquido mediante el equipo AISCAN.

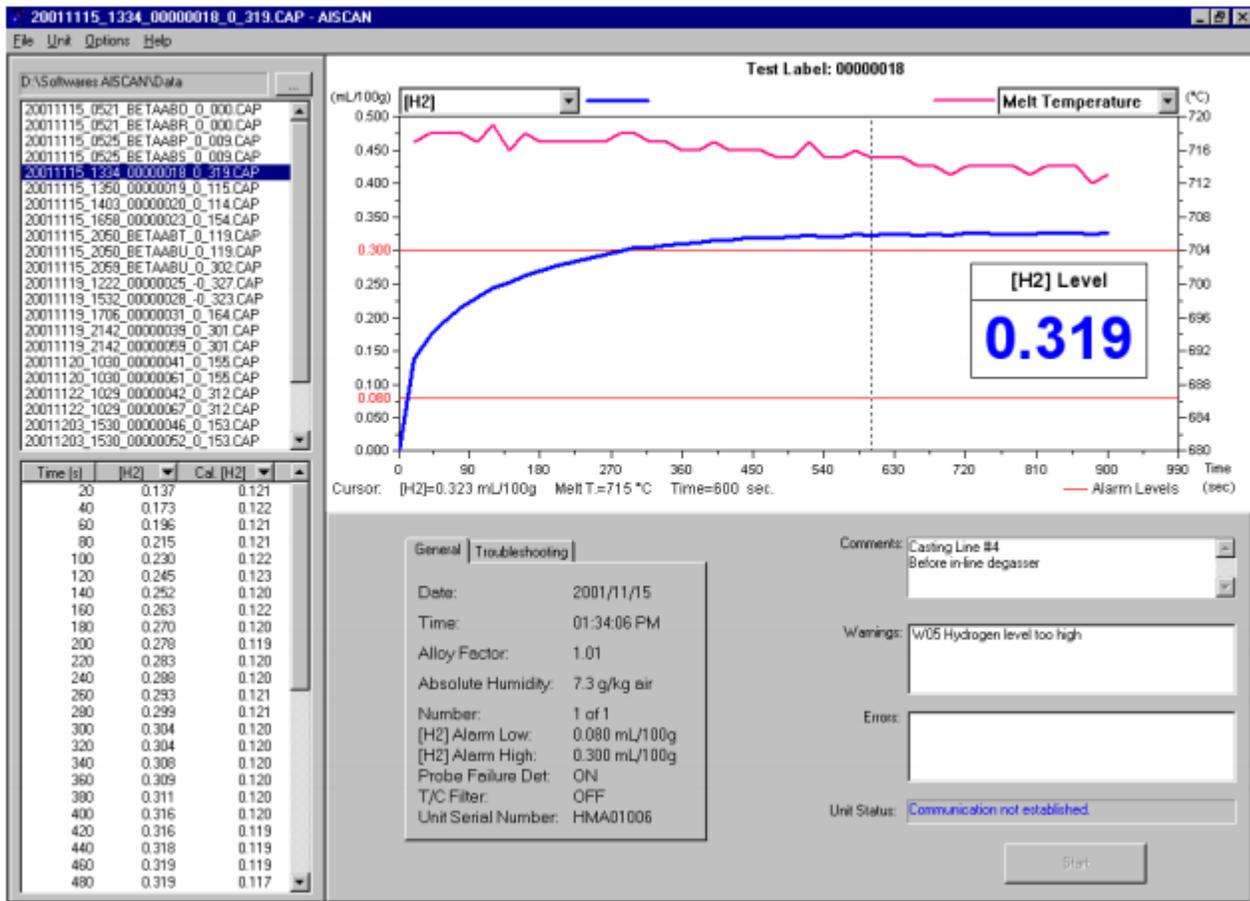


Figura 12. Ejemplo del resultado final obtenido con el software del AISCAN: concentración de hidrógeno (azul), temperatura (rosa).

Los resultados de la lectura de la concentración de hidrógeno y la temperatura del metal líquido son presentados en la interfaz del software presentado en la Figura 12. En esta figura se ve en la esquina superior izquierda la lista de pruebas realizadas en el folder donde se hayan guardado. Debajo de la sección de archivos, en la esquina inferior izquierda se encuentra la sección de los valores de la prueba corriente, donde en la primera columna se encuentra el tiempo transcurrido, en la segunda columna se encuentra la concentración de hidrógeno y finalmente en la última se encuentra la columna de temperatura actual del metal líquido. Del lado derecho, en la parte superior se encuentra la gráfica de concentración de hidrógeno y la temperatura en tiempo real. Finalmente, debajo de la gráfica se muestran las condiciones o parámetros de la prueba, comentarios, mensajes de advertencia y errores que suceden durante la prueba. En la esquina inferior derecha, se encuentra el botón de "Comienzo".

## 1.9 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA: TRABAJO PREVIO

(Mancilla, y otros, 2017) encontraron que la geometría del rotor determina directamente el comportamiento del flujo del metal líquido y la inyección de gas afecta directamente las características cinéticas del sistema. En este artículo se compararon 3 rotores distintos, donde la diferencia radicaba en la forma del rotor (un rotor estándar comercial con toberas, un rotor igual al comercial, pero con muescas, y un rotor muy distinto a los comerciales que en lugar de toberas tiene 4 aspas). En este artículo se demuestra que los rotores con aspas tienen un mejor desempeño que los rotores comerciales, pues estos últimos no permiten que las burbujas se eleven libremente hacia la superficie, generan poca turbulencia y crean gradientes de velocidad debido a la ruptura de las burbujas y a la dispersión del gas por todo el sistema. De igual manera lo hicieron (Hernández Hernández, Camacho Martínez, González Rivera, & Ramírez Argáez, 2016), quienes incluso afirman que el rotor con 4 aspas reduce hasta 34% el tiempo de desgasificado, reduce 32% el consumo de gas e incrementa 49% la eficiencia del gas respecto a los rotores comerciales y al rotor muescado bajo las condiciones de trabajo utilizadas: 40 LPM y 290 y 580 rpm. Tras 10 minutos de desgasificado el rotor con aspas había reducido el doble de la concentración de hidrógeno respecto al rotor comercial y la concentración final encontrada por el rotor de aspas fue de  $0.16 \text{ g H} / 100 \text{ g Al}$ . (Abreu López, Dutta, Camacho Martínez, Trápaga Martínez, & Ramírez Argáez, 2018) confirman en su artículo que un rotor diseñado con aspas promueve la turbulencia, una distribución más homogénea del gas, un mejor efecto de bombeo y una mayor eficiencia en la transferencia de momentum respecto a los rotores muescados, pues en su artículo se desarrolló un modelo numérico para predecir la velocidad del fluido, la permanencia del gas dentro del líquido, el tamaño del vórtice, el efecto bombeo, el coeficiente de transferencia de masa y las cinéticas para 4 tipos distintos de rotores: uno comercial, uno muescado, un rotor de 4 aspas y otro de 5 aspas. Además, se demostró que el número de aspas puede ser otra variable en el desgasificado, pues el rotor de menos aspas (4 aspas) fue el de mejor desempeño, seguido del de 5 aspas, luego el muescado y finalmente el comercial con boquillas. (Camacho Martínez, y otros, 2010) estudiaron el efecto del diseño del rotor, la velocidad del rotor y el flujo de gas en la cinética de la desgasificación de aluminio mediante el modelado físico en agua realizando las mediciones mediante PIV (Particle Image Velocity).

Además, mencionaron que la inyección de aire es una variable más a estudiar pues afecta otras, tales como la recirculación del flujo, el tamaño del vórtice, el efecto de bombeo y la turbulencia dentro del metal líquido.

(Mancilla, Cruz Méndez, Ramírez Argáez, González Rivera, & Ascanio, 2019) demostraron que la geometría del rotor tiene cierta influencia sobre el tamaño de la burbuja generada durante el desgasificado, pues el rotor con 4 aspas utilizado producía burbujas de menor diámetro promedio respecto a los rotores comerciales comparados. También afirman que el tamaño de las burbujas afecta el comportamiento de la turbulencia dentro del baño líquido, debido a que las superficies de las burbujas absorben la mayor energía inyectada hacia el metal líquido.

Finalmente, se comenta el proyecto del que se deriva este trabajo, es decir, el trabajo previo a esta tesis (Hernández Ávila, 2019). En este proyecto se propuso un nuevo rotor tomando en cuenta todos los aspectos observados en los artículos y proyectos antes mencionados. Dicha propuesta consistió en un rotor de 3 aspas, el cual se comparó con un rotor de 4 aspas de 45° de inclinación y con otro rotor de 4 aspas al cual le realizó una mejora: modificó su inclinación a 35° en lugar de 45°. Mediante simulaciones numéricas se llegó a la conclusión de que bajo las mismas condiciones de trabajo utilizadas (10 LPM y 400 rpm) el rotor de 3 aspas conseguía un mejor desempeño que los anteriores. Además, se comprobó que el número de aspas también desempeña un papel importante en el proceso de desgasificado, pues al disminuir el número de aspas se promueve una mejor distribución de las burbujas en el sistema. Igualmente se demostró que modificando el ángulo de inclinación de las aspas se puede optimizar el proceso (esto lo halló tras comparar el rotor de 4 aspas "original" con el "rediseñado"), por lo que sugiere que al rotor de 3 aspas se puede aumentar aún más su eficiencia si se incrementa la inclinación de las aspas. Asimismo, se encontró que dicha mejora en ambos rotores propuestos es debida a que se mejora la distribución del gas dentro del líquido, aumenta su tiempo de permanencia; hay una burbuja de gran tamaño, así como una caída de presión debajo del rotor (mayor efecto bombeo), altos niveles de turbulencia, entre otras características. Algo inédito reportado en su trabajo fue la obtención de desgasificado total en modelado físico con el rotor de 3 aspas y la rapidez de desgasificado exhibida por el mismo, lo que abre la probabilidad de su uso industrial en el área de fundición de aluminio de alta calidad metalúrgica.

