



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

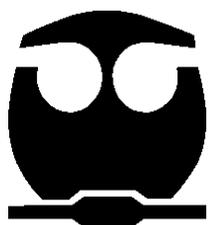
**“DESGASIFICADO DE ALUMINIO A  
NIVEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN  
CON ROTOR REDISEÑADO”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

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

**DANIELA URIBE ANTONIO**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.,**

**AÑO 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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





## **JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE: M. EN M. ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO**

**VOCAL: DR. MARCO AURELIO RAMIREZ ARGÁEZ**

**SECRETARIO: M. EN I. AGUSTIN GERARDO RUÍZ TAMAYO**

**1er. SUPLENTE: M. EN I. CLAUDIA FLORES VARGAS**

**2do. SUPLENTE: DR. JUAN SOLORZANO LÓPEZ**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO DE FUNDICIÓN, EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.**

**ASESOR DE TEMA: DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ \_\_\_\_\_**

**SUPERVISOR TÉCNICO: M EN I. AGUSTÍN GERARDO RUÍZ TAMAYO \_\_\_\_\_**

**SUSTENTANTE: DANIELA URIBE ANTONIO \_\_\_\_\_**



## *Agradecimientos*

Agradezco la beca recibida a través del proyecto PAPIIT clave IN114115, titulado "Diseño de un rotor y olla de desgasificado de aluminio mediante modelado físico y matemático" a cargo del Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.



## Índice de FIGURAS.

Número de FIGURA	Descripción de FIGURA	Número de página
<b>1</b>	Ciclo de vida del aluminio.	9
<b>2</b>	Clasificación general de aleaciones de aluminio.	11
<b>3</b>	Cinética de desgasificación entre métodos de desgasificación rotor inyector, tapón poroso y lanza.	14
<b>4</b>	Esquema de la plataforma de prueba.	17
<b>5</b>	Esquema de la remoción de hidrógeno a la atmósfera en aluminio líquido.	19
<b>6</b>	Diagrama esquemático del aparato de Ransley.	21
<b>7</b>	Diagrama LECO RH de flujo de gas simplificado.	23
<b>8</b>	Diagrama esquemático del método de fusión al vacío.	25
<b>9</b>	Diagrama esquemático de TELEGAS.	27
<b>10</b>	Sistema completo de AISCAN para monitorear la concentración de hidrógeno en aluminio.	29
<b>11</b>	Diagrama esquemático del dispositivo de CHAPEL.	32
<b>12</b>	Diagrama esquemático del método electroquímico.	34
<b>13</b>	Diagrama esquemático de la prueba de presión reducida.	35
<b>14</b>	Rotores inyectoros utilizados para la prueba de desgasificación de aluminio puro comercial.	41
<b>15</b>	Componentes de la Planta piloto. A) equipo AISCAN, B) termopar y sonda, C) computadora con software del ALSCAN, D) horno de resistencia con un crisol que contiene el aluminio líquido, E) rotor inyector con argón, F) flujometro, G) tanque de argón y nitrógeno.	41
<b>16</b>	Diálogos de calibración de equipo AISCAN.	42
<b>17</b>	Datos y gráfica obtenida al realizar la prueba.	43
<b>18</b>	Sonda y termopar que se utilizaron para la medición de hidrógeno.	44
<b>19</b>	Gasificación de aluminio líquido en horno de quemadores a temperatura de 900 °C.	45
<b>20</b>	Gasificación de aluminio líquido en horno de resistencias a temperatura de 800 °C.	46
<b>21</b>	Medición de hidrogeno después de desgasificar.	46
<b>22</b>	Desgasificación de aluminio líquido con rotor inyector rediseñado a 240 RPM.	47
<b>23</b>	Moldes de silicato de sodio-CO <sub>2</sub> para obtener probetas de tensión.	48
<b>24</b>	Toma de temperatura en la cuchara de aluminio antes del vaciar al molde.	49



\*\*\*\*\*Continuación de Índice de FIGURAS\*\*\*\*\*

<b>Número de FIGURA</b>	<b>Descripción de FIGURA</b>	<b>Número de página</b>
<b>25</b>	Vaciado de aluminio líquido gasificado en molde de probeta de tensión.	49
<b>26</b>	Vaciado de aluminio líquido desgasificado en molde de Probeta de tensión.	50
<b>27</b>	Probetas de tensión antes y después de desmontar.	50
<b>28</b>	Prueba de tensión.	51
<b>29</b>	Fracturas de las probetas de tensión: gasificada, desgasificada 7 minutos, desgasificada 12 minutos, desgasificada 12 minutos con inclusiones.	51
<b>30</b>	Representación de medición de hidrógeno del software ALSCAN en 1 minuto.	53
<b>31</b>	Representación de medición de hidrógeno del software AISCAN en 3 minutos.	54
<b>32</b>	Representación de medición de hidrógeno del software AISCAN en 7 minutos.	54
<b>33</b>	Representación de medición de hidrógeno del software AISCAN en 12 minutos.	55
<b>34</b>	Cinética de desgasificación para rotor rediseñado de 5 aspas.	57
<b>35</b>	Cinética de desgasificación para rotor de 4 aspas.	57
<b>36</b>	Cinética de desgasificación comparativo entre el rotor rediseñado de 5 aspas y el rotor de 4 aspas.	58
<b>37</b>	Curva de esfuerzo-deformación para prueba de Gasificado con rotor rediseñado.	60
<b>38</b>	Curva de esfuerzo-deformación para prueba de desgasificado en 7 minutos con rotor rediseñado.	61
<b>39</b>	Curva de esfuerzo-deformación para prueba de desgasificado en 12 minutos con rotor rediseñado.	62
<b>40</b>	Curva de esfuerzo-deformación para prueba de desgasificado en 12 minutos con rotor rediseñado y presencia de escoria.	63
<b>41</b>	Curva de esfuerzo-deformación comparativa entre prueba de desgasificado y gasificada con rotor rediseñado.	64
<b>42</b>	Metalografía de la probeta de gasificada tomada en aumento de 100x.	64
<b>43</b>	Metalografía de la probeta desgasificada en 7 minutos tomada en aumento de 100x.	65
<b>44</b>	Metalografía de la probeta desgasificada en 12 minutos tomada en aumento de 100x.	65
<b>45</b>	Metalografía de la probeta desgasificada en 12 minutos con escoria tomada en aumento de 100x.	66



## Índice de tablas

<b>Número de Tabla</b>	<b>Descripción de Tabla</b>	<b>Número de página</b>
<b>1</b>	Análisis químico por espectroscopia de emisión por chispa.	52
<b>2</b>	Concentraciones iniciales y finales de hidrógeno durante las prueba de gasificación y desgasificación para un rotor rediseñado de 5 aspas	56
<b>3</b>	Concentraciones iniciales y finales de hidrógeno durante las prueba de gasificación y desgasificación para el rotor de 4 aspas.	56
<b>4</b>	Propiedades mecánicas obtenidas con rotor rediseñado de 5 aspas.	60



# ÍNDICE

Índice de FIGURAS.....	4
Índice de <b>Tablas</b> .....	6
1 Introducción. ....	9
1.1 Reseña histórica del aluminio. ....	9
1.2 Clasificación del aluminio. ....	10
1.3 Tratamiento del metal líquido. ....	11
1.3.1 Refinación. ....	11
1.3.2 Modificación. ....	12
1.3.3 Desgasificación. ....	12
1.4 Métodos de desgasificación de aluminio. ....	13
1.5 Descripción de algunos modelos físicos y matemáticos para desgasificación de aluminio. ....	15
1.6 Mecanismo de eliminación de hidrógeno en aluminio líquido.....	18
1.7 Métodos de medición de hidrógeno. ....	19
1.7.1 Métodos cuantitativos de laboratorio. ....	19
1.7.1.1 Método de sub-fusión de Ransley.....	19
1.7.1.2 Método de fusión de portadores de nitrógeno. ....	21
1.7.1.3 Método de fusión al vacío. ....	23
1.7.2 Métodos cuantitativos in- situ. ....	25
1.7.2.1 Método de TELEGAS. ....	25
1.7.2.2 Método AISCAN. ....	27
1.7.2.3 Método de CHAPEL. ....	31
1.7.2.4 Método electroquímico. ....	32



1.7.3	Métodos semi- cuantitativos.....	34
1.7.3.1	Prueba de presión reducida (RPT). ....	34
1.7.3.2	Prueba de SEVERN .....	35
1.7.3.3	Prueba inicial de la burbuja.....	36
1.7.3.4	Método de atenuación ultrasónica .....	37
1.8	Hipótesis.....	39
1.9	Objetivos. ....	39
2	Metodología de trabajo.....	40
2.1	Manejo y calibración del equipo AISCAN.....	42
2.2	Conexión de los equipos utilizados. ....	43
2.3	Preparación del aluminio. ....	44
3	Resultados y discusión. ....	52
3.1	Resultados. ....	52
3.2	Discusión. ....	67
4	Conclusiones. ....	72
5	Bibliografía.....	73



# 1 Introducción.

## 1.1 Reseña histórica del aluminio.

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre representando un 8%. No se encuentra en estado libre, pero sus compuestos se han utilizado por la humanidad desde los tiempos más remotos (arenas ricas en silicatos hidratados de aluminio en alfarería, sales de aluminio en colorantes y medicinas).

El aluminio es un metal suave y ligero con el que, mezclado con pequeñas cantidades de otros metales, se obtiene una amplia gama de aleaciones con propiedades específicas para un sinnúmero de aplicaciones. [1]

Con un ciclo de vida sostenible de principio a fin, se puede afirmar que el aluminio es prácticamente 100% reciclable, su tasa de recuperación en construcción es de un 95%, y su reciclado ahorra el 95% de la energía usada en su producción inicial. El ciclo de vida de un aluminio se puede observar en la FIGURA 1.

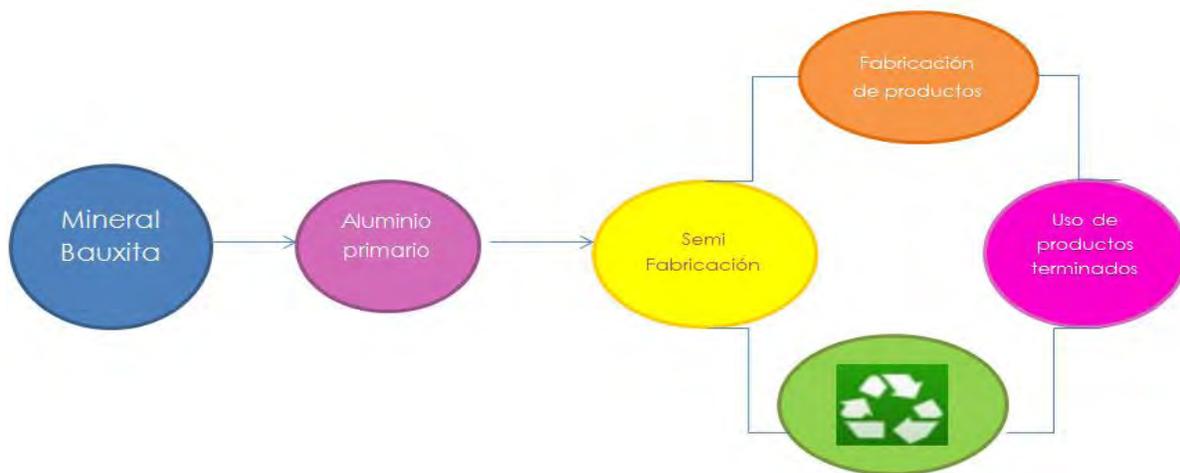


FIGURA 1. Ciclo de vida del aluminio.

El aluminio posee excelentes propiedades que lo convierten en un material con características y propiedades excelentes. Posee



propiedades tales como: baja densidad, elevada resistencia mecánica, alta conductividad térmica y eléctrica, una gran ligereza, fluidez, maleabilidad, durabilidad, buena resistencia a la corrosión, buen acabado y una gran facilidad para ser procesado: fundirse, maquinarse, laminarse, etc., lo cual aporta a elementos contruidos con él grandes ventajas en la fabricación, e infinidad de usos de productos terminados de larga vida útil y de gran influencia en nuestras vidas. [2]

## **1.2 Clasificación del aluminio.**

Una gran ventaja del aluminio, es que tiene una gran facilidad para alearse con otros metales como se observa en la FIGURA 2., por lo cual, las aleaciones de aluminio se dividen en dos grupos: aleaciones para fundición ACA, por sus siglas en inglés Aluminum Cast Alloys y las aleaciones para procesos metalmeccánico AWA, por sus sigla en inglés Aluminum Wrought Alloys.

La interpretación de designación de aleaciones para procesos metalmeccánicos, se usa un sistema de cuatro dígitos para identificar aluminio conformado y sus aleaciones (xxxx). El primer dígito indica el grupo de la aleación. El segundo dígito indica las modificaciones de la aleación original o los límites de impureza. Los dos últimos dígitos identifican la aleación de aluminio o indica la pureza del aluminio. En este proceso se obtiene piezas automotrices y gran cantidad de láminas.

En el aluminio y sus aleaciones fundidas, se usa un sistema de designación numérico de 4 dígitos (xxx.x). El primer dígito indica el principal elemento aleante. El segundo y tercer dígito identifican la aleación de aluminio o pureza, y el último dígito, el cual es separado por medio de un punto, indica la forma del producto: fundición o lingote. [2]

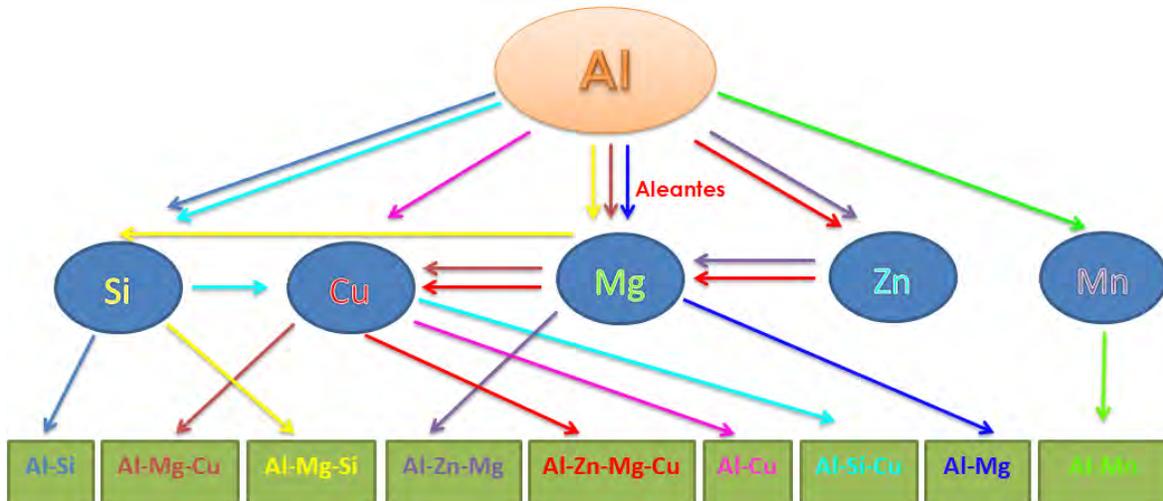


FIGURA 2. Clasificación general de aleaciones de aluminio.

### 1.3 Tratamiento del metal líquido.

El principal objetivo en la industria del aluminio es mejorar la calidad del metal líquido. La calidad de una pieza colada, ligada a sus propiedades mecánicas, está determinada por: el tamaño, forma y distribución de las fases desarrolladas durante la solidificación, así como el espaciado interdendrítico y tamaño de grano.

La fusión del metal y el tratamiento en fase líquida, proveen la calidad del metal líquido para producir piezas de calidad metalúrgica adecuada. La calidad del metal líquido está gobernada por:

- Refinamiento de grano y modificación
- Composición química, presencia de impurezas y nivel de gas disuelto.
- Cantidad de inclusiones, temperatura de colada.

#### 1.3.1 Refinación.

Uno de los principales tratamientos del metal líquido es la refinación, la cual se basa primordialmente en la forma del grano (macro-estructuralmente). Normalmente se desea una estructura de grano equiaxiado y fino en las piezas coladas de aluminio. El tipo y



tamaño de granos formados están determinados por la composición de la aleación, la rapidez de solidificación y la adición de aleaciones maestras (refinadores de grano), las cuales proveen sitios para la nucleación heterogénea de grano y la porosidad por hidrógeno. Los refinadores más comunes son:

- Temporales:  
Sales de Ti,  $K_2TiF_6$  y aleaciones maestras Al-Ti: contienen partículas de  $TiAl_3$ .
- Permanentes:  
Mezclas de sales de Ti y B:  $K_2TiF_6$ ,  $KBF_4$ ,  $K_2ZrF_6$  y aleaciones maestras: Al-5Ti-1B, Al-5Ti-0.2B.

