



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DE LA DESGASIFICACIÓN
MEDIANTE EL MÉTODO DE ROTOR-INYECTOR EN
ALEACIONES DE ALUMINIO LÍQUIDO PARA PIEZAS
DE COLADA A PRESIÓN (DCP)”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A:

ERIK FABIÁN LÓPEZ RAMÍREZ



MÉXICO, D.F.

2015



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Prof. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

VOCAL: Prof. José Alejandro García Hinojosa

SECRETARIO: Prof. Adrián Manuel Amaro Villeda

1er SUPLENTE: Prof. Luis Darío Escobar Mejía

2° SUPLENTE: Prof. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

Sitio donde se desarrolló el tema:

Burner Systems International de México, Carr. Federal Querétaro-Celaya
Km. 44.2, Predio Tierra Blanca, 38160 Apaseo El Grande, Gto

ASESOR DEL TEMA: Dr. José Alejandro García Hinojosa

SUPERVISOR TÉCNICO: M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

SUSTENTANTE: Erik Fabián López Ramírez

Contenido

Resumen	6
Capítulo I ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS	8
1.1 Introducción	8
1.2 Burner systems international de méxico s.a. de c.v.....	8
1.3 Reproducibilidad del test de presión reducida (RPT)	10
1.4 Proceso de inyección de aluminio.	11
1.4.1 Inyección por cámara caliente.	12
1.4.2 Inyección por cámara fría.	13
1.5 Hornos para fundición de aluminio	14
1.5.1 Horno de reverbero.	14
1.5.2 Horno rotativo.....	17
1.5.3 Horno de crisol.....	18
1.6 Características de aleaciones para DC	19
1.7 Características metalúrgicas del aluminio líquido.....	20
1.7.1 Oxidación del aluminio	20
1.7.2 Absorción de hidrógeno.	22
1.8 Fuentes de hidrogeno en el proceso de fusión.	24
1.8.1 La atmósfera	24
1.8.2 Fundentes.....	24
1.8.3 Crisoles.....	24
1.8.4 Gases de combustión.....	24
1.8.5 Refractarios.....	25
1.8.6 Herramental de fundición.....	25
1.8.7 Materiales de carga.....	25
1.9 Efecto de los elementos aleantes en la solubilidad de hidrogeno.	26
1.10 Etapas de la formación de sopladuras por Hidrógeno disuelto.	27
1.11 Métodos de remoción de hidrógeno del aluminio	29
1.11.1 Desgasificado Natural.....	29
1.11.2 Desgasificado al Vacío.....	30
1.11.3 Vibración Ultrasónica	30
1.11.4 Desgasificado con Purga de Gases.....	30

1.12	Métodos de tratamiento de gas inerte dentro del aluminio líquido.	32
1.12.1	Lanza de grafito.	32
1.12.2	Lanza con tapón poroso.	32
1.12.3	Rotor Inyector.	32
1.13	Métodos para determinar el contenido de hidrógeno en aleaciones de aluminio líquido	34
1.13.1	ALSPEK H y ALSPEK MQ	34
1.13.2	Telegas® y AISCAN®	35
1.13.3	Ensayo de Presión Reducida (Reduced Pressure Test, RPT)	36
1.14	Métodos para medir la densidad	37
1.14.1	Determinación de densidad por el método de balanza y probeta	38
1.14.2	Densidad aparente.	38
1.14.3	Determinación de densidad por el método de balanza hidrostática.	39
1.15	Diseño de reactores de mezclado	40
Capítulo II	EQUIPO DE CAMPO A UTILIZAR	44
2.1	Equipo de presión reducida	44
2.2	Olla de tratamiento.	45
2.3	Unidad de desgasificación.	45
Capítulo III	Desarrollo experimental	48
3.1	Metodología de trabajo general.	48
3.2	Desarrollo de muestreo en planta.	49
3.3	Variables del tratamiento por el método de Rotor-Inyector.	50
3.4	Esquema de la variación de la velocidad de rotación.	50
3.5	Variación del flujo de gas de purga y el tiempo de tratamiento.	51
Capítulo IV	Resultados y discusión	52
4.1	<i>Etapa 1: Caracterización de las condiciones iniciales del proceso y resultados previos.</i>	52
4.1.1	Pérdidas de temperatura en el proceso previamente establecido en BSI (Desgasificación con lanza).	52
4.1.2	Caracterización del equipo para el tratamiento de desgasificación con el método de Rotor-Inyector.	54
4.1.2.1	Diseño de la altura del rotor.	54
4.1.2.2	Velocidad de rotación.	55
4.1.3	Mediciones de densidad.	56

4.1.4	Relación de la densidad con el porcentaje de porosidad.	58
4.1.5	Análisis metalográfico.....	59
4.2	<i>Etapa 2: Tratamiento de desgasificación con el equipo de Rotor-Inyector.....</i>	62
4.2.1	Efecto del desgasificado con el rotor-inyector.	62
4.2.2	Flujo de gas Nitrógeno inyectado.	64
4.2.3	Efecto de la temperatura de vaciado.	66
4.2.3.1	<i>Relación entre la temperatura antes del tratamiento y la pérdida de temperatura después de cada condición de flujo.....</i>	67
4.2.3.2	<i>Relación de la temperatura antes del tratamiento con la densidad promedio en cada condición de flujo.</i>	69
4.2.4	Velocidad del rotor.	70
4.2.5	Tiempo de tratamiento.	72
4.2.6	Nivel de Aluminio líquido.	76
4.2.7	Condiciones de operación para niveles de Aluminio líquido entre 30% y 50% de capacidad máxima de la olla.	77
Capítulo V	Resumen de análisis de resultados	80
Capítulo VI	Conclusiones	82
REFERENCIAS	84

Resumen

El Hidrógeno es el único gas con solubilidad apreciable en aleaciones de Aluminio líquido. Industrialmente, éste gas se incorpora al metal líquido en cantidades que dependen de la técnica de fusión (condiciones y tipo de carga, tipo de horno, temperatura de trabajo, humedad en el medio ambiente, etc.). La presencia de porosidad por hidrógeno resulta en deterioro de la calidad metalúrgica y especialmente en las propiedades mecánicas. Desde luego, éste fenómeno se presenta en los procesos de colada a presión que usan hornos de reverbero, para proveer de aluminio a los hornos de mantenimiento, localizados junto a las máquinas de colada a presión. Por lo que resulta de vital importancia aplicar métodos de desgasificación que sean adecuados a los procesos de fusión y técnicas que aplica cada planta en particular.

En éste trabajo, se evalúa el efecto en la desgasificación de aluminio líquido con el método de rotor-inyector para piezas de colada a presión. Dicha evaluación se realizó con mediciones de temperatura, tiempo de traslado y tratamiento, y muestras estandarizadas de la aleación de aluminio por el test de presión reducida (RPT, Reduced Pressure Test); con las cuales se obtuvieron resultados cuantitativos de porosidad y densidad específica. El tratamiento de desgasificación se llevó a cabo con la unidad de desgasificación proporcionada por la empresa Burner Systems International de México S.A. de C.V (BSI Celaya). Este trabajo se dividió en dos etapas. La primera etapa consistió en determinar las condiciones de operación previamente establecidas en la empresa (BSI Celaya), así como determinar las variables internas y externas que puedan alterar los resultados del proceso y de esta manera realizar pruebas de seguridad con el equipo de desgasificado para evitar accidentes.

La segunda etapa consistió en la aplicación de los tratamientos de desgasificación con respecto al diseño experimental. Las variables estudiadas fueron velocidad de rotación, flujo de gas de purga, tiempo de tratamiento, temperatura del metal líquido antes del tratamiento y nivel de aluminio líquido dentro de la olla de tratamiento. Con estos resultados, se determinaron las condiciones óptimas del proceso de tratamiento al metal líquido que se requiere en la planta Burner Systems International de México S.A. de C.V (BSI Celaya), con el fin de

proveer Aluminio líquido con alta calidad metalúrgica a la siguiente etapa del proceso.

Objetivos

Evaluar la eficiencia del tratamiento de desgasificación de aleaciones de aluminio en el proceso de colada de inyección a presión, usando el método del rotor-inyector mediante pruebas de control de calidad como RPT Reduced Pressure Test y/o densidad, con la correcta aplicación e interpretación de dicha prueba.

Determinar el efecto de las distintas variables implicadas en el método de desgasificación con rotor-inyector, en las condiciones de proceso de la planta BSI.

Evaluar la eficiencia de la desgasificación por rotor-inyector con respecto al método de desgasificado por lanza.

Caracterizar la unidad de desgasificación de la planta BSI, estableciendo los parámetros adecuados de operación del equipo para dos alturas distintas de Aluminio líquido en la olla de tratamiento que se requiere en el proceso.

Determinar las condiciones adecuadas de temperatura, tiempo, velocidad de rotación y flujo de gas de purga, para dos alturas de aluminio líquido en la etapa de tratamiento de desgasificación con el método de rotor-inyector.

Hipótesis

Una eficiente desgasificación de la aleación líquida A380, puede ser lograda en base al control de los parámetros de desgasificación cuando se aplica el método de rotor-inyector, apoyados mediante el ensayo de presión reducida y de la densidad para determinar la porosidad en el aluminio.

Capítulo I ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS

1.1 Introducción

Es conocido que el hidrógeno naciente puede entrar en solución con gran facilidad en aleaciones de aluminio líquido; el cual es asociado a la técnica de fusión (condiciones y tipo de carga, tipo de horno, temperatura de trabajo, humedad en el medio ambiente, etc.). Consecuentemente la presencia de porosidad por hidrógeno resulta en deterioro de la calidad metalúrgica de las piezas y especialmente en las propiedades mecánicas. Desde luego, éste fenómeno se presenta en los procesos de colada a presión que usan hornos de reverbero para proveer de aluminio a los hornos de mantenimiento; localizados junto a las máquinas de colada a presión. Adicionalmente éste fenómeno, puede agravarse o eliminar el efecto del tratamiento de desgasificación asociado al manejo y trasvase de aluminio líquido, desde la unidad o zona de tratamiento hasta el horno de retención. Por lo que resulta de vital importancia aplicar métodos de desgasificación que sean adecuados a los procesos de fusión y técnicas que aplica cada planta en particular. Estas pruebas deben realizarse en puntos específicos y adecuados, con equipo bien calibrado, así como realizar una correcta interpretación que se relacione con las condiciones de operación del proceso. Esto con el propósito de definir en base a ellas, las medidas correctivas cuando sean necesarias.

1.2 Burner Systems International de México S.A. de C.V.

(BSI Celaya) se encuentra ubicada en Apaseo el Grande, Guanajuato, México. Ésta empresa se dedica a la fabricación de sistemas de gas para estufas. Actualmente fabrica diversos productos tales como:

quemadores, tubings de aluminio, tubos manifold, válvulas, reguladores y termostatos (Figura 1).



Figura 1. Piezas que se obtienen por Die-Casting. De izquierda a derecha, regulador, termostato, quemador y válvula. (1)

El área de fundición es de vital importancia en la empresa. Ya que de los productos que se obtienen, una serie va directamente a ensambles, como es el caso de los quemadores, siendo estos de diversos modelos. La otra serie de productos, pasa a la sección de maquinados, como es el caso de las válvulas, termostatos y reguladores. Estas piezas requieren una alta calidad metalúrgica debido a que en el proceso de maquinado y ensamble final, las piezas pueden contener poros e inclusiones; mismos que impactan directamente en la calidad y funcionalidad del producto donde se pueden encontrar piezas con rechupe, inclusiones, porosidad, fuga de gas (porosidad expuesta en el maquinado).

La empresa BSI actualmente trabaja con el proceso de fundición de inyección a presión (Die Casting); en el cual se inyecta la aleación de aluminio A380 que proviene del proceso de refundido de lingote y de los retornos de la planta. Estos retornos se conforman de rechazos de inspección visual, rechazos de maquinado, rechazos de pruebas finales de fuga de gas, derrames y arañas (sistema de colada del proceso). Todo esto se funde en un horno de reverbero con una capacidad de 4 toneladas aproximadamente, donde el metal está en contacto directo con los gases de combustión.

Para la empresa es de gran importancia la calidad de sus productos. Actualmente es empleado el proceso de desgasificación por lanza, pero en términos de porosidad y limpieza, se desea una mayor eficiencia y calidad. Hoy en día la empresa desea implementar nuevas técnicas con la finalidad de obtener la calidad deseada del metal líquido; por esta razón es necesario establecer las condiciones del tratamiento de desgasificado por Rotor-Inyector.

1.3 Reproducibilidad del test de presión reducida (RPT) (2)

D. Dişınar. Realiza pruebas de reproducibilidad de la técnica de Presión Reducida (RPT) como método para determinar la calidad del aluminio líquido. Su trabajo establece que si se trabaja con un molde metálico sin tratamiento de precalentamiento, los resultados son reproducibles a partir de la 4ta muestra. También define una presión óptima de vacío de 100 mbar, donde debe permanecer la muestra durante un periodo de tiempo de 5 a 7 minutos. Inclusive muestra que ésta técnica es un indicador de calidad que mide no solo la cantidad de Hidrógeno disuelto, sino también la cantidad de inclusiones presentes en el aluminio líquido, en la Figura 2 se presentan las muestras que obtuvo en su trabajo donde de un par de probetas en la primera corrida no se observa porosidad con respecto a las últimas pruebas, por ser esta diferencia en porosidad muy grande se especifica realizar pruebas previas de calibración ajustando los parámetros del equipo precalentando en cada muestreo la cuchara metálica y así los resultados de las probetas siguientes sean estables y confiables.

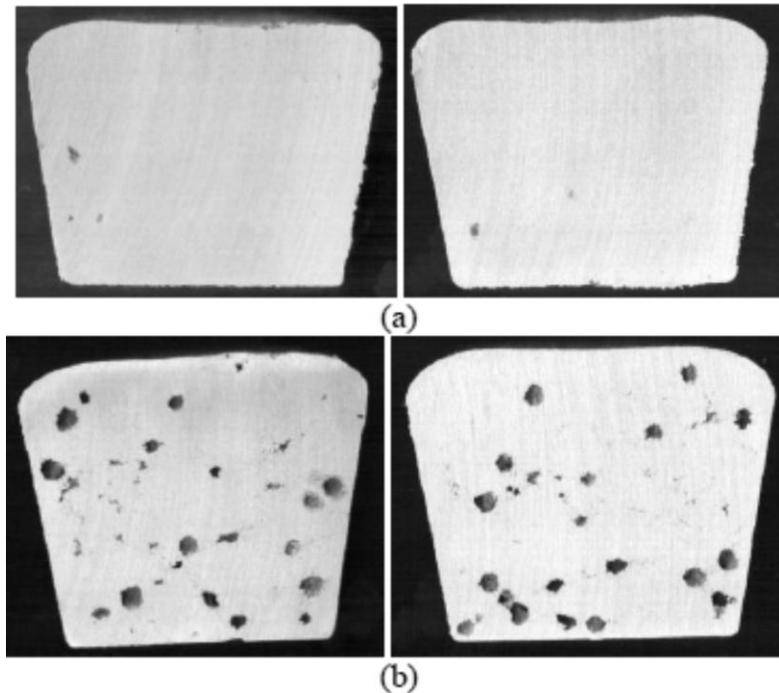


Figura 2. Estudio de reproducibilidad de muestras obtenidas por el equipo de presión reducida, es necesario llevar el equipo a condiciones estables con los primeros dos muestreos y precalentar la probeta de acero en cada toma posterior. Sección de corte de (a) primeras dos muestras y (b) últimas dos muestras de RPT. (2)

1.4 Proceso de inyección de aluminio. (3-4)

En el método de fundición por inyección a presión se funden piezas idénticas a un ritmo acelerado de producción, forzando el metal fundido bajo grandes presiones, a ingresar dentro de los moldes metálicos donde la solidificación se lleva a cabo en segundos. Las dos partes de la matriz de metal son colocadas de forma segura para poder resistir presiones altas. Cuando el metal se ha solidificado, las matrices son desbloqueadas y se abren para extraer la pieza fundida caliente.

Las dimensiones de la máquina se especifican de acuerdo a la carga de cerrado del molde y van desde 10 a 4.000 toneladas. En general podemos describir dos tipos.

1. Pequeñas: 25Ton (presión de cerrado del dado) y 1.000 psi de presión de inyección o menos para producir piezas pequeñas y ligeras de hasta 600 inyecciones por hora.
2. Grandes: 3.000 Ton (presión de cerrado del dado) e inyectan 100lb de Al por ciclo y presiones de inyección de 40.000 psi.

Existen dos métodos para la fundición a presión. Estos procesos son: cámara caliente y cámara fría.

1.4.1 Inyección por cámara caliente.

Se coloca una cámara que contiene aluminio líquido sobre la cual, actúa un pistón hidráulico en contacto directo con el metal líquido (Figura 3). Este proceso minimiza la turbulencia del metal líquido, la oxidación y las pérdidas de calor durante la transferencia de metal. Sin embargo tiempos prolongados en contacto con el metal líquido, provocan severos daños sobre los materiales del equipo. Se utiliza en aleaciones de bajo punto de fusión (Zamak, Pewter), que no atacan ni erosionan fácilmente los crisoles, cilindros ni pistones de metal.

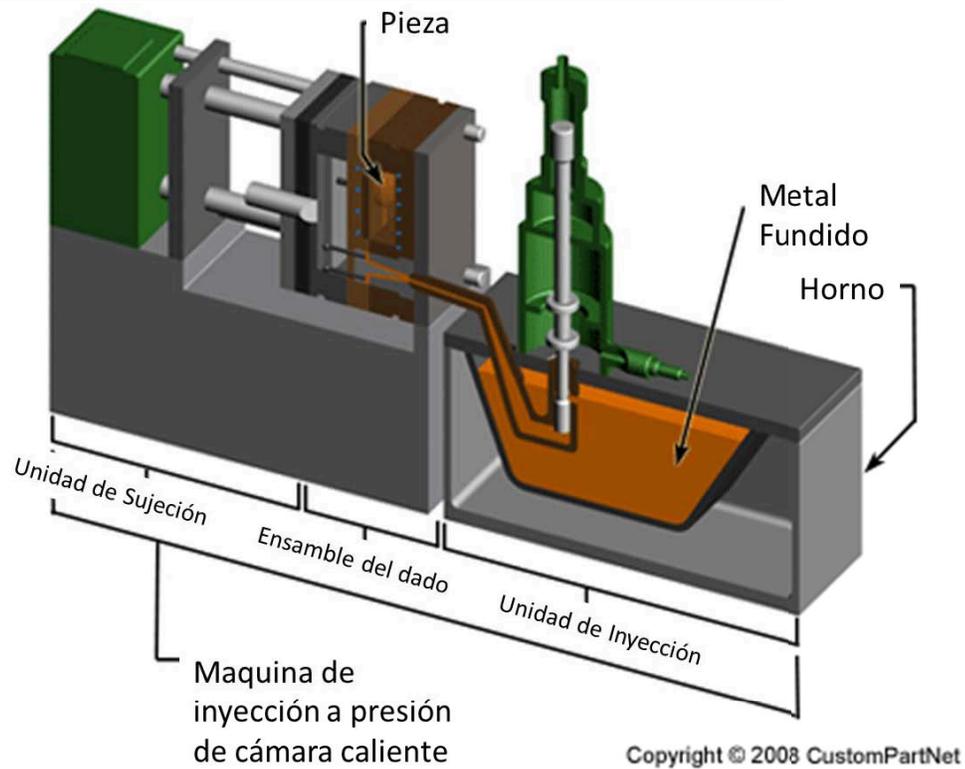


Figura 3. Esquema del equipo del proceso de cámara caliente. (4)

1.4.2 Inyección por cámara fría.

La máquina de cámara fría, como se ilustra en la Figura 4 es utilizada al igual que la antes mencionada para aleaciones de bajo punto de fusión integrando también aleaciones con alto punto de fusión (Al, y recientemente Mg). El metal fundido se vacía en una "cámara fría", en la manga cilíndrica de forma manual por un cucharón en mano o por una cuchara automática. Un émbolo hidráulico sella la cámara fría y el metal fundido es inyectado al molde a altas presiones.