Por lo anteriormente descrito en la revisión de la literatura especializada y particularmente con base a los resultados exitosos de desgasificación con el rotor de 3 aspas, probado por Hernández Ávila mediante modelado físico y matemático; en este trabajo se pretende validar el mejor desempeño que supuestamente muestra el rotor de 3 aspas bajo las mismas condiciones de operación que los otros rotores estudiados al desgasificar aluminio líquido en un dispositivo a escala laboratorio de fundición y ratificar lo previamente reportado mediante modelados físico y matemático.

## **1.10 OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Comparar el desempeño de un rotor rediseñado anteriormente en un proyecto y otro ya probado en una tesis previa, mediante experimentación en aluminio líquido midiendo el contenido de hidrógeno disuelto en aluminio con el equipo AISCAN.

### **Objetivos Particulares**

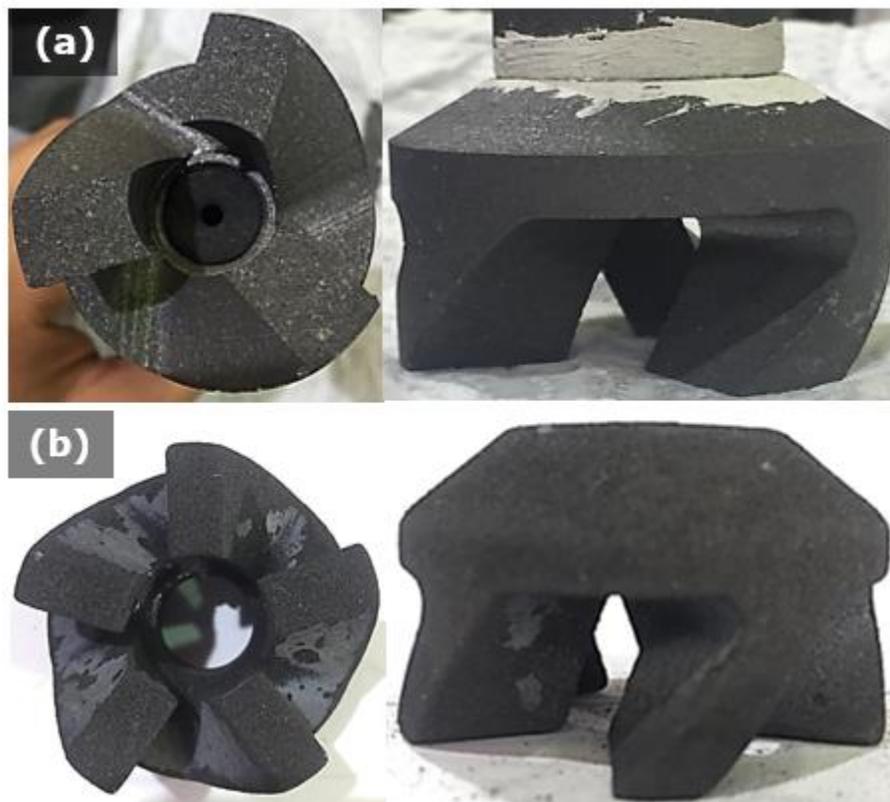
- Realizar el desgasificado de aluminio líquido con un rotor de 3 aspas y con otro de 5 aspas a distintos tiempos: 3, 6, 9 y 12 minutos y compararlos con el aluminio gasificado.
- Comparar el comportamiento de las propiedades mecánicas antes y después del proceso de deshidrogenación con dos distintos rotores manteniendo las demás condiciones de trabajo constantes variando los tiempos de desgasificación (0, 3, 6, 9 y 12 minutos).

## **1.11 HIPÓTESIS**

El nuevo rotor de 3 aspas mejorará la velocidad de deshidrogenación respecto al de 5 aspas para el caso de aluminio puro; incrementando la turbulencia y la distribución de burbujas de menor tamaño de manera más uniforme produciendo un transporte más eficiente del hidrógeno desde el seno del metal hacia el seno de la burbuja del gas de purga, incrementando el tiempo de residencia del gas.

## 2. METODOLOGÍA

En este trabajo, el proceso de desgasificado que se realizó consistió en comparar la eficiencia de dos rotores inyectoros de grafito, además de corroborar que el nuevo rotor propuesto (3 aspás) tiene un mejor rendimiento que los rotores comerciales (Abreu López, Amaro Villeda, Acosta González, González Rivera, & Ramírez Argáez, 2017) y que un rotor demostrado en un proyecto anterior (5 aspás). En la Figura 13 se muestran los rotores utilizados.



*Figura 13. Rotores inyectoros utilizados para desgasificar aluminio puro (vista inferior y lateral respectivamente): (a) rotor de 3 aspás, (b) rotor de 5 aspás.*

A continuación, se describirá el proceso llevado a cabo en el laboratorio de fundición a fin de crear una planta piloto.

## 2.1 PREPARACIÓN DE MOLDES DE SILICATO – CO<sub>2</sub>

Lo primero que se realizó fueron los moldes de silicato - CO<sub>2</sub> para obtener probetas para prueba de tracción (Figura 14), con el fin de examinar las propiedades mecánicas previas y posteriores al proceso de desgasificado.

Para realizar los moldes de silicato – CO<sub>2</sub> se pesó 2 Kg de arena sílice 90-100 y se le añadió lentamente resina de silicato de sodio al 6% (120mL) mientras se mezclaban por un tiempo entre 3 y 4 minutos. Una vez realizada la mezcla se colocó en un recipiente de plástico para evitar que la resina solidificara y de esa manera poder manipularla mejor.

Se limpió minuciosamente la caja de acrílico que se usó para colocar la mezcla, así como la placa modelo. Posteriormente se les colocó un lubricante a ambas piezas para facilitar la extracción del molde final.



*Figura 14. Ejemplar de molde de silicato - CO<sub>2</sub>.*

Se vació la mezcla sobre la placa modelo, dentro de la caja de acrílico y se apisonó de 3 a 4 veces para que el molde quedara completamente compacto. Una vez cumplido lo anterior se quita el exceso de mezcla del acrílico y se le inyecta CO<sub>2</sub>, tanto en la cara posterior como en la anterior, 3 veces en cada una; cuidadosamente se retira de la placa modelo y de la caja de acrílico. Luego se eliminó la humedad que pudiera quedar en el molde cociéndolo dentro de un horno a 110°C por aproximadamente 20 minutos.

Todo el proceso anterior describe la producción de la mitad de un molde para prueba de tracción.

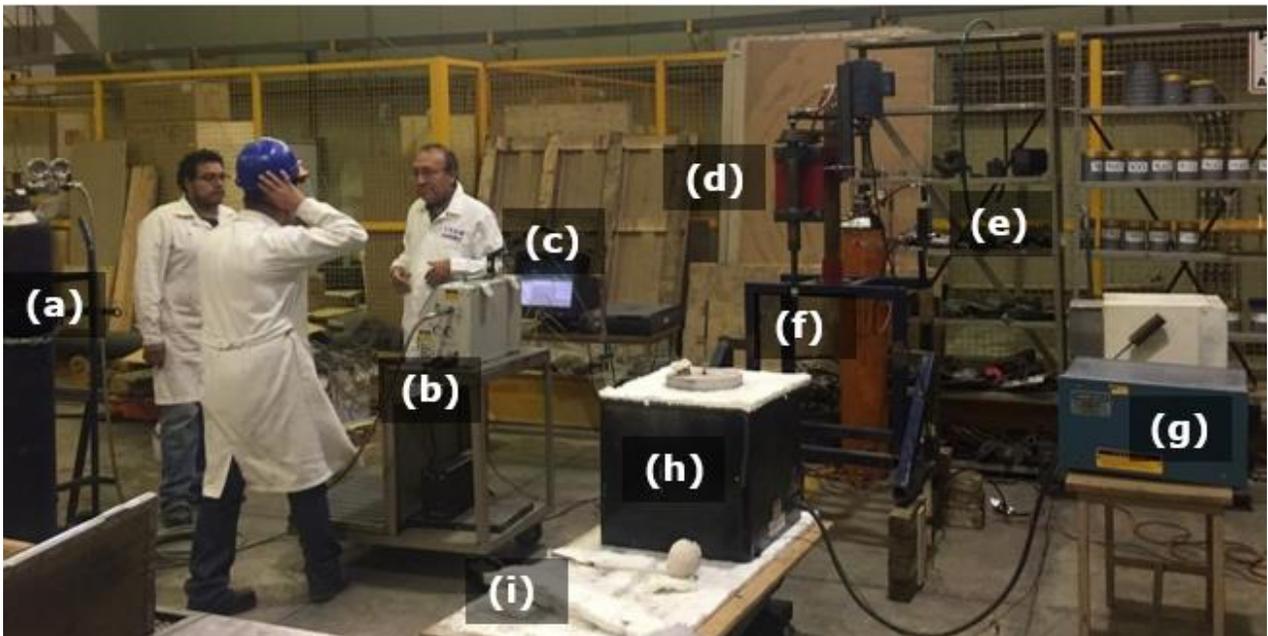


Finalmente, se unieron ambas mitades. Se revisó que estuvieran perfectamente alineadas donde se vaciaría el metal líquido, se les colocaron tablas en los extremos y se les colocó una pinza de presión grande para sujetarlas sin romper el molde (Figura 15).

*Figura 15. Molde para prueba de tracción completo y sujetado por una pinza de presión.*

## 2.2 PREPARACIÓN DE LA PLANTA PILOTO

Posteriormente se realizó el arreglo de la planta piloto a nivel laboratorio de fundición, de manera que todo el material utilizado quedara a la mano y ordenado para facilitar su manejo, como se observa en la Figura 16. Se obtuvo el aluminio puro a partir de 2 lingotes de 10 kg cada uno, los cuales se fundieron para producir lingotes de menor tamaño (400 g cada uno aproximadamente).



*Figura 16. Fotografía de la planta piloto con material utilizado: (a) Tanque de Nitrógeno con 99.997% de pureza conectado al AISCAN, (b) AISCAN, (c) Computadora con software de AISCAN instalado, (d) Motor con junta rotativa, lanza y rotor inyector ensamblado, (e) Flujoímetro, (f) Tanque de Nitrógeno de línea industrial, (g) Controlador de temperatura del horno, (h) Horno de*

*resistencias utilizado con crisol de grafito conteniendo aluminio líquido en su interior, (i) soporte para controlar la altura del horno.*

Para la preparación de la planta piloto se necesitó elevar el soporte del motor con junta rotativa con ayuda de tablones para lograr obtener la altura necesaria para manipular el horno antes y después del proceso de desgasificación. También se observa en la Figura 16 el acomodo que se llevó a cabo para tener todo lo necesario a la mano y evitar pérdidas de tiempo y temperatura.