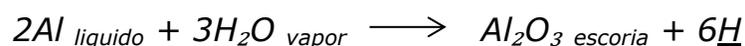
### **1.3.2 Modificación.**

El segundo tratamiento es la modificación, el cual es un cambio de la morfología del Si eutéctico acicular o en forma de placas a globular fibroso, debido al cambio en la cinética de crecimiento del silicio en la cual los modificadores modifican las tensiones superficiales en el sistema de aleación y cambian consecuentemente la forma del silicio a nivel microscópico. Los modificadores más utilizados son:

- Temporales: sodio (Na)
- Permanentes: estroncio (Sr), antimonio (Sb)

### **1.3.3 Desgasificación.**

Por último, se encuentra la desgasificación, motivo de este proyecto. El aluminio en estado líquido tiene una tendencia muy fuerte a absorber gas hidrógeno del medio ambiente. La fuente más común de contaminación por hidrógeno es la humedad del aire, la cual al entrar en contacto con la superficie caliente del metal fundido reacciona produciendo óxido de aluminio e hidrógeno como se presenta en la siguiente reacción:





El hidrógeno resultante es absorbido fácilmente por el metal caliente manteniéndose en solución, mientras el aluminio se encuentra en la fase líquida.

#### **1.4 Métodos de desgasificación de aluminio.**

Hay varios métodos para desgasificar el aluminio, algunos son muy novedosos gracias al desarrollo de tecnología y otros son muy tradicionales. Los nuevos métodos pretenden aumentar la eficiencia del proceso. A continuación se mencionan algunos métodos de desgasificación <sup>[3]</sup>:

1. **Tabletas de desgasificación:** es una técnica que ya está en desuso debido al daño a la salud que pueden causar los gases resultantes del proceso. Se usan tabletas de hexacloroetano ( $C_2Cl_6$ ) las cuales generan cloruro de aluminio en forma gaseosa que atrapa al hidrógeno y lo libera a la atmósfera. Este proceso no es tan eficiente debido a que la burbuja es muy grande y tiene una relación área/volumen muy baja.
2. **Desgasificado natural:** se entiende que la solubilidad del hidrógeno en el aluminio disminuye al bajar la temperatura, por lo que al bajar la temperatura del baño se produce la desgasificación del aluminio. Este proceso no es eficiente porque la concentración de hidrógeno tarda mucho tiempo en bajar.
3. **Inyección de gas de purga con lanza:** por medio de una lanza con recubrimiento refractario se inyecta un gas de purga y se agita constantemente para distribuir el gas en el baño. Este método no es muy recomendable ya que la dispersión de las burbujas no es homogénea y el tamaño de las burbujas son muy grandes, por lo cual gran parte del aluminio líquido queda con gran cantidad de hidrógeno.



4. Inyección de gas de purga con tapones porosos: se utilizan tapones porosos de grafito y se usan para distribuir burbujas pequeñas en el metal líquido, requiere de agitación y no se puede controlar la distribución de burbujas en el baño, en consecuencia existen zonas muertas.
5. Inyección de gas de purga con rotor inyector: se utilizan rotores de grafito y una lanza que conecta al rotor con un componente el cual gira a ciertas RPM e inyecta gas de purga al metal líquido. La finalidad del rotor es promover un flujo turbulento y una buena distribución de las burbujas finas de gas de purga a lo largo y ancho del volumen del sistema a manera de maximizar la eficiencia del proceso. Las variables a controlar son las RPM, geometría del rotor, flujo de gas y tiempo de tratamiento.

Se ha demostrado en trabajos anteriores que el uso del rotor inyector mejora el desgasificado de aluminio respecto a las otras técnicas de desgasificación con inyección de gas (ver FIGURA 3.).

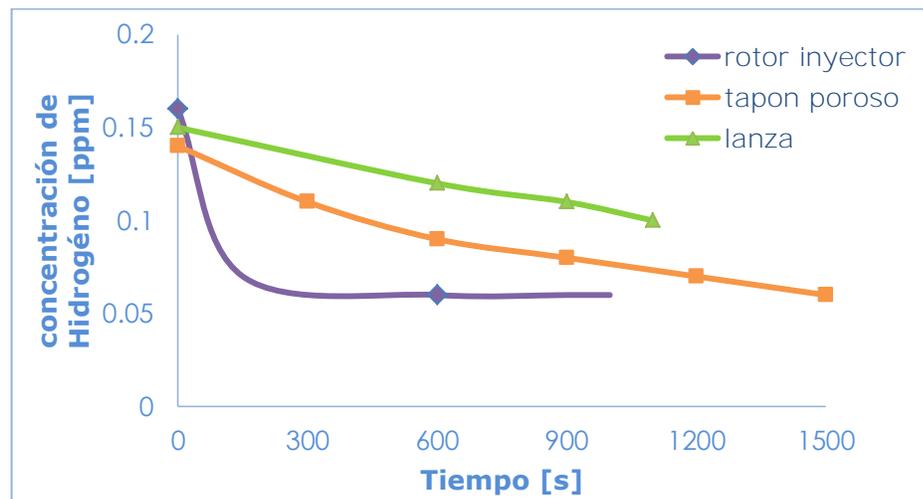


FIGURA 3. Cinética de desgasificación entre métodos de desgasificación 1) rotor inyector 2) tapón poroso y 3) lanza.<sup>[4]</sup>



## **1.5 Descripción de algunos modelos físicos y matemáticos para desgasificación de aluminio.**

Hoy en día uno de los objetivos básicos de la industria del aluminio es el trabajo continuo sobre cómo mejorar la calidad del metal líquido por lo cual se buscan métodos para eliminar de una manera más eficaz todas las inclusiones no metálicas perjudiciales que están presentes en el metal líquido, ya que tanto el aluminio primario y secundario tienen muchas inclusiones y burbujas de gas.

Buscando la optimización del proceso en términos de calidad de producción, disminución de costos, así como de impacto ambiental, se han desarrollado diversos modelos físicos en agua como herramientas accesibles y económicas de análisis, optimización y control de procesos, combinados con modelos matemáticos en un mismo estudio para validar los resultados del modelado matemático.

La eliminación de hidrógeno disuelto y partículas de impurezas sólidas de aleaciones fundidas por desgasificación es una práctica de fundición ampliamente utilizada. La desgasificación por rotación implica la purga de un gas en la aleación fundida a través de agujeros en un impulsor giratorio. El hidrógeno disuelto monoatómico se difunde dentro del líquido y cuando alcanza una burbuja se forma gas hidrógeno diatómico en la superficie de las burbujas; en cualquier caso, el hidrógeno se elimina de la masa fundida con las burbujas ascendentes. Al mismo tiempo, las partículas sólidas en la masa fundida chocan una con la otra debido a la turbulencia creada por la rotación del impulsor y el gas. Estos agregados se depositan en el suelo del horno, o son capturados por las burbujas de gas ascendentes y también se eliminan de la masa fundida. Un modelo matemático se ha desarrollado para simular el campo de flujo multifásico turbulento que se desarrolla en la masa fundida durante la desgasificación rotatoria. El modelo matemático



permite el cálculo del patrón de flujo turbulento y la distribución de burbujas de gas en la masa fundida. Ambos cálculos se introducen en otros modelos matemáticos que simulan la eliminación de partículas sólidas de hidrógeno disuelto y de impurezas de la masa fundida. <sup>[5]</sup>

La modelación física se basa principalmente en el análisis de escalamientos del sistema en estudio, los cuales abarcan una serie de criterios de similitud expresados últimamente en términos de relaciones adimensionales <sup>[6]</sup>. Los modelados físicos en agua han sido de gran utilidad para el estudio de una gran variedad de parámetros operacionales en el desgasificado de aluminio mediante la técnica de rotor inyector. Su aplicación incluye la evaluación de diferentes tipos de geometrías de rotor inyector <sup>[7,8]</sup>. Se estudió el comportamiento de burbujas de gas inyectado en términos de la distribución, el tiempo de residencia y tamaños, así como la cinética de eliminación de gases disueltos en modelos de agua mediante la remoción de oxígeno previamente disuelto mediante la inyección de gas inerte <sup>[7]</sup>.

Se han realizado varios estudios del modelado físico. Uno de ellos es la investigación del proceso de dispersión de burbujas de gas en los líquidos y la influencia del flujo de gas de refino y la velocidad del impulsor sobre el proceso de desgasificación de aluminio, el cual se llevó a cabo en el laboratorio del Departamento de Metalurgia de la Universidad Tecnológica de Silesia en Katowice. El modelo físico del proceso de refinado de aluminio fue diseñado (oxígeno soluble en agua se eliminó análogamente al proceso de desorción de hidrógeno de aluminio) y el esquema de la plataforma de pruebas se presenta en la FIGURA 4.

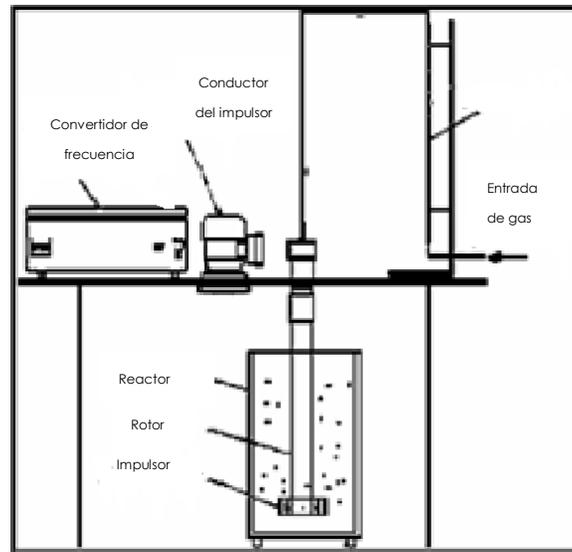


FIGURA 4. Esquema de la plataforma de prueba. <sup>[9]</sup>

A medida que la velocidad de flujo de gas de refinado influye en la forma de burbujas de gas, la selección correcta de parámetros para: la velocidad de flujo de gas de refinado y la velocidad del impulsor permite obtener burbujas de gas pequeñas, uniformemente distribuidas en metal líquido. Hay cuatro patrones de dispersión de gas en un metal líquido: sin dispersión, mínimos, dispersión íntima y uniforme. <sup>[9]</sup>

Por otro lado ha habido muchos intentos de cuantificar la cinética de desgasificación a través de la purga de gases, una muestra de ellos son las que se han realizado en ollas equipadas con rotor inyector mediante principios de transporte de masa, acoplados a un balance global de materia, en donde la cinética del proceso se puede expresar a través de un coeficiente global de transporte de masa en función de los diferentes parámetros de operación. Uno de los modelos importantes se creó para simular el flujo turbulento que se desarrolla en la masa fundida durante la desgasificación. El modelo matemático permite el cálculo de la energía de agitación y la distribución de burbujas de gas en la masa fundida. Ambas cantidades se introducen en otros modelos matemáticos



que simulan la eliminación de partículas sólidas de hidrógeno disuelto y de impurezas de la masa fundida. <sup>[5]</sup>

### **1.6 Mecanismo de eliminación de hidrógeno en aluminio líquido.**

Como se mencionó anteriormente el hidrógeno queda en solución líquida, pero al enfriarse el líquido y solidificar, la solubilidad de hidrógeno en aluminio sólido es despreciable por lo que el hidrógeno rechazado hacia el líquido interdendrítico alcanza la saturación rápidamente y empieza a nuclear hidrógeno formando poros.

La creación de los poros involucra fenómenos de transporte de masa de átomos de hidrógeno disuelto <sup>[10]</sup>, los cuales se pueden dividir en las etapas siguientes:

- a) Transporte de hidrógeno hacia la burbuja que genera la purga de gas, en el cual se van generando mecanismos convectivos y difusivos a través de la difusión de átomos de hidrógeno hacia la capa límite de la burbuja.
- b) Absorción química de átomos de hidrógeno en la superficie de la burbuja, en la cual reaccionan dos átomos de hidrógeno para formar una molécula de  $H_2$  y posteriormente hay una desorción del gas en la superficie de la burbuja.
- c) Difusión de  $H_2$  dentro de las burbujas de gas.
- d) Finalmente eliminación de hidrógeno hacia la superficie. Este mecanismo se puede observar en la FIGURA 5.

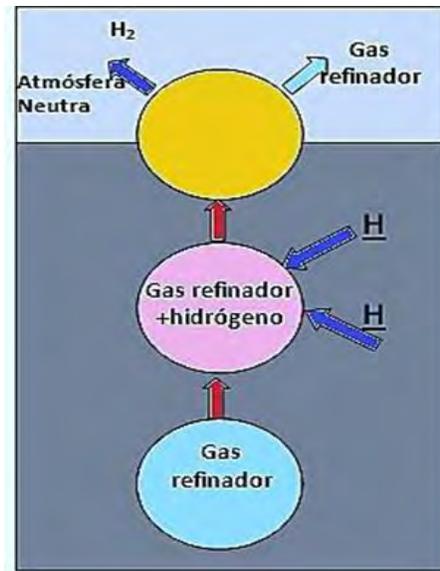


FIGURA 5. Esquema de la remoción de hidrógeno a la atmósfera en aluminio líquido. <sup>[9]</sup>

## 1.7 Métodos de medición de hidrógeno. <sup>[11]</sup>

Con los años, se han desarrollado muchas técnicas para determinar el contenido de hidrógeno en aluminio y en sus aleaciones, por lo cual se han desarrollado nuevos métodos. Estos métodos se pueden clasificar de 2 maneras; en métodos cuantitativos in-situ y en métodos semi-cuantitativos.

### 1.7.1 Métodos cuantitativos de laboratorio.

Estos métodos producen una medida cuantitativa de la concentración de hidrógeno en aluminio y en las aleaciones de aluminio; sin embargo, se limitan al uso en el laboratorio. Se incluyen en esta categoría el método de sub-fusión de Ransley, el método de fusión de portadores de nitrógeno y el método de fusión al vacío.

#### 1.7.1.1 Método de sub-fusión de Ransley.

La técnica de extracción de sub-fusión en vacío fue desarrollada por C.E. Ransley, R. Eborall y D.E.J. Talbot durante 1945-55. Por lo regular es llamado método Ransley. Debido a su exactitud y estabilidad, el método ha sido utilizado como invención, como técnica de referencia contra la cual se calibran o se comparan otras técnicas.



El método de sub-fusión de Ransley utiliza una muestra cilíndrica maquinada de dimensiones dadas. La muestra se calienta bajo vacío hasta una temperatura justo por debajo del punto en el que comienza la fusión. A esta temperatura, se extrae hidrógeno de la muestra a través de la difusión. El hidrógeno extraído se recoge en un volumen conocido y la presión de hidrógeno se mide utilizando un indicador McLeod o Pirani. (Ver FIGURA 6.). A partir de estos valores, se calcula el contenido de hidrógeno de la muestra.

Una de las complicaciones en la determinación del hidrógeno en el aluminio por el método de sub-fusión es el hidrógeno superficial, que se genera a partir de las reacciones de la superficie que dan lugar a la adición del ion del hidrógeno que está presente en el metal. Las reacciones se deben principalmente a:

- a) Descomposición de hidrocarburos de aceite o grasa contaminante.
- b) Reacción de la humedad superficial adsorbida con la muestra de metal.

Se ha encontrado que los valores de hidrógeno medidos por el método de Ransley son inferiores a los calculados por otros métodos, tales como TELEGAS, AISCAN o Chapel.

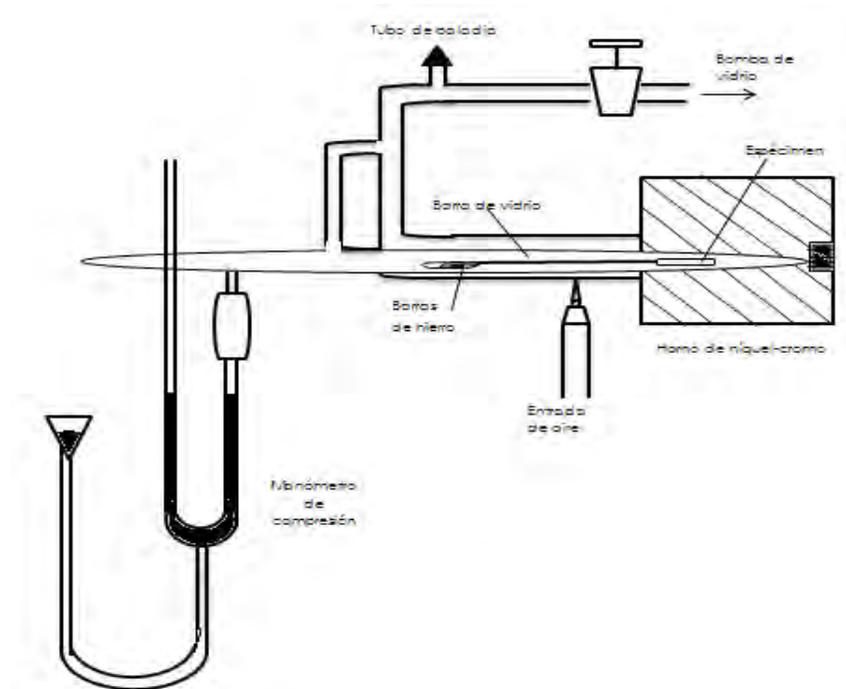


FIGURA 6. Diagrama esquemático del aparato de Ransley.