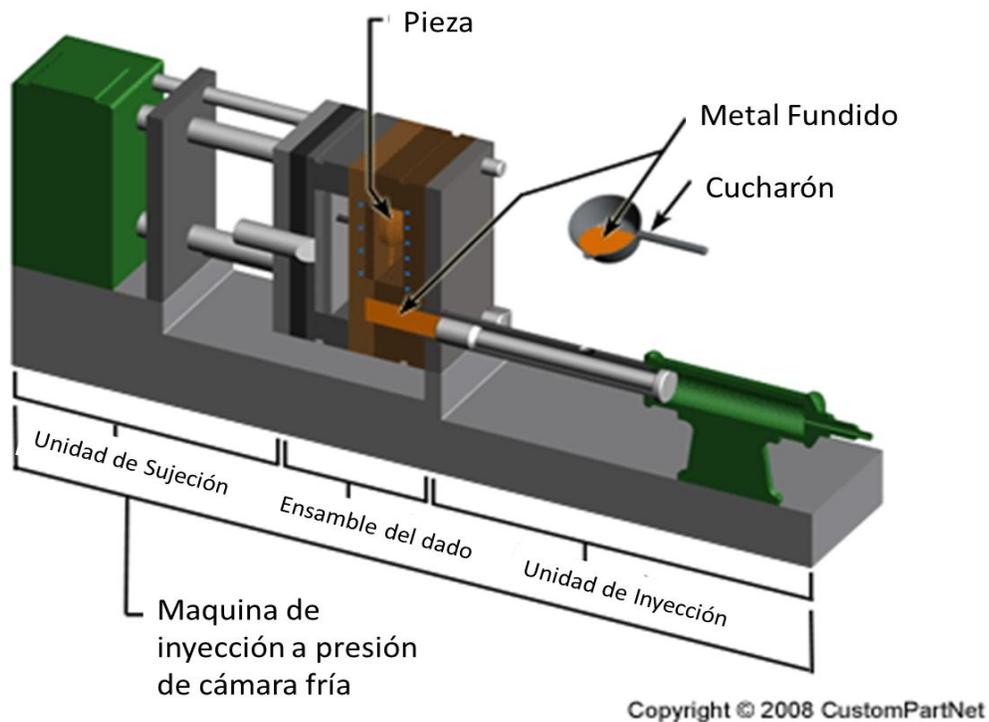


Figura 4. Esquema del equipo del proceso de cámara fría. (4)

1.5 Hornos para fundición de aluminio (5)

1.5.1 Horno de reverbero.

El término de horno de reverbero se remonta a la era de la segunda guerra mundial. Los hornos de reverbero se utilizan para la fundición de piezas de grandes dimensiones, tanto de metales férreos como de metales no férreos, tales como cobre, latón, bronce y aluminio.

Los hornos de reverbero son de poca altura y gran longitud. En uno de los extremos se encuentra el hogar donde se quema el combustible y en el extremo opuesto se encuentra la chimenea. Las llamas y productos de la combustión atraviesan el horno y son dirigidos por la bóveda de forma adecuada hacia la solera del horno, donde está situada la carga

del metal que se desea fundir. Esta carga se calienta, no solo por su contacto con las llamas y gases calientes sino también por el calor de radiación de la bóveda del horno de reverbero.

Este concepto viejo para fundir aluminio, es usado aún en muchas fundiciones, sin embargo la tendencia, es usar quemadores en la parte superior o quemadores laterales dirigidos hacia la superficie del metal. En esencia, la tendencia es calentar el metal y no el horno para una operación eficiente.

Los hornos de reverbero encendidos con fuego directo, pueden ser designados de cámara húmeda o de cámara seca. En un horno de cámara húmeda, el producto de la combustión está en contacto directo con la superficie del metal fundido y la transferencia de calor se logra por una combinación de radiación y convección. En un horno de cámara seca, la carga de metal sólido se posiciona en un corazón inclinado sobre el nivel del metal, por lo tanto la carga es envuelta por los gases calientes. El calor es absorbido rápidamente por la carga sólida, la cual se fusiona y subsecuentemente se drena desde el corazón inclinado hacia la cámara de retención o de mantenimiento.

En las Figuras 5 y 6 se ilustran dos tipos de horno de reverbero, en la Figura 5 se tiene un horno de cámara húmeda donde la flama de los quemadores está en contacto directo con el Aluminio líquido, este tipo de horno se utiliza comúnmente para producción de grandes cantidades de aluminio donde la principal ventaja es su alta velocidad de fusión. En la Figura 6 se muestra un horno de reverbero compuesto por una cámara seca y una cámara húmeda, este horno tiene como principal ventaja una velocidad de fusión mayor por las altas temperaturas que se alcanzan en la cámara seca donde así mismo por el diseño del plano inclinado permite separar materiales ajenos a la aleación como por ejemplo en la industria de reciclaje de chatarra de Aluminio donde generalmente se tiene impurezas de piezas de aceros ensamblados con la misma chatarra.

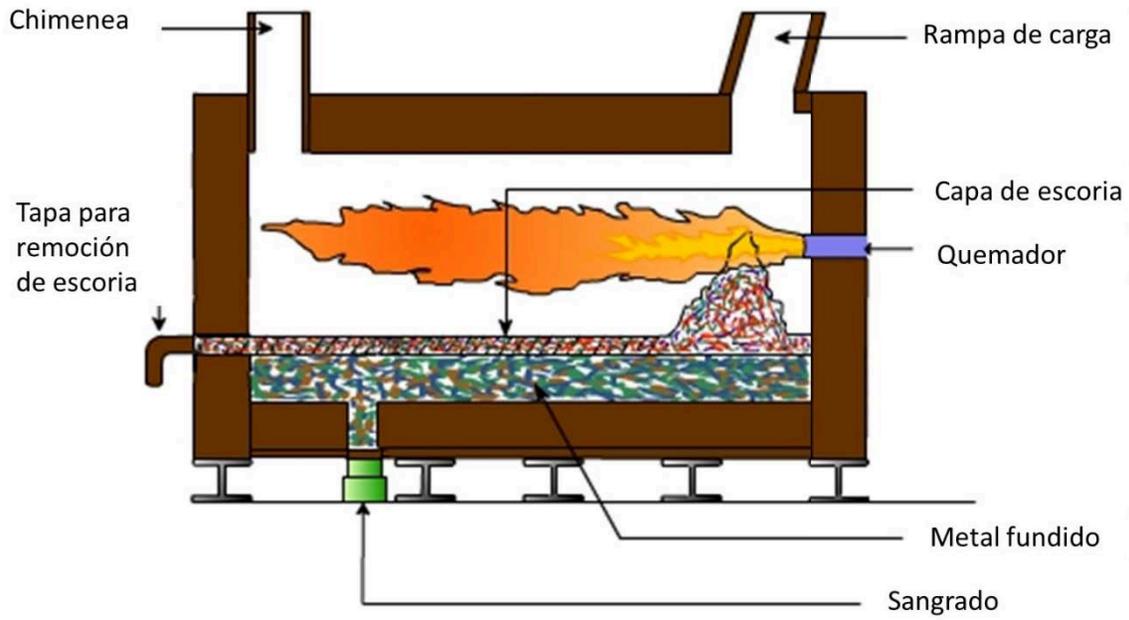


Figura 5. Horno de corazón húmedo (6)

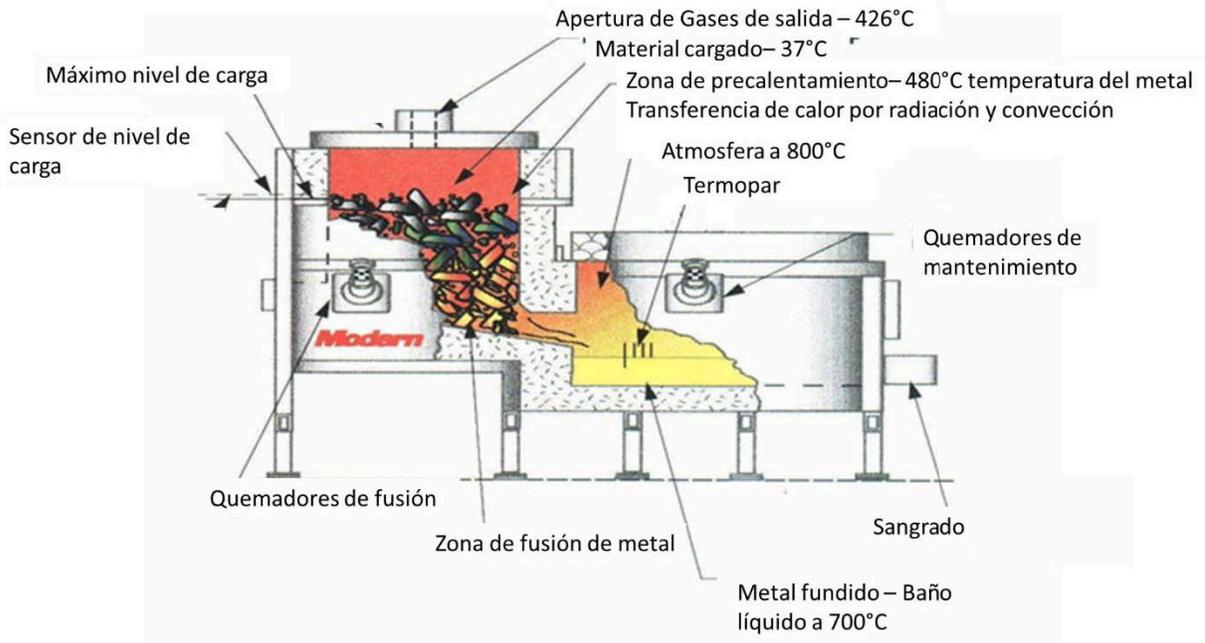


Figura 6. Horno mixto de corazón seco y húmedo. (7)

1.5.2 Horno rotativo

Los hornos rotativos están formados por una coraza cilíndrica de acero, de eje sensiblemente horizontal, que termina con dos troncos de cono, uno en cada extremo. En uno de los extremos está situado el quemador y en el otro la salida de los gases de combustión, que generalmente pasan por un sistema de recuperación de calor para precalentar el aire de soplado antes de ser evacuados por la chimenea. Todo el interior del horno está revestido con un material refractario.

Los hornos rotativos (Figura 7) se han considerado como hornos de reverbero perfeccionados, ya que además de calentarse la carga por el contacto de las llamas y gases y por la radiación de la bóveda caliente, se calienta también por el contacto directo con la parte superior del horno, que al girar queda bajo la carga. Con esto se consigue un notable acortamiento del tiempo de fusión, pues se logra evitar el efecto aislante de la capa de escorias, que flota sobre el baño, que en los hornos de reverbero ordinarios dificulta el calentamiento de la masa del metal.



Figura 7. Horno rotativo (horno de reverbero mejorado). ⁽⁸⁾

La capacidad de los hornos rotativos para la fusión de los metales varía ordinariamente entre los 50kg. y las 5Ton. Aunque se han llegado a construir hornos para la fabricación de acero de hasta 10Ton. también se construyen hornos oscilantes que no llegan a girar, sino solamente moverse de un lado a otro.

1.5.3 Horno de crisol

Los hornos de crisoles modernos se construyen para el calentamiento de un solo crisol. Si los hornos son fijos se extrae el metal líquido con cuchara, pero también se construyen hornos de crisol basculantes. En los que la colada resulta más cómoda. En estos tipos de hornos se calienta primero el crisol vacío, hasta que llega al rojo cereza y después se carga.

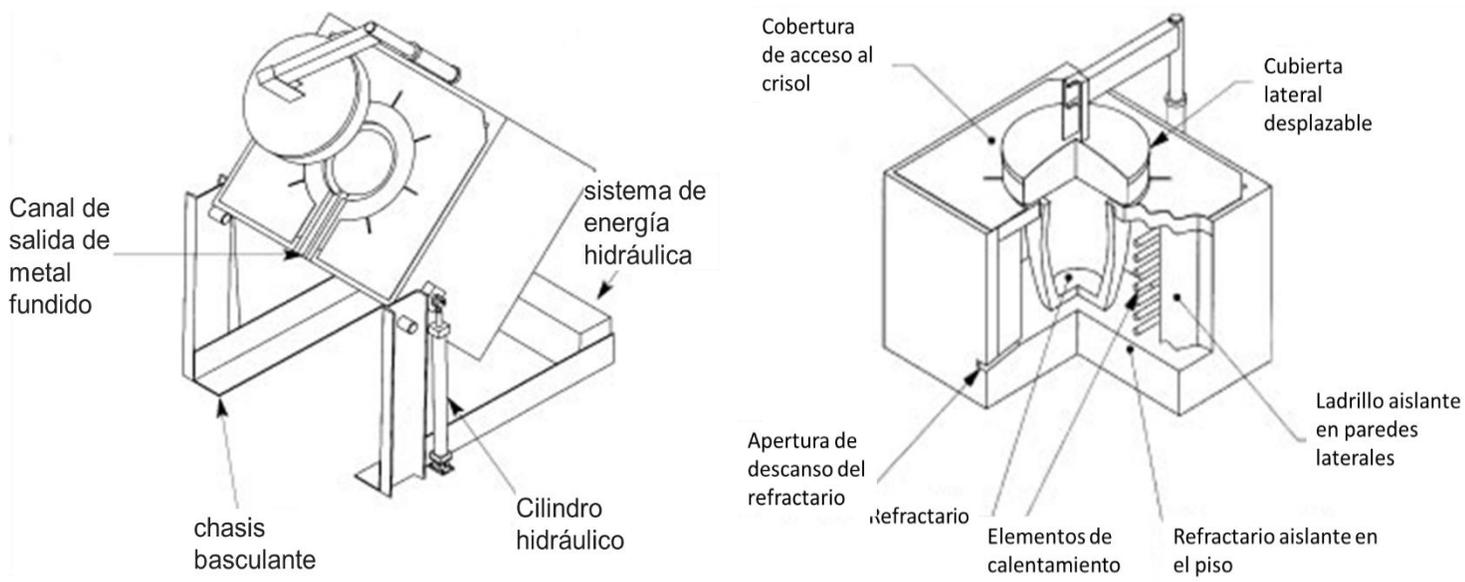


Figura 8. Esquema de horno de crisol basculante. (9)

La ventaja de los hornos de crisol modernos, tanto fijos como basculantes, es que la carga queda totalmente aislada, y por tanto, no se altera su composición por efecto de los gases producidos en la combustión. En la Figura 8 se muestra el esquema de un horno de crisol basculante con calentamiento por resistencias.

1.6 Características de aleaciones para DC ⁽¹⁰⁾

Las principales características de las aleaciones base aluminio utilizadas para procesos de colada a presión son las siguientes:

1. Prohibidas las aleaciones Al-Si usadas para colada en arena.
2. Mg en bajos niveles para controlar la generación de óxidos.
3. % de Fe mayores a 0.70 % para maximizar la resistencia a alta temperatura, facilitar la inyección y minimizar el soldado o adherencia.
4. Actualmente estudios de reducción del %Fe a 0.25 para incrementar la ductilidad de las piezas.
5. Las aleaciones hipereutécticas están creciendo debido a sus propiedades y características adecuadas para procesos de DC, especialmente en la industria automotriz.

La aleación de aluminio A380 es una de las comúnmente mejor especificadas. Ofrece muy buenos resultados en cuanto a fluidez, hermeticidad y resistencia al agrietado en caliente. Tiene una buena capacidad de maquinado, se utiliza para una amplia variedad de productos, incluyendo chasis para equipos electrónicos, frenos de motor, cajas de cambios, muebles, herramientas manuales y eléctricas. El tratamiento térmico de las piezas inyectadas no es habitual por la posibilidad de que se produzcan ampollas.

1.7 Características metalúrgicas del aluminio líquido

Las dos principales características del aluminio líquido que afectan su calidad metalúrgica son

1. Oxidación.
2. Absorción de hidrógeno.

1.7.1 Oxidación del aluminio ⁽¹¹⁻¹³⁾

El aluminio líquido y sus aleaciones forman una delgada capa de óxido. Pero a diferencia del aluminio en estado sólido donde esta capa alcanza un espesor finito, el aluminio en estado líquido forma una capa que se hace más gruesa con el aumento de la temperatura. Conforme transcurre la fusión, aumenta más la formación de óxidos sobre la superficie del baño, debido a que la oxidación en estado líquido es continua, favorecida por la elevada difusión del oxígeno a alta temperatura a través de la capa ya formada. Por esta razón es necesario evitar un tiempo de permanencia prolongado.

El grado de oxidación durante el proceso de fusión depende de la composición de la aleación, de la temperatura, del tiempo de fusión, del tipo de horno y su calentamiento, del área expuesta de la superficie del baño y del tipo de material utilizado. La oxidación durante el proceso de fusión genera una pérdida de metal en forma de residuos calcinados, incluyéndose, tanto la pérdida por impurezas adheridas a los elementos de aleación, así como los residuos calcinados por volatilización. Durante el traspaso del metal en hornos de conservación y de fusión, así como al momento de verter el metal al molde, aumenta el contenido de óxidos en el baño debido a una mayor exposición del aluminio líquido con el aire.

Las partículas de alúmina formadas tienen una densidad superior a la del aluminio fundido y estas descienden hacia el fondo del baño líquido. Sin embargo, a causa de las tensiones superficiales y de la consistencia porosa de dichas partículas, se mojan de aluminio líquido y entonces, presentan una densidad aparente análoga a la del aluminio fundido, lo cual ocasiona que estas partículas queden inmersas en el seno del baño.

Estas partículas pueden generar centros de nucleación de gas hidrógeno promoviendo la formación de poros. La Figura 9 muestra el mecanismo de oxidación y absorción de hidrógeno en el aluminio líquido.

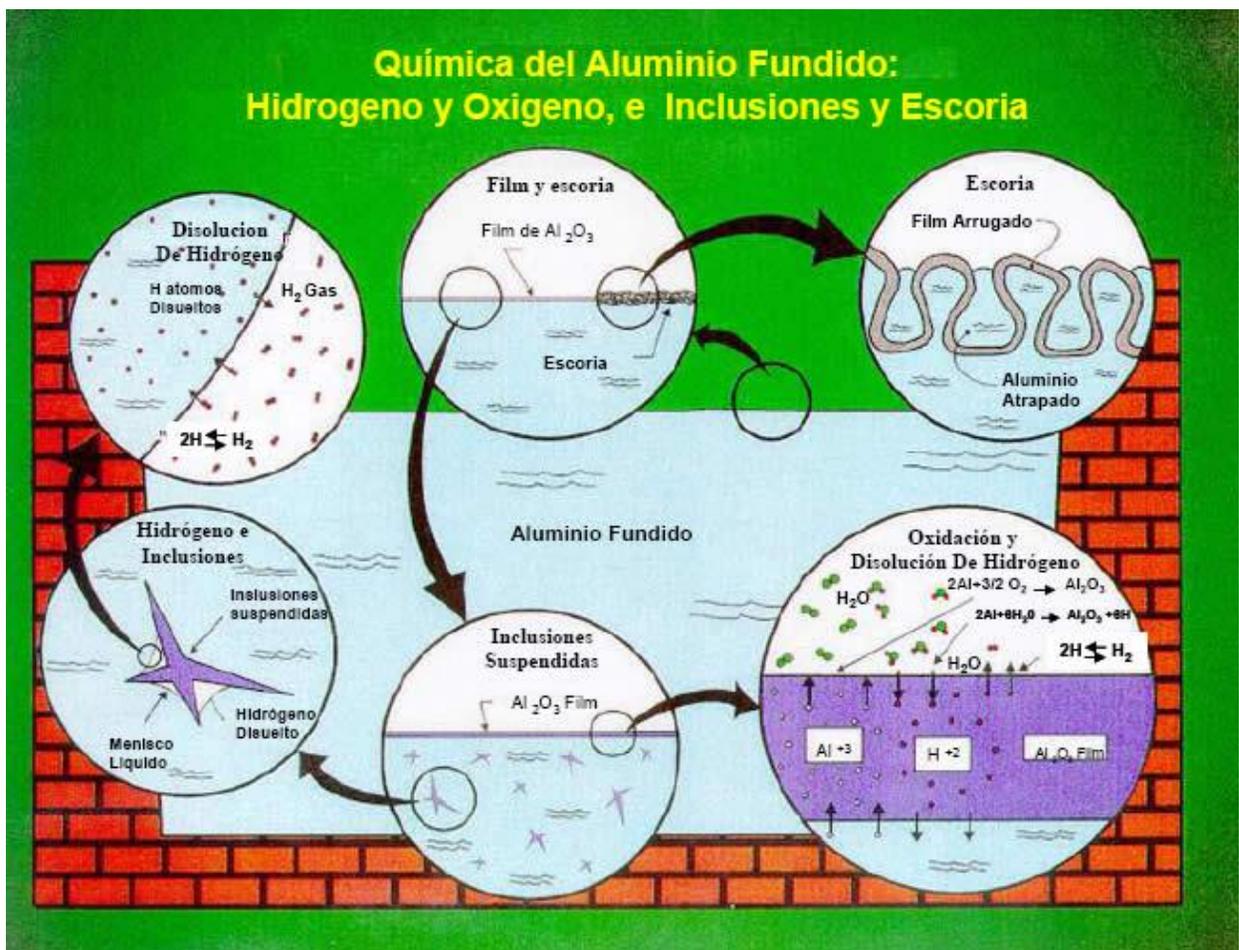


Figura 9. Esquema del efecto del O₂ e H₂ en las escorias del aluminio líquido. (13)

En las piezas fundidas, la presencia de óxidos puede ser como hilos aislados, películas o nódulos de óxido. Estas inclusiones disminuyen las propiedades mecánicas de las piezas fundidas, así como la resistencia a la corrosión, aumentando el desgaste de las herramientas en el maquinado. Las aleaciones de aluminio que contienen zinc, magnesio y sodio, son especialmente sensibles a la oxidación.