Al horno de resistencias se le colocaron almohadillas debajo de él para impedir que se desplazara, así como para que no se transfiriese calor hacia la estructura acoplada como soporte; también se le colocó almohadillas sobre él para mantener estable la temperatura durante la fusión de los lingotes, el proceso de desgasificado con los rotores y el análisis del AISCAN.

El tanque de nitrógeno de alta pureza se conectó directamente al AISCAN debido a que no se pudo cargar el pequeño tanque que tiene el AISCAN en la parte inferior frontal.

## **2.3 CONDICIONES DE TRABAJO**

Posteriormente se fijaron las condiciones de trabajo:

- Masa utilizada de aluminio puro comercial (Anexo): 5 kg.
- Temperatura del metal líquido: 760°C.
- Velocidad de rotación de rotor inyector: 240 rpm.
- Flujo de gas nitrógeno de línea industrial: 10 L/min .
- Altura del rotor respecto del baño:  $\frac{1}{3}$ .

## **2.4 PREPARACIÓN DE DISPOSITIVOS**

- Primero se precalentó el horno de resistencias y se niveló el crisol dentro del mismo para evitar la pérdida o derrame de metal durante el desgasificado. También se encendió el horno de crisol con quemador de gas para ayudar a precalentar los lingotes de aluminio, colocándolos a una distancia moderada de la flama para evitar que estos se fundieran antes de tiempo, con el fin de que estos comenzaran a hacerse pastosos y que, al introducirlos al horno de resistencias, este último no perdiera tanta temperatura por la adición.

- Se colocó el rotor de 3 aspas en una flecha ensamblados en un motor equipado con una junta rotativa. En la unión de la flecha con el rotor se colocó un poco de pintura refractaria de zirconio (como se muestra en la Figura 13a) con el objetivo de evitar que el baño de aluminio penetrara en esa zona y complicara poder desenroscar el rotor.
- Se realizaron las mediciones y los cálculos necesarios para obtener la altura del rotor respecto al metal líquido. Teniendo esto, se marcó con pintura de circonio en la lanza la altura a la que debía someterse el rotor dentro del crisol.
- Se conectó el tanque de nitrógeno de línea industrial al flujómetro, y este a su vez hacia la lanza que contenía al rotor inyector.
- Se conectó el tanque de nitrógeno de 99.997% de pureza al AISCAN para detectar la concentración de hidrógeno y la temperatura en el baño de aluminio líquido mediante un software. Por lo que el AISCAN se conectó a una computadora, y a este mismo se le conectó una sonda y un termopar, donde estos dos últimos iban sujetos al brazo del AISCAN para tener movilidad y una altura fija dentro del baño líquido.
- Se encendió y conectó el AISCAN a la computadora para calibrarlo y preparar el almacenamiento de cada prueba a realizar.

## 2.5 PREPARACIÓN DEL METAL LÍQUIDO

- Se precalentaron los lingotes de aluminio puro en el horno de crisol con quemador de gas para ayudar a que estos se fundieran rápidamente dentro del crisol en el horno de resistencias.  
Para agilizar el precalentado de los lingotes en el horno de gas, se pusieron directo sobre la flama con ayuda de unas pinzas previamente recubiertas con pintura de circonio.
- Se ajustó el controlador de temperatura del horno en 800°C para que facilitara la fundición del lingote precalentado. Una vez fundido se esperó a que la temperatura se estabilizara a 780°C aproximadamente (determinado con un multímetro y un termopar).
- Se realizó la medición de contenido de hidrógeno inicial con el AISCAN previo a comenzar la gasificación del baño de aluminio líquido, dicho proceso se detalla en la sección *2.6 Medición utilizando AISCAN*.
- Se calentó aproximadamente 2.5L de agua en un matraz sobre una parrilla sin utilizar agitación magnética, se colocó en un atomizador

metálico y se roció por 10 minutos con el objetivo de lograr una concentración aproximada de saturación de hidrógeno de 0.6mL/100g de aluminio obteniendo así la temperatura de trabajo detectada por el AISCAN (760°C).

- Para homogenizar la incorporación del hidrógeno al rociar el agua hacia el aluminio líquido, se agitó con una cucharilla recubierta con pintura de circonio; dentro del horno de resistencias para evitar una mayor pérdida de temperatura (Figura 17).
- Al terminar la gasificación se determinó la temperatura con un multímetro y un termopar. Esperando obtener temperaturas cercanas a 760°C.



*Figura 17. Agitación y atomización de agua precalentada en el aluminio líquido.*

## 2.6 MEDICIÓN UTILIZANDO AISCAN

- Se colocaron la sonda y el termopar dentro del aluminio líquido al tener una temperatura cercana a los 760°C.
- Al comenzar su trabajo, el AISCAN realizó 3 purgas de gas nitrógeno.
- Al finalizar las purgas, se comenzó a obtener el valor del hidrógeno contenido cada 20 segundos hasta obtener una concentración constante respecto al tiempo (tras 4-6 minutos de medición continua).

Para guardar la prueba realizada se procedió a cambiar el nombre del archivo para esto se dio clic en "File" (parte superior del menú); seleccionando la opción de "Test Label" (Figura 18), esta opción acepta un máximo de 15 caracteres, sin aceptar las siguientes encerradas entre corchetes: [espacio, \_ . < > : \ " / | \* ?]. A través de prueba-error se identificó que el AISCAN guarda automáticamente solo una medición por cada vez que se abre el programa en la computadora. Se impidió que se sobrescribiera la prueba actual sobre la anterior cambiando el nombre del

archivo (como se mencionó anteriormente) antes de realizar la prueba. Esto último se realizó cada vez que se hacía una prueba nueva.

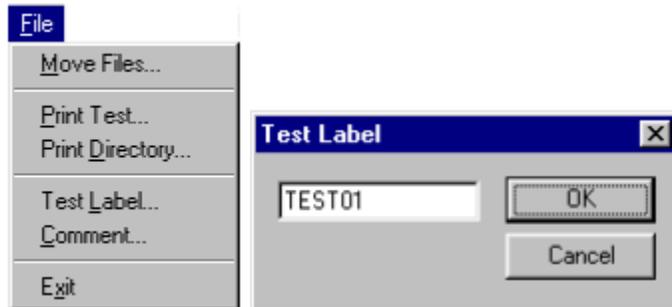


Figura 18. Método para cambiar nombre a la prueba.

## 2.7 DESGASIFICACIÓN CON ROTOR INYECTOR

- Tras la medición del contenido inicial de hidrógeno, se sumergió el rotor inyector en el metal líquido, ajustando la altura con el soporte donde se encontraba el horno.
- Se ajustó la velocidad de rotación del rotor inyector a 240 rpm aproximadamente con un tacómetro (Figura 19) y manipulando los tornillos del taladro. Asimismo, se ajustó el flujo de gas de purga a un valor constante de 10 LPM con ayuda de un flujómetro.
- Se determinó la concentración de hidrógeno contenido siguiendo los pasos mencionados en la sección 2.6 *Medición utilizando AISCAN*.
- Se realizó este proceso para los distintos tiempos de desgasificación establecidos: 0, 3, 6, 9 y 12 minutos.



Figura 19. Velocidad de rotación del rotor con un tacómetro digital Marca MEM.

## 2.8 PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCIÓN

- Tras terminar la medición de hidrógeno por el AISCAN y con el objetivo de comparar el efecto de la desgasificación sobre el comportamiento

mecánico del aluminio, se vació aluminio sobre los moldes previamente armados como se aprecia en la Figura 20.

- Para ello se tomaron muestras del aluminio líquido con ayuda de una cuchara recubierta con pintura de circonio y se llenaron los moldes a distintos tiempos: 0, 9 y 12 minutos.
- Esta prueba se realizó por duplicado para el rotor de 3 aspas y por triplicado para el rotor de 5 aspas (la muestra a cero minutos, "Blanco", no fue necesario repetirla de nuevo en el otro rotor).
- Una vez solidificadas se desmoldaron y se les extrajo la rebaba excedente mediante el uso de una lijadora eléctrica.



*Figura 20. Obtención de probetas de tensión.*

## **2.9 ENSAYO DE TRACCIÓN**

- A todas las probetas preparadas anteriormente se les realizó el ensayo de tensión en una Máquina de Tensión Universal marca MTS Systems Corporation, modelo 661.23B-01 (Figura 21).
- Para ello se marcó sobre el cuello de las probetas una distancia de 50mm para poder conocer el porcentaje de elongación más adelante.
- Se colocó un extensómetro para conocer cuántos milímetros soportó la probeta antes de fracturarse durante el ensayo.
- Tras los ensayos de tensión, se procedió a analizar la zona de fractura de las probetas y se registró la distancia final con un Vernier.