### 1.7.1.2 Método de fusión de portadores de nitrógeno.

Estos incluyen el dispositivo de leco RH y el dispositivo Ithac. El desarrollo de estos dos dispositivos se basó en el trabajo de Degreve. En este método, una muestra cilíndrica se coloca en un crisol de grafito y se funde en una corriente de nitrógeno (gas portador). El hidrógeno se desprende de la masa fundida se mezcla con el nitrógeno y se lleva a la superficie. El hidrógeno es detectado y medido por un catarómetro, que determina la conductividad térmica de la mezcla de gases. (ver FIGURA 7.). El principio de medición se basa en el hecho de que la conductividad térmica del gas hidrógeno es aproximadamente siete veces mayor que la del gas nitrógeno.

Dos factores principales que afectan la precisión de medición son: el hidrógeno superficial y la entrada de humedad en el portador de gas nitrógeno. La humedad puede proceder de dos fuentes: el gas portador



y los iones hidroxilo en la red de sílice del tubo de cuarzo en el que se funde la muestra.

La principal diferencia entre el instrumento Ithac y LECO RH es el hecho de que éste tiene un cabezal de carga para la introducción de muestras. El cabezal de carga permite almacenar la muestra en una cavidad, el restante ha sido purgado con gas nitrógeno seco y sellado, antes de introducirlo en el crisol de grafito y fundirse. De esta manera, la cocción fuera del crisol y la fusión posterior pueden llevarse a cabo sin abrir el aparato en cualquier etapa del ciclo analítico. Como resultado, la humedad atmosférica no se pone en contacto con el horno debe abrirse después de que se cuece para introducir la muestra.

Este método es mucho más rápido que el método de sub-fusión. Un análisis completo por este método toma aproximadamente 20 minutos, y el ciclo analítico de fusión es de sólo unos 3 minutos. Tiene una precisión satisfactoria para algunas aleaciones, pero generalmente no es tan exacto como el método de sub-fusión. Su equipo es costoso y tiene requisitos estrictos para la preparación y operación de la muestra. Además, al igual que los métodos Ransley, debe ser operado con cuidado por personal capacitado, mantenido rigurosamente y utilizado principalmente en laboratorios.

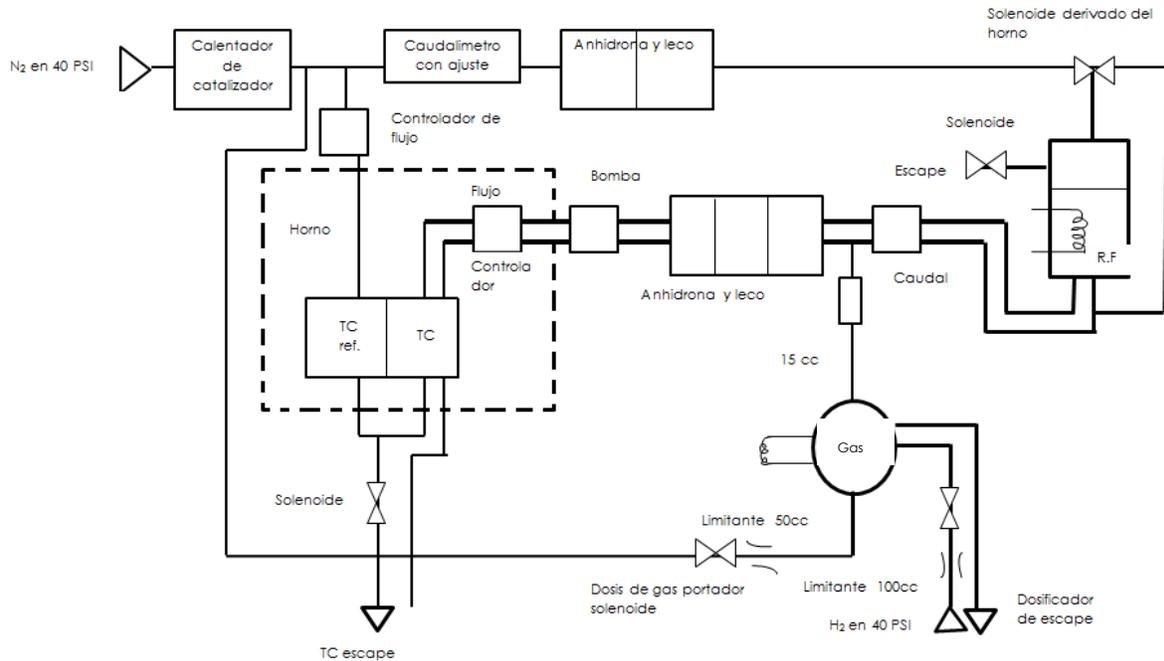


FIGURA 7. Diagrama LECO RH de flujo de gas simplificado.

### 1.7.1.3 Método de fusión al vacío.

El método de fusión al vacío se desarrolló inicialmente para determinar los elementos gaseosos oxígeno, nitrógeno e hidrógeno simultáneamente en aleaciones ferrosas. En este método, se mide un espécimen fundido a vacío y el aumento de presión de gas en la cámara de vacío. El aumento de presión, resultado de la liberación de gases en la aleación durante la fusión, se puede convertir en el contenido de gas. (ver FIGURA 8.). Este método se utilizó por primera vez para determinar el contenido de hidrógeno en aleaciones de aluminio a principios de 1940.

En ese momento se aceptaba generalmente como el método estándar para las aleaciones ferrosas. Al mismo tiempo, la mayor parte de los intentos de estimar el hidrógeno en aleaciones de aluminio se habían basado en la extracción del gas, a alta temperatura y en vacío, el metal en estado sólido o líquido.



El método de fusión al vacío podría considerarse el primer método factible para determinar el contenido de hidrógeno en aleaciones de aluminio. La extracción Ransley más tarde ganó popularidad debido a su precisión y sus otras ventajas. No hay evidencia de que el método de fusión al vacío se haya usado solamente para la determinación de hidrógeno desde entonces.

El método es relativamente simple y los resultados se derivan de unas pocas mediciones de presión, el método consiste en sistema de fusión al vacío junto con la cromatografía de gases. Consiste en una bomba de vacío, cámara en la que se puede fundir la muestra, un manómetro y un sistema de recolección de gas. El sistema de recolección de gas incluye dos colectores de gas, uno para recoger una muestra de gases presentes en la cámara de fusión antes de la fusión de la muestra y el otro para recoger los gases después de la fusión.

La muestra debe limpiarse y secarse cuidadosamente y pesarse cuidadosamente antes de colocarla en el crisol. La unidad de fusión en vacío (sin incluir el cromatógrafo de gases) es relativamente barata de construir y operar. Este método mide el contenido total de gas evolucionado, tanto disuelto como atrapado en la muestra, pero no de ninguna especie en particular. Ésta es una de sus ventajas. Puede utilizarse para la determinación de hidrógeno para aleaciones de aluminio y para la determinación de otros gases en otras aleaciones diferentes a las de aluminio. Sin embargo, esto también es un inconveniente, ya que el método no puede medir con precisión un gas particular cuando otros gases se disuelven o están atrapados en la muestra, ya que la cromatografía de gases sólo puede identificar las especies presentes pero no puede realizar una medición cuantitativa.

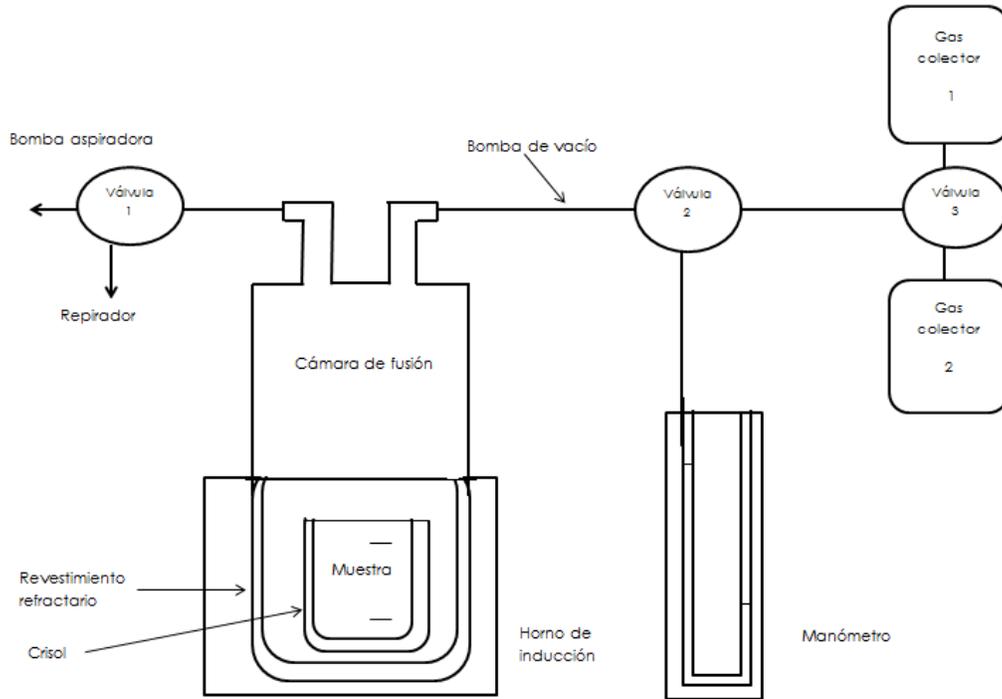


FIGURA 8. Diagrama esquemático del método de fusión al vacío.

### 1.7.2 Métodos cuantitativos in- situ.

Estos métodos producen una medida cuantitativa in situ de la concentración de hidrógeno en fundiciones de aluminio y aleaciones de aluminio. Se incluyen en esta categoría los dispositivos de TELEGAS y ALSCAN, el dispositivo CHAPEL, los métodos electroquímicos y los métodos de tira y difusión de hidrógeno.

#### 1.7.2.1 Método de TELEGAS.

Desarrollado por Ransley, Talbot y Barlow en 1958, la técnica de TELEGAS es ahora comercializada por AISCAN. El analizador AISCAN fue desarrollado por AISCAN basado en el principio del método de los TELEGAS.

El principio básico de los TELEGAS y métodos AISCAN es la recirculación de gas en circuito cerrado. Una pequeña cantidad de gas portador (tal como nitrógeno, argón o helio) se pone en contacto con la aleación de aluminio fundido y se recircula a través de una sonda de cerámica



sumergida en la aleación fundida. El hidrógeno se difunde hasta alcanzar el contenido de hidrógeno monoatómico en la masa fundida. (ver FIGURA 9.). En esta condición se establece el equilibrio, según la ley de Sieverts.

La ley del Sievert establece que la cantidad de un gas diatómico (hidrógeno) disuelto en el metal, en este caso aluminio fundido, es proporcional a la raíz cuadrada de su presión en la fase gaseosa por encima del fundido.

$$S = k\sqrt{pH_2}$$

Dónde:

S: es la concentración de hidrógeno en aluminio líquido.

K: constante de proporcionalidad.

$pH_2$ : presión de hidrógeno en contacto con el metal.

La sonda que utiliza el método de TELEGAS consiste en una campana y los dos tubos (tubos de salida y entrada) del sistema de recirculación de gas portador. La campana está hecha de cerámica en la que están incrustados los tubos metálicos. Durante el funcionamiento, la sonda se inserta en la masa fundida. Las burbujas del tubo de salida son pequeñas cantidades del gas portador continuamente dentro del metal fundido, y el hidrógeno se va difundiendo del metal en las burbujas de gas. Las burbujas de gas son recogidas por la campana y dirigidas al tubo de entrada para recircular. La sonda debe colocarse en la masa fundida verticalmente para asegurarse de que no escapa gas.

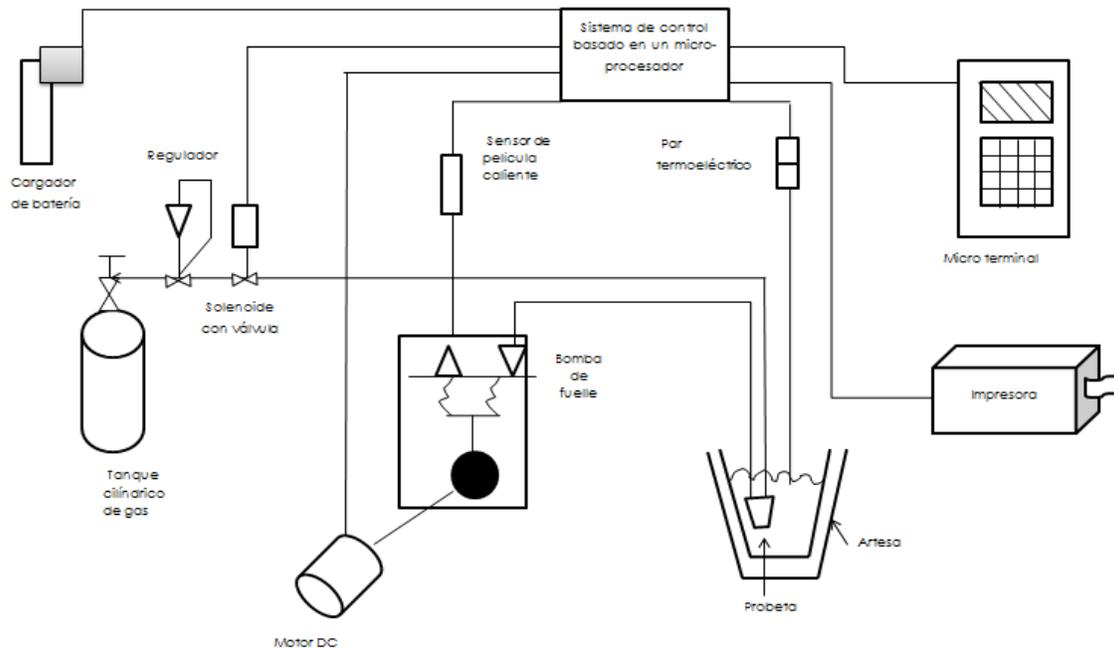


FIGURA 9. Diagrama esquemático de TELEGAS.

### 1.7.2.2 Método AISCAN.

Básicamente, tanto los TELEGAS como los analizadores AISCAN consisten en un sistema de recirculación de gas que incluye una sonda cambiante, consumible, un sensor (detector de conductividad térmica) y una pantalla de datos. La sonda aloja la sección abierta del sistema de recirculación de gas portador, donde el gas entra en contacto con el metal fundido.

El analizador AISCAN funciona permitiendo que hidrógeno atómico disuelto en aluminio difunda desde una masa fundida en un pequeño volumen cerrado a través de una sonda porosa inmersa en la masa fundida.

La sonda "desechable" consiste en una pequeña pieza de cerámica de poro abierto en la que están incrustados dos tubos de metal capilar (la salida y la entrada para el gas portador). El tamaño de poro del material de la sonda es suficientemente grande para permitir una buena



circulación de gas, pero lo suficientemente pequeño para evitar la penetración del metal. Por esta razón, la pieza cerámica sirve simplemente para localizar físicamente una burbuja de gas estacionaria dentro del metal fundido. El intercambio de hidrógeno gaseoso y el líquido tiene lugar en la interfase entre los poros abiertos de la pieza cerámica y el metal fundido.

La estructura de poros abiertos mejora la resistencia al choque térmico de la cerámica. Los tubos metálicos incrustados en la pieza cerámica no entran en contacto con la masa fundida. Un recubrimiento cerámico delgado protege la sección de los tubos que entran en contacto con el metal.

El analizador AISCAN también está equipado con un dispositivo de agitación, que refresca la interfaz sonda/metal proporcionando un tiempo de respuesta rápido y buena reproducibilidad. Como resultado, el proceso normalmente requiere unos cinco minutos para conseguir el equilibrio de hidrógeno entre el gas portador y el metal, pero se recomienda una operación de 10 minutos para asegurar un buen resultado.

El analizador AISCAN es un equipo que involucra tres fases donde los intercambios de hidrógeno ocurren entre ellas en las siguientes partes (ver FIGURA 10.):

- La masa fundida.
- El ambiente atmosférico libre por encima de la masa fundida.
- El bucle cerrado de gas en el interior del analizador.