1.7.2 Absorción de hidrógeno. (14-16)

El Hidrógeno es el único gas que tiene una solubilidad apreciable en el Aluminio y sus aleaciones; su solubilidad varía directamente con la temperatura como se muestra en la Figura 10. En el Aluminio puro, el hidrógeno tiene un incremento de solubilidad en el punto de fusión de aproximadamente 0.02ml/100g de Al en fase sólida a 0.7ml/100g de Al en la fase líquida. En el estado líquido, también se observa una fuerte dependencia de la solubilidad con la temperatura. En la solidificación, casi todo el Hidrógeno disuelto en el líquido es rechazado por el sólido que va formándose. Con más frecuencia este Hidrógeno rechazado, forma una fase gaseosa que resulta en porosidad dentro de productos solidificados. Poco Hidrógeno es absorbido de la atmósfera, la mayor cantidad se obtiene de la disociación del vapor de agua en la superficie del metal líquido o de la humedad de los aditivos de fusión como crisoles y herramientas; pero sobre todo los gases provenientes de la combustión en los hornos de flama directa, son una fuente importante de Hidrógeno.

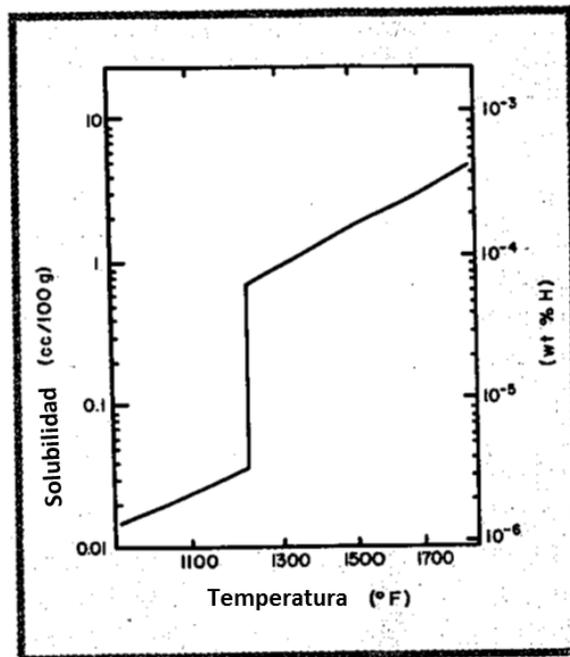
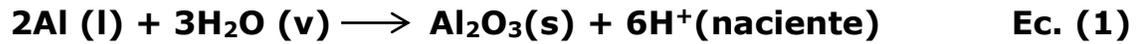


Figura 10. Gráfico de solubilidad de gas Hidrogeno en Aluminio Puro.⁽¹⁵⁾

El Hidrógeno liberado por la reacción de la humedad con el aluminio está en forma atómica de acuerdo a la siguiente reacción:



Este Hidrógeno atómico es muy reactivo y rápidamente es absorbido por el Aluminio fundido en donde queda disuelto.

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

La solubilidad del hidrógeno en aluminio puro a una atmósfera de presión fue determinada por Opie y Grant por la siguiente ecuación:

$$\log_{10}S = -2550/T + 2.62 \quad \text{Ec. (2)}$$

En la ecuación anterior la solubilidad S está en mililitros de hidrógeno a temperatura y presión estándar por cada 100 gramos de aluminio y la temperatura T está en grados Kelvin.

La temperatura juega un papel muy importante dentro de la solubilidad, ya que por cada 110°C de sobrecalentamiento la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido incrementa al doble.

1.8 Fuentes de hidrogeno en el proceso de fusión.

1.8.1 La atmósfera

La atmósfera es una de las más importantes fuentes de vapor de agua, por ejemplo, aire a 26°C y 65% de humedad relativa contiene casi 16 gramos de agua por metro cúbico.

1.8.2 Fundentes

Los fundentes son, en general, sales higroscópicas las cuales naturalmente contienen agua adsorbida de la atmósfera. Por ello, los fundentes deben ser cuidadosamente empaquetados, almacenados y precalentados para retirar toda la humedad, algunos de estos deben ser sumergidos en el Aluminio líquido como tratamiento de remoción de alguna impureza o inclusión siendo de suma importancia siempre precalentarlos antes de su aplicación.

1.8.3 Crisoles

Los crisoles nuevos siempre contienen un poco de humedad en sus poros, por ello las fusiones hechas en crisoles nuevos presentarán mayor gasificación que en crisoles viejos.

1.8.4 Gases de combustión

Los productos de combustión contienen de 10 a 20% de vapor de agua. El gas natural puede producir más de 2m³ de vapor de agua por cada m³ de gas quemado. Las ventajas de usar hornos eléctricos para minimizar la cantidad de hidrógeno son obvias.

1.8.5 Refractarios

Como los crisoles, los refractarios nuevos contienen un poco de humedad, la cual contribuye en la disolución de hidrógeno en el metal, hasta que se elimine totalmente con el uso.

1.8.6 Herramental de fundición

Herramientas sin precalentamiento pueden ser una fuente importante de hidrógeno, también el herramental previamente cubierto con pintura refractaria contiene humedad proveniente de la misma pintura siendo en su mayoría higroscópicas, por estas razones es muy importante precalentar siempre el herramental y evitar accidentes.

1.8.7 Materiales de carga

Los materiales de carga pueden introducir hidrógeno a través de la humedad contenida en su superficie, poros y hendiduras. También pueden introducir hidrógeno a través de otras fuentes, por ejemplo la chatarra, que puede estar contaminada con grasa o aceite de corte. El aluminio parcialmente corroído puede agregar hidrógeno por la descomposición de los productos de corrosión de acuerdo a la reacción:



En general estos factores se pueden prevenir con el debido precalentamiento de cada uno de los equipos a utilizar y evitando la perturbación de la capa de escoria, que es una barrera efectiva a la recolección de hidrógeno.

1.9 Efecto de los elementos aleantes en la solubilidad de hidrogeno. ⁽¹⁶⁾

La adición de elementos aleantes modifica la solubilidad del hidrógeno. Algunos elementos como el silicio, zinc, cobre y manganeso disminuyen la solubilidad del hidrógeno en aluminio. Algunos otros, como el magnesio, titanio, níquel y litio la incrementan.

Los elementos de aleación no cambian el comportamiento de la solubilidad del hidrógeno por debajo del punto de fusión. Sin embargo, por arriba de este, las curvas de solubilidad presentan cierto desplazamiento con respecto de la correspondiente para el aluminio puro. En la Figura 11 se muestra el grafico de solubilidad de hidrogeno para las aleaciones 356 y 319, donde los elementos principales de aleación son el silicio y el cobre, que además tienen puntos de fusión menores al aluminio puro y provocan un decremento en la solubilidad de hidrógeno con respecto al aluminio puro.

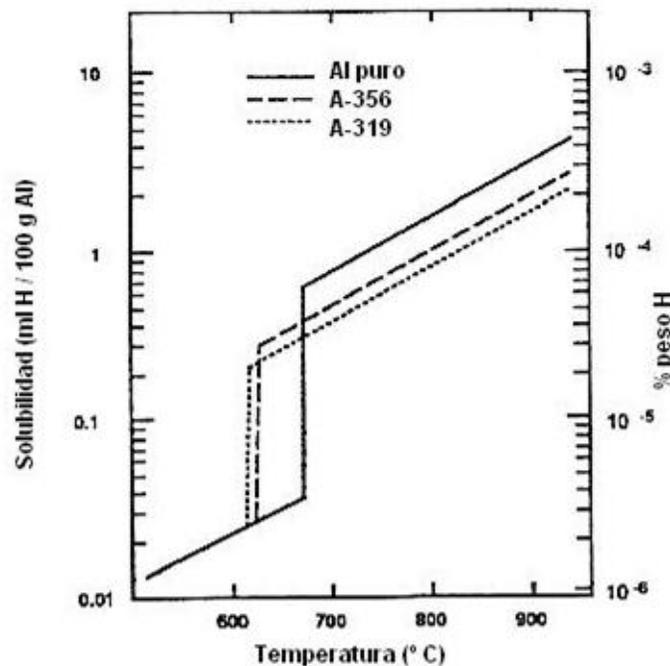


Figura 11. Solubilidad de hidrógeno en aluminio puro, A356 y A319 (ml de H₂ por cada 100 g de Al). ⁽¹⁶⁾

El hidrógeno tiende a salir de forma natural del metal líquido, pero generalmente por el tiempo de solidificación tan corto, el hidrógeno queda atrapado en el interior de la pieza en forma de burbujas, llamadas sopladuras. Este defecto genera principalmente en la pieza metálica obtenida: disminución en las propiedades mecánicas y mal aspecto superficial. El aluminio puro al solidificar, solo retiene aproximadamente 5% del hidrógeno presente en el baño líquido, y el 95% restante escapa del baño. Este es el principal motivo por el cual debe eliminarse el hidrógeno del aluminio aún en estado líquido, para evitar la presencia de porosidades y por consecuencia el rechazo de piezas coladas.

1.10 Etapas de la formación de sopladuras por Hidrógeno disuelto. ⁽¹⁷⁾

Aunque los mecanismos de formación de microporosidad aún no están claramente establecidos, el mecanismo más aceptado es ilustrado en la Figura 12, en la cual se pueden identificar 4 etapas:

- a) Etapa I. Durante la solidificación, el líquido interdendrítico es gradualmente enriquecido con hidrógeno proveniente del aluminio ya solidificado, y que es rechazado hacia la intercara sólido-líquido. Conforme la solidificación progresa, el contenido de hidrógeno en el líquido se incrementa excediendo eventualmente su solubilidad. Idealmente un poro de gas se debería nuclear en este punto, pero esto requiere el establecimiento de una nueva superficie; debido a esta barrera energética de superficie, el contenido de hidrógeno en el líquido seguirá incrementándose por arriba de su límite de solubilidad hasta que alcance un valor al cual se pueda formar el poro.
- b) Etapa II. El poro comienza a nuclear, preferentemente en los brazos de la dendrita o en otros sitios heterogéneos tales como inclusiones. Originalmente el poro es muy pequeño, aproximadamente

de $20\mu\text{m}$, y comienza a crecer muy lentamente sin afectar la composición del líquido.

c) Etapa III. Una vez que el poro ha crecido a su diámetro máximo, la burbuja puede ser separada del brazo dendrítico y es transportada hacia el seno del fluido. La burbuja crece instantáneamente y por lo tanto el contenido de hidrógeno en el aluminio líquido desciende drásticamente.

d) Etapa IV. La velocidad de crecimiento del poro disminuye debido a que la concentración de hidrógeno en el líquido es menor; sin embargo, el poro continúa creciendo hasta que la solidificación se haya completado.

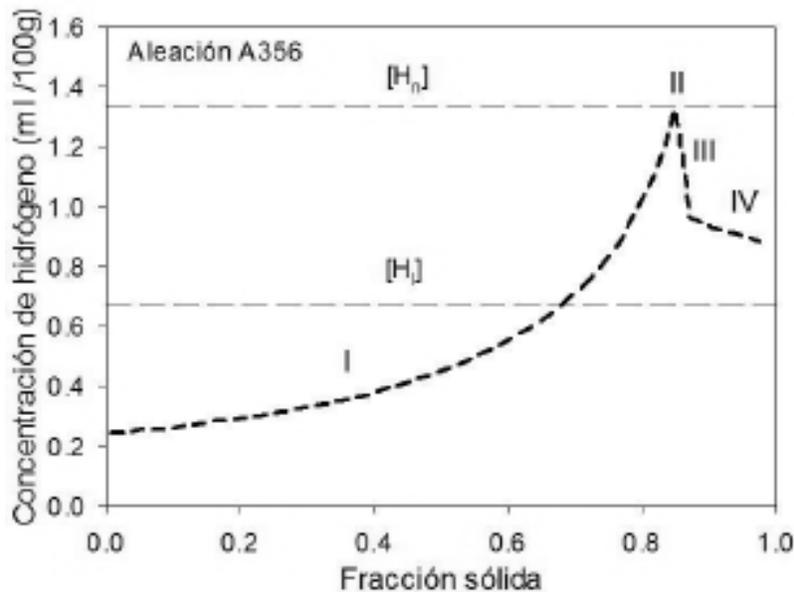


Figura 12. Mecanismos de formación de porosidad durante la solidificación del aluminio líquido. (18)

1.11 Métodos de remoción de hidrógeno del aluminio ⁽¹⁸⁾

El uso del desgasificado y de la elección de la tecnología de desgasificado, dependen del nivel de hidrógeno deseado. En algunas aplicaciones, tal como las piezas aeroespaciales de alta calidad, las especificaciones de calidad de las piezas son particularmente estrictas y las propiedades mecánicas deben ser reproducibles y garantizadas. Tales especificaciones dictan niveles muy bajos de hidrógeno (menos de 0.1ml/100g de Al) y el uso de las técnicas de desgasificado más sofisticadas. El desgasificado debe usarse siempre, en conjunto con uno de los métodos de medición de concentración de hidrógeno disuelto.

Aunque existen muchos procesos de desgasificado de fundiciones de aluminio y sus aleaciones, estos caen en los tipos generales:

Desgasificado Natural

Desgasificado al Vacío

Vibración Ultrasónica

Desgasificado con Purga de Gases

Solo la purga de gases es usada ampliamente en la industria de la fundición y es en la que se concentra este trabajo, sin embargo, a continuación se hace una breve descripción de los otros métodos de forma complementaria.

1.11.1 Desgasificado Natural

Este desgasificado ocurre muy lentamente, usualmente se requiere de unas pocas horas para alcanzar un grado de desgasificación útil. El desgasificado natural es favorecido por las bajas temperaturas y atmósferas libres de hidrógeno, es decir de humedad. Un método para favorecer el desgasificado natural es bajar la temperatura del baño de tal manera que disminuya la solubilidad y debido a esto el hidrógeno salga del baño líquido. Sin embargo no es práctico a nivel industrial

1.11.2 Desgasificado al Vacío

La eliminación de la presión atmosférica sobre el aluminio fundido promueve la formación de burbujas de hidrógeno, según la ley de Sieverts. El desgasificado también es promovido a través de una atmósfera completamente libre de hidrógeno. Este es un método de desgasificado no contaminante, con el cual se pueden obtener concentraciones por debajo de 0.08ml de H₂/100g de Al. Sin embargo requiere de una gran inversión de capital.

1.11.3 Vibración Ultrasónica

La vibración ultrasónica es eficiente para desgasificar solamente volúmenes pequeños de aluminio fundido, es por esto que esta técnica es utilizada solamente para asistir a los otros métodos de desgasificado haciéndolos más eficientes.

1.11.4 Desgasificado con Purga de Gases

Esta técnica es históricamente la más usada en la industria para la desgasificación. Es un tratamiento con gas inerte, gas reactivo o una mezcla de ambos, en la cual se hace pasar burbujas libres de hidrógeno a través del baño metálico. El hidrógeno se encuentra en forma atómica (H) y no en su forma molecular (H₂). La diferencia de concentración de hidrógeno entre el aluminio líquido y la burbuja de gas inyectado, es la fuerza motriz que provoca el transporte del hidrógeno atómico desde el seno del baño metálico hasta la burbuja de gas inerte, permitiendo que una burbuja de hidrógeno se forme dentro, la cual asciende a través de todo el metal hasta la superficie. La eficiencia del desgasificado es fuertemente dependiente del tamaño de burbuja, lo cual a su vez, depende de cómo fueron formadas las burbujas en el baño.

El gas comúnmente usado es el Argón, el Cloro puro fue extensamente usado en el pasado, pero ahora ha sido discontinuado debido a su alta toxicidad y efectos corrosivos sobre el equipo y los ductos de ventilación.

También existen, aunque ya no se utilizan, tabletas mismas que se basan generalmente en la descomposición del hexacloretano. En el baño metálico, el hexacloroetano contenido en la tableta forma cloruro de aluminio, una fase gaseosa meta estable e insoluble. La burbuja de gas del cloruro de aluminio sirve como colector y permite que el hidrógeno sea absorbido por la burbuja, esta se eleva hasta la superficie liberando el hidrógeno en la atmósfera.



Podemos mencionar 6 etapas cinéticas sucesivas en el proceso de remoción de hidrógeno:

1. Transporte de hidrógeno disuelto en el aluminio líquido hacia la superficie de la burbuja del gas de purga, por mecanismos de transporte difusivo y convectivo.
2. Transporte de átomos de hidrógeno por difusión a través de una capa delgada de líquido que rodea la burbuja, llamada capa límite.
3. Adsorción química de átomos de hidrógeno sobre la superficie de la burbuja.
4. Reacción de átomos de hidrógeno para formar moléculas de hidrógeno ($\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$) y su posterior desorción de la superficie de la burbuja.
5. Difusión de hidrógeno gaseoso dentro de la burbuja de gas inerte.
6. Remoción del hidrógeno contenido en la burbuja, al ser descargada en la superficie libre.

1.12 Métodos de tratamiento de gas inerte dentro del aluminio líquido. ⁽¹⁹⁾

El gas puede ser introducido al baño metálico básicamente de tres métodos.

1.12.1 Lanza de grafito.

Es el más simple pero menos efectivo, consta de una lanza con un diámetro exterior de entre 2.5 a 5 cm y diámetro interno de 0.3 cm. La dificultad con este método es que la burbuja resultante es grande con un cociente superficial área/volumen bajo. Por lo tanto, las burbujas de gas se elevan rápidamente con un tiempo de residencia mínimo para eliminar al hidrógeno. Además, provocará poca cobertura del volumen del metal líquido, reduciendo la eficiencia del proceso.

1.12.2 Lanza con tapón poroso.

Una dispersión mucho más fina de burbujas puede lograrse con el uso de tapones porosos sobre la lanza. Sin embargo, ocurre muy poco mezclado entre las burbujas y el metal.

1.12.3 Rotor Inyector.

Esta es la técnica más sofisticada y eficiente de desgasificado de aluminio. En esta técnica, el gas inerte se introduce al aluminio fundido a través de una flecha y un rotor con toberas por las cuales sale el gas. El rotor, está sujeto al extremo de la lanza que gira con cierta velocidad sumergido en la olla, la Figura 13 muestra un esquema del equipo DFU (Foundry Degassing Unit) de la empresa Foseco. La acción del rotor crea un esfuerzo de corte fragmentando las burbujas haciéndolas más finas y que salen con elevados momentos angulares y radiales, dando lugar a una mayor dispersión de burbujas en un mayor volumen del baño metálico, aumentando la relación área/volumen. Estas burbujas más

finas, tienen un mayor tiempo de residencia en el metal, dotando de una capacidad más alta de eliminar el hidrógeno presente.

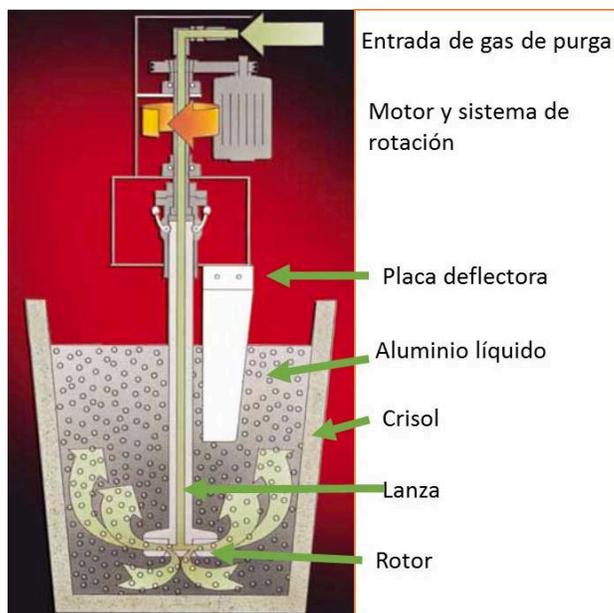


Figura 13. Esquema de la unidad de desgasificado (DFU) de la empresa Foseco. ⁽²⁰⁾

La grafica de la Figura 14 muestra comparativamente la eficiencia de los tres métodos descritos.

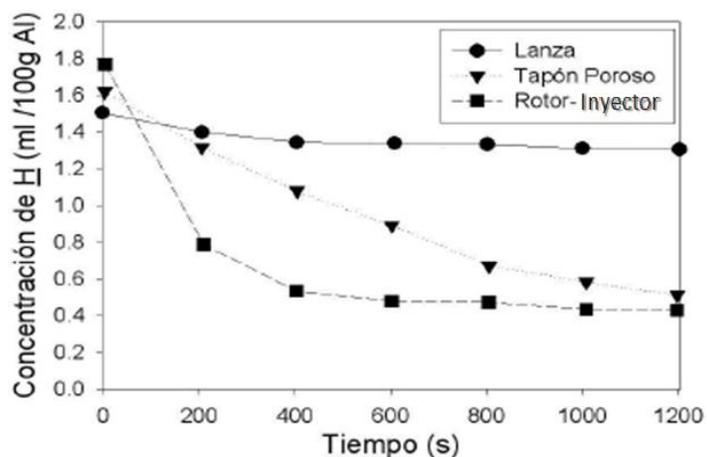


Figura 14. Comparación de la cinética de desgasificación de los tres métodos de inyección de gas: lanza, tapón poroso y Rotor-Inyector. ⁽¹⁹⁾

1.13 Métodos para determinar el contenido de hidrógeno en aleaciones de aluminio líquido ⁽¹⁹⁻²¹⁾

Se han desarrollado muchas técnicas para determinar el contenido de hidrógeno en el aluminio y sus aleaciones, pueden ser clasificadas de acuerdo a su uso en la práctica como:

- a) Métodos cuantitativos de laboratorio. Determinan la cantidad de hidrógeno disuelto aunque su uso está limitado al laboratorio. Ejemplos de estos métodos son el método de Sub – fusión de Ransley y el de fusión al vacío.
- b) Métodos cuantitativos insitu. Dispositivos como Telegas, Alscan y CHAPEL, así como el método y el de tubo de difusión, permiten la medición cuantitativa del hidrógeno disuelto directamente en planta.
- c) Métodos semi-cuantitativos. Dentro de esta clasificación se encuentran las pruebas de la primera burbuja y presión reducida, siendo esta última ampliamente utilizada en pruebas de laboratorio y en la industria desde que se comenzó a desarrollar en 1920.