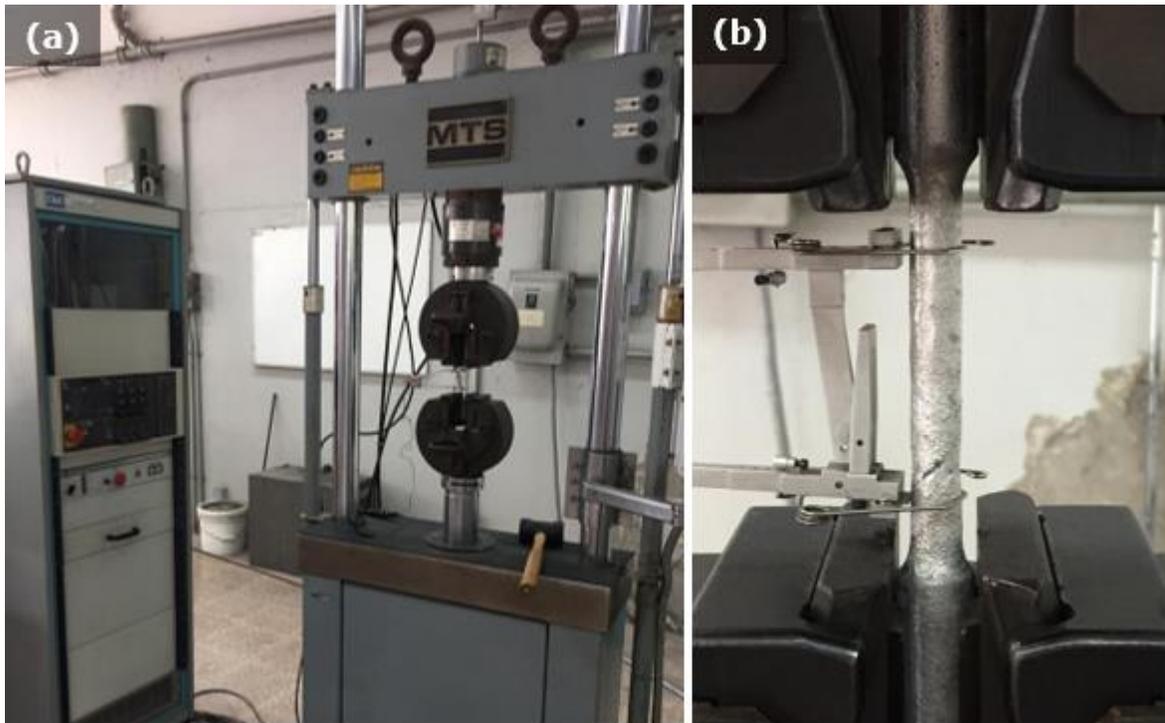


Figura 21. Proceso de ensayo de tracción: (a) Máquina de Tensión Universal, (b) Fotografía de probeta equipada con el extensómetro durante el ensayo.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó la validación del rotor propuesto por un trabajo anterior (Hernández Ávila, 2019) en el laboratorio de fundición para comparar el desempeño de los rotores de 3 y 5 aspas en el proceso de desgasificado, pues en dicho trabajo se encontró que el rotor de 3 aspas obtenía una desgasificación óptima en el caso de modelado físico en agua y también a través de modelado matemático.

#### 3.1 ROTOR DE 3 ASPAS

En la Figura 22 se muestra un ejemplo del gráfico obtenido durante la medición de la concentración de hidrógeno en el aluminio fundido con el AISCAN, donde se observa la concentración de hidrógeno dentro del baño (línea azul) y la temperatura (línea rosa) contra el tiempo. En este caso fue la medición antes de purgar gas por 9 minutos, es decir, en su condición gasificada.

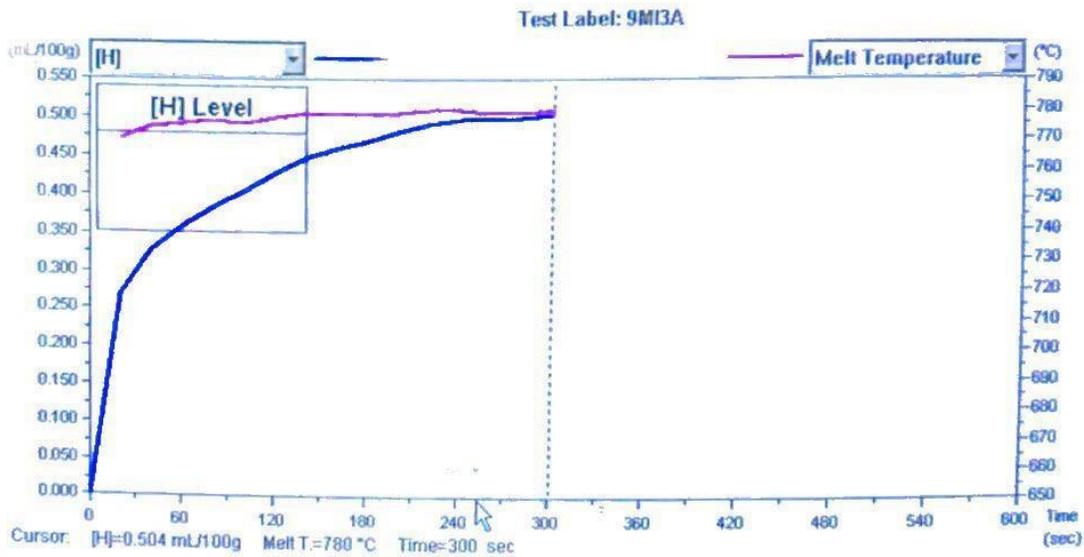


Figura 22. Ejemplo de gráfico obtenido con el software de AISCAN para un rotor de 3 aspas.

En la Tabla 7 se muestran los datos obtenidos antes y después del proceso de desgasificado utilizando el rotor de 3 aspas. En la Figura 23 se presenta el contenido de hidrógeno en aluminio fundido durante el proceso de desgasificado que se midió a los 3, 6, 9 y 12 minutos, es decir la cinética de desgasificado para el rotor de 3 aspas. Con los valores de contenido de hidrógeno en su condición gaseado y después de cada periodo de purga se obtiene una concentración adimensional de hidrógeno dividiendo la concentración de hidrógeno tras desgasificar entre la concentración antes de desgasificar:

$$\frac{[H]_f}{[H]_i} = \text{Concentración final de hidrógeno} / \text{Concentración inicial de hidrógeno}$$

Ecuación 1. Concentración de hidrógeno adimensional.

Tabla 7. Concentraciones iniciales y finales de hidrógeno; y relación de hidrógeno para un rotor de 3 aspas.

Tiempo (s)	[H] <sub>i</sub>	[H] <sub>f</sub>	Relación de H
0	0.440	0.440	1
180	0.510	0.328	0.643
360	0.440	0.225	0.511
540	0.641	0.279	0.435
720	0.524	0.193	0.368

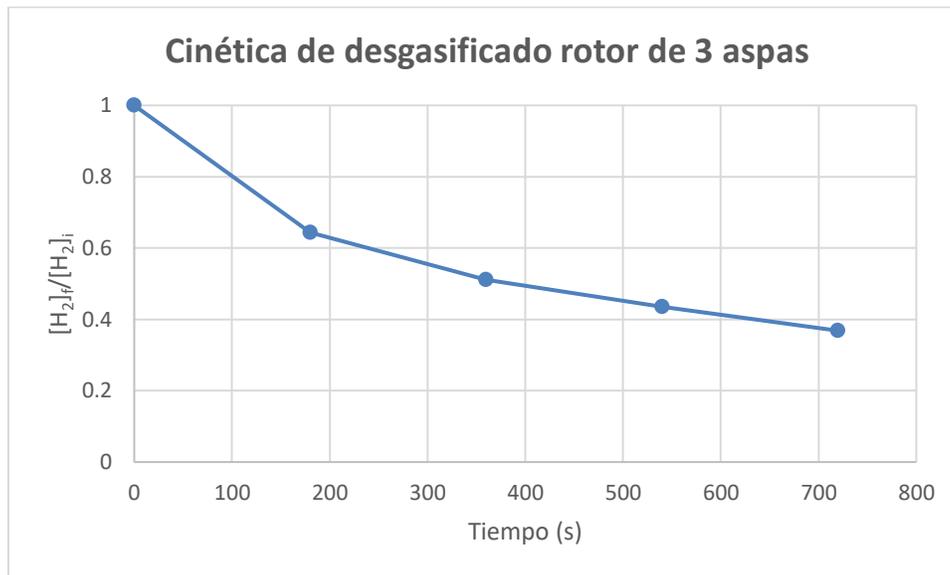


Figura 23. Cinética de desgasificado del rotor de 3 aspas.

En la Tabla 8 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas de tensión provenientes del desgasificado con el rotor de 3 aspas.

Tabla 8. Propiedades mecánicas obtenidas posterior al desgasificado con un rotor de 3 aspas de manera general.

Probeta	UTS (MPa)	YS (MPa)	% Elongación
<b>Blanco</b>	53.679 ± 0.000*	45.952 ± 0.000*	--**
<b>Desgasificado 9 min</b>	60.229 ± 7.488	44.186 ± 1.962	17.55 ± 5.45
<b>Desgasificado 12 min</b>	66.860 ± 1.072	41.048 ± 0.027	22.2 ± 0.000*

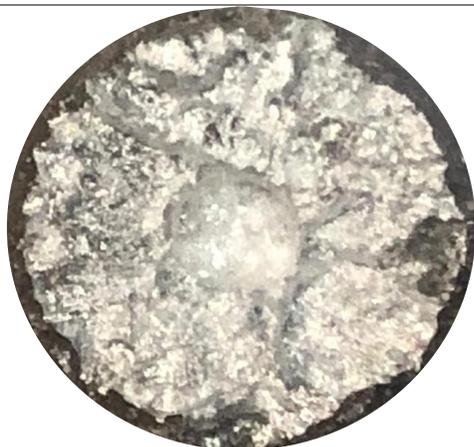
\* No se obtuvo una desviación estándar debido a que solo se obtuvieron datos de una probeta, porque la otra se fracturó de la agarradera.

\*\* Ambas piezas fracturaron de las agarraderas, por lo que no se obtuvo el % de Elongación para ninguna pieza.

Tras hacer las pruebas de tracción se tomaron fotos a las probetas provenientes de las pruebas con el rotor de 3 aspas en la zona de fractura las cuales se describen en la Tabla 9.

En la Figura 24 se presentan las zonas de las fracturas de las probetas C, E y F. En la Figura 25 se muestra el inicio de la fractura en la probeta E y en la Figura 26 se muestra la escoria encontrada que explica la falla de la probeta F.

*Tabla 9. Descripción de la zona de fractura de las probetas de tensión del rotor de 3 aspas.*



Blanco (Pieza A).  
Se presentó fractura en una de las agarraderas debido a un enorme poro al centro, además de ser visible un poco de escoria cerca de la superficie del lado derecho.

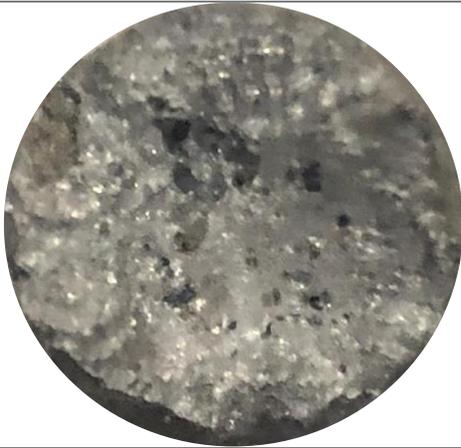


Blanco (Pieza B).  
Se observan 2 rechupes al centro, lo que probablemente causó la falla de la probeta por una de las agarraderas.