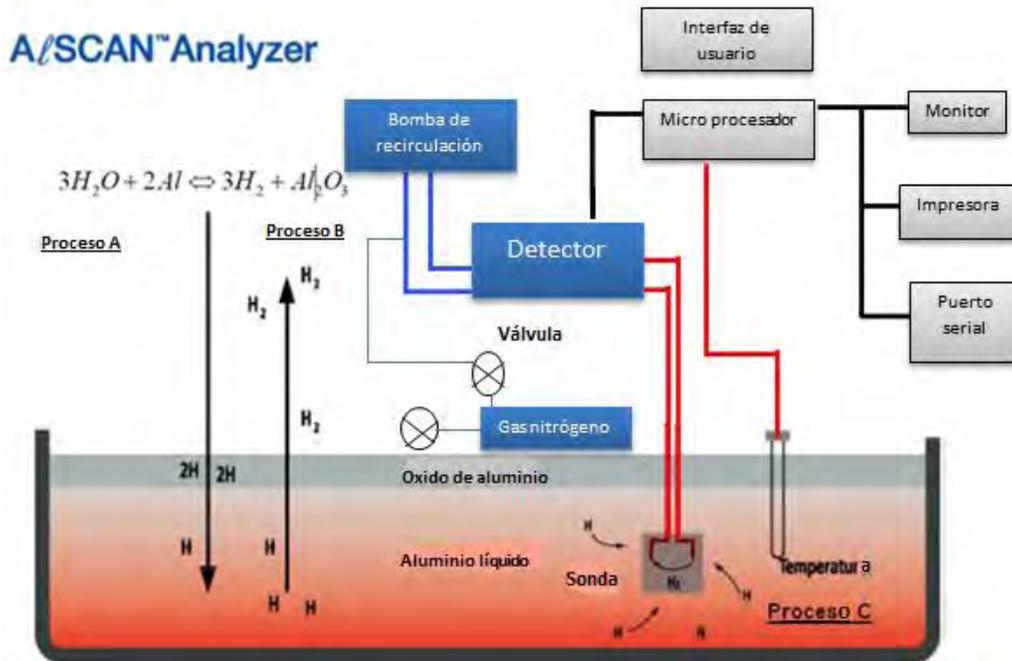


FIGURA 10. Sistema completo de AISCAN para monitorear la concentración de hidrógeno en aluminio. [12]

Los intercambios de hidrógeno entre el metal líquido y el medio ambiente están caracterizados por dos procesos:

Proceso A: se forma hidrógeno cuando el vapor de agua entra en contacto con el aluminio líquido; liberando así el hidrógeno que se disuelve fácilmente en el metal, la tasa de formación de hidrógeno incrementa con la temperatura del metal líquido y el nivel de la humedad en el ambiente.

Proceso B: el hidrógeno disuelto en la masa fundida se evapora hacia el aire del ambiente a una velocidad que crece con el aumento en el contenido de gas en estado fundido.

El contenido de gas de la masa fundida es estable cuando estos dos procesos están en equilibrio.

Proceso C: el analizador AISCAN funciona permitiendo al hidrógeno difundirse en la masa fundida en un pequeño volumen cerrado. La



cantidad que se difunde se mide y se relaciona con la cantidad presente en la masa fundida.

El volumen cerrado se refiere como el "circuito cerrado de gas" del instrumento. Sólo contiene hidrógeno, y algunos gases inertes insolubles (usualmente nitrógeno). El hidrógeno sale de la solución y se evapora en el circuito de gas. El proceso inverso tiene lugar también: hidrógeno presente en el circuito de gas se disuelve en la masa fundida. El contenido de gas hidrógeno en el circuito llega a su valor de equilibrio, de manera que la rapidez de evaporación y la de disolución son de igual magnitud. <sup>[10]</sup>

El software AISCAN proporciona comunicación entre los instrumentos AISCAN y un ordenador externo. Permite configurar los instrumentos del AISCAN, la descarga de datos para la posterior revisión y análisis.

El software es compatible con equipos que ejecutan los sistemas operativos Windows 2000, NT. Un ordenador puede controlar tantos analizadores como su número de puertos posea.

El AISCAN utiliza la ley de Sievert para medir a cantidad de hidrógeno en un volumen cerrado midiendo y relacionando la cantidad presente de hidrógeno en la masa fundida <sup>[12]</sup>. Este contenido de hidrógeno se puede observar con la siguiente ecuación:

$$S = S_0 * \sqrt{pH_2} * CF(A) * CF(T_{\text{baño}})$$

Dónde:

S: concentración de hidrógeno en el metal (ml/100g).

S<sub>0</sub>: solubilidad del aluminio líquido a 700 °C: 0.92 ml/100g.

pH<sub>2</sub>: presión parcial del hidrógeno en el circuito cerrado (atm).

CF(A): factor de corrección de la aleación. El cual en aluminio puro este factor es igual a 1.



CF ( $T_{\text{baño}}$ ): factor de corrección de temperatura del baño, el cual toma en cuenta la variación de la solubilidad de hidrógeno con la temperatura en aluminio puro. Este factor está dado por la siguiente ecuación:

$$CF(T_{\text{baño}}) = e^{\left[6.531 \frac{(T_{\text{baño}} - 700)}{(T_{\text{baño}} - 273)}\right]}$$

En comparación con las técnicas de sub-fusión y fusión, las TELEGAS y AISCAN son mucho más rápidas en la determinación cuantitativa del contenido de hidrógeno en aleaciones de aluminio.

### **1.7.2.3 Método de CHAPEL. [11]**

Se trata de un método de medición de presión parcial de hidrógeno directo desarrollado en Alemania en los 80's. Se denomina CHAPEL abreviado para el análisis continuo de hidrógeno mediante la evaluación de la presión en líquidos o DPM (abreviatura para la medición directa de la presión).

Contiene una sonda porosa que consiste en un disco de grafito que se fija al extremo de un tubo cerámico impermeable y se coloca en la masa fundida de aluminio. La sonda y el tubo están conectados a un instrumento de medición de presión y este conjunto está conectado al sistema de vacío a través de 2 válvulas (1 y 2). En el proceso de medición, el espacio dentro de este conjunto es evacuado primero. Cuando la evacuación se completa, las válvulas 1 y 2 se cierran. Debido a la baja presión, el hidrógeno disuelto en la masa fundida se difunde desde la masa fundida hasta el interior de este conjunto, donde, por consiguiente, aumenta la presión del gas. Cuando la difusión de hidrógeno alcanza el equilibrio, el sensor de medición registra la presión del gas  $H_2$ . Usando presión de hidrógeno, el volumen del espacio dentro del conjunto y la temperatura del baño, se puede calcular la concentración de hidrógeno en la masa fundida. (ver FIGURA 11.)



El principal problema de funcionamiento observado durante los ensayos es con los flujos en la masa fundida. Las sales fundidas de los fundentes penetran en la sonda porosa. Esto destruye la sonda y hace imposibles las mediciones significativas, por lo que este aparato no se puede usar donde están presentes las sales. Debido a que sigue siendo un nuevo método, los datos de uso práctico son limitados.

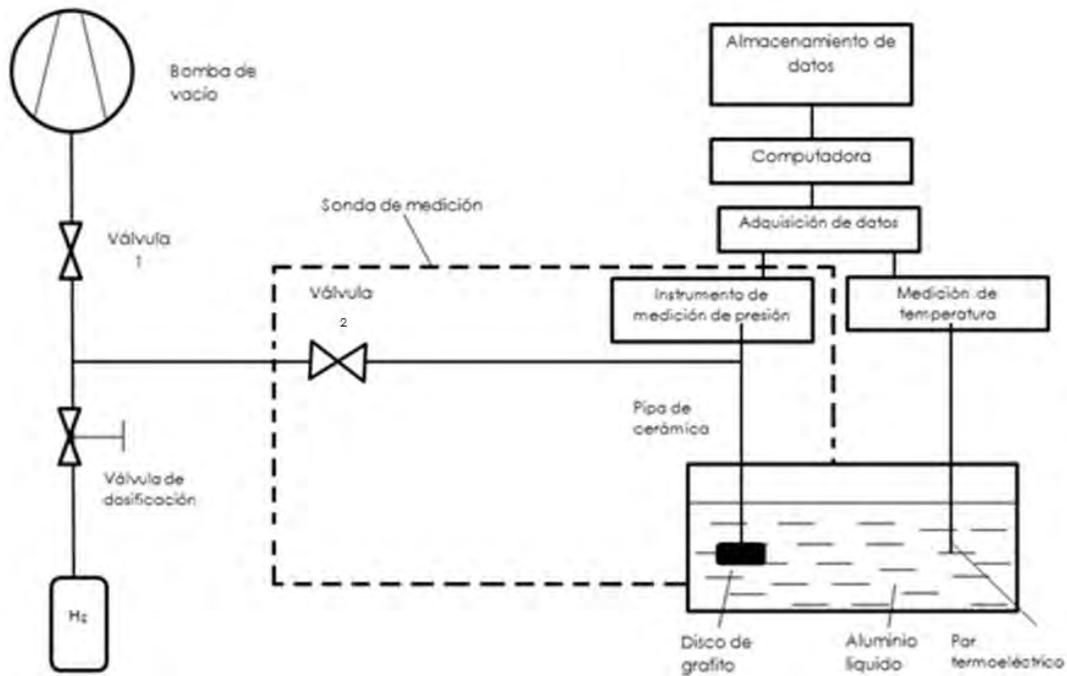


FIGURA 11. Diagrama esquemático del dispositivo de CHAPEL.

#### 1.7.2.4 Método electroquímico.

Este método fue realizado en los años 60's. En ese momento se habían utilizado sondas de electrolito sólido para la determinación instantánea de oxígeno en acero, cobre y en la medición del contenido de sodio en aleaciones de aluminio. El trabajo fue un intento de utilizar la técnica de medición del hidrógeno en aleaciones de aluminio.

Esto se realizó con la ayuda de una celda que constaba de dos electrodos en un electrolito, el potencial eléctrico de equilibrio (E) medido a través de las interfaces electrodo-electrolito y el potencial



químico de la especie. Al utilizar una celda como una sonda de hidrógeno para aluminio, la masa fundida de aluminio que contiene hidrógeno actuará como el electrodo cuya presión parcial de hidrógeno debe medirse. (ver FIGURA 12.). Para que este dispositivo tenga éxito, debe encontrarse un electrodo adecuado y un electrodo de hidrógeno. Es esencial que el electrolito mantenga sus propiedades bajo las condiciones de funcionamiento del sistema. En particular, debe ser térmicamente estable y estable en contacto con los dos electrodos. El otro electrodo también debe mantener constante la presión parcial de hidrógeno. Una mezcla de un metal con su hidruro, que proporcionaría un potencial de hidrógeno fijo a una temperatura dada, sería adecuada para hacer de este electrodo una referencia de hidrógeno.

Este método da virtualmente una lectura instantánea. Se dijo que los resultados obtenidos en las pruebas de Gee estaban en buen acuerdo con el método de sub-fusión en vacío. Sin embargo, la estabilidad termodinámica del material de la sonda no fue satisfactoria, dando como resultado una vida corta de la sonda o lecturas inestables. Aparentemente, el método no experimentó ningún desarrollo o uso en la práctica y, por lo tanto, la información sobre él es limitada y su exactitud es desconocida.

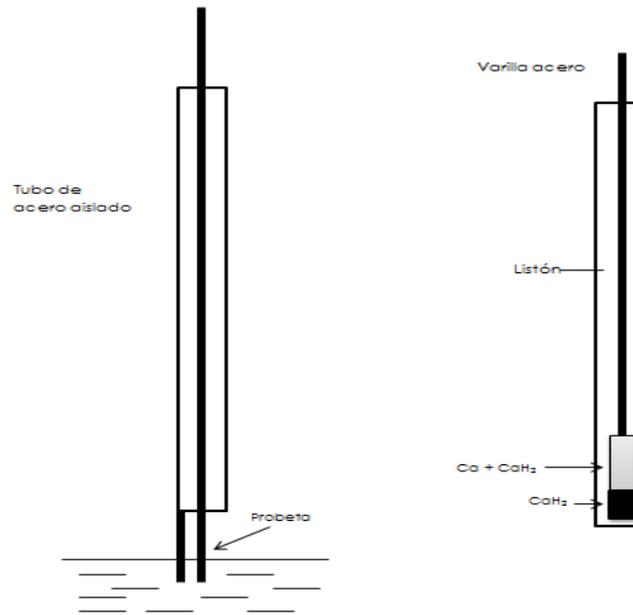


FIGURA 12. Diagrama esquemático del método electroquímico.

### 1.7.3 Métodos semi- cuantitativos.

Estos métodos producen una medida semi cuantitativa de la concentración de hidrógeno en aluminio puro y sus aleaciones. Se incluyen en esta categoría la prueba de presión reducida (RPT), junto con algunas variaciones menores en sus principios básicos de funcionamiento, y el método de atenuación ultrasónica.

#### 1.7.3.1 Prueba de presión reducida (RPT).

La prueba de presión reducida también se denomina prueba de solidificación al vacío o prueba de Straube-Pfeiffer. En este ensayo se deja solidificar una pequeña cantidad de una muestra de aleación de aluminio fundido bajo presión reducida controlada y se determina el contenido de gas observando el comportamiento de solidificación de la muestra o por medición de densidad o análisis de porosidad de la muestra solidificada. Este método fue utilizado por primera vez en la década de 1920 y se ha desarrollado desde entonces. En la primera etapa de su desarrollo sólo se utilizó para la estimación cualitativa de la calidad de la aleación fundida. Ahora es un método semi cuantitativo



para medir el contenido de hidrógeno y es ampliamente utilizado en la industria del aluminio. (ver FIGURA 13.).

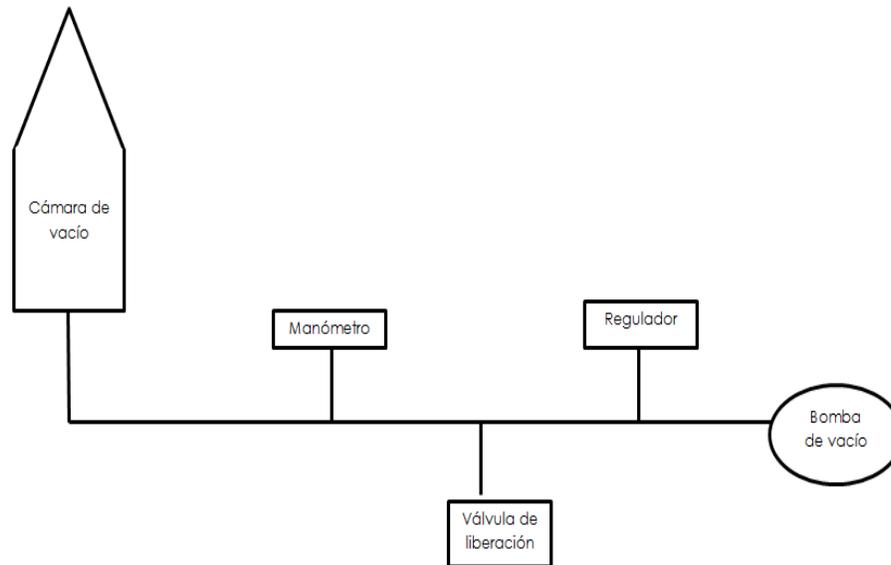


FIGURA 13. Diagrama esquemático de la prueba de presión reducida.

### 1.7.3.2 Prueba de SEVERN

El analizador SEVERN, desarrollado en el Reino Unido, utiliza un espécimen de peso constante. El peso constante de aleación de aluminio es de 100 g, se coloca en una cámara de vacío de volumen conocido y la presión se reduce a un nivel predeterminado. La cámara con la muestra líquida se aísla luego del resto del entorno y se deja solidificar la muestra. En el curso de la solidificación, el hidrógeno liberado desarrolla una presión de gas, que se mide mediante un calibrador Pirini. El calibrador Pirini se calibra cuidadosamente utilizando volúmenes conocidos de gas hidrógeno. La presión de gas medida se convierte entonces en una lectura digital de contenido de hidrógeno.

El método parece ser un proceso simple y rápido. Debido a que se utiliza un peso conocido de metal, la lectura que puede obtenerse al completar la solidificación se puede convertir fácilmente al contenido de hidrógeno requerido. Se informó que este método era capaz de detectar



un nivel de hidrógeno de menos de 0.10 ml/100 g. Para asegurar una exactitud razonable, este método necesita una medición exacta del peso de 100g de metal líquido, esto con el fin para controlar la tasa de solidificación para extraer todo el hidrógeno que se debe extraer de la muestra, y una forma de prevenir o corregir hidrógeno durante la construcción de vacío inicial.

### **1.7.3.3 Prueba inicial de la burbuja**

La prueba de burbuja, se propuso por primera vez a finales de la década de los 40's y se utilizó para fines prácticos a principios de 1960. La prueba implica el mantenimiento de una pequeña muestra de aleación de aluminio en estado fundido mientras que la presión sobre la muestra es baja. A una cierta presión por debajo de 1 atm, las burbujas de gas se nuclearán y se romperán a través de la superficie. Se verifica la presión y la temperatura a las que se observa la primera burbuja y para determinar el contenido de hidrógeno de la masa fundida.

Este es un método rápido para la medición cuantitativa del contenido de hidrógeno en aleaciones de aluminio. Se puede hacer una determinación individual en aproximadamente 2 minutos. Sin embargo, la determinación de la aparición de la primera burbuja implica cierto grado de subjetividad. La primera burbuja de gas puede no ser una burbuja de gas hidrógeno, pero puede resultar del aire atrapado en escorias adheridas a la superficie del crisol. Además, en cuanto al método Straube-Pfeiffer, la formación de la primera burbuja no se determina solamente por el contenido de hidrógeno, la temperatura, la presión y la composición de la aleación. También depende de las condiciones de nucleación de la burbuja de gas, tales como los niveles y naturalezas de las partículas exógenas, los materiales del crisol y su estado superficial, y el grado de vibración. Todos estos factores conducen a resultados espurios ocasionales. Debido a esto, se deben hacer al menos tres



mediciones en cada masa fundida. En consecuencia, la exactitud de los métodos es relativamente baja, se informó que estaba dentro de  $\pm 0.005$  ml/100 g.