1.13.1 ALSPEK H y ALSPEK MQ

Medición directa de hidrógeno ALSPEK H®, este es un nuevo dispositivo para la medición directa de concentración de hidrógeno en aleaciones de aluminio. Está compuesto por un innovador sensor electroquímico capaz de realizar mediciones rápidas y en tiempo real. Asimismo, aparte de mostrar valores simples de contenido de hidrógeno y temperatura, el analizador es capaz de trazar un gráfico en tiempo real de los cambios de hidrógeno y temperatura y grabar estos datos para posibles controles de calidad. La Figura 15 muestra el equipo y la gráfica de contenido de hidrógeno.

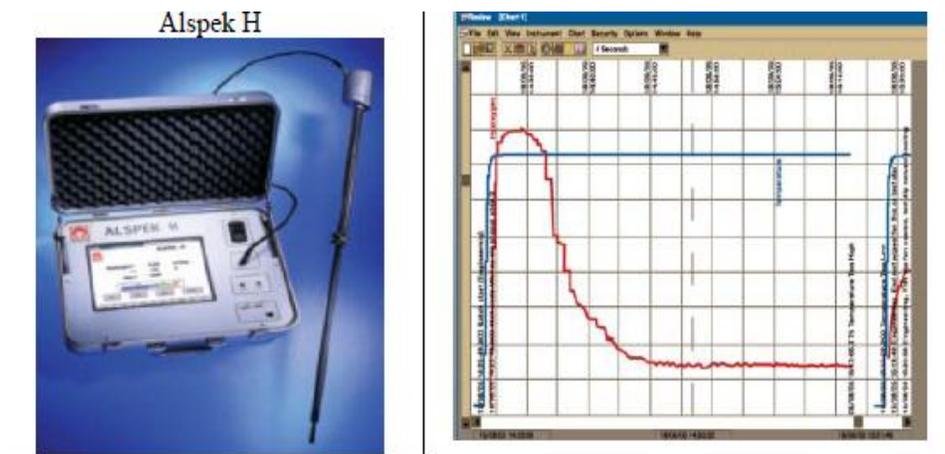


Figura 15. Equipo para prueba Alspek H (21)

1.13.2 Telegas® y AISCAN®.

La recirculación de gas es un método de medición directa y que forma la base de dos tipos de equipos comerciales utilizados en planta: Telegas® y AISCAN®. El aparato recircula un pequeño volumen de gas nitrógeno dentro de la aleación fundida. Mientras que el nitrógeno entra en contacto con el baño, recoge el hidrógeno, hasta que eventualmente el hidrógeno contenido en la corriente de nitrógeno entra en equilibrio con la concentración de hidrógeno en el baño. La presión parcial del hidrógeno en el nitrógeno, la cual es igual a la presión del hidrógeno en el aluminio, se determina midiendo la conductividad térmica de la mezcla. Una vez conocida la presión parcial del hidrógeno, se utiliza la ley de Sievert para determinar la concentración. La Figura 16 muestra el esquema básico del funcionamiento de la prueba TELGAS con la inyección de gas de purga y el colector.

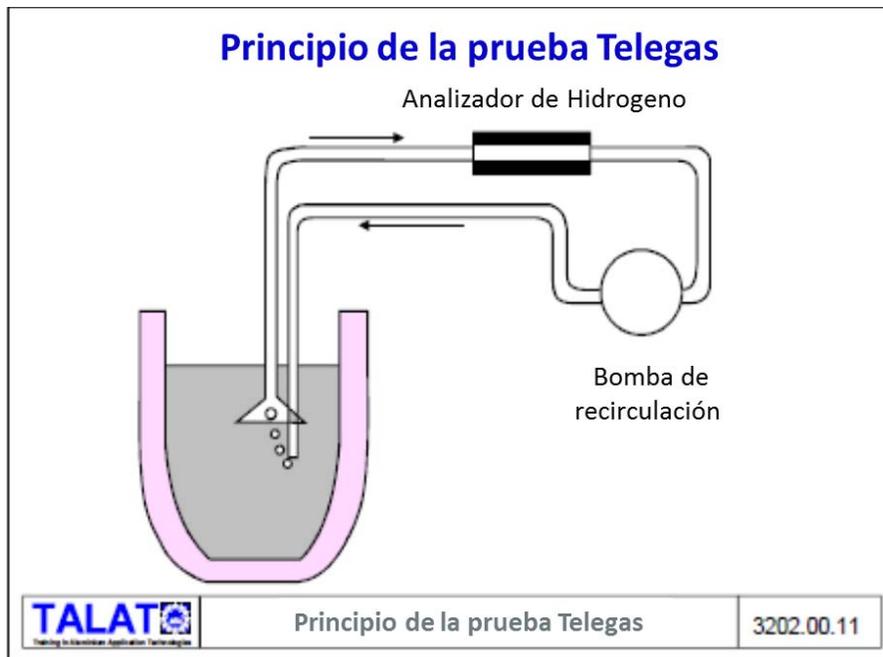


Figura 16. Principio de la prueba Telegas (21)

1.13.3 Ensayo de Presión Reducida (Reduced Pressure Test, RPT) (2)

Una de las técnicas más ampliamente usadas en la industria de la fundición es la de **"Presión Reducida"**, la cual consiste en solidificar una muestra bajo condiciones de vacío parcial para promover la formación de los poros de hidrógeno a través de la reducción de la presión atmosférica sobre la muestra. Esta es una prueba indirecta, comparativa y no cuantitativa. La Figura 17 muestra las dimensiones estándar de la probeta para el muestreo de la prueba de RPT y en la Figura 18 se tienen dos probetas en las cuales al observar la superficie del rechupe se puede estimar por observación la porosidad de la muestra, al seccionar las probetas se puede determinar cualitativamente bajo observación el porcentaje de porosidad en relación a patrones teóricos.

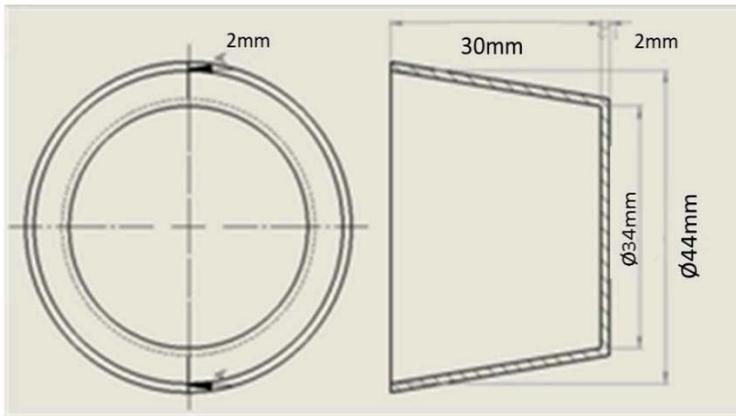


Figura 17. Dimensiones de la probeta RPT ⁽²⁾



Figura 18. Muestras obtenidas por RPT ⁽²⁾

Aproximadamente 100g de la muestra solidifica a baja presión, se debe trabajar a una presión de 26 plg. de columna de Hg en muestras de Aleaciones de aluminio que serán coladas en moldes permanentes, y a 28 plg. de columna de Hg para muestras de Aleaciones de Aluminio que serán coladas en moldes de arena. En estas presiones la formación del poro es acelerada provocando un decrecimiento en la densidad; usualmente se realiza un análisis cuantitativo midiendo la densidad de las muestras.

1.14 Métodos para medir la densidad

El principio de Arquímedes establece que todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido experimenta una fuerza vertical hacia arriba, llamada empuje, cuyo valor es igual al peso del fluido desalojado y cuya línea de acción pasa por el centro de gravedad del fluido desalojado. En la Figura 19 se esquematiza el balance de fuerzas de un cuerpo sumergido donde se puede determinar el empuje que sufre este por acción del fluido en el que se encuentra inmerso.

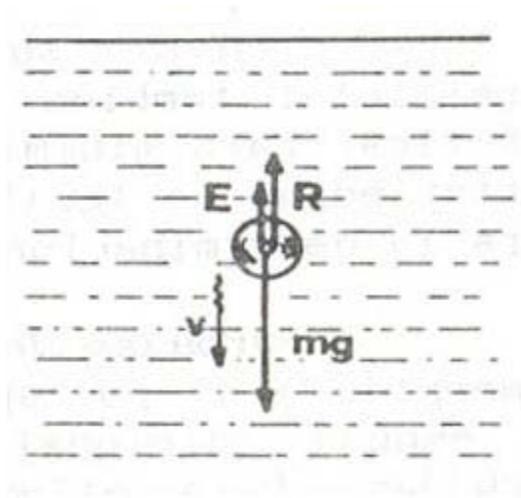


Figura 19. Balance de fuerzas normales en un cuerpo sumergido.

Así, si un cuerpo de volumen V se encuentra totalmente sumergido en un líquido de densidad ρ , el empuje que experimenta el cuerpo es: $E = \rho g V$ que es igual al peso del líquido desalojado al ingresar un cuerpo en él.

1.14.1 Determinación de densidad por el método de balanza y probeta.

Con la balanza se determina la masa del cuerpo y su volumen se mide por el aumento de volumen del agua de la probeta graduada al introducir el cuerpo en ella.

1.14.2 Densidad aparente.

Relación del peso de la muestra en aire y en agua. Esto se obtiene mediante un cable colgante, en la balanza se coloca un soporte donde

se sujeta el colgante y la muestra queda sujeta al colgante por el otro extremo donde se sumerge en agua, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D_s = W_A / (W_A - W_W) \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde el significado de la nomenclatura descrita es la siguiente:

D_s = densidad aparente

W_A = peso de la muestra en aire.

W_W = peso de la muestra en agua.

1.14.3 Determinación de densidad por el método de balanza hidrostática.

La balanza hidrostática se basa en el Principio de Arquímedes. Primeramente se calcula la masa del cuerpo, **M**, depositándolo sobre el platillo de la balanza. A continuación se suspende el cuerpo de un soporte y se introduce en un vaso o probeta lleno de agua sumergiéndole totalmente, y viendo el empuje que experimenta, **E**.

$$\text{Peso del cuerpo} = m * g \quad \text{Ec: (5)}$$

Empuje = Peso del volumen de agua desalojada por el cuerpo sumergido

$$\text{Empuje} = d * g * V \quad \text{Ec. (6)}$$

* **d**; Densidad del agua = 1 g/cm³

* **g**; Fuerza de la gravedad = 9.81m/s²

* **V**; Volumen de agua desalojada=volumen del cuerpo sumergido

* **m**; Masa del cuerpo

- * **M**; Peso del cuerpo
- * **E**; Empuje

La **DENSIDAD** es el cociente: $D = \frac{m}{V} = \frac{m \cdot g}{V \cdot g} = \frac{M}{E}$ **Ec. (7)**

Las Figuras 20 y 21 muestran las imágenes del ejercicio para calcular la densidad, en la Figura 20 se muestra la obtención del peso de la probeta al aire y en la Figura 21 se muestra la medición de la fuerza de empuje de la probeta suspendida en agua.



Figura 20. Peso en aire de la muestra.

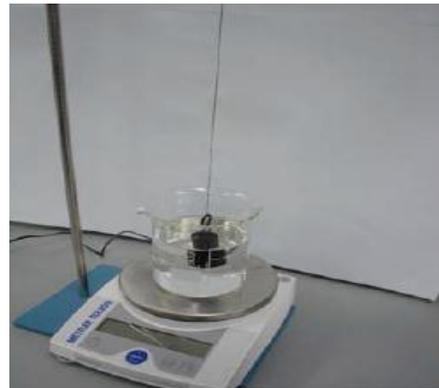


Figura 21. Peso del volumen de agua desalojada.

1.15 Diseño de reactores de mezclado ⁽²²⁾

En el diseño de un tanque agitado es de gran importancia la correcta elección de diferentes variables como lo son, el tipo de agitador a emplear, su localización, la geometría y proporciones del tanque, el número y dimensiones de las placas deflectoras así como la velocidad

apropiada del agitador. Estas decisiones tienen influencia en la velocidad de circulación del líquido, los modelos de velocidad y el consumo de potencia.

Existen relaciones para la geometría óptima de tipos de agitador y del tanque. A continuación se muestran algunas proporciones típicas expuestas por MacCabe (1993), para el diseño de un tanque con agitador de turbina. Un número muy importante para caracterizar los tanques de agitación es el número adimensional de potencia

$$P^* = \frac{P}{\rho N^3 D_{rodete}^5}$$

Ec: (8)

La nomenclatura usada para el cálculo del número adimensional de potencia, es la siguiente:

P*: Número adimensional de potencia

P: Potencia suministrada

r: Densidad del fluido

N: Revoluciones del eje

Donde r es la densidad del fluido, N son las revoluciones del eje y P la potencia suministrada.

Por otra parte, el número de placas deflectoras es generalmente 4 y el de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente es de 6 u 8. En la práctica, el diseño de la agitación debe tener en cuenta adicionalmente dos factores: el grado de homogeneidad y el tiempo de mezcla. Dado que el resultado de la mezcla nunca es perfecto, el grado de homogeneidad obedece a la calidad deseada en el producto final. Finalmente, la potencia requerida en la agitación depende de estos dos factores, así como del rendimiento.

Ecuaciones de los factores de forma apropiados para el reactor de mezclado:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

Ec. (9)

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

Ec. (10)

$$\frac{E}{D_a} = 1$$

Ec. (11)

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

Ec. (12)

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Ec. (13)

En la Figura 22, se presenta esquemáticamente la nomenclatura empleada en las ecuaciones anteriormente presentadas.

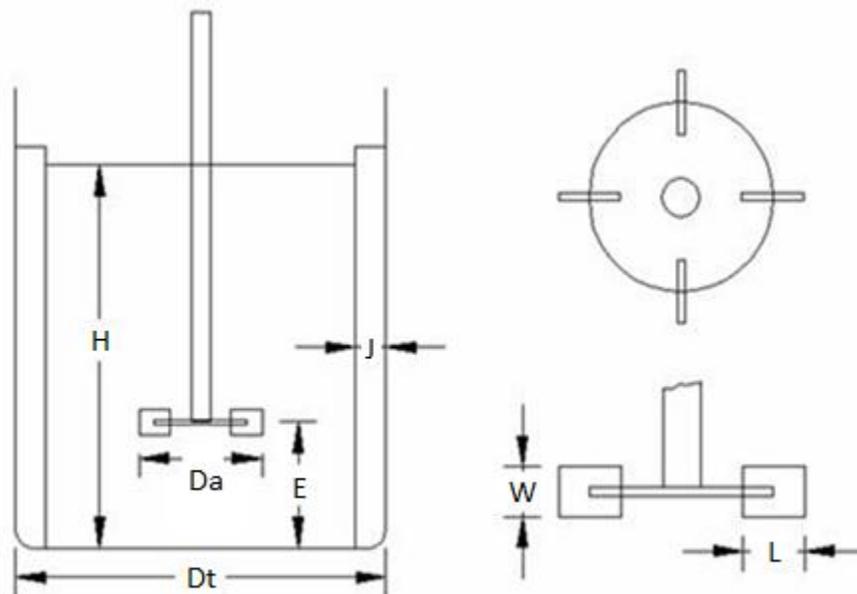


Figura 22. Esquema de la olla de tratamiento de mezclado e inyección de gas. ⁽²²⁾

El significado de cada dimensión es la siguiente:

H: altura del fluido dentro del tanque

Dt: Diámetro del tanque

Da: Diámetro del agitador

E: altura desde el fondo del tanque hasta el centro del agitador

J: Ancho de los deflectores en el tanque

W: Ancho de las paletas en el agitador de turbina

L: Largo de las paletas en el agitador de turbina

Capítulo II EQUIPO DE CAMPO A UTILIZAR

2.1 Equipo de presión reducida

Para la medición cuantitativa de la porosidad y la densidad se utilizó el equipo de presión reducida proporcionado por la empresa BSI (Figura 23), este equipo se trabajó en un rango de presiones de 26 a 27 in de Hg, controlando la presión con la válvula de control, para trabajar en presiones de vacío correspondientes a moldes permanentes. La cantidad de metal que almacena la probeta varía de 90g a 120g dependiendo de la cantidad colectada por la muestra a la cual se le da un tiempo de permanencia en el vacío de 5 min.



Figura 23. Equipo de presión reducida, pirómetro y termopar.

Para determinar la densidad a partir de (RPT), se relacionaron tres métodos de medición para seleccionar el más sencillo y rápido, debido a la gran cantidad de muestras a caracterizar. El método seleccionado fue el de Balanza Hidrostática.

2.2 Olla de tratamiento.

En este caso, la olla de tratamiento es igual a la olla de vaciado (figura 24), la cual se transporta con el montacargas desde la zona del horno de fusión hasta la zona del equipo de tratamiento, el tiempo de traslado es de solo 20 segundos. La olla de tratamiento por lo general se llena hasta un nivel de 10 cm por debajo de la altura total que corresponde a 480 kg de aluminio líquido. También se trabajan ollas a niveles entre 30% y 50% dependiendo de la cantidad de material demandado por el proceso, estos niveles se trabajan por lo regular los días viernes, aunque en cualquier momento durante el proceso se puede requerir poco volumen de Aluminio líquido.



Figura 24. Olla de tratamiento (reactor) y de vaciado a hornos de retención.

2.3 Unidad de desgasificación.

La unidad de desgasificación (Figura 27) cuenta con un panel de control (Figura 25), que permite modificar las condiciones del proceso en intervalos preestablecidos por el mismo equipo, como es la velocidad del

rotor, la cual se puede variar de cero a 100% que corresponde a 390 RPM. El nivel del rotor puede controlarse, ya que el equipo tiene dos sensores ajustables. El flujo de gas de purga se ajusta manualmente con la perilla del flujo-metro con una escala de 10 L/min a 95 L/min, en la empresa BSI se utiliza como gas purgante Nitrógeno grado industrial. El equipo maneja dos velocidades de rotor, una velocidad de ingreso al metal líquido y la otra que corresponde al tratamiento. El panel de control se observa en la Figura 25 junto con el flujómetro y el panel de perillas de control manual.



Figura 25. Controles de la unidad de desgasificación, Izquierda; flujómetro, centro; panel de control automatizado, derecha; perillas de control manual.

El tiempo máximo de tratamiento es de 300 s (5 min), por lo que si se requieren 10 minutos de tratamiento, será necesario reiniciar el mismo, lo cual no es recomendable debido a que el equipo presenta un fallo de seguridad, donde al terminar el proceso, se retira el rotor de la olla sin rotación y con flujo de gas. Pero si antes de llegar a la altura máxima se reinicia el tratamiento, el rotor comenzará el proceso en esa posición hasta comenzar a girar de nuevo; si la posición en la que queda el rotor es cercana a la superficie del metal líquido, éste se proyectará violentamente a los alrededores. La flecha de grafito tiene una longitud de 756 mm, el rotor es del tipo estándar con un diámetro de 850 mm y

4 orificios laterales, cuenta con una placa deflectora de cerámico (Figura 26).



Figura 26. Componentes de la unidad de desgasificación para aplicar el tratamiento. Izquierda: lanza de grafito, centro: rotor de grafito tipo estándar vista lateral y superior, derecha: placa deflectora cerámica para romper el vórtice.



Figura 27. Izquierda, montaje del sistema de flecha, rotor y placa deflectora en la olla de tratamiento. Derecha, montaje completo de la unidad de desgasificación con la olla de tratamiento.

Capítulo III Desarrollo experimental

3.1 Metodología de trabajo general.

La metodología de trabajo definida para realizar la parte experimental abarcó los siguientes puntos:

1. Caracterizar las condiciones del proceso de desgasificación con el método de lanza utilizado inicialmente en la planta BSI, y registrar las pérdidas de temperatura promedio en cada etapa del proceso.
2. Para el método de Rotor-Inyector. Realizar pruebas de prevención de riesgos determinando las condiciones máximas de proceso para niveles de (75-90)% y de (30-50)% de metal líquido en la olla de tratamiento. Realizando un barrido de las mínimas condiciones de velocidades y flujos, llevándolas gradualmente a las condiciones máximas permitidas por las dimensiones y características del mismo proceso de la planta BSI.
3. Realizar un barrido de flujos de gas Nitrógeno grado industrial (10, 20 y 30 L/min), manteniendo constantes las variables de velocidad, tiempo, altura del rotor, nivel de olla, etc.
4. Realizar un barrido de velocidad de rotación, manteniendo constantes las demás variables.
5. Realizar un barrido de tiempos a cada condición de flujo de gas Nitrógeno y manteniendo constantes las demás variables.
6. Determinar la densidad de cada panqué de RPT por el método de la Balanza Hidrostática.
7. Cortar transversalmente las muestras por la mitad para la evaluación visual y cuantitativa de la porosidad por medio del programa Image Pro plus.
8. Preparación metalográfica para evaluación.