Probeta con 9 minutos de desgasificado (Pieza C).  
Esta probeta presentó la fractura en una de las agarraderas (Figura 24), probablemente debido a que al momento de llenar el molde se formaron burbujas que no lograron llegar a la superficie, quedando atrapadas en el metal líquido, creando así un poro claramente visible al centro. Existen rechupes a los costados; sin embargo, el tamaño del poro es de mayor dimensión.

---



Probeta con 9 minutos de desgaseado (Pieza D).

En esta probeta se observó una fractura claramente dúctil, la cual fue producida por unos poros hallados al centro de la pieza. Dichos poros se ven de un tamaño mayor que los demás observados en la periferia de la pieza.



Probeta con 12 minutos de desgaseado (Pieza E).

La probeta comenzó a fallar en la parte inferior de esta foto, esto se observa en la Figura 25. También se observa con camino de poros en la parte superior de la foto por donde terminó la fractura, el poro de mayor tamaño se ubica en el centro y se observó en la parte superior izquierda el término de la fractura por fatiga.



Probeta con 12 minutos de desgaseado (Pieza F).

Se observó que la probeta falló a partir de la mayor concentración de escoria atrapada (zona negra-café), pues se encontró escoria residual dentro de los poros. Esto se ilustra mejor en la Figura 26 donde se tomó la foto con un estereoscopio para ver a detalle dicha zona.

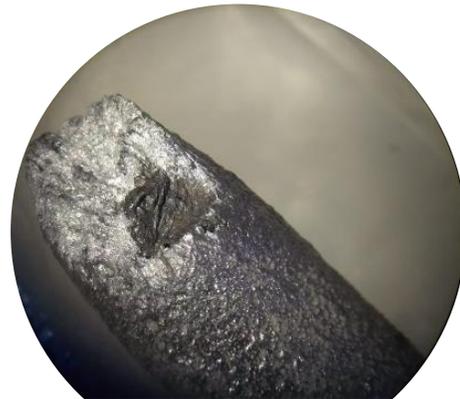
---



*Figura 24. Zona de fractura de las piezas C, E y F.*



*Figura 25. Inicio de fractura en la pieza E.*



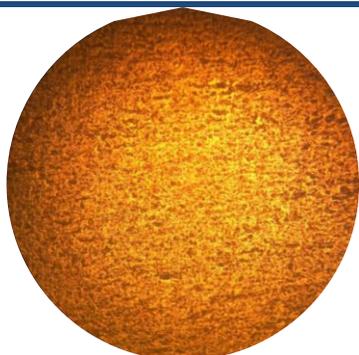
*Figura 26. Escoria dentro de la pieza F.*

En la Figura 27 se muestra la comparación entre las propiedades mecánicas obtenidas después la prueba de tensión a las probetas resultantes usando el rotor de 3 aspas en sus condiciones de gaseadas y desgasificadas por 9 y 12 minutos.

A continuación, en la Tabla 10 se presentan las metalografías realizadas a las probetas procedentes de la desgasificación con un rotor de 3 aspas.

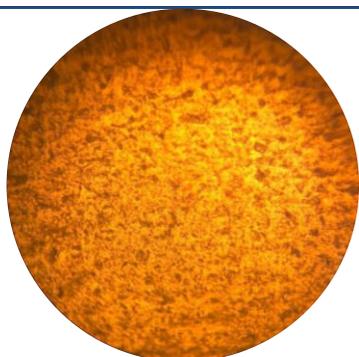
Tabla 10. Metalografías realizadas a las probetas obtenidas.

# Blanco



Se observa una pieza con una presencia muy marcada de porosidad aparentemente uniforme en distribución y tamaño de poros.

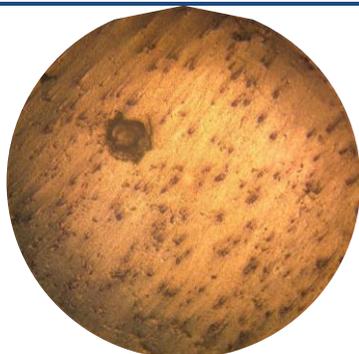
40x.



A mayores aumentos se observa que la porosidad no es homogénea tanto en distribución como en tamaño de poros.

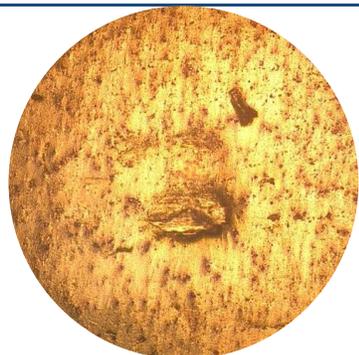
100x.

# Desgasificado de 9 minutos



Se observa una considerable disminución en el número de poros; sin embargo, aún existen poros de tamaño considerable que disminuyen las propiedades mecánicas del aluminio producido.

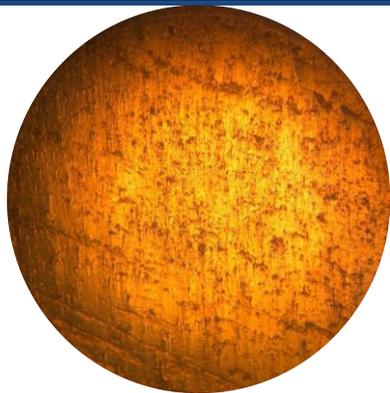
40x.



Se observan incluso rechupes acompañados de poros en su periferia; así como colonias de poros (lado izquierdo).

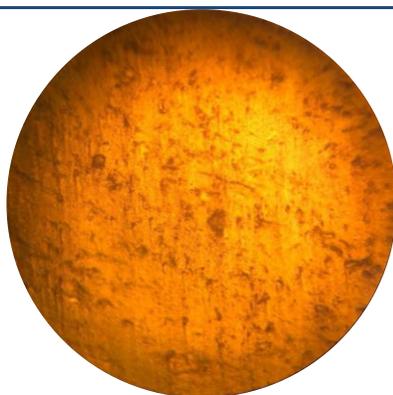
100x.

# Desgasificado de 12 minutos



Se observa presencia de porosidad. No obstante, se observa más limpia la pieza, a pesar de las marcas de desbaste presentes en la parte superior e inferior de la fotografía.

40x.



Se observa una pieza ligeramente más limpia, pero aún con presencia de poros, aunque éstos ya parecen tener un tamaño menor. No se hallaron rechupes.

100x.

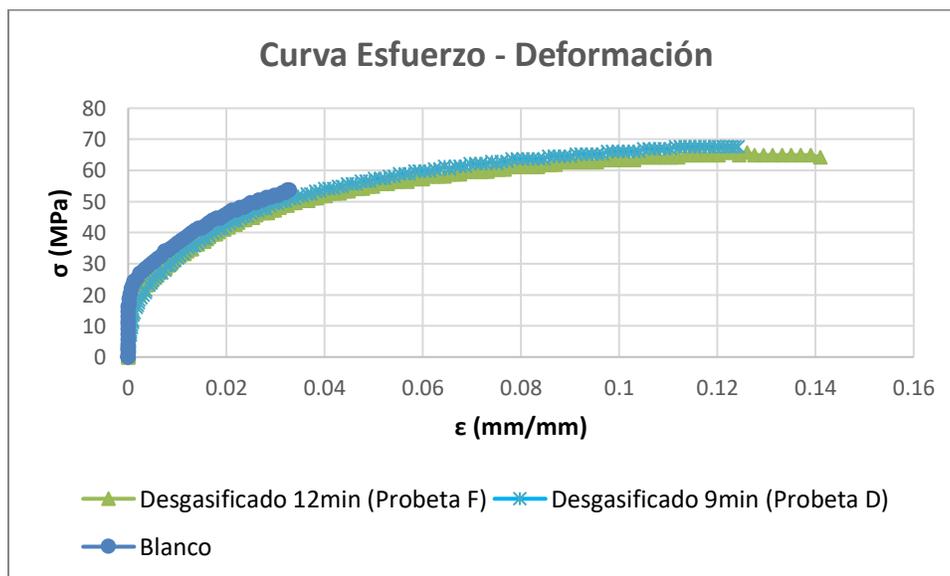


Figura 27. Comparación de las curvas esfuerzo-deformación resultantes del desgasificado con rotor de 3 aspas.

### 3.2 ROTOR DE 5 ASPAS

La Figura 28 se muestra un ejemplo del gráfico obtenido con el AISCAN, donde se observa la concentración de hidrógeno dentro del baño (línea azul) y la temperatura (línea rosa) contra el tiempo. En este caso fue la obtenida para la prueba tras 3 minutos de desgasificado.

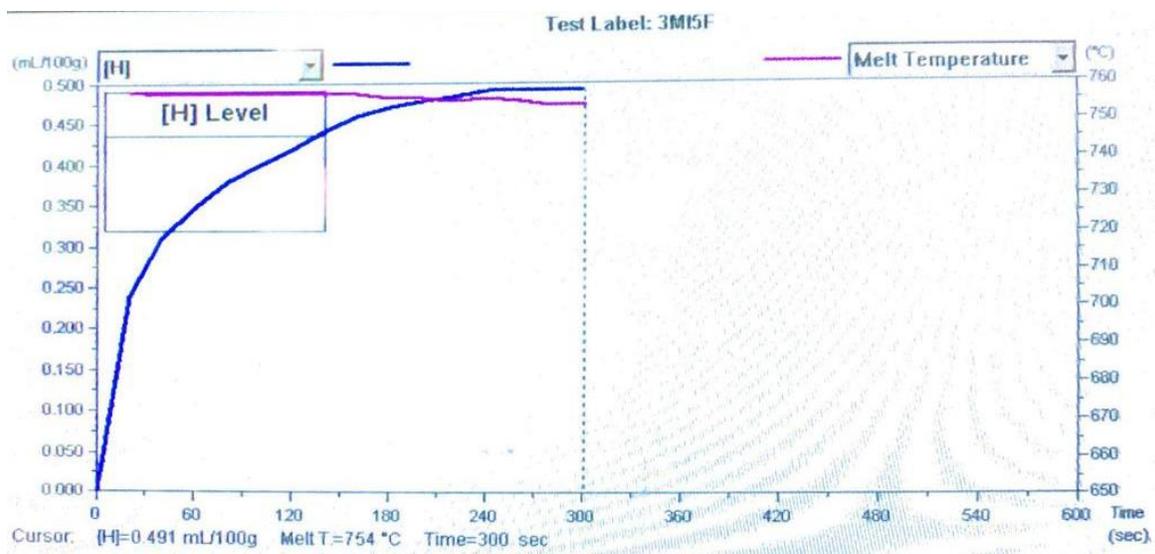


Figura 28. Ejemplo de gráfico obtenido con el software de AISCAN para un rotor de 5 aspas.