#### **1.7.3.4 Método de atenuación ultrasónica.**

Las técnicas ultrasónicas se han utilizado con éxito para detectar irregularidades tales como inclusiones, porosidad y grietas en aleaciones ferrosas y no ferrosas. A principios de los 80's, M. Thiagarajan hizo un esfuerzo para utilizar esta técnica para medir el contenido de gas en las aleaciones de aluminio en el laboratorio. En este método, el contenido de gas se determina midiendo los niveles de porosidad de un espécimen fundido usando medidas de atenuación ultrasónica.

Dado que el nivel de porosidad en el espécimen de aleación de aluminio está directamente relacionado con el contenido de hidrógeno, puede establecerse la relación entre el contenido de hidrógeno y el porcentaje de atenuación.

A lo largo de la investigación se utilizó una sonda de titanio de bario de 0.8 MHz de frecuencia. Se utilizó aceite de ricino como un agente de acoplamiento, el espesor de la capa de acoplamiento y la presión sobre la sonda se mantuvieron constantes en todos los experimentos. Es esencial que los especímenes tengan una superficie lisa sin defectos. Se utilizaron dos tipos de especímenes especialmente diseñados, uno para la muestra libre de porosidad y otro para la detección de la porosidad.

Se afirmó que se trataba de un método simple y rápido. El tiempo para una medición del contenido de hidrógeno con la ayuda de gráficos proporcionados fue de aproximadamente 5-10 minutos desde el momento en que se derramó la masa fundida en el molde. Sin embargo, hubo dos limitaciones: se requirió operador experto para determinar con precisión los valores de alturas de eco y la sensibilidad fue baja para



algunas aleaciones. Ninguna aplicación práctica de este método ha sido reportada en la literatura publicada.

La exactitud y la reproducibilidad de este método no fueron reveladas. Su precisión podría verse afectada por el hecho de que las técnicas ultrasónicas tienen dificultad para distinguir la porosidad y otros defectos. Pero la precisión de este método podría mejorarse ampliando la porosidad. Esto sugiere que vale la pena investigar combinando la solidificación a presión reducida y técnicas de medición ultrasónica.



## **1.8 Hipótesis.**

- El rediseño de un rotor para el desgasificado de aluminio que consiste en aumentar un aspa y reducir la sección troncocónica de un diseño previo, mejorará la rapidez de desgasificación.
- La desgasificación aumenta por lo menos al doble las propiedades mecánicas del aluminio con gas.

## **1.9 Objetivos.**

- Comparar el desempeño en el proceso de desgasificación entre un rotor rediseñado y un rotor diseñado previamente en una tesis, a través de pruebas de desgasificado en aluminio líquido en el laboratorio de fundición.
- Conocer cuánto mejoran las propiedades mecánicas del aluminio después de realizar la desgasificación.



## **2 Metodología de trabajo.**

Para realizar el proceso de desgasificación de aluminio puro se utilizó la técnica de rotor inyector para evaluar el desempeño de un rotor rediseñado, que tienen 5 aspas y una sección troncocónica más reducida con respecto a un rotor de 4 aspas realizado en un proyecto anterior (ver FIGURA 14.). Para ello se utilizó una planta piloto en el laboratorio de fundición como se muestra en la FIGURA 15., donde se aprecian todos los componentes de este arreglo experimental, que incluye tanques de gas, computadora, equipo AISCAN, medidores de flujo de hidrógeno y de temperatura, así como el horno para mantener líquido al metal y el rotor inyector.

El gas que se utilizó para la inyección fue argón grado industrial con 99.9% de pureza; así como un horno de resistencias para tener un control de temperatura; ya que la cantidad de hidrógeno que registra el equipo AISCAN dependen de la temperatura, por lo cual el control de esta variable juega un papel importante en este experimento. Se utilizó un crisol con una capacidad de 5 kilogramos, el cual se recubrió con pintura de zirconio.



FIGURA 14. Rotores inyectoros utilizados para la prueba de desgasificación de aluminio puro comercial.

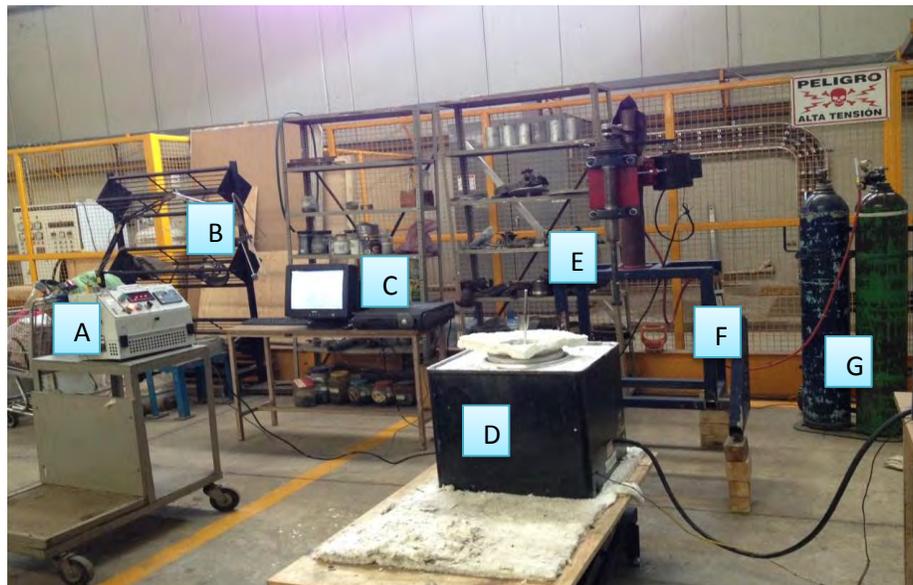


FIGURA 15. Componentes de la Planta piloto. A) equipo AISCAN, B) termopar y sonda, C) computadora con software del AISCAN, D) horno de resistencia con un crisol que contiene el aluminio líquido, E) rotor inyector con argón, F) flujometro, G) tanque de Argón y Nitrógeno.



## 2.1 Manejo y calibración del equipo AISCAN.

Dado que los datos que registra el equipo AISCAN los envía al software de la computadora, se realizó la calibración del equipo mediante la siguiente secuencia de instrucciones con el software inicializado:

- i. Irse a "unit"(unidad)
- ii. "Calibration" (calibración)
- iii. "Save instrument calibration to a file" (guardar el instrumento calibrado en un archivo) y darle "OK"
- iv. Aparecerá una pantalla en la cual se debe seleccionar un documento con el nombre de "calibración-AISCAN.CAL"
- v. Dar en guardar, luego reemplazar y darle "OK" (ver FIGURA 16.).

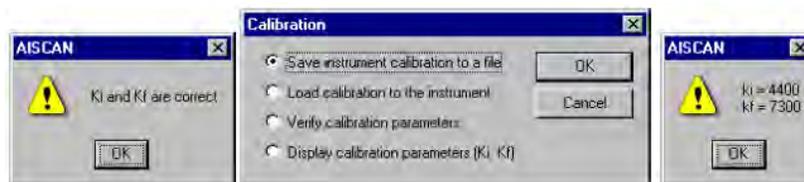


FIGURA 16. Diálogos de calibración de AISCAN.

El programa construirá una gráfica de la evolución del contenido de hidrógeno y los valores numéricos durante el proceso de medición como se muestra en la FIGURA 17., en donde también se observa la evolución de la temperatura (línea rosa) junto con la de la concentración de hidrógeno en el aluminio (línea azul).

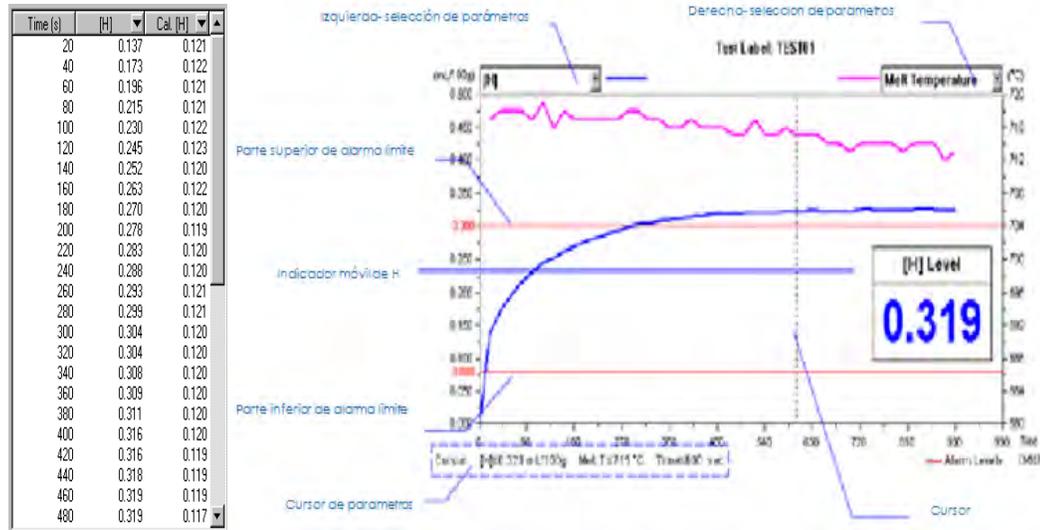


FIGURA 17. Datos y gráfica obtenida al realizar la prueba. [12]

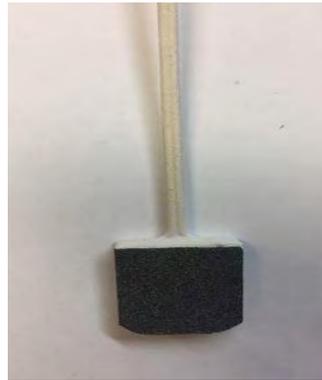
## 2.2 Conexión de los equipos utilizados.

Algunas características de la experimentación fueron las siguientes:

1. Se fijaron las condiciones de proceso en la planta piloto y carga del metal la cuales fueron:
  - I. Velocidad de rotación: 240 RPM
  - II. Flujo de gas argón: 10 L/min
  - III. Temperatura del metal: 730 °C
  - IV. Masa de aluminio puro comercial: 5 Kg
2. Para la carga del aluminio se fundió previamente un lingote de 10 kg y se colocaron lingotes con una masa total de 5 kg.
3. Se colocó el rotor rediseñado con una flecha a 240 RPM, con una junta rotativa.
4. Se conectó el tanque de argón directo hacia en flujómetro. Esto con el fin de inyectar argón al aluminio líquido por medio del rotor inyector.
5. Para la medición del contenido de hidrógeno con la ayuda del equipo AISCAN se realizó lo siguiente:



- I. Se conectó el equipo AISCAN a una computadora, la cual por medio de un software registra los datos de contenido de hidrógeno que envía el AISCAN.
- II. Esta información que registra el AISCAN, se detectan por medio de una sonda que registra el contenido de hidrógeno y un termopar que registra la temperatura. (ver FIGURA 18.)



[a]



[b]

FIGURA 18. a) Sonda y b) Termopar

### 2.3 Preparación del aluminio.

El procedimiento que se realizó para la desgasificación de aluminio con el rotor rediseñado fue el siguiente:

1. Se precalentó la carga de los lingotes de aluminio puro en un horno con quemador de gas.
2. La composición química de aluminio puro que se usó en los experimentos se obtuvo por espectroscopía de emisión óptica usando un espectrómetro spectro-lab modelo M8.
3. Se esperó a que fundiera el metal líquido aproximadamente a 900°C.
4. Se removió la escoria presente en el metal líquido.
5. Se calentó agua en un matraz de 2 litros aproximadamente.



6. Se colocó el agua caliente en un atomizador metálico, para gasificar el aluminio líquido.
7. Una vez obtenida la temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$ , tomada con ayuda de un multímetro, se comenzó a gasificar, rociando el agua en el metal líquido durante 30 min., rociando un aproximado de 3 litros de agua. Esto con el fin de obtener una concentración saturada de hidrógeno aproximada de  $0.6\text{ ml}/100\text{g}$  de aluminio y disminuir la temperatura inicial y así obtener la temperatura de trabajo de  $730^{\circ}\text{C}$ . (ver FIGURA 19.)
8. Se incorporó el agua en el metal/líquido agitando con una cucharilla para obtener una incorporación de hidrógeno homogénea.



*FIGURA 19. Gasificación de aluminio líquido en horno de quemadores a temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$ .*

9. Para obtener un mejor control en la temperatura, el aluminio líquido se colocó en un horno de resistencia y se siguió gasificando, para así obtener un control en la temperatura de  $730^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. (FIGURA 20.)



*FIGURA 20. Gasificación de aluminio líquido en horno de resistencias a temperatura de 800 °C.*

10. Se colocó el termopar y la sonda dentro del aluminio líquido.
11. Una vez instalado todo el equipo y el aluminio líquido a temperatura de 730 °C se comenzó a realizar el registro de hidrógeno con el AISCAN.
12. Antes de iniciar la medición el equipo realizó 3 purgas de gas nitrógeno de alta pureza que contiene un pequeño cilindro dentro del AISCAN.
13. Una vez finalizada la purga, el equipo comenzó a registrar el contenido de hidrógeno en el aluminio líquido y a registrar el valor de concentración cada 20 segundos (FIGURA 21.). Obteniendo así un gráfico de tiempo contra ml/100g (mililitros de hidrógeno por cada 100 gramos de aluminio) como el gráfico de la FIGURA 17.



*FIGURA 21. Medición de hidrogeno después de desgasificar.*



14. Ya que se obtuvo la concentración de hidrógeno constante en el tiempo, se detuvo la medición.
15. Después se colocó el rotor rediseñado dentro del metal líquido a 240 RPM con una altura con respecto al baño de 1/3, durante diferentes tiempos de desgasificación; el primer tiempo de desgasificación fue de 1min. (ver FIGURA 22.)



*FIGURA 22. Desgasificación de aluminio líquido con rotor inyector rediseñado a 240 RPM.*

16. Una vez que transcurrió el tiempo de desgasificación, se detuvo el proceso y se procedió a la medición del contenido de hidrógeno nuevamente con el equipo AISCAN (FIGURA 21.)
17. Para ello nuevamente se realizó el inicio de las 3 purgas anteriormente mencionadas en el paso 12.
18. Una vez finalizadas las purgas se inició la lectura del contenido de hidrógeno desgasificado.
19. Los pasos del 11 al 18 se realizaron para cada uno de los diferentes tiempos que se manejaron: 1, 3, 7 y 12 min.; esto con el fin de obtener cada uno de los puntos del gráfico que se muestra en los resultados.
20. Por último, se colaron 5 probetas de tensión para observar el comportamiento de algunas propiedades mecánicas del aluminio puro gasificado y desgasificado en 3 tiempos. Para ello se



realizaron 5 moldes de silicato de sodio- $\text{CO}_2$  (ver FIGURA 23.), cuyo procedimiento de construcción a su vez es el siguiente:

- I. Se pesaron 2000 g de arena sílice y 6% (120 ml) de resina de silicato de sodio. para cada una de las mitades de cada molde.
- II. Se mezclaron por un tiempo de 5 min. aproximadamente.
- III. La mezcla se colocó en una caja de acrílico, en la cual se puso una placa modelo de aluminio con la mitad del diseño de probeta.
- IV. Se apisonó hasta que la mezcla quedara compacta.
- V. Se retiró la placa modelo y se prosiguió a la inyección de gas  $\text{CO}_2$  cinco veces en lapsos de 5 minutos.
- VI. Una vez terminada la inyección de gas, se procede a darles una cocción para eliminar la humedad.
- VII. Finalmente se unieron dos mitades de un molde y se sellaron con un adhesivo.



*FIGURA 23. Moldes de silicato de sodio-  $\text{CO}_2$  para obtener probetas de tensión.*

21. Ya listos cada uno de los moldes, durante la experimentación tanto del gasificado como el desgasificado de aluminio se prosiguió a vaciar aluminio en cada uno de los moldes en distintos tiempos. A todas las cucharas con aluminio líquido, se les tomó la temperatura antes de vaciar al molde para tener una referencia



del proceso. Esta temperatura fue de 730 °C. (Observar FIGURA 24.)



*FIGURA 24. Toma de temperatura en la cuchara de aluminio antes del vaciar al molde.*

22. Para obtener la primera probeta de tensión, se tomó una muestra de metal líquido gasificado en la última prueba que se realizó de 12 minutos. Observar (FIGURA 25.)



*FIGURA 25. Vaciado de aluminio líquido gasificado en molde de probeta de tensión.*

23. La segunda probeta que se vació fue en el desgasificado de aluminio en un tiempo de 12 minutos. Posteriormente se vació la de desgasificado de 7 minutos (FIGURA 26.)



*FIGURA 26. Vaciado de aluminio líquido desgasificado en molde de probeta de tensión.*

24. Dado que la última prueba de desgasificado de 12 minutos se realizó por duplicado, se obtuvieron dos probetas de tensión de este tiempo de desgasificado.
25. Una vez solidificadas las probetas, se desmoldaron y se les quito el exceso de rebabas que presentaron, esto con el fin de dejarlas preparadas para la prueba de tensión. (ver FIGURA 27.)