3.2 Desarrollo de muestreo en planta.

Respecto al diagrama de flujo del proceso (Figura 28) de tratamiento al Aluminio líquido de la planta BSI, se tomaron muestras en las siguientes secciones:

1. Tomar la temperatura de salida del metal en el horno de reverbero. Teórica (tablero del horno) y experimental (termopar).
2. Tomar la temperatura en la olla de tratamiento al terminar el vaciado.
3. Tomar en la olla una muestra para RPT del metal de salida sin escoriado para evitar perdida de temperatura.
4. Tomar la temperatura en la olla después del tratamiento de desgasificado.
5. Tomar en la olla una muestra para RPT del metal después del tratamiento.

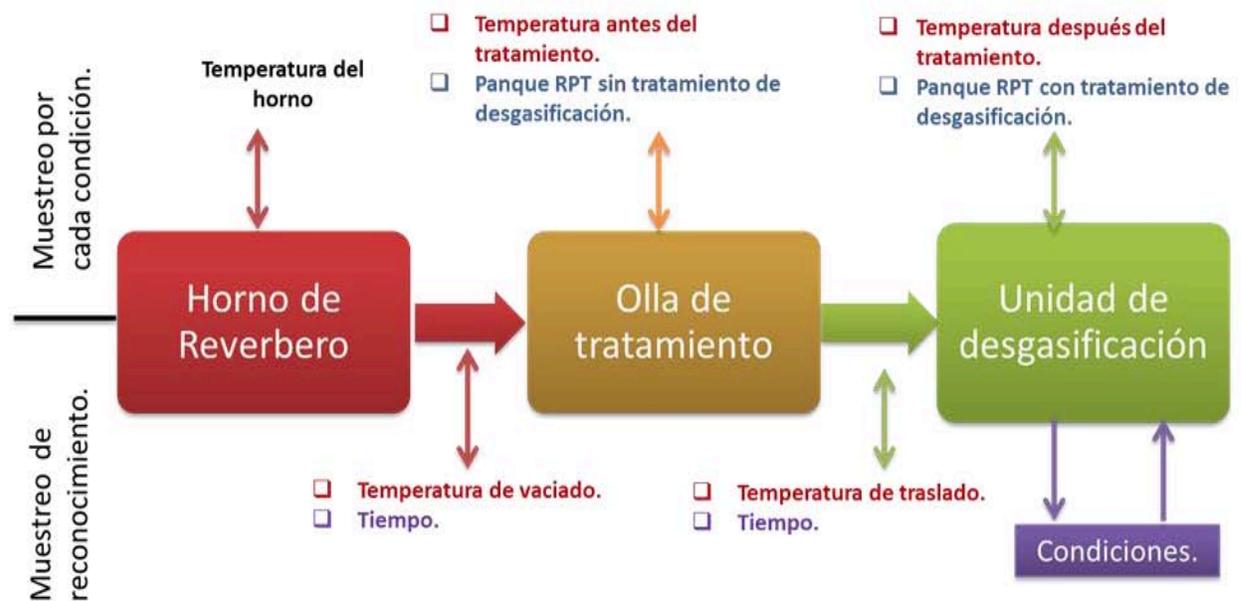


Figura 28. En la parte superior se muestran las mediciones realizadas por cada condición de tratamiento y en la parte inferior se encuentran las mediciones para determinar la temperatura que se pierde en cada etapa del proceso.

3.3 Variables del tratamiento por el método de Rotor-Inyector.

Las variables definidas para el diseño experimental para realizar el tratamiento de desgasificación fueron las siguientes:

- Volumen de Aluminio líquido, nivel bajo(30%-50%) y nivel alto (75%-90%) ; **Intervalos Fijos**
- Diseño del Rotor. ; **Comercial, Fijo**
- Concentración inicial de Hidrógeno (porosidad y/o densidad). **Intervalo , Fija** (2.57g/cm³ a 2.62g/cm³)
- ✓ Temperatura del Aluminio líquido. **variable**
- ✓ Velocidad de rotación. **Variable.**
- ✓ Flujo de gas inyectado. **Variable.**
- ✓ Tiempo de tratamiento. **Variable.**

En el caso de la concentración inicial de Hidrógeno, se debe realizar un amplio muestreo para determinar los rangos dónde se mantienen los valores de porosidad y densidad.

La temperatura del aluminio líquido, varía de acuerdo a los requerimientos de producción de la empresa, por ello se toma como una variable más.

3.4 Esquema de la variación de la velocidad de rotación.

De la Figura 29, el 100% corresponde a la velocidad máxima que alcanza el equipo. La temperatura del aluminio líquido de cada prueba debe estar dentro del mismo rango, para considerarse como constante. La olla debe cumplir con la condición del nivel máximo de aluminio líquido, el cual se trabaja entre 75% y 90%.

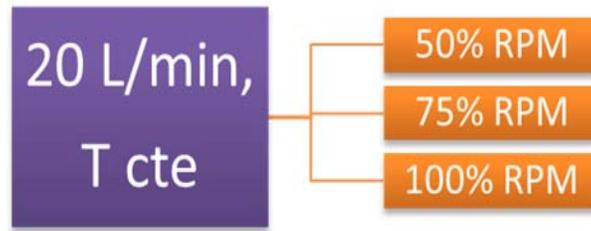


Figura 29. Esquema de diseño experimental para la variación de la velocidad de rotación en porcentajes, con respecto a las velocidades determinadas con el tacómetro.

3.5 Variación del flujo de gas de purga y el tiempo de tratamiento.

Si la temperatura de vaciado del aluminio líquido esta fuera del rango establecido, se tomarán muestras en las condiciones que se indican por los recuadros rojos de la Figura 30, con la finalidad de trabajar con la temperatura como variable para cada condición de flujo de gas de purga.

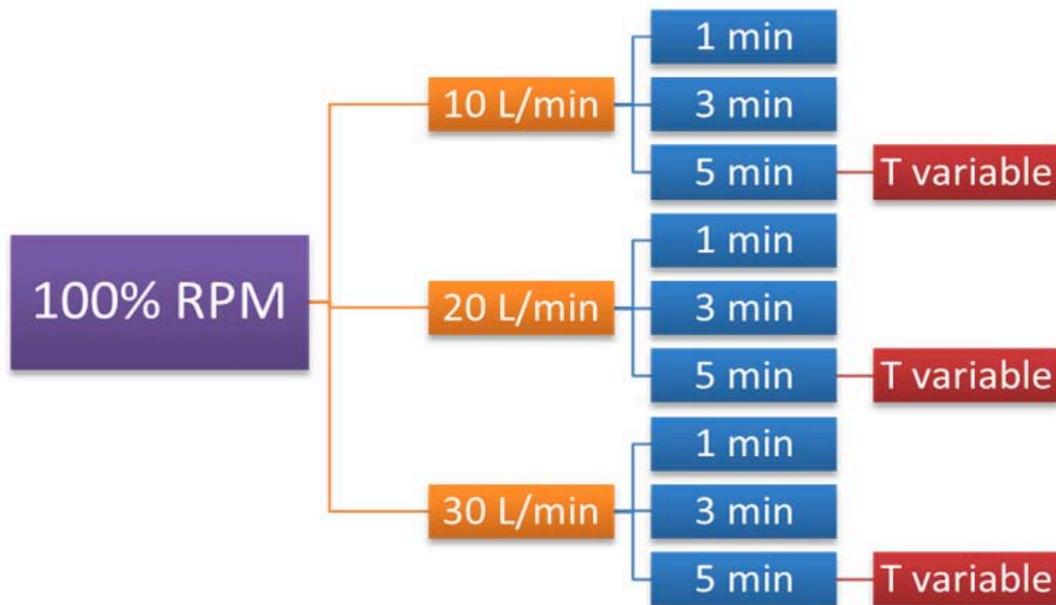


Figura 30. Esquema del diseño experimental para la variación del flujo de gas de inyección, y el tiempo de cada condición de tratamiento.

Capítulo IV Resultados y discusión

4.1 Etapa 1: Caracterización de las condiciones iniciales del proceso y resultados previos.

Actualmente en la planta BSI se realiza el tratamiento de desgasificado con el método de lanza, éste se realiza con un flujo de 10-15 L/min, tiempo de 5-7 min, y ligera agitación. Esta lanza es de acero de media pulgada de diámetro, recubierto con pintura refractaria de grafito, ésta se coloca directamente en la olla de vaciado donde al término del tratamiento, se agrega el escoriante para su limpieza final.

4.1.1 Pérdidas de temperatura en el proceso previamente establecido en BSI (Desgasificación con lanza).

Para observar las pérdidas de temperatura por trasvase y traslado del material, se obtuvo el promedio de 5 mediciones a lo largo del proceso. Los resultados se muestran en la tabla siguiente (Tabla 1), así como en el diagrama del proceso (Figura 31).



Figura 31. Diagrama del proceso de desgasificación con lanza actual en la empresa BSI. El tiempo total del proceso de desgasificado es de aproximadamente 10 min.

En la Tabla 1 se presentan las temperaturas correspondientes a cada etapa del proceso, las últimas tres columnas muestran la temperatura promedio que se pierde en cada una de estas etapas. Esta información permite realizar mediciones de temperatura, sólo en los puntos críticos del proceso, donde la pérdida de temperatura se da únicamente por el tratamiento de desgasificación ya sea por el método de lanza o por Rotor-Inyector.

Tabla 1. Temperatura promedio que se pierde en cada etapa del proceso. La temperatura real del metal líquido es más alta por $28^{\circ}\text{C} \pm 4.76^{\circ}\text{C}$ de lo que marca el tablero del horno, y las caídas de temperatura de vaciado están en un promedio de $36^{\circ}\text{C} \pm 4.18^{\circ}\text{C}$. La caída de temperatura debido al tratamiento actual de desgasificación con lanza es de $45^{\circ}\text{C} \pm 3.2^{\circ}\text{C}$.

No. De Corrida	T0, Panel (°C)	T0, Medida (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)	ΔT_3 (°C)
C1	712	743	709	667	31	-34	-42
C2	712	743	711	666	31	-32	-45
C3	732	763	728	681	31	-35	-47
C4	764	793	750	700	29	-43	-50
C5	720	740	704	661	20	-36	-43
				promedio	28.4	-36	-45.4

Simbología de Tabla 1.

***C#**, Número de corrida de medición de temperatura.

***T0 Panel**, Temperatura medida por el panel de control del horno.

***T0 Medida**, Temperatura medida con el pirómetro termoeléctrico portátil.

***T1**, Temperatura medida en la olla antes del tratamiento de desgasificación

***T₂**, Temperatura medida en la olla después del tratamiento de desgasificación.

* **ΔT_1** , Diferencia de temperatura entre la medición del tablero del horno de reverbero y por el pirómetro termoeléctrico portátil, ambos termopares se colocaron en la abertura de sangrado del horno.

* **ΔT_2** , Pérdida de temperatura del Aluminio líquido durante el vaciado del horno de reverbero a la olla de tratamiento (Temperaturas medidas con el pirómetro termoeléctrico portátil)

* **ΔT_3** , Pérdida de temperatura del Aluminio líquido por el tratamiento de desgasificación por el método de lanza (diferencia entre T₁ y T₂ medidos con el pirómetro termoeléctrico portátil).

4.1.2 Caracterización del equipo para el tratamiento de desgasificación con el método de Rotor-Inyector.

4.1.2.1 Diseño de la altura del rotor.

La altura del rotor es una variable más del tratamiento por el método de rotor-inyector. Para fijar esta variable, se basó la altura del rotor en el diseño de un reactor de mezclado perfecto con respecto a la norma DIN 28131. Por lo tanto con un diámetro de la olla de tratamiento de 65.5 cm, se colocó el rotor a una altura de 21 cm sobre la base de la olla más 5cm de seguridad, debido a la acumulación de escoria en el fondo de la olla con espesores entre 3cm y 5cm. Con esta información se determinaron las dimensiones del sistema para colocar los sensores de posición del equipo (Figura 32).

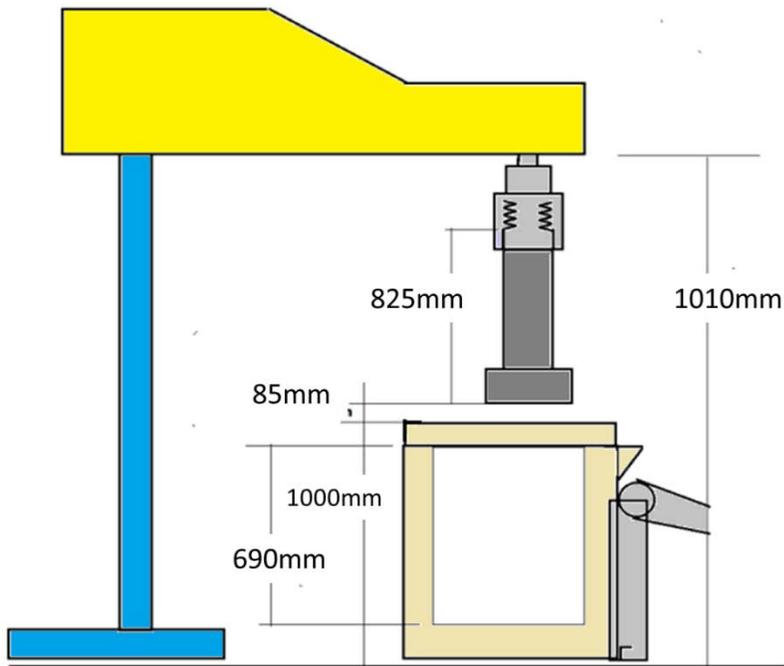


Figura 32. Dimensiones del sistema completo para el tratamiento de degasificación con la unidad fija y la olla de vaciado.

4.1.2.2 Velocidad de rotación.

Debido a que la unidad de degasificación, controla la velocidad de rotación en porcentajes, fue necesario construir una curva de calibración (Figura 33) utilizando un tacómetro, para determinar el rango de velocidades (RPM) en que permite trabajar el equipo.

Porcentaje de velocidad contra la velocidad de rotación en RPM.

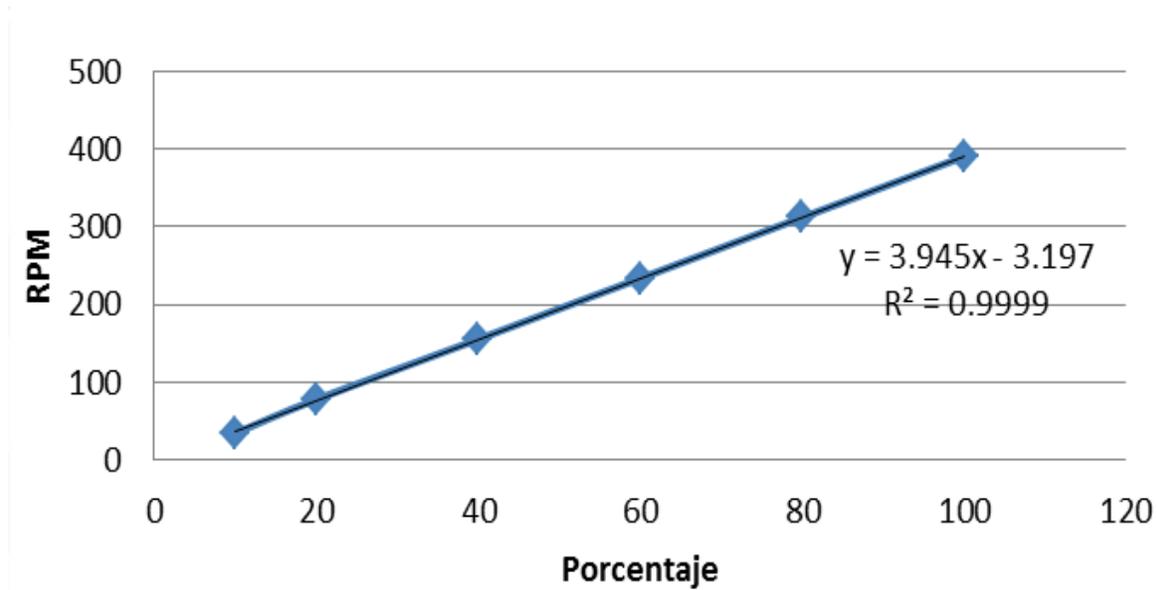


Figura 33. Curva de calibración de la unidad de desgasificación. La velocidad máxima alcanzada por el equipo es de 290.8 RPM y corresponde al 100%, por lo que al trabajar al 75% y 50%, corresponderían a 293 RPM y 195 RPM respectivamente.

4.1.3 Mediciones de densidad.

Se trabajaron con varios modelos para calcular la densidad y determinar el método a utilizar durante el trabajo experimental. Los valores de densidad que se obtienen por estos tres métodos y el error entre ellos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Mediciones promedio de los tres métodos de cálculo de densidad. El porcentaje de error es menor al 1% y por su facilidad de medición se trabajó con el método de balanza hidrostática.

Muestra	Peso aire (g)	Peso agua (g)	Volumen (ml)	Peso en aire (g)	Peso en agua (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad por método de balanza y probeta (g/cm ³)	Densidad por método de balanza hidrostática (g/cm ³)	% error
S1	127.66	77.93	50	62.468	24.245	2.57	2.55	2.58	0.91
S2	114.34	68.84	45	44.404	17.584	2.51	2.54	2.53	0.49
S3	107.81	65.76	42	107.8	41.872	2.56	2.57	2.57	0.12
Probetas de RPT	Mediciones para calcular densidad por métodos de: (balanza y probeta) y (densidad aparente)			Mediciones para calcular densidad por método de: Balanza hidrostática		Diferencia entre los tres métodos para determinar la densidad de las probetas de RPT			

Se tomaron tres probetas por RPT de la olla sin tratamiento de desgasificación correspondientes a la columna uno (S1, S2 y S3). Las mediciones de volumen y peso correspondientes se realizaron por triplicado para cada probeta y se presenta únicamente el promedio en la Tabla 2. En las columnas de color negro se muestran los resultados de los tres métodos para obtener la densidad relativa. A partir de esta tabla, se determina que por el bajo porcentaje de error entre los tres métodos y tomando en cuenta la facilidad y rapidez para realizar las mediciones de las probetas, el método seleccionado para medir la densidad relativa es el de Balanza Hidrostática.

4.1.4 Relación de la densidad con el porcentaje de porosidad.

Debido a que las variaciones en la densidad entre cada tratamiento de desgasificación (ya sea por el método de lanza o por el método de Rotor-Inyector) se dan en rangos de valores muy cortos, se relacionaron los valores de densidad con el porcentaje de porosidad calculada con el programa ImagePro Plus; esto con el fin observar el impacto de éste cambio en la densidad, con la porosidad.

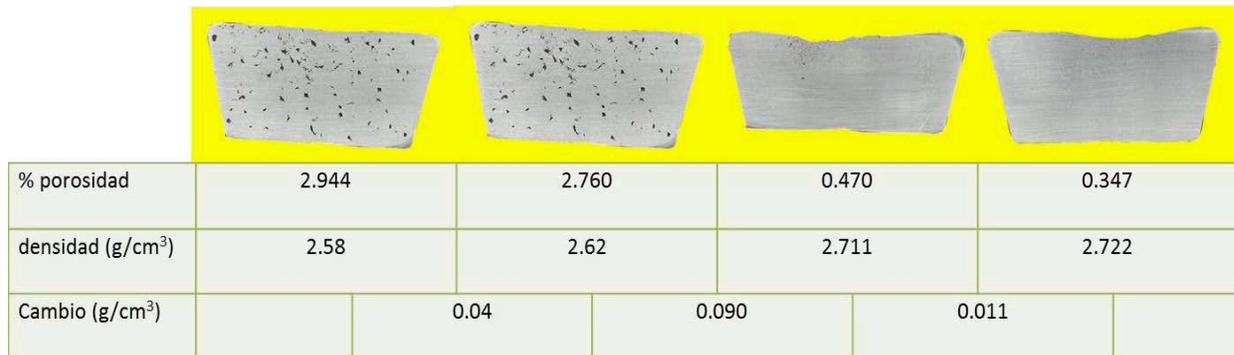


Figura 34. Probetas por RPT con desbaste a lija 600 evaluadas con ImagePro Plus (las probetas son aleatorias entre el tratamiento con lanza, rotor inyector y sin tratamiento de desgasificación). Se tomaron probetas realizando un barrido desde un valor mínimo a un valor máximo de densidad promedio.

En la Figura 34, se puede observar que la densidad es inversamente proporcional al porcentaje de porosidad, y que las variaciones en las centésimas del valor de la densidad, genera un reducción de la porosidad de alrededor de un 30%. Si la variación se da en las décimas del valor de la densidad, se reduce la porosidad alrededor de un 80%. Con estos resultados se observa que, aunque el cambio en el valor de la densidad se da en intervalos muy cortos, indican grandes cambios en el porcentaje de porosidad, aun así la porosidad depende no solo de la concentración de hidrógeno, sino también influye la cantidad de óxidos inmersos en el aluminio líquido con los que se pueden obtener densidades relativamente altas pero con mayor porcentaje de porosidad. Por lo tanto la densidad nos da un valor aproximado con el cual,

podemos estimar la porosidad que se obtiene por la eliminación del hidrógeno y los óxidos presentes en el aluminio líquido.