En la Tabla 11 se muestran los datos obtenidos antes y después del proceso de desgasificado utilizando el rotor de 5 aspas. En la Figura 29 se muestra la cinética de desgasificado de aluminio con un rotor de 5 aspas, con base en las concentraciones adimensionales presentadas en la Tabla 7 para 3, 6, 9 y 12 minutos de desgasificado.

Tabla 11. Concentraciones iniciales y finales de hidrógeno; y relación de hidrógeno para un rotor de 5 aspas.

Tiempo (s)	[H] <sub>i</sub>	[H] <sub>f</sub>	Relación de H
0	0.440	0.440	1
180	0.794	0.491	0.618
360	0.661	0.362	0.548
540	0.661	0.348	0.526
720	0.552	0.309	0.560

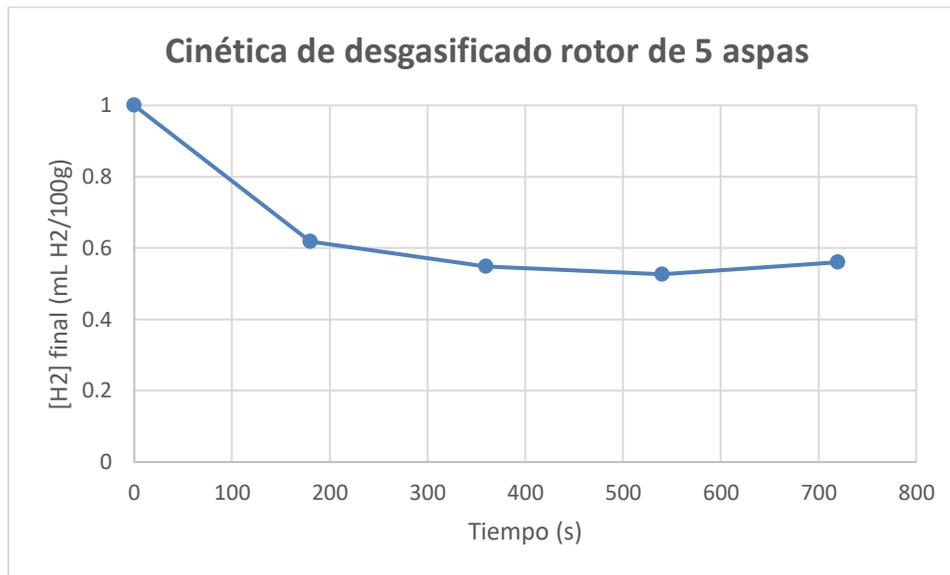


Figura 29. Cinética de desgasificado del rotor de 5 aspas.

En la Tabla 12 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas de tensión provenientes del desgasificado con el rotor de 5 aspas para las probetas gasificadas, y desgasificadas durante 9 y 12 minutos.

Tabla 12. Descripción de la zona de fractura de las probetas de tensión del rotor de 5 aspas de manera general.

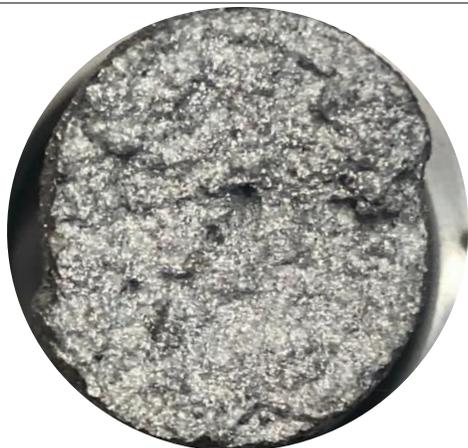
Probeta	UTS (MPa)	YS (MPa)	% Elongación
<b>Blanco</b>	53.679 ± 0.000*	45.952 ± 0.000*	--**
<b>Desgasificado 9 min</b>	67.633 ± 9.253	43.433 ± 3.338	13.17 ± 0.014
<b>Desgasificado 12 min</b>	70.166 ± 3.352	41.194 ± 1.430	19.673 ± 0.885

\* No se obtuvo una desviación estándar debido a que solo se obtuvieron datos de una probeta, porque la otra se fracturó de la agarradera.

\*\* Ambas piezas fracturaron de las agarraderas, por lo que no se obtuvo el % de Elongación para ninguna pieza.

Tras hacer las pruebas de tracción se tomaron fotos a las probetas provenientes de las pruebas con el rotor de 3 aspas en la zona de fractura las cuales se describen en la Tabla 13 (no se incluyen los blancos pues fueron los mismos que se utilizaron con el rotor anterior).

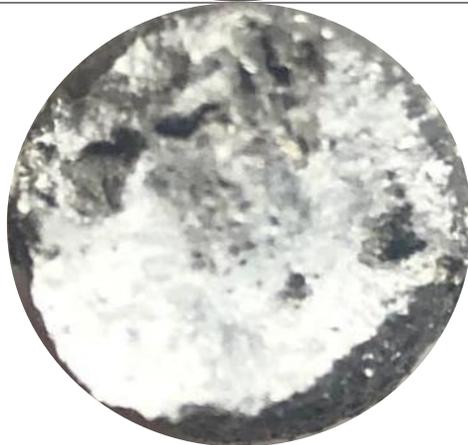
*Tabla 13. Descripción de la zona de fractura de las probetas de tensión del rotor de 5 aspas.*



Desgasificado 9 min (Pieza G)  
Esta pieza falló de una de las agarraderas, debido a un poro al centro de la pieza. Posee además una pequeña cantidad de poros, pero de menor tamaño que el central.



Desgasificado 9 min (Pieza H)  
Esta pieza presenta escoria y poros de gran dimensión al centro. Falló fuera de las marcas esperadas para poder cuantificar el porcentaje de elongación tras el ensayo de tracción.



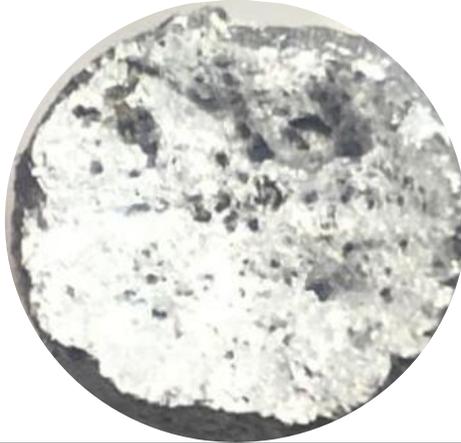
Desgasificado 9 min (Pieza I)  
Esta pieza contiene escoria en los poros de gran tamaño que se observan en la parte superior de la imagen, así como en la parte derecha de la misma. No se observan poros pequeños distintos a los de la escoria.

---



Desgasificado 12 min (Pieza J)

Esta pieza no presenta poro alguno; no obstante, se fracturó fuera de la zona esperada y no se logró obtener una buena medida del porcentaje de elongación de ella. La parte superior de la imagen nos indica que fue la última zona en fracturarse.



Desgasificado 12 min (Pieza K)

Esta pieza presentó pequeños poros en la parte central de la fractura, los cuales son de mucho menor tamaño que los encontrados en las piezas de 9 minutos de degasificación.



Desgasificado 12 min (Pieza L)

Pieza casi completamente sana, excepto por el poro que se encuentra en la parte superior de la imagen. Desafortunadamente se fracturó apenas arriba de las marcas para determinar su porcentaje de elongación.

---

En la Figura 30 se muestra la comparación entre las propiedades mecánicas obtenidas después la prueba de tensión a las probetas resultantes usando el rotor de 5 aspas.

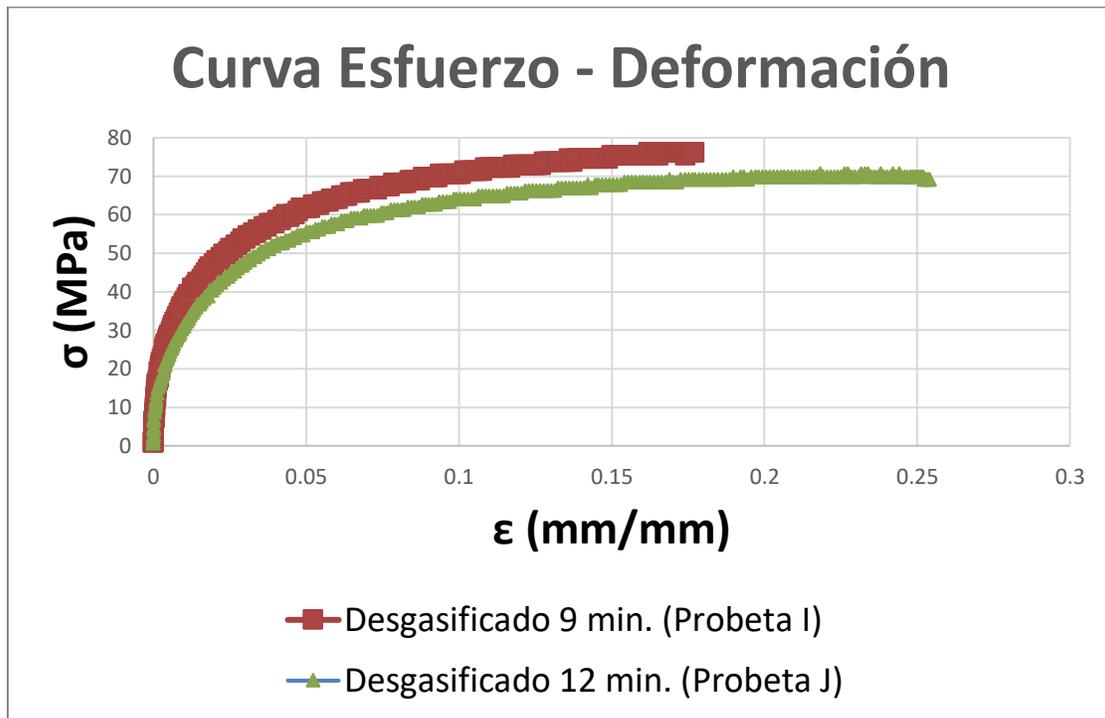


Figura 30. Comparación de las curvas esfuerzo-deformación resultantes del desgasificado con rotor de 5 aspas.