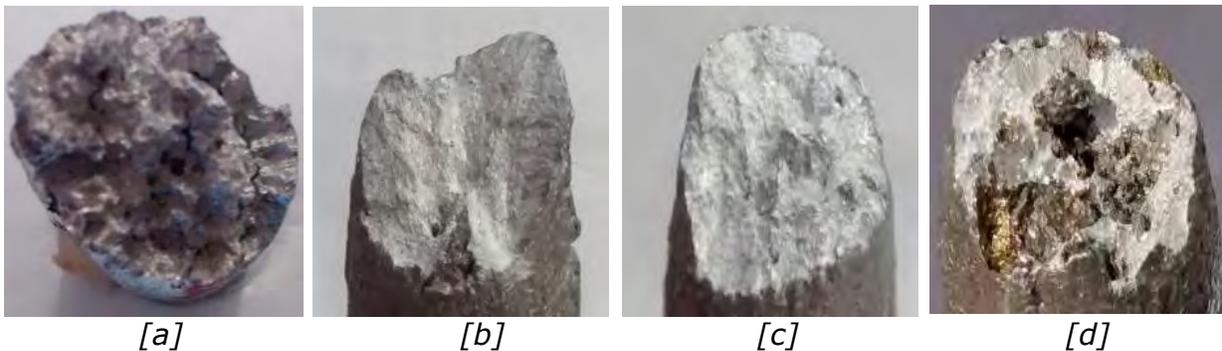
*FIGURA 27. Probetas de tensión antes y después de desmoldar.*

26. Una vez listas las probetas de tensión, se realizaron las pruebas de tensión en una máquina de tensión universal marca MTS modelo 810 con condiciones de velocidad de pistón de 3 mm/min. Observar (FIGURA 28.)



*FIGURA 28. Prueba de tensión.*

27. Por último. una vez que se realizó la prueba de tensión se prosiguió a una preparación metalográfica a las probetas para observar la porosidad, en el punto donde se fracturaron las probetas. (ver FIGURA 29.)



*FIGURA 29. Fracturas de las probetas de tensión: [a] gasificada, [b] desgasificada 7 minutos, [c] desgasificada 12 minutos, [d] desgasificada 12 minutos con escoria.*



### 3 Resultados y discusión.

#### 3.1 Resultados.

Un diseño de rotor de 4 aspas que se probó en una tesis anterior (2016) <sup>[8]</sup>, demostró un desempeño superior a los rotores comerciales de la empresa FOSECO, sin embargo, un análisis numérico con códigos CFD mostró que un nuevo rediseño de este rotor aumentando una aspa y disminuyendo su sección troncocónica, podría mejorar la fluido dinámica y por lo tanto aumentaría la cinética de desgasificación, lo cual constituye la hipótesis principal de este proyecto. Algunos resultados, relativos al rotor de 4 aspas que se muestran en esta sección fueron tomados de la tesis anterior.

La composición química de aluminio puro comercial que se utilizó se muestra en la Tabla 1., en la cual se puede observar una composición del 99.5% de aluminio obtenida por análisis químico por chispa. También en la Tabla 1., se muestra la composición química teórica de un aluminio 1050, con 99.5% de pureza.

Tabla 1. Análisis químico por espectroscopia de emisión por chispa.

Elemento	Al	Si	Fe	Ti	Zn	Mn	Otros
% Peso	99.5	0.197	0.231	0.0384	0.0257	0.00786	0.00004
Aluminio							
1050	99.5	0.24	0.23	0.05	0.04	0.05	0.00002
teórico							

En la FIGURA 30. se puede ver la medición del hidrógeno desgasificado por un minuto por medio del AISCAN. La lectura se ve con la línea azul que representa la concentración de hidrógeno en aluminio con respecto



al tiempo de medición. La prueba se detiene una vez obtenida una concentración constante en el tiempo.

La línea rosa, nos indica la temperatura con la cual se están tomando las lecturas de concentración de hidrógeno. Esta línea es de suma importancia ya que de ella dependen los valores de concentración de hidrógeno que arroja el software.

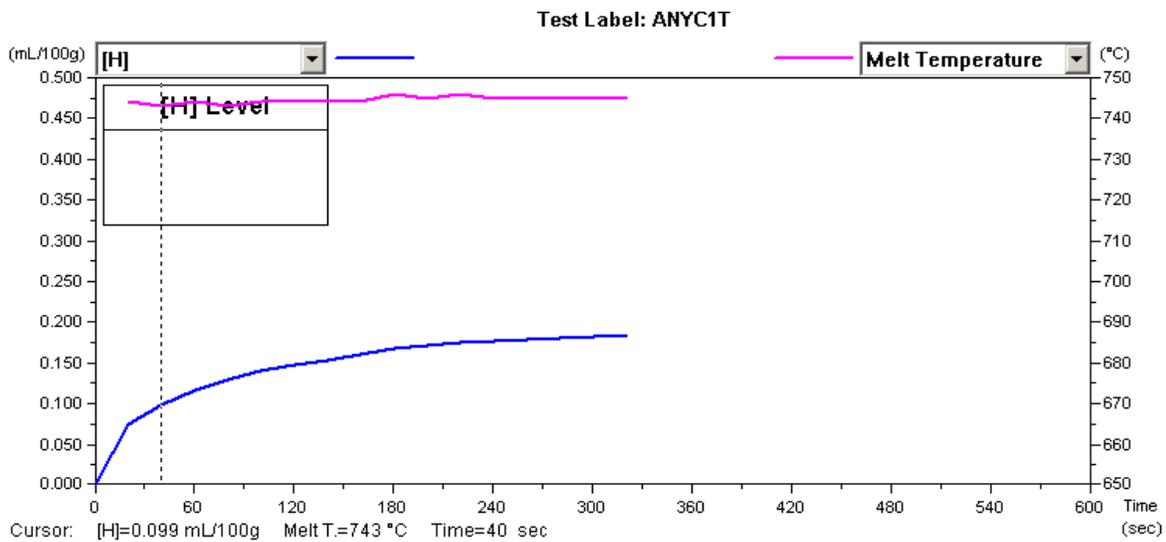


FIGURA 30. Representación de medición de hidrógeno del software AISCAN en 1 minuto.

En la FIGURA 31. se puede ver la medición del hidrógeno desgasificado por 3 minutos por medio del AISCAN. La lectura se ve con la línea azul que representa la concentración de hidrógeno en aluminio con respecto al tiempo de medición. La prueba se detiene una vez obtenida una concentración constante en el tiempo. La línea rosa marca la temperatura de medición.

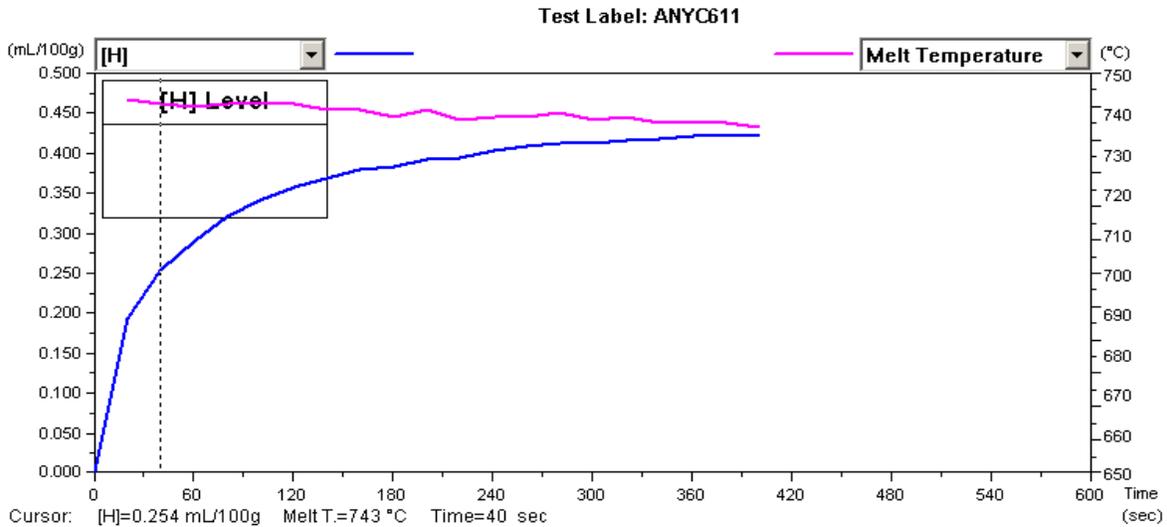


FIGURA 31. Representación de medición de hidrógeno del software ALSKAN en 3 minutos.

En la FIGURA 32. se puede ver la medición del hidrógeno desgasificado por 7 minutos por medio del AISCAN. La lectura se ve con la línea azul que representa la concentración de hidrógeno en aluminio con respecto al tiempo de medición. La prueba se detiene una vez obtenida una concentración constante en el tiempo. La línea rosa marca la temperatura de medición.

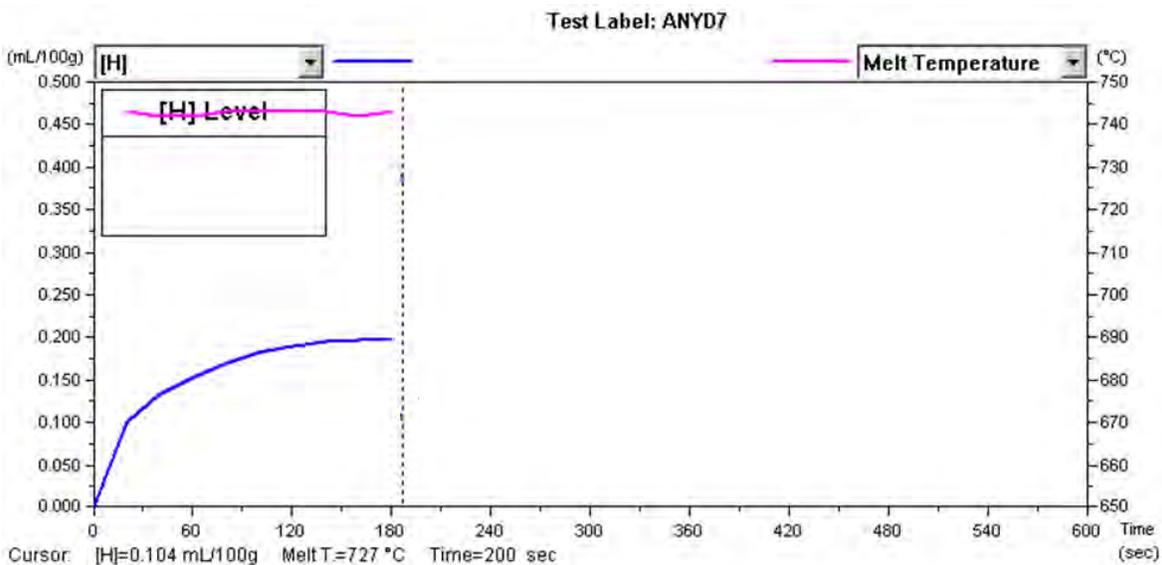


FIGURA 32. Representación de medición de hidrógeno del software AISCAN en 7 minutos.



En la FIGURA 33. se puede ver la medición del hidrógeno desgasificado por 12 minutos por medio del AISCAN. La lectura se ve con la línea azul que representa la concentración de hidrógeno en aluminio con respecto al tiempo de medición. La prueba se detiene una vez obtenida una concentración constante en el tiempo. La línea rosa marca la temperatura de medición.

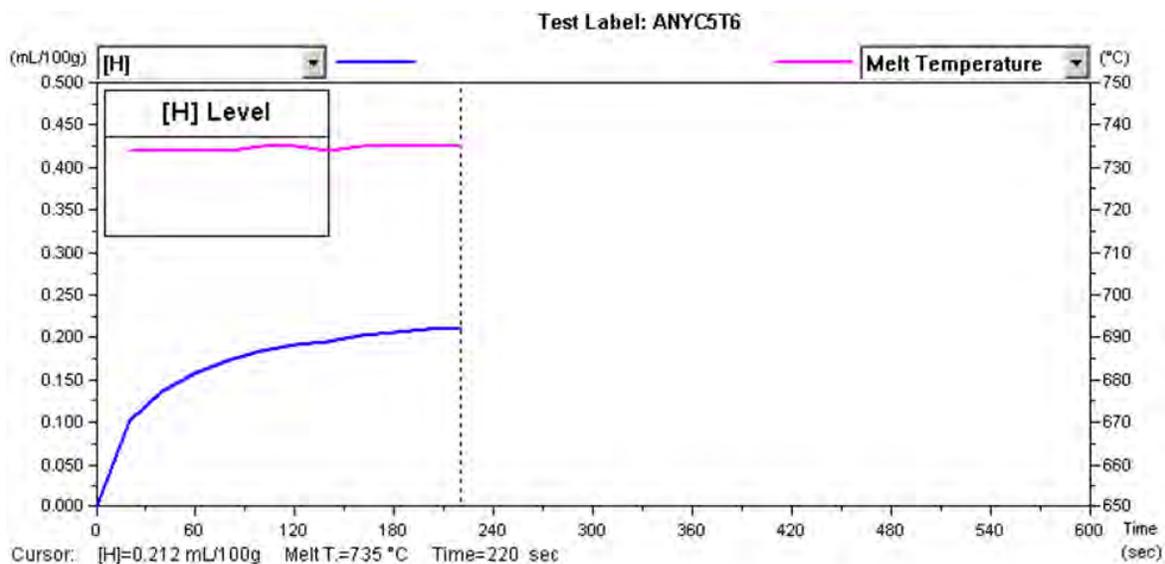


FIGURA 33. Representación de medición de hidrógeno del software AISCAN en 12 minutos.

La Tabla 2. muestra en la segunda columna las concentraciones finales de hidrógeno después de la gasificación y en la tercera columna las concentraciones finales después de la desgasificación de aluminio, ya que el último valor obtenido tanto en la prueba de gasificación como desgasificación sirven para describir el contenido de gas a través de una concentración adimensional de hidrógeno, de tal manera que cada experimento empieza con una concentración unitaria y al final del mismo la concentración adimensional representa la fracción de gas eliminada para el rotor de 5 aspas.



Tabla 2. Concentraciones iniciales y finales de hidrógeno durante las prueba de gasificación y desgasificación para un rotor rediseñado de 5 aspas.

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>[H<sub>2</sub>] inicial</b>	<b>[H<sub>2</sub>] final</b>	<b>[H<sub>2</sub>] final/[H<sub>2</sub>] inicial</b>
0	0.422	0.422	1
60	0.424	0.312	0.735
180	0.445	0.223	0.501
420	0.658	0.197	0.299
720	0.719	0.185	0.257
720D	0.657	0.219	0.333

La TABLA 3. se muestran de igual manera las columnas 2, 3 y 4 que representan concentraciones finales después de la gasificación, las concentraciones finales después de la desgasificación y la concentración adimensional respectivamente, pero en este caso para las mediciones con el rotor de 4 aspas. Estos datos plasmados en la Tabla 3. fueron tomados de un proyecto anterior.

Tabla 3. Concentraciones iniciales y finales de Hidrógeno durante las prueba de gasificación y desgasificación para el rotor de 4 aspas. <sup>[3]</sup>

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>[H<sub>2</sub>] inicial</b>	<b>[H<sub>2</sub>] final</b>	<b>[H<sub>2</sub>] final/[H<sub>2</sub>] inicial</b>
0	0.579	0.579	1
60	0.708	0.442	0.62
300	0.745	0.258	0.35
720	0.579	0.106	0.18

En la FIGURA 34. se muestra un gráfico, donde se observa la cinética de desgasificación de aluminio donde se colocaron las concentraciones adimensionales obtenidas a diferentes tiempos de desgasificado de 0, 1, 3, 7 y 12 minutos con el rotor rediseñado de 5 aspas.

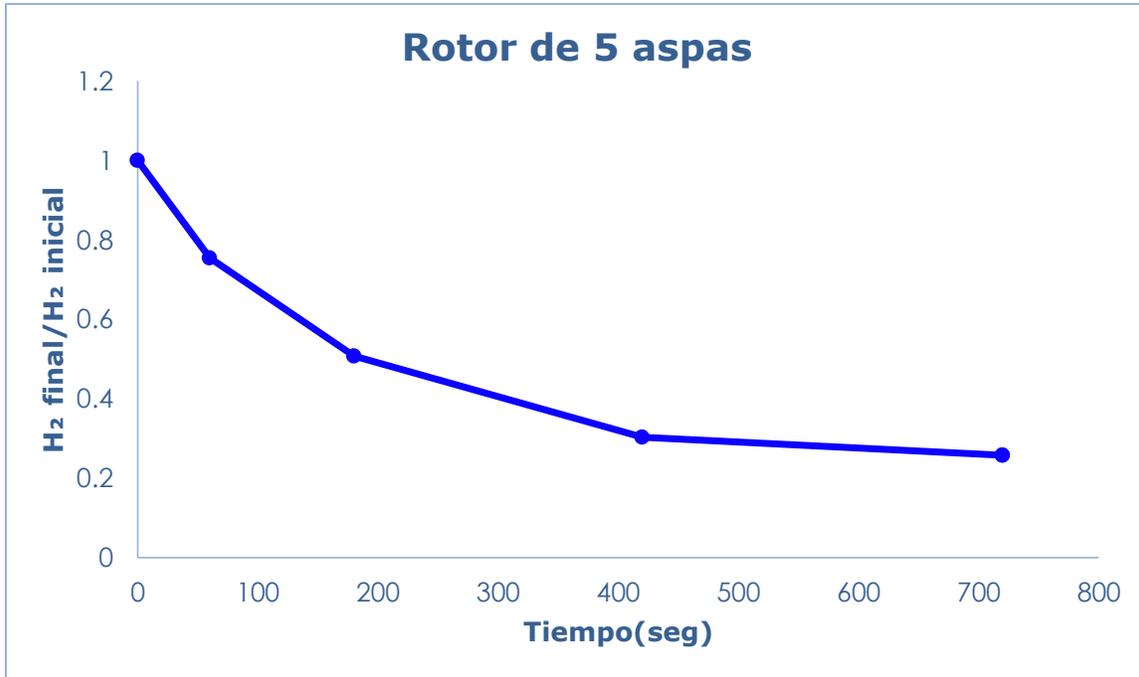


FIGURA 34. Cinética de desgasificación para rotor rediseñado de 5 aspas.