4.1.5 Análisis metalográfico ⁽²³⁾

Para el análisis metalográfico se prepararon tres muestras; sin desgasificado, con desgasificado por el método de lanza y con desgasificado por el método de Rotor-Inyector. Las micrografías obtenidas se analizaron bajo comparación con patrones literarios referentes a la aleación A380.

En la muestra sin tratamiento hay presencia de inclusiones (óxidos) que se representan con el número 6 en color azul de la Figura 35, estos óxidos se diferencian por la forma y textura que presentan en la imagen, ya que las fases de Mg_2Si (partículas en color negro) no presentan relieves. Con respecto a la aleación A380 se pueden encontrar diversas fases que dependen del contenido de cada elemento y una pequeña variación puede modificar la microestructura presente aunque las fases siempre presentes son el Silicio eutéctico, la fase de solución sólida Aluminio alfa y las fases intermetálicas correspondientes.

La morfología de las fases intermetálicas varía dependiendo de la velocidad de enfriamiento y de la composición química. En esta microestructura se observa la presencia de silicio primario con forma de prisma. También se encuentra la fase intermetálica $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ en forma de scripts de color rosa o café claro, esta fase es conocida como sludge (lodos) que es perjudicial cuando no se tiene un control sobre sus dimensiones y aglomeraciones máximas (rosetas o prismas en la misma tonalidad) que depende de la relación Fe/Mn y contenido de Cr. Otra fase presente es el Al_2Cu que se presenta como cristales en algunas variantes de color rosado y en algunas otras se observa solo el contorno y el fondo de la misma tonalidad que la fase Aluminio α , por lo que pareciera ser una fase transparente.

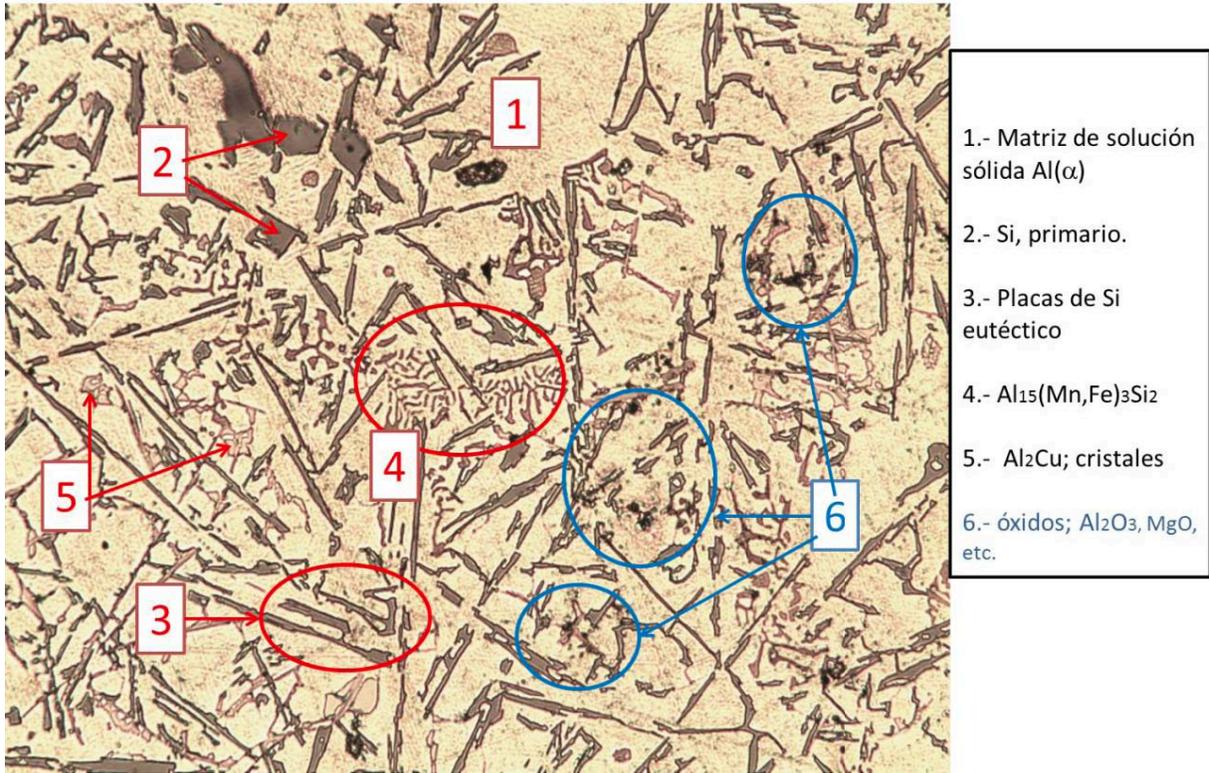


Figura 35. Micrografía A380 sin tratamiento de desgasificado.

En la Figura 36, se encuentran las mismas características que en la microestructura sin tratamiento, también hay presencia de inclusiones (óxidos). Los scripts correspondientes a la fase $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ que se aglomeran tendiendo a la formación de rosetas (lodos).

Aunque aún hay inclusiones presentes en la microestructura de la Figura 32, se observa una disminución en cantidad y tamaño de estos, por lo tanto el tratamiento de desgasificado con lanza reduce la cantidad de óxidos presentes pero no con la eficiencia que se requiere, ya que al menos a lo largo del corte transversal de la muestra no deben de observarse inclusiones muy grandes o aglomeradas.

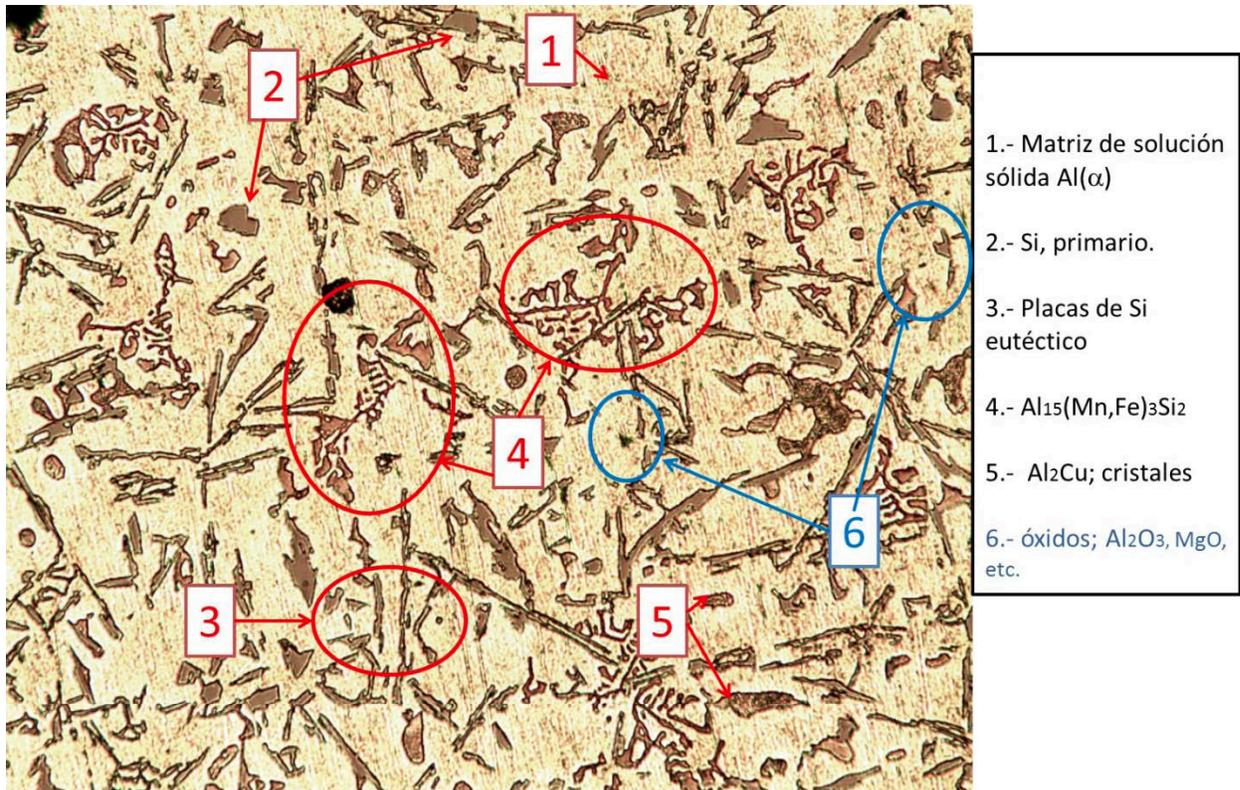


Figura 36. Micrografía A380 con tratamiento de desgasificado con lanza.

En la Figura 37, se observa que no hay presencia de óxidos a lo largo del corte transversal, los puntos oscuros corresponden a la fase Mg₂Si y las fases presentes son las mismas citadas anteriormente.

El efecto de cada tratamiento de desgasificado implica una reducción de óxidos presentes en la microestructura y es un indicador de que el tratamiento de desgasificación expulsa el Hidrógeno disuelto y arrastra las partículas de óxido hacia la superficie, el tratamiento con rotor-inyector presenta una eficiencia mucho mayor que el tratamiento con lanza ya que de las muestras seccionadas, la mayoría presentaba poca o nula presencia de óxidos.

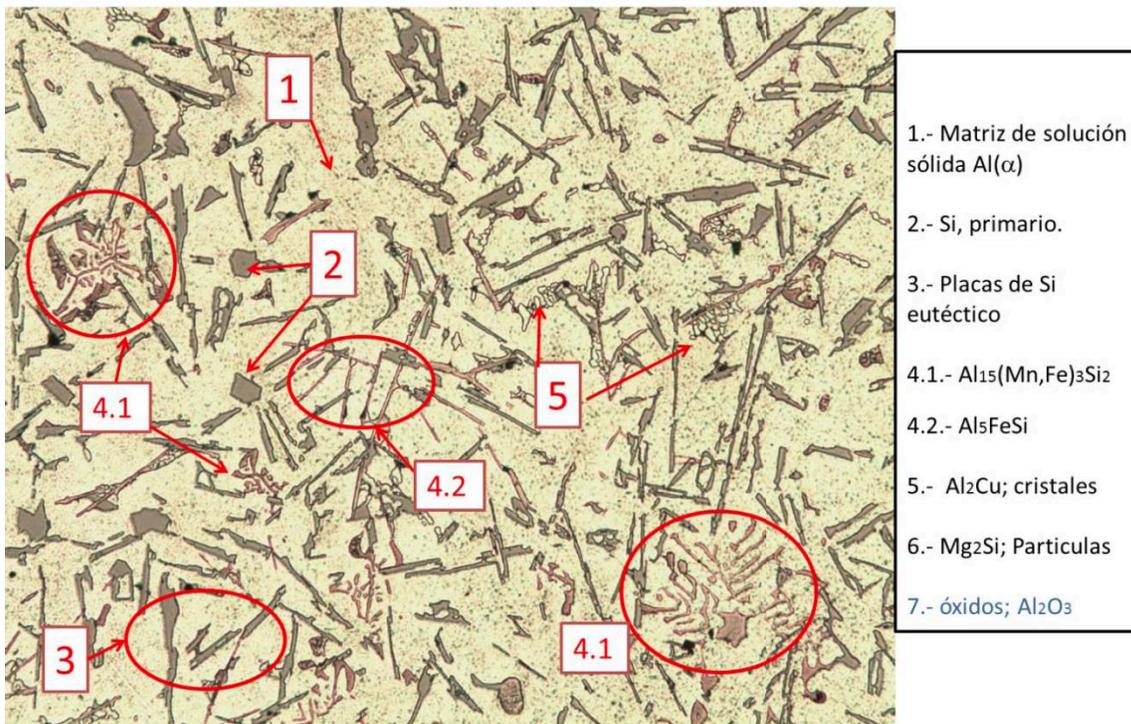


Figura 37. Micrografía de la aleación A380 con tratamiento de rotor-inyector en las condiciones de tratamiento (390 RPM, 30 L/min, 7 min).

4.2 Etapa 2: Tratamiento de desgasificación con el equipo de Rotor-Inyector.

Con las pruebas visuales de seguridad se obtuvieron los parámetros de trabajo. El equipo alcanza una velocidad máxima de operación de 100% que corresponden a 390 RPM, y un flujo máximo sin proyecciones de 30 L/min, para las condiciones de la olla de tratamiento en un nivel lleno correspondiente a 487 kg de metal líquido.

4.2.1 Efecto del desgasificado con el rotor-inyector.

Se tomaron varias muestras a una misma condición para observar el efecto del tratamiento con rotor por rangos, debido a la variación en la

concentración inicial de hidrógeno que se obtiene de la fusión del material en el horno de reverbero, esta concentración inicial varía de acuerdo a la cantidad de retornos y lingotes fundidos, ya que los retornos que corresponden a piezas rechazadas y arañas (sistema de colado), llevan grasas provenientes de los lubricantes al momento del maquinado y troquelado.

La Figura 38, muestra los intervalos de los valores de densidad que se obtuvieron en cada método de desgasificado, la serie en color amarillo son muestras de metal sin tratamiento, la serie en color morado corresponde al tratamiento de desgasificación con lanza, las series en color azul, rojo y verde corresponden al tratamiento con el método de rotor-inyector en los flujos de 10L/min, 20L/min y 30L/min respectivamente.

Comparativo de la eficiencia de cada método de desgasificación

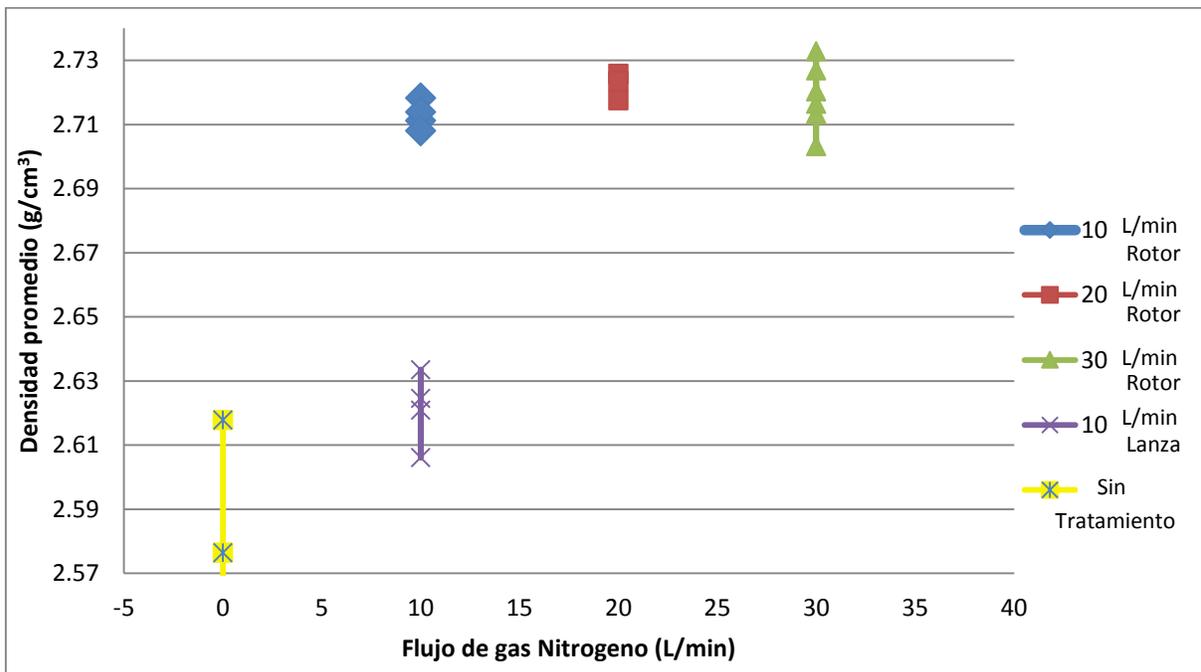


Figura 38. Comparación del efecto del tratamiento de desgasificación con el tratamiento de lanza y sin tratamiento. La densidad promedio del metal antes del tratamiento es de 2.58 g/cm³ y varía en un rango de 2.40 g/cm³ a 2.62 g/cm³. Condiciones de operación; 390 RPM, 5 min, olla llena.

De acuerdo a los resultados, se observa que se logran densidades más altas con el método de rotor-inyector con los tres flujos de gas inyectado (10L/min, 20L/min, 30L/min) con respecto al desgasificado con lanza. Sin embargo, no se puede distinguir alguna tendencia al variar el flujo entre los resultados del tratamiento con rotor, debido a que el mismo proceso en sí, disminuye significativamente la porosidad; así que para cuantificar el efecto de las variables del proceso por rotor-inyector, se generaron gráficos con intervalos más cerrados los cuales se presentan en las secciones posteriores.

Éste comportamiento se da, porque el tratamiento por el método de lanza, alcanza un valor de densidad máxima de 2.63g/cm^3 en un tiempo de 5 a 7min, debido a que no hay una buena distribución de cobertura por la burbuja y concentrándose en un solo punto; además el diámetro del tubo de acero es de 2in y no cuenta con algún filtro o tapón poroso, generando un tamaño de burbuja muy grande que asciende rápidamente a la superficie. Éste tiempo de residencia de burbuja bajo, remueve muy poco hidrógeno en la zona donde se coloca la lanza. Por otro lado el método de rotor inyector, rompe y dispersa la burbuja en todo el baño, promoviendo tiempos de residencia más prolongados y permitiendo la remoción de mayor cantidad de hidrógeno, el efecto del proceso con el método con rotor inyector incrementa tanto la eficiencia del desgasificado, que aún en las condiciones más bajas de operación, mejora significativamente la calidad del metal.

4.2.2 Flujo de gas Nitrógeno inyectado.

Para determinar el efecto del flujo de gas Nitrógeno grado industrial inyectado, se tomaron los promedios de las densidades y de los deltas de temperatura de un mínimo de 3 muestreos. Se varió el flujo de gas en 10L/min, 20L/min y 30L/min, manteniendo constante la velocidad de rotación; $V_{rot} = 390\text{RPM}$, el tiempo de tratamiento; $t = 5\text{min}$, el volumen de metal en la olla; Alt. = Olla llena y el rotor estándar.

Con respecto al gráfico de la Figura 39, se observa un incremento significativo en el valor de la densidad promedio de una inyección de gas de 10L/min a 20L/min, comparado con las condiciones de flujo de 20L/min a 30L/min donde no hay un aumento tan amplio en la densidad

promedio como con la condición anterior; por lo que después de los 20L/min, la densidad se encuentra en intervalos muy cercanos y la curva tiende a un comportamiento asintótico. Esto, se debe a que en bajas condiciones de flujo de gas hay una menor cantidad de burbujas presentes en el baño de metal líquido, lo que es proporcional a la cantidad de hidrogeno extraído y de óxidos sumergidos en el metal líquido, que son impulsados a la superficie por arrastre de gas donde reaccionan con el escoriante; al eliminar estos óxidos, la densidad de la muestra también aumenta, ya que estos óxidos generan centros de nucleación de gas hidrógeno disminuyendo la densidad, por lo tanto al aumentar el valor de ésta, también indica una mayor limpieza del metal líquido.

Flujo de gas de purga contra densidad promedio y ΔT

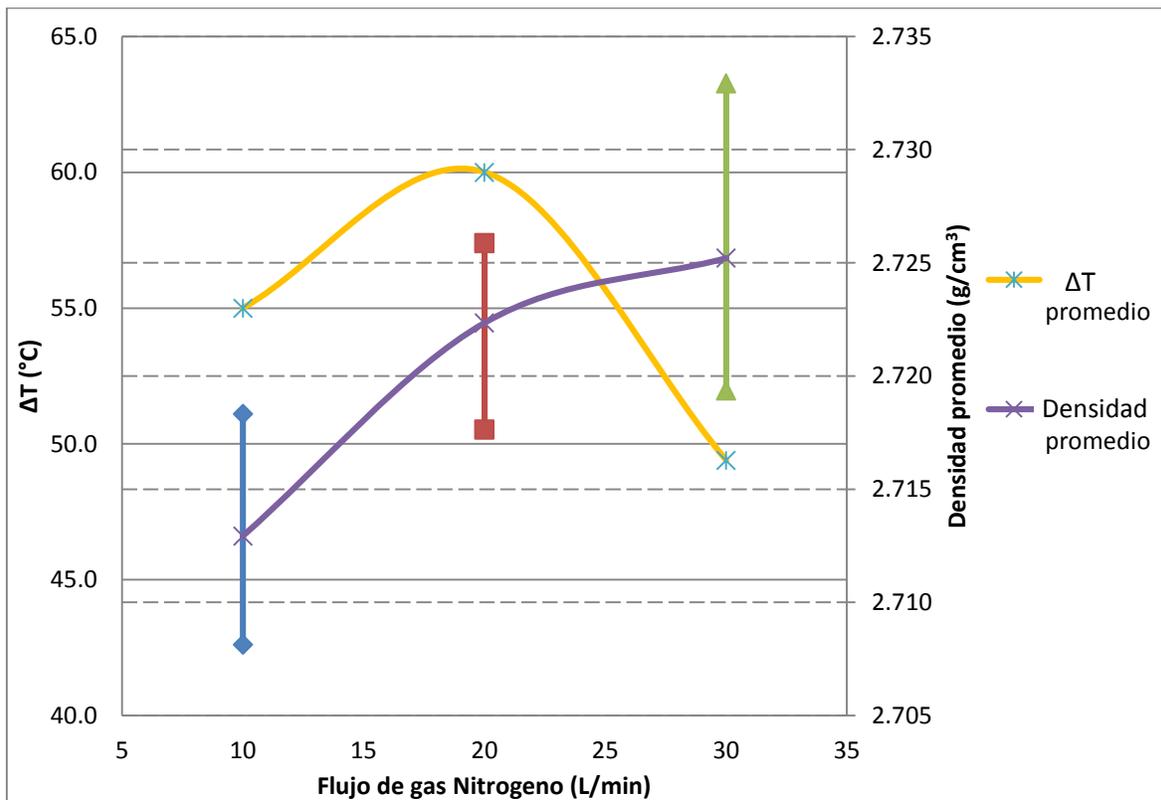


Figura 39. Efecto del flujo de gas inyectado y pérdida de temperatura contra la densidad promedio. La densidad promedio del metal antes del tratamiento es de 2.58 g/cm³ y varía en un rango de 2.40 g/cm³ a 2.62 g/cm³.