### 3.3 COMPARACIÓN

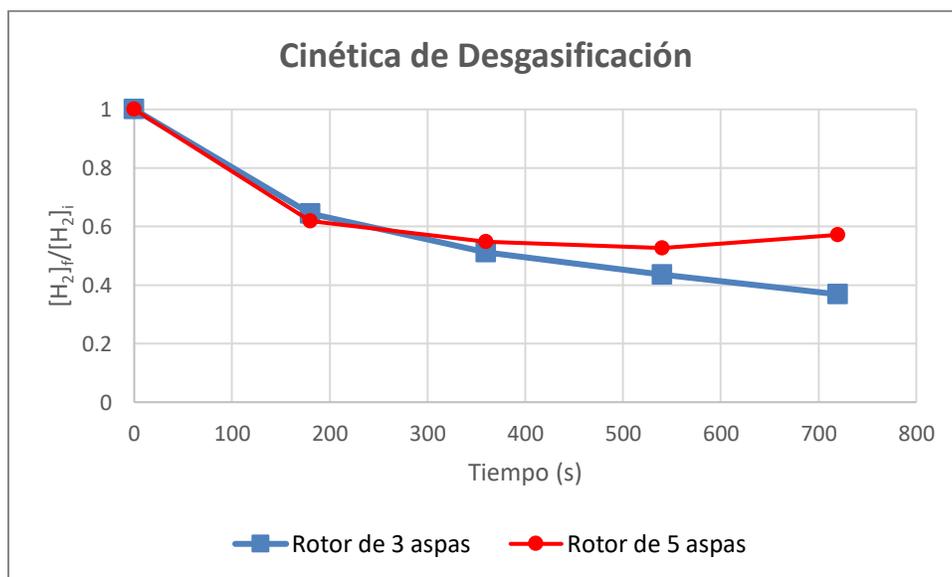


Figura 31. Comparativo entre la cinética de desgasificación presentada por los rotors de 3 y 5 aspas.

En la Figura 31 se observa la tendencia del desgasificado entre el rotor de 3 aspas (azul) y el de 5 aspas (rojo). Se obtuvo un mejor proceso de desgasificación utilizando un rotor de 3 aspas ya que se obtiene una concentración de hidrógeno alrededor de 1.5 veces menor que utilizando un rotor de 5 aspas tras 12 minutos de desgasificación.

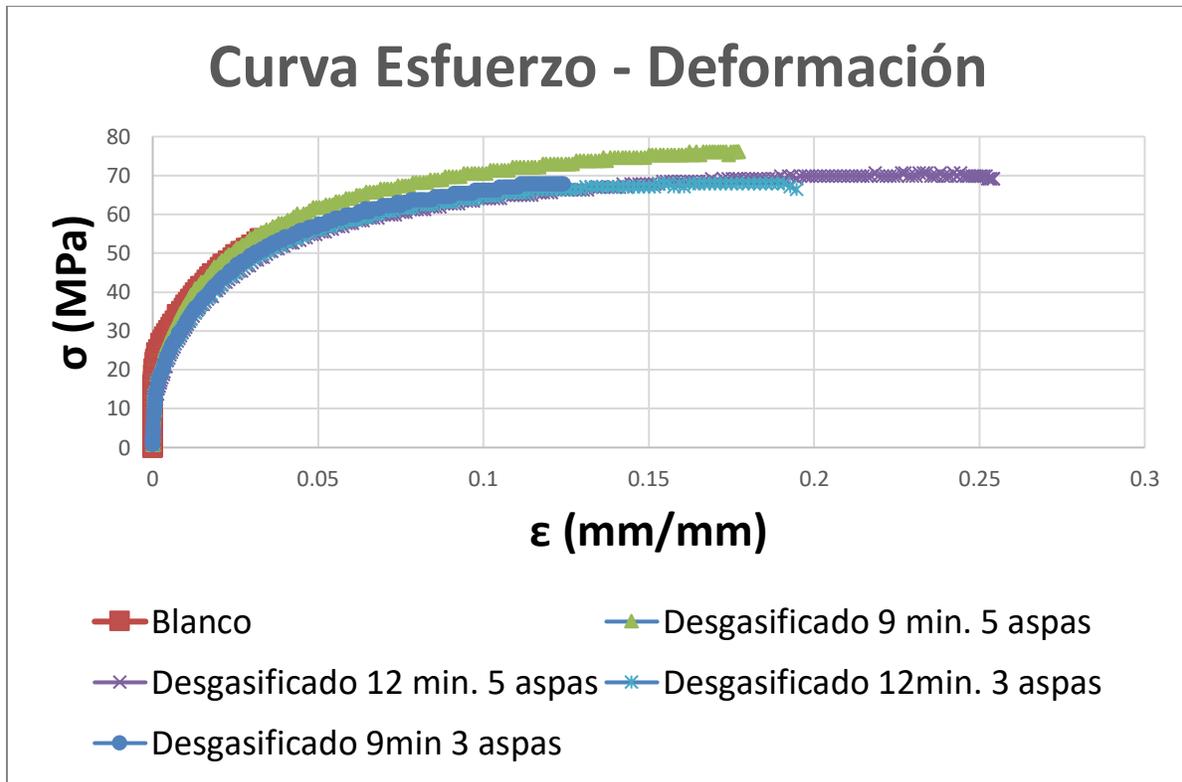


Figura 32. Gráfico esfuerzo - deformación comparativo de los tiempos de desgasificado de ambos rotores.

En la Figura 32 se muestra las curvas de esfuerzo – deformación de manera comparativa de los tiempos de desgasificación de las probetas que mostraron un mejor desempeño entre los 2 rotores probados.

### 3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al comparar la cinética de desgasificación como se hizo en la Figura 31, se encontró con que el rotor de 3 aspas presenta aproximadamente 1.5 veces mejor eficiencia en el proceso de desgasificado respecto al rotor de 5 aspas después de 12 minutos de proceso.

Ambos rotores tienen un comportamiento similar durante los primeros 6 minutos, donde la diferencia entre ellos es mínima; sin embargo, la diferencia comienza a ser un poco más perceptible tras 9 minutos de proceso, pues justo en ese momento parece que el rotor de 5 aspas sería mejor; no obstante al alcanzar los 12 minutos de desgasificación la concentración de hidrógeno presente no presenta una gran variación, lo cual lleva a la conclusión de que esta concentración permanecerá constante respecto al tiempo y que esta será la menor concentración de hidrógeno que podrá alcanzar el rotor de 5 aspas, por lo que sería innecesario llevar a cabo una medición a un tiempo mayor. Mientras que en el caso del rotor de 3 aspas demostró un mejor desempeño de manera notable; incluso podría haberse realizado una medición más después de 15 minutos de desgasificado para observar si la concentración de hidrógeno presente continuaría descendiendo o lograría permanecer constante respecto al tiempo.

El comportamiento encontrado por ambos rotores se debe a la geometría del rotor; ya que como se reportó en un trabajo anterior (Hernández Ávila, 2019), en el caso del rotor de 5 aspas, el número de aspas retiene el gas de purga impidiendo la interacción de manera homogénea del rotor con el metal líquido, creando una zona de baja presión justo debajo del rotor, creando una burbuja relativamente grande que al reventarse se distribuye en el baño líquido, provocando que el proceso de desgasificación sea intermitente, pues depende del tiempo que tarde en formarse-reventarse la burbuja bajo el rotor; esto explicaría el fenómeno de salpicadura de metal líquido hacia el exterior del horno que se presentó durante la experimentación. Mientras en el caso del rotor de 3 aspas, el número de aspas permitió una mejor distribución entre el gas en el baño líquido, proporcionando una mejor interacción entre el rotor y el metal, dando como resultado burbujas más pequeñas y así una mayor expulsión de hidrógeno hacia la superficie; demostrando ser incluso más seguro, pues no mostró expulsión de metal hacia el exterior del horno.

Desafortunadamente, se encontraron muchos poros en las piezas al momento de realizar el ensayo de tracción en zonas donde no se esperaban (agarraderas), así como residuos de escoria. Todo ello hizo un poco más difícil el tratamiento de datos, por ejemplo, en el caso del rotor de 3 aspas se encontró escoria en la probeta que había presentado mejor desempeño para ese rotor, por lo que -para ese caso- fue una limitante que pudo determinar un resultado no muy favorable. Por lo que se podría tener un poco más de cuidado al momento de colar los moldes para ensayo de tracción retirando mejor la escoria y realizando una colada más cuidadosa para no producir tantos poros en las agarraderas, pues estos pueden crearse al momento de vaciar el metal líquido en el molde. Esto también se observó en las probetas de tensión procedentes del proceso de desgasificación con el rotor de 5 aspas; sin embargo, se observó que se tuvo mucho más cuidado en las últimas probetas de 12 minutos de proceso.