En la FIGURA 35. se muestra un gráfico, donde se observa la cinética de desgasificación de aluminio donde se colocaron las concentraciones adimensionales obtenidas a diferentes tiempos de desgasificado de 0, 1, 5 y 12 minutos con el rotor de 4 aspas.

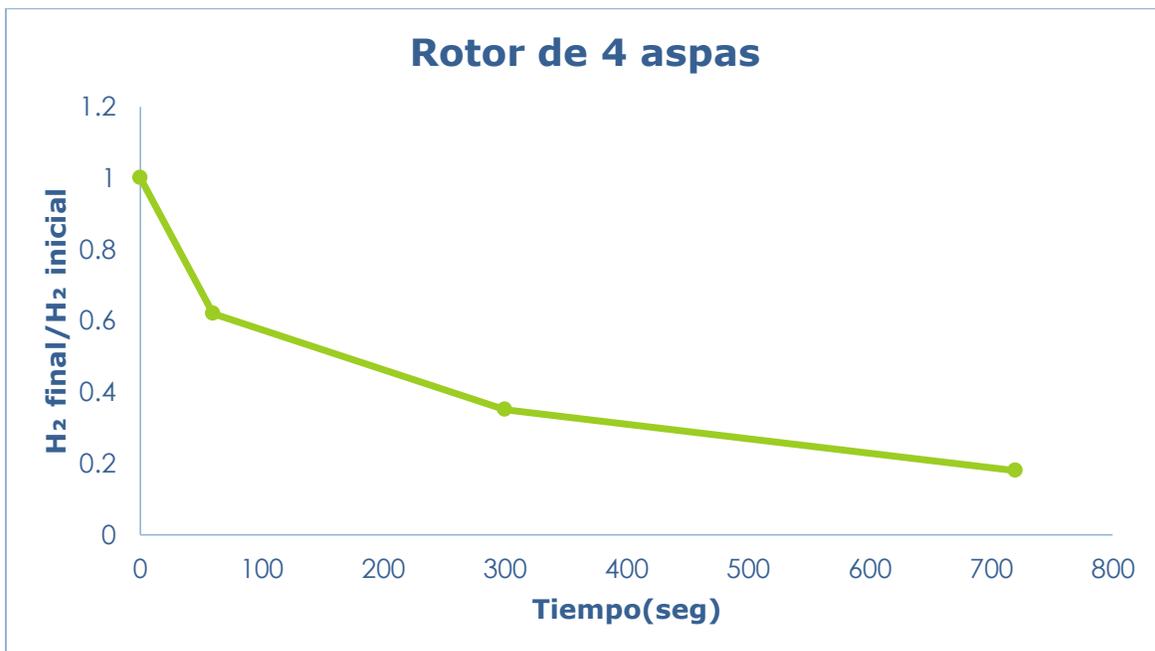


FIGURA 35. Cinética de desgasificación para rotor de 4 aspas.



En la FIGURA 36. se muestra un gráfico, donde se observa un comparativo de la cinética de desgasificación entre el rotor rediseñado de 5 aspas que se puede observar sus mediciones en el gráfico en puntos de color azul y el rotor de 4 aspas cuyas mediciones se observan en puntos de color verde. En dicha figura se aprecia el nivel máximo de desgasificación para ambos rotores, obteniendo un valor de 0.25 para el rotor rediseñado de 5 aspas y 0.18 para el rotor de 4 aspas. También se puede observar que a cualquier tiempo el rotor de 4 aspas presenta ligeramente mayor grado de desgasificación que el rotor de 5 aspas.

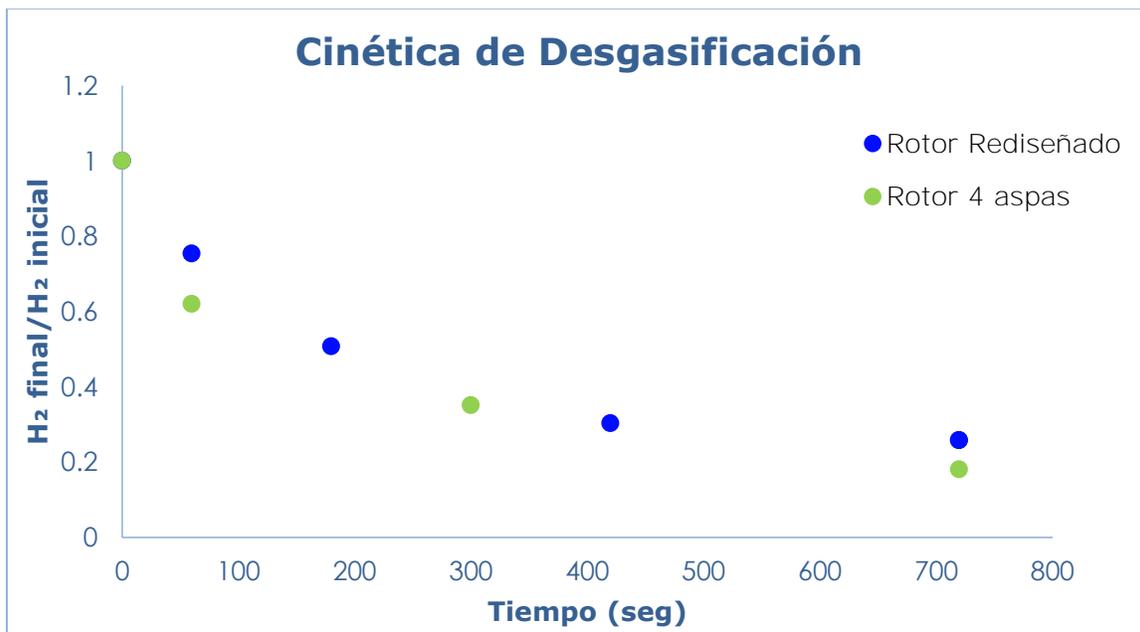


FIGURA 36. Cinética de desgasificación comparativo entre el rotor rediseñado de 5 aspas y el rotor de 4 aspas.

En la Tabla 4. se muestra en la primera columna el esfuerzo máximo a la tracción (UTS o TS), en la segunda columna el esfuerzo de cedencia (YS) y en la última columna el porcentaje de elongación, que se obtuvieron como resultado de la prueba de tensión, esto con el fin de obtener evidencia de la mejoría de las propiedades mecánicas del aluminio, antes y después de desgasificar las probetas de tensión



realizadas en este proyecto con el rotor rediseñado de 5 aspas. En esta tabla se muestra un comparativo entre las propiedades mecánicas obtenidas durante la experimentación y las propiedades mecánicas teóricas de un aluminio 1050 (99.5% aluminio). Los datos tanto el esfuerzo máximo a la tracción y el esfuerzo a la cedencia fueron obtenidos directamente de los gráficos de las curvas esfuerzo-deformación; por otro lado, los cálculos para obtener el porcentaje de elongación se basaron en las siguientes ecuaciones junto con los cálculos para la probeta gasificada y desgasificada a diferentes tiempos:

$$\%Elongación = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

$$\%Edesgasificado 7 \text{ min.} = \frac{58.42 - 50.1}{50.1} \times 100 = 16.61\%$$

$$\%Edesgasificado 12 \text{ min.} = \frac{60.05 - 50.8}{50.8} \times 100 = 18.20\%$$

$$\%Edesgasificado 12 \text{ min. con escoria} = \frac{52.72 - 50.1}{50.1} \times 100 = 5.23\%$$

$$\%Egasificado = \frac{52.43 - 50.1}{50.1} \times 100 = 4.65\%$$

Dónde:

$l_f$ : es la longitud final de la probeta (después de la fractura)

$l_0$ : es la longitud inicial de la probeta del ensayo mecánico.



Tabla 4. Propiedades mecánicas obtenidas con rotor rediseñado de 5 aspas.

Propiedades	UTS(MPa)	YS(MPa)	%ELONGACIÓN
Gasificado	48.61	23.67	4.65
Desgasificado 7 minutos	100.25	47.87	16.61
Desgasificado 12 minutos	107.69	53.84	18.20
Desgasificado 12 minutos con inclusiones	83.34	26.63	5.23
Aluminio1050 <sup>[13]</sup>	95	35	34

En la FIGURA 37. se muestra un gráfico de una curva de esfuerzo-deformación, obtenida mediante la prueba de tensión que se le realizó a la probeta de aluminio antes de desgasificar, y en la cual se pudieron obtener los valores que se plasman en la Tabla 4.



FIGURA 37. Curva de esfuerzo-deformación para prueba de gasificado con rotor rediseñado.



En la FIGURA 38. se muestra un gráfico de una curva de esfuerzo-deformación, obtenida mediante la prueba de tensión que se le realizó a la probeta de aluminio desgasificado durante un tiempo de 7 minutos, y en la cual se pudieron obtener los valores que se plasman en la Tabla 4.

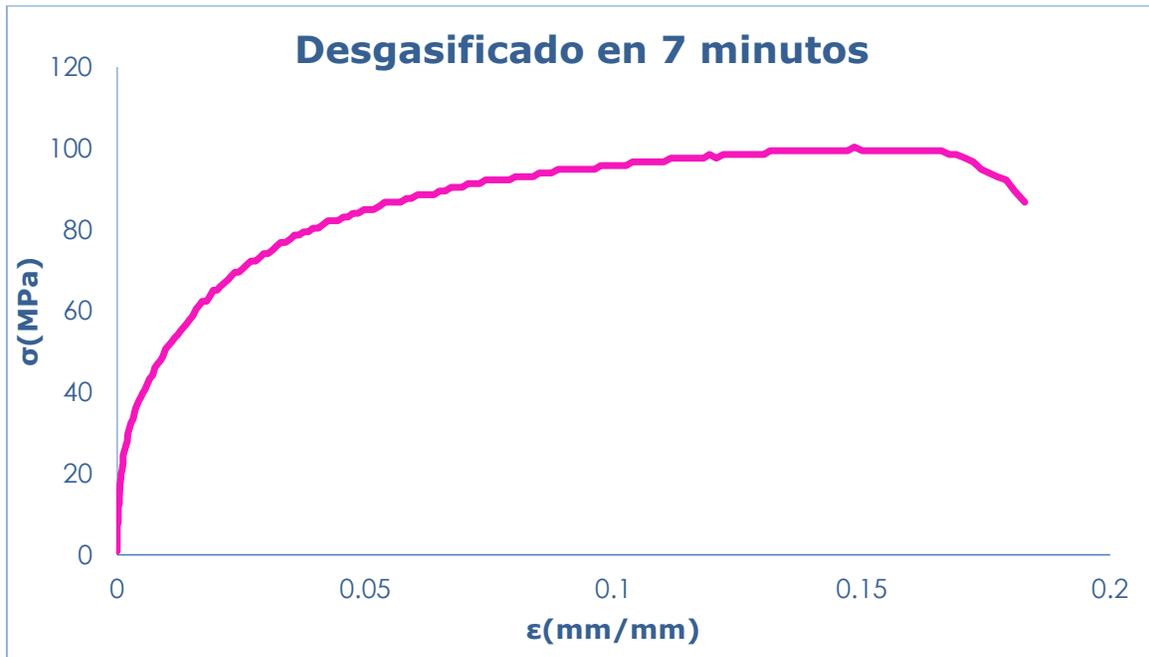


FIGURA 38. Curva de esfuerzo- deformación para prueba de desgasificado en 7 minutos con rotor rediseñado.

En la FIGURA 39. se muestra un gráfico de una curva de esfuerzo-deformación, obtenida mediante la prueba de tensión que se le realizó a la probeta de aluminio desgasificado durante un tiempo de 12 minutos, y en la cual se pudieron obtener los valores que se plasman en la Tabla 4.

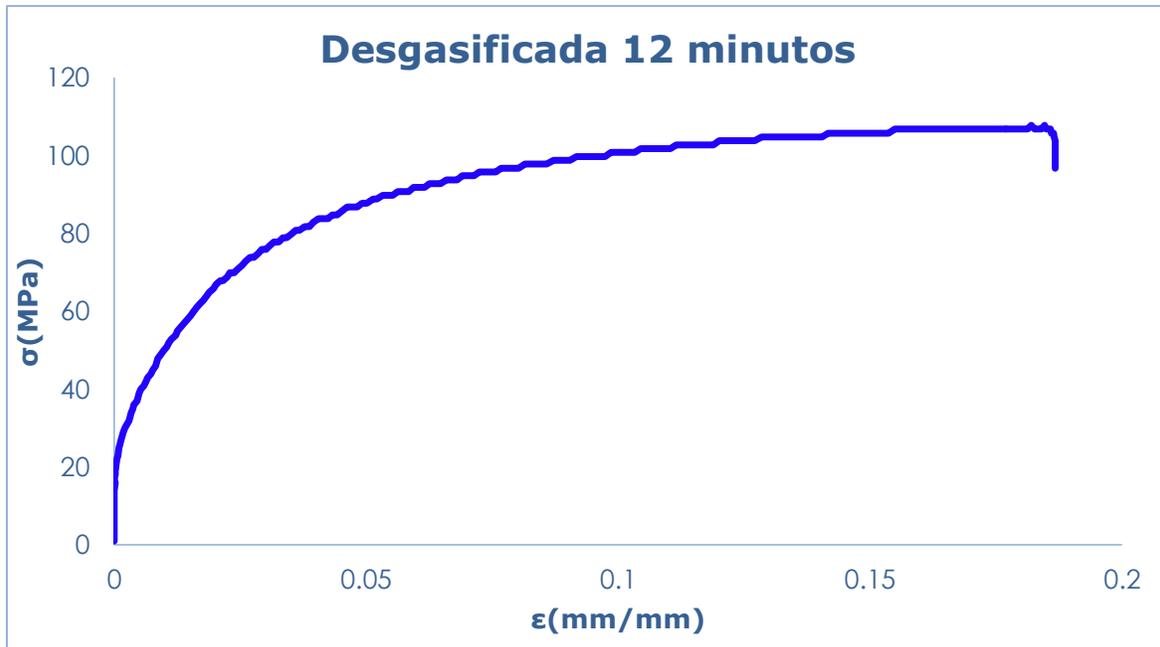


FIGURA 39. Curva de esfuerzo-deformación para prueba de desgasificado en 12 minutos con rotor rediseñado.

En la FIGURA 40. se muestra un gráfico de una curva de esfuerzo-deformación, obtenida mediante la prueba de tensión que se le realizó a la segunda probeta de aluminio desgasificado durante un tiempo de 12 minutos, debido a los datos registrados previamente se tuvo que realizar por duplicado la prueba de 12 minutos para corroborar los datos obtenidos, en este caso se observó presencia de escoria en la muestra, lo cual disminuyó el esfuerzo máximo a la tracción como se puede observar en el gráfico de la FIGURA 41., los datos numéricos obtenidos se plasman en la Tabla 4.

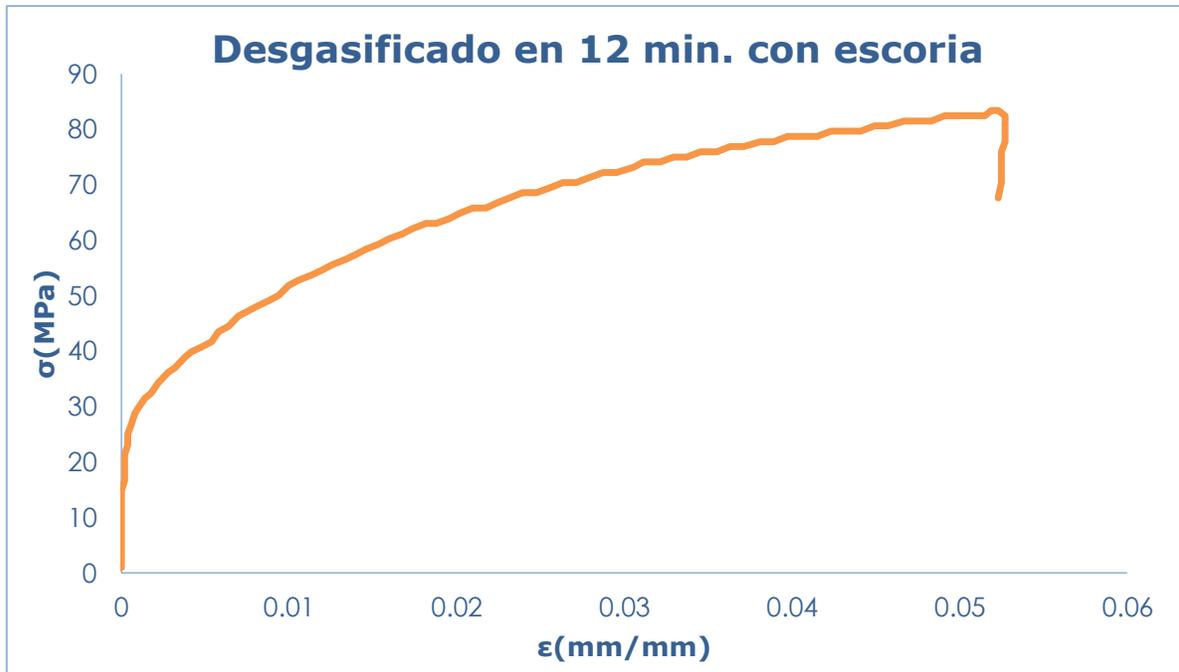


FIGURA 40. Curva de esfuerzo- deformación para prueba de desgasificado en 12 minutos con rotor rediseñado y presencia de escoria.