En un flujo de gas alto, la cantidad de burbujas presentes en el metal líquido y el impulso generado por la misma rapidez del flujo, extrae tanto el hidrógeno disuelto (debido a la cantidad de gas inyectado), como los óxidos inmersos que se extraen con mayor facilidad (debido al impulso generado por la rapidez del flujo de inyección), por lo que se llega a una condición más estable de porosidad a partir de un flujo de 20L/min, donde la densidad aumenta en intervalos más cortos con flujos de inyección por arriba de ésta condición.

En el tratamiento con una inyección de 30L/min, el efecto del gas inyectado amortigua la agitación del baño generada por el rotor y aunque la pluma de gas sigue siendo amplia sin concentrarse en la flecha, ésta tiende a generar turbulencia proyectando pequeñas gotas de metal líquido, provocando una reacción exotérmica más eficiente del escoriante: lo cual es visible durante el tratamiento y permite una mejor retención de la temperatura del Aluminio líquido, durante el proceso. Ya que a flujos más bajos, la reacción del escoriante no es muy visible y se crea en la parte inferior una capa de escoria que reacciona completamente, y en la parte superior se observa polvo rezagado de escoriante sin reaccionar. Este efecto se aprecia en el gráfico de la Figura 39 analizando la línea superior en color amarillo, donde la pérdida de temperatura se incrementa de 10L/min a 20L/min pero, al llegar a un flujo de 30L/min la pérdida de temperatura baja considerablemente.

4.2.3 Efecto de la temperatura de vaciado.

La temperatura de vaciado, varía de acuerdo a la producción que se requiere en la planta BSI, si hay una alta producción, las temperaturas de trabajo en el horno de fusión llegan a ser más altas del rango establecido, debido a que se requiere mayor energía para fundir con mayor velocidad la carga y se tiene menor control de la temperatura en el aluminio líquido.

4.2.3.1 Relación entre la temperatura antes del tratamiento y la pérdida de temperatura después de cada condición de flujo.

El gráfico de la Figura 40, muestra las mediciones de temperatura que fueron tomadas antes de cada tratamiento en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas se presenta la pérdida de temperatura (ΔT) por el tratamiento de desgasificación con el método de rotor-inyector.

Temperatura previa al tratamiento contra decaimiento de temperatura (ΔT)

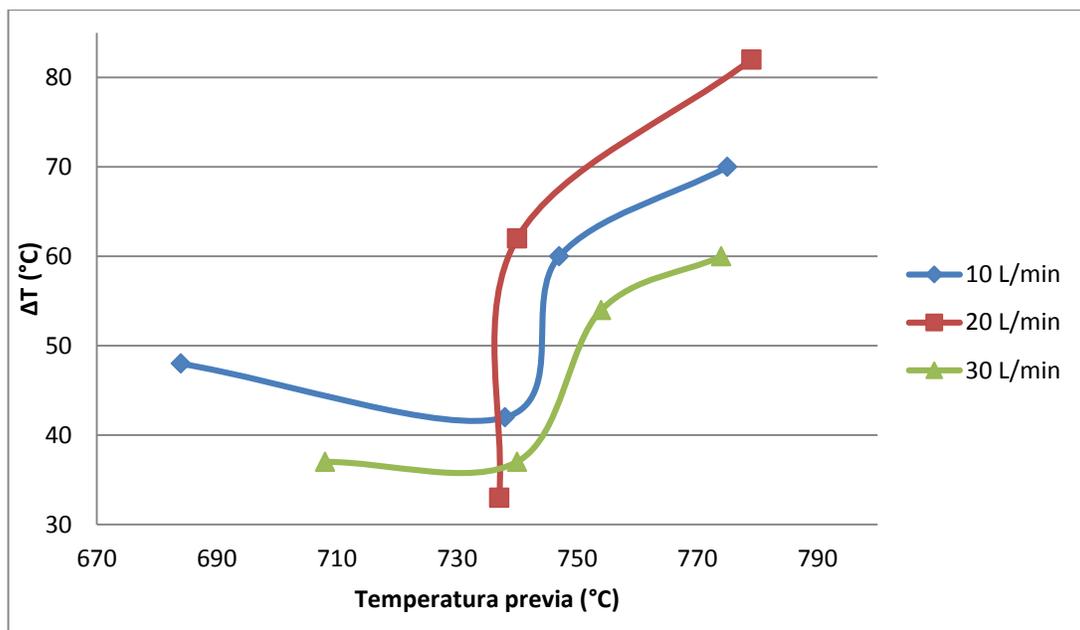


Figura 40. Relación de la temperatura antes del tratamiento y el decaimiento en la temperatura (ΔT) de cada condición de flujo de tratamiento.

La tendencia general de las tres condiciones de flujo es ascendente y se puede apreciar que alrededor de los 740°C hay un cambio abrupto en la pendiente. Por lo tanto la pérdida de temperatura es lineal y aumenta, conforme aumenta la temperatura previa al tratamiento. Éste comportamiento sigue su linealidad hasta los 740°C, donde la temperatura se pierde con mayor rapidez. Esto ocurre por el efecto que tiene la temperatura sobre la fluidez del metal líquido, ya que al aumentar la fluidez del metal líquido opondrá menor resistencia a la agitación provocada por el mezclado del rotor, acelerando la pérdida de calor por convección.

Con respecto al flujo de inyección, se observa el mismo comportamiento analizado anteriormente, el flujo correspondiente a los 30L/min presenta la menor pérdida de temperatura. Sin embargo también sigue el comportamiento ascendente, visualmente al aumentar la temperatura el rotor agita con mayor rapidez el metal líquido y se presenta una ruptura de la capa escoriante, esparciéndose por la superficie del baño, este escoriante es visualmente más polvoso (menor aluminio adherido), pero tiende a concentrarse en el centro de la olla, debido al pequeño vórtice generado en altas temperaturas aun contando con la paleta refractaria. Éste efecto suma importancia al valor acrecentado en la pérdida de temperatura a partir de los 740°C.

Las otras dos condiciones de flujo, correspondientes a las curvas, Azul (10L/min) y Rojo (20L/min) de la figura, presentan una tendencia teórica, donde el flujo más alto presenta la mayor pérdida de temperatura. En este caso se observa la misma tendencia ascendente por las dos condiciones de flujo, pero por arriba de los 740°C la pérdida de temperatura incrementa drásticamente en el flujo de inyección de 20L/min, donde visualmente presenta las mismas características en la cobertura del escoriante que en el flujo de 10L/min. Pero en esta condición, la presencia de gas es el doble que en la condición anterior, resultando en una mayor pérdida de temperatura, debido únicamente al efecto del flujo de gas de inyección. Este comportamiento debe corroborarse con un mayor número de muestras en pruebas controladas en laboratorio que confirmen estos resultados.

4.2.3.2 Relación de la temperatura antes del tratamiento con la densidad promedio en cada condición de flujo.

Los resultados del gráfico de la Figura 41, relacionan la temperatura previa al tratamiento con la densidad que se alcanza para cada condición de flujo, las líneas corresponden a los rangos de temperatura previa al tratamiento en los que se tomaron las muestras, en orden ascendente de temperaturas las líneas se ordenan en Azul (680-708)°C, Rojo (710-754)°C, Verde (755-779)°C. Analizando los primeros dos rangos de temperatura, se observa que la línea azul correspondiente a temperaturas previas al tratamiento bajas, en las cuales se obtienen los valores de densidad más altos, al tomar como referencia la línea de tendencia en color Rojo, se tiene un aumento en la densidad cerca de dos centésimas de gramo por centímetro cúbico, al disminuir la temperatura previa al tratamiento, cerca de 37.8°C valor correspondiente a la media de cada intervalo.

Efecto de la temperatura sobre la densidad promedio.

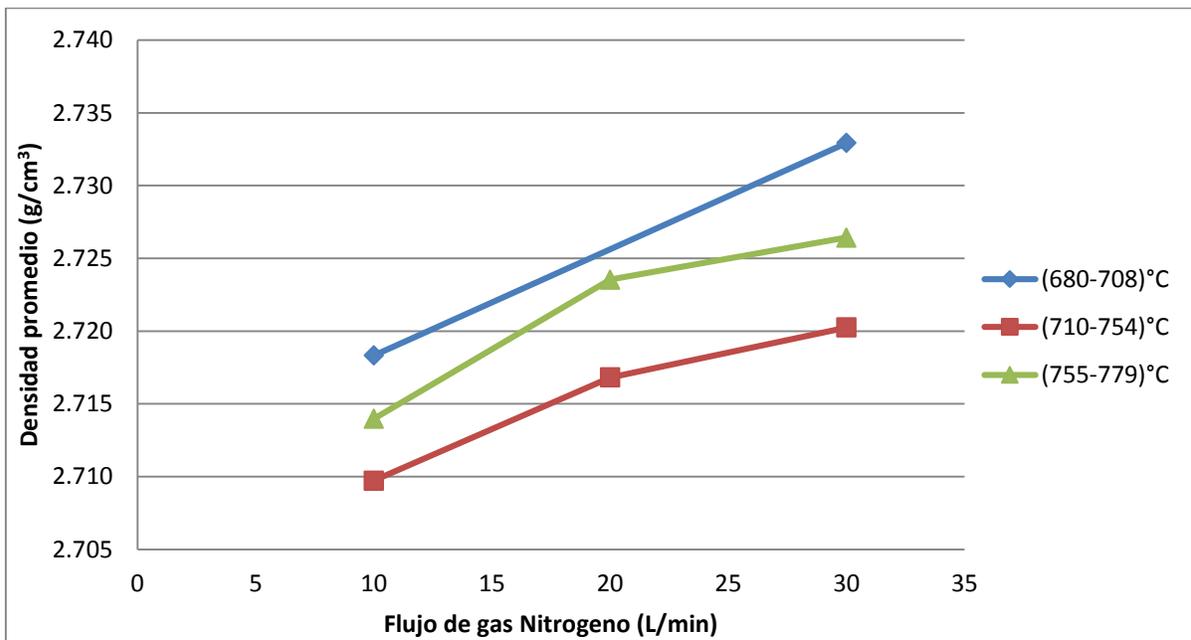


Figura 41. Cada línea coloreada corresponde a un rango de temperaturas antes del tratamiento y los ejes del gráfico relacionan la densidad promedio después del tratamiento para cada condición de flujo. Condiciones de operación; 390 RPM, 5 min.

Estos resultados nos indican que al disminuir la temperatura, la densidad alcanzada después de cada tratamiento será más alta y su impacto en éste incremento será mayor, que si sólo aumentamos la cantidad de flujo de inyección, debido a que la solubilidad de hidrógeno depende primordialmente de la temperatura; y aunque la cinética de la desgasificación natural es muy lenta, el tratamiento con el método de rotor-inyector incrementa la cinética de remoción del hidrógeno con el mezclado, además de la remoción, debido al flujo de gas inyectado.

Por otro lado la curva en color verde que corresponde a las temperaturas más altas, se encuentra entre las otras dos condiciones, y siguiendo con el razonamiento anterior, a esta temperatura más alta, deberían de conseguirse los valores de densidad más bajos y por lo tanto esta curva debería presentarse por debajo de las otras dos curvas (Azul y Rojo). De nuevo éste mismo fenómeno se presenta debido a que en altas temperaturas aumenta la fluidez del metal líquido, y aunque por este fenómeno se pierde mayor energía debido al tratamiento, también entre mejor sea el mezclado y se genere mayor turbulencia en el baño la cinética del desgasificado tendrá una mejor eficiencia. Entonces se encuentra una interacción de oposición entre los efectos de la solubilidad de hidrogeno, que aumenta a estas temperaturas contra la cinética de desgasificación promovida por la reducción en la oposición al mezclado y la presencia del gas purgante.

4.2.4 Velocidad del rotor.

Las bajas velocidades de rotación, generan una concentración de flujo de gas alrededor de la flecha de grafito y debido a la poca rotación y ruptura desproporcionada de la burbuja. Éstas velocidades, provocan mayores proyecciones de material que con el tratamiento de lanza, haciéndolas menos aptas por razones de seguridad del operador y el personal.

El gráfico de la Figura 42, muestra que la velocidad de rotación es directamente proporcional a la densidad y como las muestras de densidad cuantifican no solo la concentración de hidrógeno presente, sino también la limpieza del metal líquido, es seguro que al aumentar la

velocidad de rotación disminuirá la concentración de hidrógeno y de óxidos presentes en el metal líquido.

Velocidad de rotación contra densidad promedio.

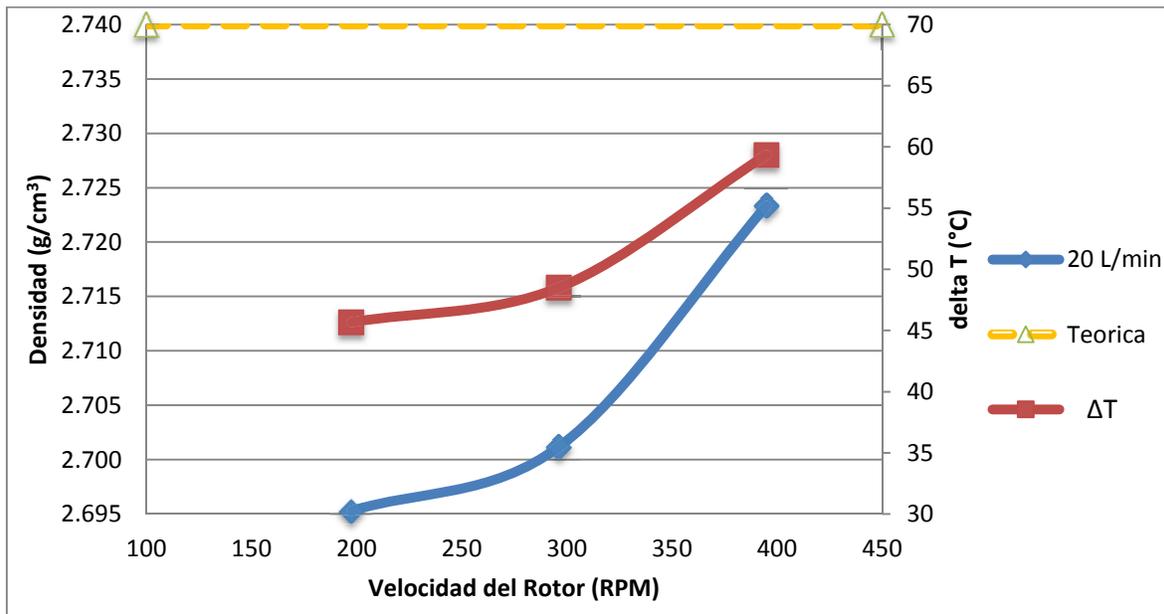


Figura 42. Efecto de la velocidad del rotor sobre la densidad, a un flujo constante de 20 L/min y 5 min de tratamiento.

En el gráfico de la Figura 42, observamos que la tendencia de la curva es exponencial, ya que a bajas revoluciones el flujo de gas tiende a concentrarse en la flecha del rotor y la ruptura de la burbuja es irregular y más lenta. Por lo que se obtienen tamaños de burbuja grandes, de diferentes tamaños entre sí, con poca cobertura y que ascienden rápidamente a la superficie restando tiempo para que el hidrogeno se adhiera a la burbuja y se dé el mecanismo de extracción. La velocidad baja también disminuye la eficiencia de mezclado del metal líquido. Una velocidad de rotación baja, no permitirá que el metal cercano a las paredes de la olla de tratamiento, sea recirculado y se mezcle. Así mismo, se da una disminución en el efecto de la fuerza centrífuga que impulsa los componentes más densos dentro del metal líquido hacia las paredes de la olla, lo cual ayuda al proceso permitiendo eliminar impurezas.

Visualmente, en velocidades bajas las burbujas generadas son grandes y se agrupan en el centro del rotor rompiendo la capa escoriada, mientras el gas emerge en distintos tamaños, la escoria pegada al rotor se mezcla e introduce dentro del metal líquido, lo que provoca que se proyecten gotas de Aluminio líquido considerablemente grandes para calificarlo como peligroso, ya que reduce la oportunidad de observar detalladamente el proceso o que el material proyectado caiga en algún otro componente aledaño como pueden ser algunas conexiones cercanas. En las velocidades altas se obtienen tamaños de burbujas pequeños, donde las proyecciones solo se dan en flujos altos por arriba de los 30L/min, aun así las proyecciones son pequeñas partículas diminutas de metal sin mucho alcance radial.

4.2.5 Tiempo de tratamiento.

En el primer gráfico correspondiente a la Figura 43, se plasma la densidad promedio de muestras que fueron tomadas en un barrido de tiempos de 1min, 3min, 5min y 7min, en las condiciones de flujo de gas inyectado de 10L/min y una velocidad de 390RPM. La curva que se obtiene tiene una tendencia asintótica donde a partir de los 5 min la variación de la densidad, ya no es muy significativa por lo tanto se requiere de tiempos demasiado largos de tratamiento para que se alcance una densidad cercana a la densidad teórica.

Tiempo de tratamiento contra densidad promedio.

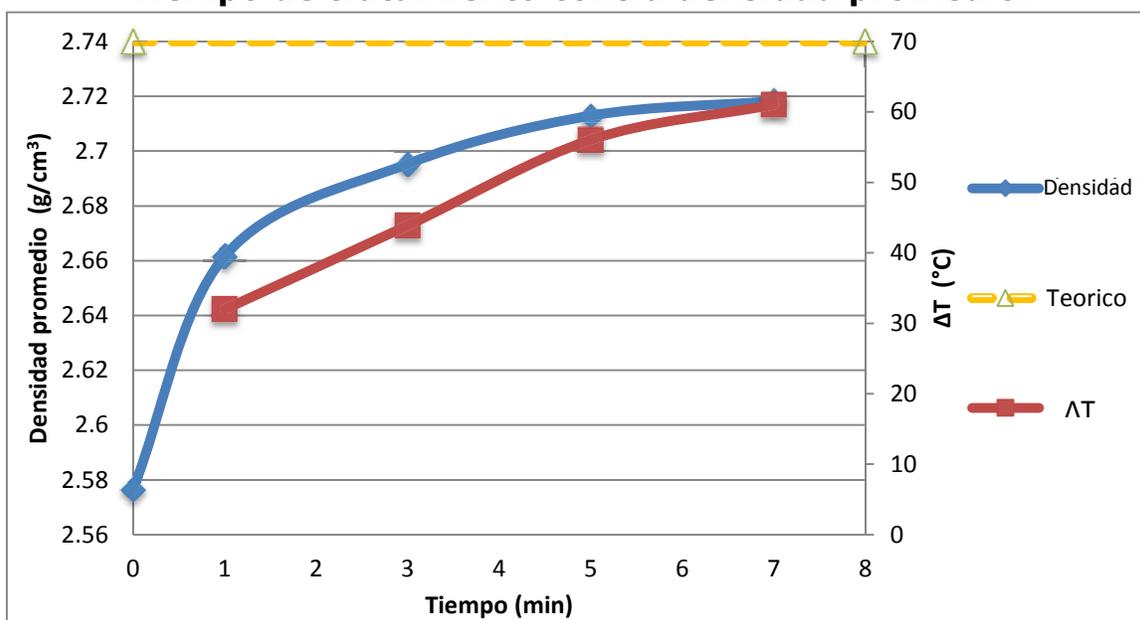


Figura 43. Variación del tiempo de tratamiento y su efecto sobre la densidad y pérdida de temperatura, en un tratamiento con Rotor-Inyector en las condiciones; 10 L/min, 390 RPM, olla llena, T=(710-750)°C

En el gráfico de la Figura 43, también se encuentra la curva en color Rojo correspondiente a la pérdida de temperatura, la cual crece a manera que el tiempo de tratamiento es más prolongado, ya que el metal líquido queda expuesto por más tiempo a la temperatura del gas de purga, a la temperatura del medio ambiente y al efecto del mezclado por el rotor.