Contrario a lo esperado por la cinética de desgasificación obtenida ambos rotores utilizando el AISCAN y probablemente afectado por lo explicado anteriormente, se encontró que el rotor de 5 aspas presentó mejores propiedades mecánicas promedio tanto para el UTS como para el YS (donde para ambos rotores el UTS hallado corresponde al aluminio 99.9 a 99.99% de pureza, esto indica que aún con todos los inconvenientes experimentados las probetas producidas poseen un mejor UTS que el que les correspondería, pues el aluminio utilizado en esta tesis tiene un 99.5% de pureza); pero no para el porcentaje de elongación; por lo que, sin considerar los factores de colada y de escoria, al comparar en un gráfico de esfuerzo-deformación los mejores desempeños de cada tiempo para cada rotor (Figura 32), se encontró que para ambos tiempos (con todo y sus defectos) el rotor de 5 aspas fue mejor. Esto no quiere decir que el rotor de 5 aspas desgasifica mejor, ya que con mediciones se ha comprobado que es todo lo contrario, es decir, el rotor de 3 aspas desgasifica ligeramente más rápido que el de 5 aspas. Entonces, la posible explicación del porqué las propiedades mecánicas son mejores con 5 aspas que con 3 aspas pues se puede deber a inclusiones no-metálicas de tipo exógenas formadas por la oxidación del aluminio líquido con el medio ambiente, que a su vez produjeron escoria atrapada en el baño líquido, que se obtuvieron en mayor cantidad con el rotor de 3 aspas que con el de 5 aspas debido a la incorporación mecánica de escoria durante la agitación, haciendo que el aluminio se recontaminara. Estas inclusiones no metálicas fueron identificadas

según las características que (Kumai, Hiromoto, Matsunaga, Ohashi, & Ono, 1974) describe las cuales son: tamaño mayor a 50  $\mu\text{m}$  (las obtenidas se ven a simple vista), forma irregular, ocurrencia esporádica, promotores de fallas. Nuevamente, esto a primera vista pudiese representar una desventaja del diseño de 3 aspas propuesto, sin embargo, desde otra óptica, se puede ver como un rotor que agita mejor y que con el uso de baffles, disminuiría el vórtice y con esto se evitaría recontaminar al aluminio, es decir, desgasificaría mejor y se evitaría ensuciar al metal con presencia de baffles u otros modificadores de flujo, lo cual en combinación con el rotor de 3 aspas puede promover un metal de altas propiedades mecánicas.

Además, hay variables que no se pudieron controlar en el llenado de los moldes para la elaboración de las probetas de tensión, que pudieron influir en las propiedades mecánicas obtenidas. En particular, la presencia de partículas no metálicas pudiesen ser la causa de la no coincidencia entre las propiedades mecánicas medidas y el contenido de hidrógeno contenido en el metal líquido.

## **4. CONCLUSIONES**

Este trabajo demostró utilizando una técnica cuantitativa – in situ (AISCAN) que el rotor de 3 aspas mejoró la remoción de hidrógeno respecto al de 5 aspas para los tiempos experimentados (3, 6, 9 y 12 minutos). Esta mejora se debió a un proceso más uniforme en la distribución del gas de purga hacia el aluminio líquido, permitiendo que el gas que ingresaba al baño líquido fuese interaccionando con el metal al entrar; mientras que el rotor de 5 aspas se comportó como un capacitor de gas, el cual acumulaba una burbuja de gas que al deshacerse proyectaba aluminio hacia el exterior del baño líquido, haciendo intermitente el proceso de desgasificado.

Los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas para ambos rotores fueron afectados por la limpieza del aluminio en las probetas, por lo cual no demuestran la relación rotor inyector – propiedades mecánicas, aunque para ambos rotores se mejoró sobre todo la elongación al aumentar de 0 a 9 y a 12 minutos de desgasificado.

Las dificultades y contratiempos producidos por los moldes de silicato- $\text{CO}_2$  al momento de colar el metal líquido pudieron deberse a la impracticabilidad de esta técnica, ya que su forma de llenado no es homogénea y genera cavidades

dentro de la pieza solidificada, lo cual no permitió determinar las propiedades mecánicas presentes tras la desgasificación. Por ello, se recomienda que el Departamento de Metalurgia adquiera un molde específico para la elaboración de probetas de tensión que cumpla la norma ASTM E-8 para mejorar las condiciones de trabajo y disminuir los defectos en las piezas causados por la colada del metal líquido.

De este trabajo surgen las siguientes sugerencias para proyectos de tesis futuras: evaluar el desempeño de este rotor de 3 aspas en una planta industrial; valorar el rotor en un modelo con deflectores, así como en otro tipo de reactores continuos. Finalmente, se sugiere seguir mejorando la parte de experimentación, es decir, ver la manera en que se pueda minimizar el fenómeno de salpicadura de metal líquido hacia el exterior del horno; así como el uso de una malla de acero fina recubierta con pintura de circonio, como se hace en industria, para asegurar que al momento de realizar la colada en los moldes de silicato CO<sub>2</sub> no ingrese escoria. Dicha malla deberá ser reemplazada cuando las dimensiones de los orificios incrementen, pues esta podría estar solubilizándose en el aluminio líquido.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

ABB Inc. (2003). *AISCAN User's Manual*. Québec, Canadá: ABB Inc. Analytical and Advanced Solutions.

Abreu López, D., Amaro Villeda, A., Acosta González, F., González Rivera, C., & Ramírez Argáez, M. (2017). Effect of the Impeller Design on Desgasification Kinetics Using the Impeller Injector Technique Assisted by Mathematical Modeling. *Metals*, 132 - 146. doi:10.3390/met7040132

Abreu López, D., Dutta, A., Camacho Martínez, J., Trápaga Martínez, G., & Ramírez Argáez, M. (2018). Mass Transfer Study of a Batch Aluminum Degassing Ladle with Multiple Designs of Rotating Impellers. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 70, 2958 - 2967.

Aluminium, W. (2019). Retrieved from World Aluminium: <http://www.world-aluminium.org/statistics/>

American Foundrymen's Society, Inc. (1998). *Measurement and Removal of Hydrogen in Aluminium Alloys*. Illinois, Estados Unidos de Norteamérica: ASF.

Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie. (2013). *El Aluminio*. Retrieved from Ventajas del Aluminio en la Construcción: <https://www.asoc-aluminio.es/el-aluminio/ventajas-del-aluminio-en-la-construccion>

Camacho Martínez, J. L., Ramírez Argáez, M. A., Zenit Camacho, R., Juárez Hernández, A., Barceinas Sánchez, O., & Trápaga Martínez, G. (2010). Physical Modelling of an Aluminium Degassing Operation with Rotation Impellers - A Comparative Hydrodynamic Analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 581-591. doi:10.1080/10426910903367386

Cámara de Diputados, & CESOP, C. (2018). *La Industria del Acero y el Aluminio en la relación comercial México-EEUU*. Retrieved from [www5.diputados.gob.mx > index.php > esl > content > download > file](http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/content/download/file)

Cruz Méndez, W. F. (2017). *Evaluación y diseño de un nuevo rotor-inyector para el proceso de desgasificado de aluminio en un modelo físico de agua*. México: Tesis de Maestría. UNAM.

El Economista. (2019). Retrieved from El Economista: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Industria-del-aluminio-con-gran-potencial-en-Queretaro-20191001-0120.html>

Grupo INFRA. (n.d.). *Desgasificado de Aluminio con Ar*. Retrieved from <http://grupoinfra.com/files/libreria-de-descargas/desgasificado-aluminio.pdf>

Hernández Ávila, E. (2019). *Propuesta de un nuevo diseño de rotor para el desgasificado de aluminio asistido por modelado matemático y validado con modelado físico*. México, CDMX: Tesis de Licenciatura. UNAM.

- Hernández Hernández, M., Camacho Martínez, J., González Rivera, C., & Ramírez Argáez, M. (2016). Impeller design assisted by physical modeling and pilot plant trials. *Journal of Materials Processing Technology*, 1 - 8.
- Hernández Hernández, M., Cruz Mendez, W., González Rivera, C., & Ramírez Argáez, M. (2014). Effect of Process Variables on Kinetics and Gas Consumption in Rotor-Degassing Assisted by Physical and Mathematical Modeling. *Materials and Manufacturing Processes*, 216 - 221. doi:10.1080/10426914.2014.952303
- Kumai, K., Hiromoto, T., Matsunaga, H., Ohashi, T., & Ono, T. (1974). *Tetsu to Hagané*.
- Mancilla, E., Cruz Méndez, W., E. Garduño, I., González Rivera, C., Ramírez Argáez, M., & Ascanio, G. (2017). *Comparison of the hydrodynamic performance of rotor-injector devices in a water physical model of an aluminium degassing ladle*. México: ELSEVIER. doi:10.1016/j.cherd.2016.11.031
- Mancilla, E., Cruz Méndez, W., Ramírez Argáez, M., González Rivera, C., & Ascanio, G. (2019). Experimental Measurements of Bubble Size Distributions in a Water Model and its Influence on the Aluminum Kinetics Degassing. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97, 1729 - 1740.
- Minería en Línea. (2019). Retrieved from La demanda global de aluminio superará el crecimiento: Fitch: <https://mineriaenlinea.com/2019/08/la-demanda-global-de-aluminio-superara-el-crecimiento-fitch/>
- Uribe Antonio, D. (2017). *Desgasificado de aluminio a nivel laboratorio de fundición con rotor rediseñado*. México: Tesis de Licenciatura. UNAM.

## 6. ANEXO: COMPOSICIÓN QUÍMICA

Program: AL-011

11/12/2019 12:09:16 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No.: Al

Quality

Usuario: Luis

Analista:

Comentarios:

No	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	0.0473	0.3267	0.0042	0.0154	0.0299	0.0145	0.0056	0.0035	0.0067
2	0.0349	0.506	0.0044	0.0168	0.0375	0.0137	0.0061	0.0038	<0.0020

No	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
1	0.0078	0.0044	<0.0020	0.0002	99.5
2	0.0113	0.0042	<0.0020	0.0002	99.4

Program: AL-011

11/12/2019 12:09:16 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average and RSD (n=2)

Elements: Concentration

Muestra No.: Al

Quality

Usuario: Luis

Analista:

Comentarios:

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
$\bar{x}$	<b>0.0411</b>	<b>0.4166</b>	<b>0.0043</b>	<b>0.0161</b>	<b>0.0337</b>	<b>0.0141</b>	<b>0.0059</b>	<b>0.0037</b>	<b>0.0043</b>
s	0.0088	0.1271	0.0002	0.0010	0.0054	0.0005	0.0003	0.0002	0.0035
sr	21.407	30.500	3.927	5.909	15.985	3.734	5.521	5.630	80.908

	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
$\bar{x}$	<b>0.0096</b>	<b>0.0043</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.0002</b>	<b>99.4</b>
s	0.0025	0.0002	0.0001	0.0000	0.1237
sr	25.761	4.341	5.453	2.611	0.124

Figura 33. Tablas de composición del aluminio comercial utilizado.