En la FIGURA 41. se muestra un gráfico comparativo de una curva de esfuerzo-deformación entre la probeta gasificada (línea en color verde) y las probetas desgasificadas, en la línea de color azul muestra la primer probeta de 12 minutos, en línea de color rosa la probeta de 7 minutos y en línea color naranja la segunda probeta de 12 minutos. En este gráfico se puede observar el aumento en las propiedades mecánicas cuando el aluminio es sometido a desgasificación. Como era de esperarse a mayor tiempo de desgasificado las propiedades mecánicas van aumentando, en el caso de la probeta duplicada de 12 minutos (línea naranja) se observa una disminución en las propiedades mecánicas considerable, esto debido a que al momento de la fractura de la probeta en la prueba de tracción presentó gran cantidad de escoria, lo cual generó dicha disminución en las propiedades mecánicas. La presencia de porosidad y escoria se pueden observar en las metalografías que se presentan posteriormente.

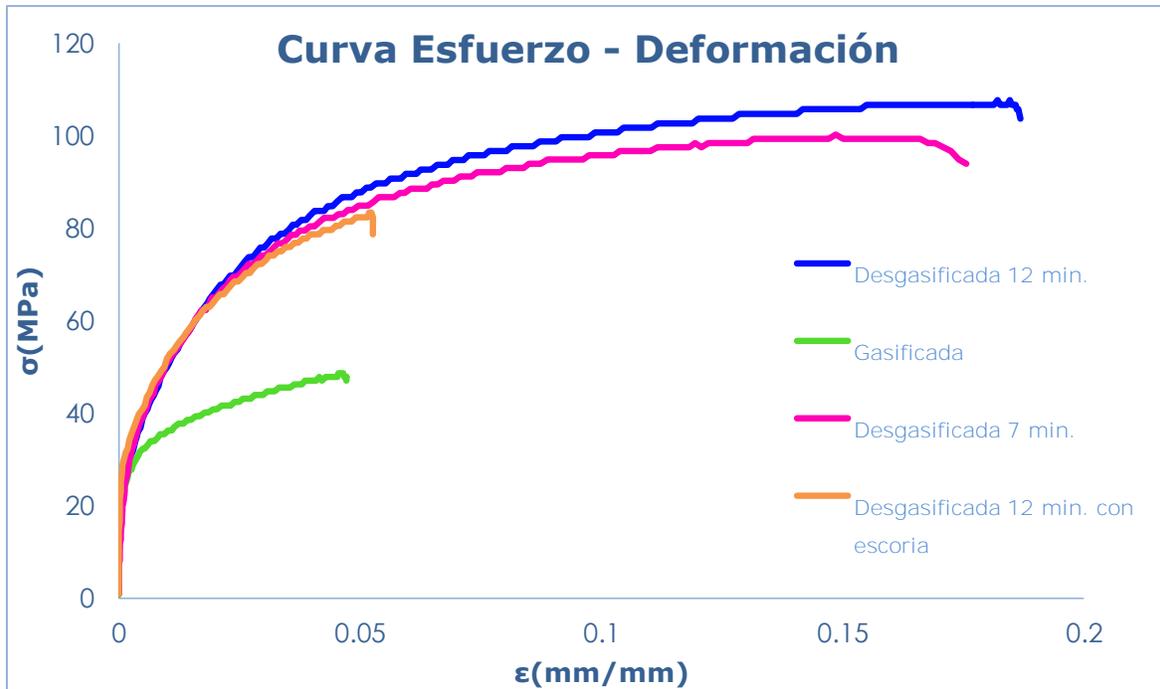


FIGURA 41. Curva de esfuerzo- deformación comparativa entre prueba de desgasificado y gasificada con rotor rediseñado.

En la FIGURA 42. se presentan dos imágenes de la metalografía realizada en la parte donde fracturó la probeta gasificada, en la cual se puede observar en la imagen [a] presencia de micro porosidad en pequeños círculos color negro e inclusiones y en la imagen [b] porosidad e inclusiones en formas irregulares color negro, esta imagen fue tomada a 100 aumentos y en diferentes lugares de la pieza.



FIGURA 42. Metalografía de la probeta gasificada tomada en aumento de 100x.



En la FIGURA 43. se presenta una imagen de la metalografía realizada en la parte donde fracturó la probeta desgasificada en 7 minutos, en la cual se puede observar pequeña presencia de micro-poros(pequeños círculos color negro), esta imagen fue tomada a 100 aumentos.



*FIGURA 43. Metalografía de la probeta desgasificada en 7 minutos tomada en aumento de 100x.*

En la FIGURA 44. se presenta una imagen de la metalografía realizada en la parte donde fracturó la primer probeta desgasificada en 12 minutos, en la cual se puede observar poca presencia de porosidad observando un pequeño micro-poro(pequeña forma irregular color oscuro) esta imagen fue tomada a 100 aumentos.



*FIGURA 44. Metalografía de la probeta desgasificada en 12 minutos tomada en aumento de 100x*



En la FIGURA 45. se presenta una imagen de la metalografía realizada en la parte donde fracturó la probeta desgasificada duplicada en 12 minutos, en la cual se puede observar la mayor parte de la imagen presencia de inclusiones (forma irregulares en color negro) esta imagen fue tomada a 100 aumentos.



*FIGURA 45. Metalografía de la probeta desgasificada en 12 minutos con escoria tomada en aumento de 100x.*



### **3.2 Discusión.**

Mediante los gráficos y tablas obtenidos, logro observar la importancia que tiene la desgasificación de aluminio mediante los rotores utilizados, tanto en su geometría, como la temperatura y el flujo de gas que se manejó durante la experimentación.

Uno de los principales factores que se manejó para una mejora en la desgasificación de aluminio fue la geometría del rotor. En el caso del rotor rediseñado se modificó el número de aspas siendo estas 5 aspas, así como su sección troncocónica la cual no afecta ni beneficia la desgasificación, dicho rotor beneficiaría la cinética de desgasificación con el aumento de un aspa con respecto a un rotor de 4 aspas. Los valores obtenidos de la cinética de desgasificación del rotor de 4 aspas fueron tomadas de un proyecto anterior, en el cual se manejó el mismo procedimiento solo que en tiempos distintos. Cómo se observó en la FIGURA 36., el gráfico mostró dicha cinética para ambos rotores en el cual se observó claramente que el rotor de 4 aspas mejoró la desgasificación de aluminio líquido, este resultado se debió a varios factores que afectaron los resultados obtenidos que se mencionan a continuación:

1. El diseño del rotor rediseñado de 5 aspas, aparentemente había sido mal diseñado, ya que como se observa en la FIGURA 14. la dirección de las aspas están en sentido contrario comparado con el rotor de 4 aspas, lo cual se descartó al momento que se realizó la experimentación con otro rotor el cual se mandó a maquinar con la dirección de las aspas en el mismo sentido que el rotor de 4 aspas; con dicho rotor se realizó una sola prueba de desgasificado siendo esta la del mayor tiempo (12 minutos), esto con el fin de comparar la concentración de hidrógeno con respecto a los otros 2 rotores, dicha concentración adimensional dio como resultado



0.40, comparando con el valor obtenido con el rotor de 5 aspas con las aspas en sentido opuesto, dio un valor menor siendo la concentración de 0.25. Ya que el objetivo de esta tesis es disminuir la concentración de hidrogeno no se continuó con la experimentación utilizando este rotor.

Por otro lado aunque se utilizó el rotor rediseñado de 5 aspas en sentido contrario al rotor de 4 aspas no se logró que dicho rotor rompiera las burbujas generadas en el aluminio, por lo cual no se generó la suficiente fuerza de corte en el metal líquido para romper el flujo de gas en burbujas pequeñas, y así poder transferir una mayor energía mecánica al sistema promoviendo un mayor momentum radial y por ende burbujas de argón más pequeñas, aumentando así la superficie de contacto entre el argón e hidrógeno y favorecer el transporte de masa por convección de la especie  $H$  desde el seno del metal líquido hasta la intercara metal líquido/burbuja, ya que tanto el aumento en la convección como en el área interfacial aceleran la cinética de desgasificado. Pero debido al diseño del rotor esto no fue posible, por lo cual la cinética de desgasificación del rotor rediseñado no mejoró la eliminación de burbujas de hidrógeno. Aunque cabe mencionar que pese a que el rotor rediseñado no fue mejor, tampoco existe una gran diferencia entre los valores de ambos rotores, como se observa en la FIGURA 36. y en la Tablas 2 y 3 los valores entre ambos rotores soy muy cercanos. En otros estudios de modelado físico de este rotor de 5 aspas, se encontró que el rotor presenta un tipo de capacitancia de gas, lo que hace intermitente la expulsión de burbujas finas hacia el baño, lo cual no ocurre para el rotor de 4 aspas que continuamente expulsa burbujas. Esto puede explicar la diferencia en el desempeño que fue observada y



aunque fueron parecidos los desempeños, fue ligeramente superior el de 4 aspas comparado con el de 5 aspas.

2. El segundo factor importante y crucial en la experimentación fue el control de la temperatura. Las mediciones de la solubilidad de hidrógeno en aluminio líquido que lee el software AISCAN dependen totalmente de la temperatura dichos valores se rigen por la ecuación de la ley Sievert. Algunos de los puntos de experimentación como lo son los tiempos de 1 y 3 minutos como se observa en la FIGURA 30. y FIGURA 31. se llevaron a cabo en una temperatura de trabajo de 743 °C, dicha temperatura se debió a que existe mucha inercia térmica en el horno de quemadores de gas utilizado, ya que en este tipo de horno no hay un buen control de temperatura; además de que estos dos puntos se realizaron en un día distinto a los últimos puntos (diferente humedad relativa ambiental), por lo cual en estos últimos puntos que fueron en los minutos 7 y 12, se optó por dar un sobrecalentamiento al metal líquido en el horno de quemadores y gasificar unos 10 minutos con el fin de disminuir un poco la temperatura para posteriormente terminar de gasificar en el horno de resistencias como se observa en el FIGURA 20. para obtener un mejor control en la temperatura y así trabajar en 730°C aproximadamente, esto casi se logró y se puede observar en las FIGURAS 32 y 33.
3. El último factor presente fue el flujo de gas argón, este factor no fue tan crucial, pero si es importante estar observando mediante el flujometro que el flujo de gas no disminuya y permanezca constante, lo cual se estuvo revisando durante la experimentación constantemente.



Por otro lado como se ha visto el aluminio ha aumentado su producción en la industria automotriz y aeronáutica esto debido a sus excelentes propiedades mecánicas. La desgasificación del aluminio es de suma importancia para obtener buenas propiedades mecánicas, como se puede observar en la Tabla 4. Al desgasificar el aluminio puede mejorar el porcentaje de elongación hasta 3 veces más que si no se desgasifica; así como se puede observar una mejoría en su resistencia máxima a la tracción que en caso de la probeta desgasificada en un tiempo de 12 minutos fue de 107.69 MPa y la probeta gasificada de 48.61 MPa, es decir, que si se desgasifica se puede mejorar más del doble su resistencia a la tracción que si no se desgasifica. Estos valores obtenidos experimentalmente mejoran dichas propiedades que un aluminio 1050 comercial, a excepción del porcentaje de elongación que en el caso del aluminio 1050 fue de 34%, aunque cabe mencionar que las propiedades de este tipo de aluminio relacionan no solo al metal, sino a los elementos aleantes y a los tratamientos térmicos que se les realizan, los cuales pueden mejorar dicho porcentaje.

Otro aspecto importante es la presencia de escoria en el metal líquido, como se comentó anteriormente, la prueba de desgasificado de 12 minutos se realizó por duplicado esto con el fin de comparar los datos entre sí, pero se observó a partir de los datos obtenidos en la Tabla 2., que los datos eran muy distintos, por lo cual al realizar la prueba de tensión, se pudo obtener mediante el gráfico (ver FIGURA 40.) que las propiedades mecánicas para esta probeta disminuyeron, comparando con la primer probeta de 12 minutos, esta comparación se puede observar más claramente en la FIGURA 41., donde se ve en línea azul la primera probeta de 12 minutos y en línea naranja la segunda probeta de 12 minutos, y donde se observa claramente que el porcentaje de elongación disminuye por lo menos tres veces, en cuanto a la resistencia



a la cedencia disminuye por lo menos el doble de esta propiedad y por último la resistencia máxima a la tracción disminuyó aproximadamente un 22%. Mediante la rotura de la prueba de tensión (ver FIGURA 29.), como en la metalografía realizada en la segunda probeta de 12 minutos, se observó presencia de escoria en el metal como se puede observar en la FIGURA 45., lo cual generó la disminución de las propiedades mencionadas.



## 4 Conclusiones.

- El rotor rediseñado de 5 aspas no fue capaz de promover un flujo turbulento y por ende una fuerza de corte en el metal líquido suficiente para romper el flujo de gas en burbujas pequeñas; por lo que la cinética de desgasificación no mejoró con el rotor rediseñado con respecto al rotor de 4 aspas. Aunque los desempeños de ambos rotores son similares.
- El control de temperatura juega un papel importante en la solubilidad de hidrógeno en aluminio, por lo que se controló las inercias térmicas presentes en los hornos, mediante la gasificación tanto en el horno de quemadores como en el horno de resistencias, así como el precalentamiento de la flecha con el rotor para el desgasificado. Adicionalmente cambiar de día durante la experimentación implicó cambio en las humedades relativas y pudo ocasionar sesgo en las mediciones del contenido de hidrógeno en aluminio.
- Las propiedades mecánicas tales como la resistencia máxima a la tracción, la resistencia a la cedencia y el porcentaje de elongación mejoran notablemente con la desgasificación de aluminio con el rotor rediseñado de 5 aspas (más del doble en todas estas propiedades en la condición desgasificada respecto a la gasificada del aluminio).



## 5 Bibliografía.

- [1] AFS. (1993). Aluminum Casting Technology, 2nd Edition. AFS. USA. 15 25p .
- [2]. Gruzleski, J.E. (1992). The Treatment of liquid Al-Si Alloys. AFS. USA.
- [3] Hernández, Navarro, R. (2017). Análisis del desempeño de dos rotores nuevos para el desgasificado de aluminio a nivel laboratorio de fundición. Tesis de licenciatura. UNAM. México. 38 p.
- [4] Engh T.A., Pedersen T. (1984). Removal of hydrogen from molten aluminium by gas purging. Light Metals 1984. TMS. 1329–1344 p.
- [5] V. S. Warke, G. Tryggvason, and M. M. Makhlof. (2005). Mathematical modeling and computer simulation of molten metal cleansing by the rotating impeller degasser: Part I. Fluid flow. Journal of materials processing technology, Vol. 168 (No. 1), 112-118 p.
- [6] J. Szekely, J. Evans and J. K. Brimacombe. (1988). The mathematical and physical modeling of primary metals processing operations. John Wiley and sons. 194-195 p.
- [7] Nilmani M. (1992). Comparative study of impeller performance. Light Metals. 939-942 p.
- [8] J. L. Camacho-Martínez, M. A. Ramírez-Argáez, R. Zenit-Camacho, A. Juárez-Hernández, O. J. Barceinas-Sánchez and G. Trápaga-Martínez. (2010). Physical Modelling of an Aluminium Degassing Operation with Rotating Impellers—A Comparative Hydrodynamic Analysis. Materials and Manufacturing Processes, Vol. 25 (No. 7), 581-591 p.
- [9] M. Saternus, and J. Botor, J. (2006). The physical and mathematical model of aluminium refining process in reactor URO-200. Advanced Processing of Metals and Materials—Thermo and Physicochemical Principles, TMS, 697-710.



[10] M. Hernández Hernández. (2015). Estudio de la cinética de desgasificación de aluminio con rotor inyector, variando el punto de inyección de gas y el diseño del rotor asistido por el modelo matemático y planta piloto. Tesis de doctorado. UNAM. México. 17p.

[11] M. M. Makhoulf, L. Wang and D. Apelian. (1998). Measurement and removal of hydrogen in aluminum alloys. Metal processing. AFS. 21-55 p.

[12] AISCAN™ User's Manual. ABB Inc. Analytical and Advanced Solutions. Québec, Canada. 28-34 p.

[13] M. P. Groover. (1997). Fundamentos de manufactura moderna. 1ra edición. Pearson. México. 150 p.