En la Figura 44, se grafican los mismos parámetros, pero para las tres condiciones de flujo; 10L/min, 20L/min y 30L/min, con sus respectivos colores Azul, Rojo y Verde. En las tres condiciones de flujo de gas inyectado, la densidad promedio aumenta con forme el tiempo de tratamiento es más prolongado, pero la curva correspondiente a un flujo de 30L/min tiene una mayor rapidez de aumentó en la densidad con una pendiente más grande.

Tiempo de tratamiento contra densidad promedio a diferentes flujos de gas de purga.

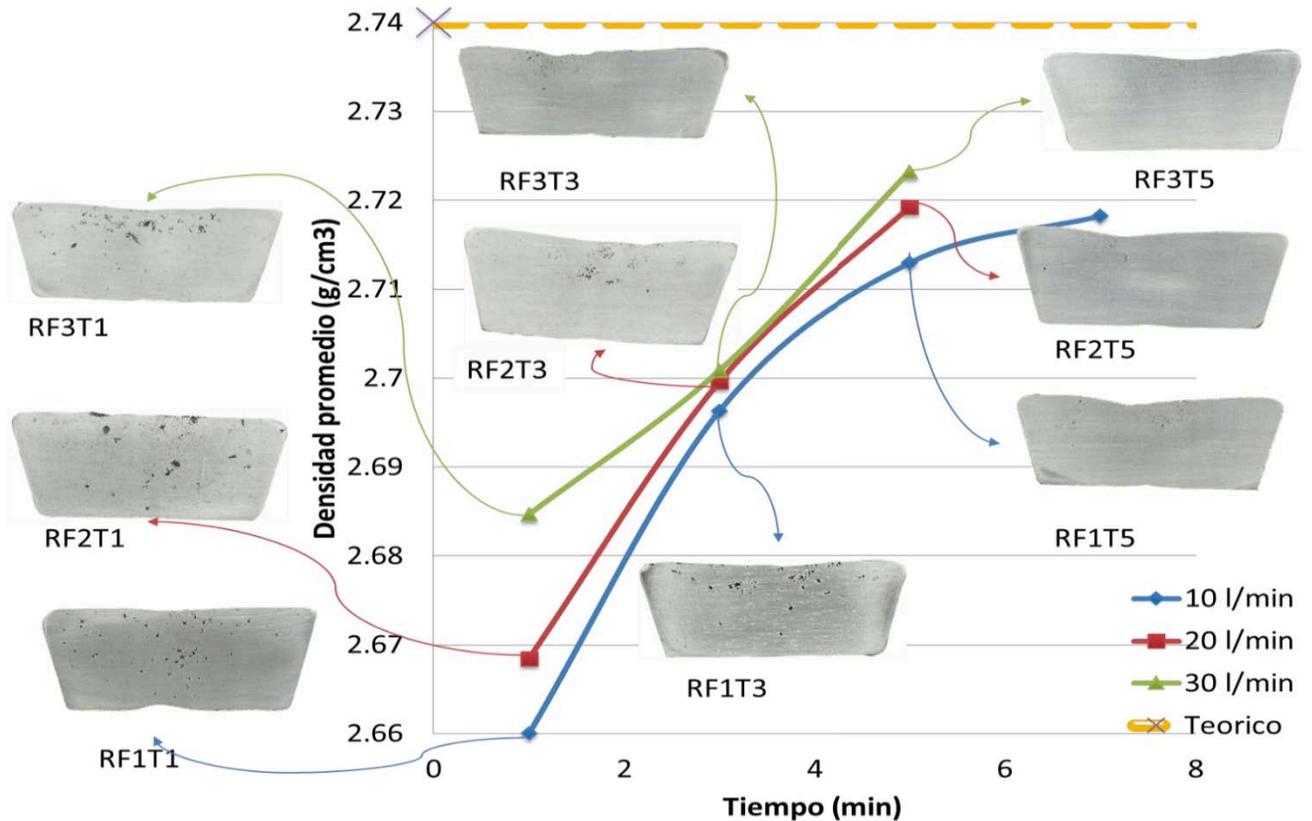


Figura 44. Relación de la porosidad con la densidad y su variación respecto al tiempo de tratamiento por cada condición de flujo de Nitrógeno inyectado.

Tabla 3. Resumen de datos de % de porosidad y densidad promedio, la tabla se encuentra ordenada en orden descendente de % de porosidad la cual se obtuvo de las muestras representativas que se muestran en la Figura 44 por medio del programa ImagePro Plus.

Muestra	% Porosidad	Densidad (g/cm ³)	Flujo (L/min)	Tiempo (min)
RF1T1	1.281	2.6600	10	1
RF2T1	1.260	2.6685	20	1
RF3T1	1.011	2.6847	30	1
RF1T3	0.583	2.6963	10	3
RF2T3	0.440	2.6996	20	3
RF3T3	0.348	2.7009	30	3
RF1T5	0.258	2.7129	10	5
RF2T5	0.127	2.7192	20	5
RF3T5	0.060	2.7252	30	5
RF1T7	0.160	2.7182	10	7

Nomenclatura de Tabla:

***R:** Tratamiento de desgasificación por Rotor-Inyector.

***F#:** Flujo de gas Nitrógeno (1=10L/min, 2=20L/min y 3=30L/min).

***T#:** Tiempo de tratamiento de desgasificación dado en minutos.

De la Figura 44, analizando la muestra y la densidad correspondiente al primer minuto de tratamiento con un flujo de gas de 30L/min, se observa que este promueve una mejor extracción de la escoria del fondo y de las paredes de la olla que es arrastrada hacia la superficie. Pero debido al poco tiempo de tratamiento, la escoria queda sumergida en el baño de metal líquido (se observa en la muestra con porosidad en la parte superior), mientras que en flujos más bajos, no se desprende tanta escoria y su contenido en el metal líquido es más bajo (se observa en la muestra la porosidad dispersa). Después de los primeros minutos el sistema comienza a estabilizarse en un nuevo rango de densidades, donde interactúa la concentración de hidrógeno y la cantidad de escoria remanente inmersa en el metal líquido que afecta especialmente a la condición de flujo de 30L/min que es donde hay una mayor velocidad de flujo y al mismo tiempo mayor turbulencia dentro del metal fundido. Éste fenómeno corresponde al minuto 3 donde las muestras de las tres condiciones de flujo presentan densidades y porosidades dentro de un intervalo muy cerrado, esto es visible en las muestras de la Figura 44 y en los datos de la Tabla 3. Después de los 3 minutos las curvas se separan mostrando de nuevo mayor rapidez en la desgasificación con flujo de gas de 30L/min. y los flujos de 10L/min y 20L/min, tienen una tendencia similar y no se separan mucho una de la otra. Analizando las imágenes de la Figura 44 se determina con el área gerencial de BSI un rango de trabajo entre 3min y 5min donde visualmente, la porosidad que se obtiene entre densidades que van de 2.69 g/cm^3 hasta 2.72 g/cm^3 son óptimas con respecto a los parámetros de calidad establecidos en la planta BSI, así mismo este rango no se encuentra tan alejado de la densidad teórica de 2.74 g/cm^3 del Aluminio A380. Tomando en cuenta que la disminución de la porosidad comprende la remoción del hidrógeno y óxidos inmersos en el metal líquido, es para

BSI lo que tiene mayor impacto en la calidad del producto respecto a los intereses de BSI México.

4.2.6 Nivel de Aluminio líquido.

El gráfico de la Figura 45, muestra la variación del nivel de Aluminio líquido dentro de la olla en porcentaje, el nivel más bajo (60%) presenta la densidad más alta comparando con los niveles a 75% y 90%. Esto se debe a que el mezclado es mucho más eficiente en niveles bajos promoviendo una mayor cobertura por las burbujas generadas, también la relación de gas Nitrógeno inyectado con el volumen de Aluminio líquido es mayor, por lo tanto hay una mayor cantidad de burbujas con respecto a la cantidad de aluminio líquido, aunque su tiempo de residencia no sea tan largo. Para el caso del nivel intermedio de 75%, la densidad que se obtiene es la más baja de todos los niveles, esto se debe a que la relación gas Nitrógeno y volumen de Aluminio líquido es baja y se tiene una menor cantidad de burbujas en relación a la cantidad de aluminio líquido, además que el tiempo de residencia es menor que una olla con nivel de 90%, efecto que se da por el nivel y no por el volumen de Aluminio líquido. También hay que considerar que el grado de mezclado es menor en un nivel de 75% que uno de 60% por lo que hay menor cobertura por la dispersión de la burbuja. Debido a estos fenómenos, el nivel de 75% obtiene la densidad más baja y el 60% la densidad más alta, por lo tanto podemos observar que en el tratamiento es muy importante controlar las dimensiones de la olla para lograr un equilibrio entre la relación gas de inyección y volumen de metal líquido (grado de mezclado), con el tiempo de permanencia de la burbuja (debido a la altura de aluminio líquido en la olla)

Altura de Aluminio líquido contra densidad promedio.

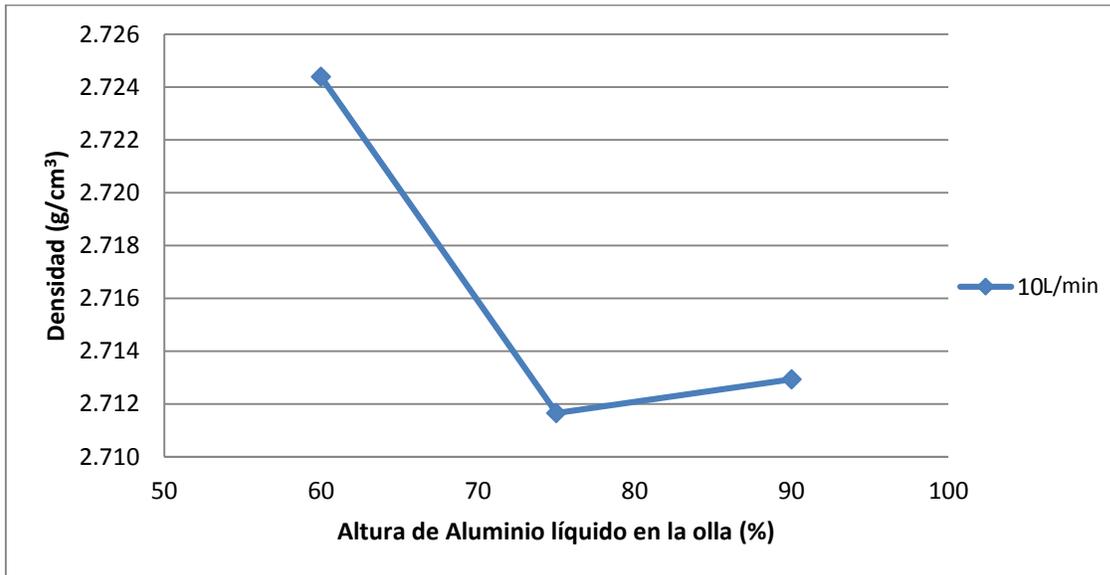


Figura 45. Efecto de la altura de aluminio líquido sobre la densidad.

4.2.7 Condiciones de operación para niveles de Aluminio líquido entre 30% y 50% de capacidad máxima de la olla.

Debido a que la eficiencia del mezclado depende de las dimensiones de la olla de vaciado, al trabajar en un nivel del 50% o por debajo de este, es necesario ajustar la posición del rotor a un nivel más bajo. Esta nueva posición debe cumplir con agitación eficiente para ambos niveles, por lo tanto se realizó el cálculo tomando como referencia la altura de la olla y la posición preestablecida del rotor, con esta información se determinó una altura de 16 cm por encima de la base de la olla, lo cual comprende 11cm que es la distancia media entre ambos niveles, más 5 cm de seguridad por la formación de escoria.

Los tratamientos por debajo de niveles del 50% no presentan buena estabilidad en las condiciones del proceso por el mismo diseño de la olla

que impacta directamente el mezclado del Aluminio líquido. Los parámetros de operación, permiten una velocidad máxima del rotor de 273RPM (70% en el equipo) con un flujo de 20L/min. Si la velocidad de rotación es menor de 273RPM con un flujo de gas Nitrógeno de 20L/min, presenta proyección de material en grandes cantidades por lo que es necesario reducir el flujo de inyección a 10L/min. Debido a la escala del flujómetro que tiene el equipo, no se permiten inyecciones de flujo menores a los 10L/min, y las condiciones más estables de tratamiento para estos niveles son únicamente: 273RPM con 20L/min de inyección de gas Nitrógeno y 197RPM con 10L/min de gas inyectado, estas condiciones se comparan en la Figura 46.

Condiciones de proceso estable en alturas de 30% a 50% de la olla contra densidad promedio

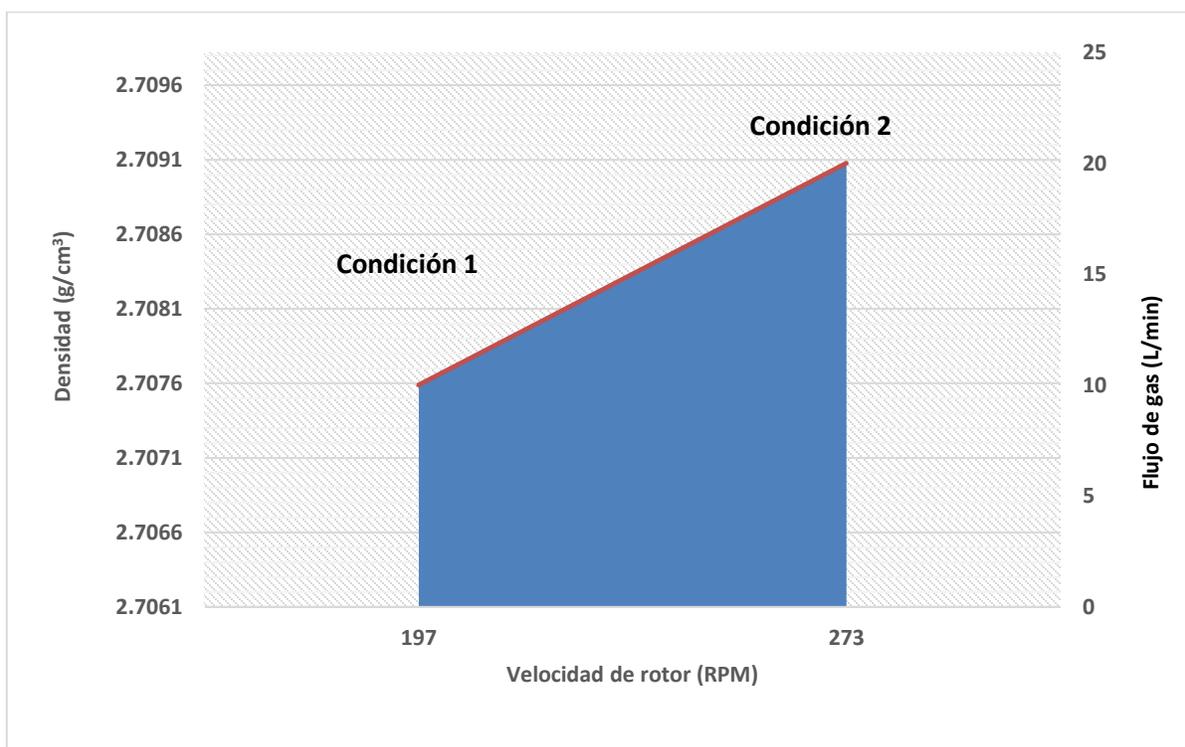


Figura 46. Impacto sobre la densidad de ambas condiciones de tratamiento para un nivel de 30% de la capacidad de la olla. **Condición 1** (197 RPM-10L/min), **condición 2** (273 RPM-20L/min). Solo estas dos condiciones permiten el tratamiento de desgasificación sin proyecciones de Aluminio líquido y sin generación de vórtice.

En el gráfico de la Figura 46, se observa que la densidad que se alcanza con ambos tratamientos es prácticamente la misma con una diferencia de 0.001g/cm^3 entre ambas. Por lo tanto se debe aplicar el tratamiento con las condiciones más bajas, y se recomienda para la empresa BSI trabajar con la **condición 1** (197RPM, 10L/min, 5min).

Variación de la densidad con respecto al tiempo.

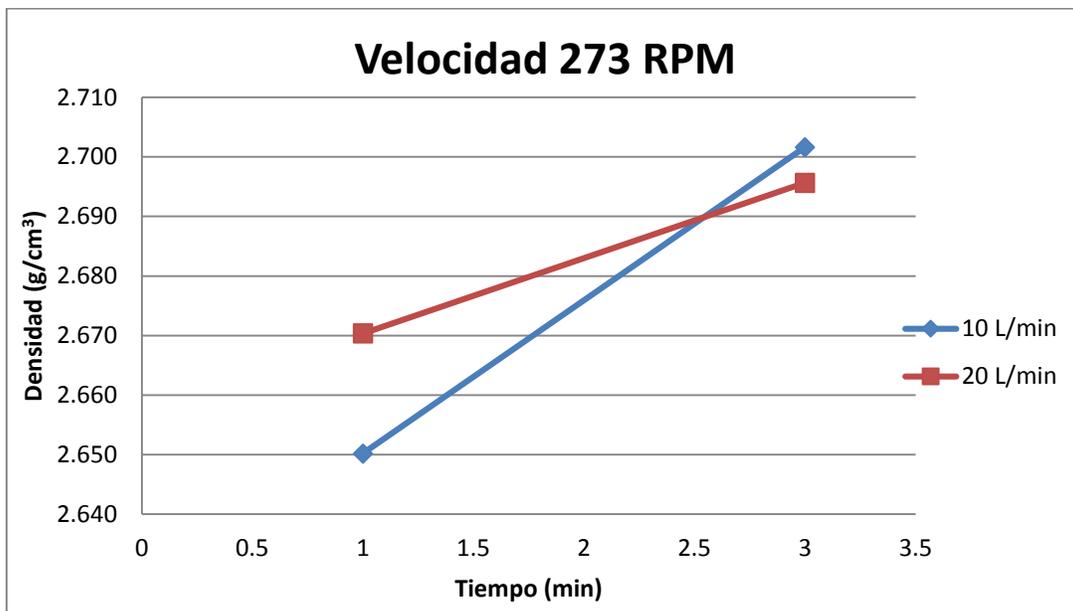


Figura 47. Relación del flujo de inyección de gas Nitrógeno con la densidad, a una velocidad de rotación de 273 RPM para una olla al 50% de su capacidad máxima.

En la Figura 47, se mantiene una velocidad de rotación de 273 RPM que corresponden al 70% de la velocidad en el equipo, las líneas corresponden a las dos condiciones de flujo, en Azul-10L/min y Rojo-20L/min. Se observa que la densidad que se alcanza con ambas condiciones es muy cercana mientras el proceso se estabiliza, es decir a tiempos prolongados, la densidad que se obtiene es muy cercana para las dos condiciones.

Capítulo V Resumen de análisis de resultados

La técnica de tratamiento de desgasificación con el método de rotor-inyector, tiene una mayor eficiencia que el tratamiento con lanza, aún en las condiciones más bajas de proceso arrojando resultados determinantes por comparación de RPT.

La cubierta generada por el fundente, juega un papel muy importante en el proceso al aislar el metal líquido de la humedad proveniente del medio ambiente, así como por sus características de reacción exotérmica, que permiten mantener mejor la temperatura del baño líquido de aluminio.

A medida que se inyecta mayor cantidad de gas de purga en el tratamiento del metal líquido con rotor-inyector, la densidad aumenta (la porosidad disminuye) hasta llegar a un comportamiento asintótico, que en este proceso se da a partir de un flujo de gas Nitrógeno de 20 L/min donde el incremento en la densidad no es significativo por encima de este valor de flujo.

La velocidad del rotor impacta significativamente en el cambio de la densidad (porosidad por hidrógeno) sólo a revoluciones altas (en este proceso de 295 RPM a 390 RPM). Por lo tanto lo mejor es trabajar con revoluciones altas sin que estas generen un vórtice. En éste caso la placa deflectora permite interrumpir el flujo del aluminio líquido y eliminar el vórtice.

En un intervalo de tiempo de 3 a 5 minutos y un flujo de inyección de 30 L/min de gas Nitrógeno, se presenta una mayor cantidad de escoria atrapada por los tiempos cortos de tratamiento (mezclado ineficiente y poco tiempo de residencia de burbuja), por lo tanto una inyección de gas Nitrógeno de 10 L/min sería adecuada para estas condiciones de proceso y se evitaría el consumo innecesario de gas Nitrógeno.

Cuándo la temperatura del metal líquido antes del tratamiento, está por debajo de los 710°C se obtienen las densidades más altas. En el intervalo de 710°C hasta 755°C se obtuvieron las densidades más bajas. La reducción mínima que se alcanza en la porosidad por efecto de

la temperatura es del 26.17 % entre estas dos series de datos. Por lo tanto la temperatura de tratamiento es el factor con mayor peso en el aumento de la densidad y por ello debe trabajarse a temperaturas bajas, lo suficiente para compensar la pérdida de energía del vaciado a hornos de retención.

Considerando que a mayor temperatura del Aluminio líquido dentro de la olla antes del tratamiento, hay una mayor pérdida de temperatura después del tratamiento de desgasificación con Rotor-Inyector, la opción de trabajar con altas temperaturas, solo promueve el consumo de combustible, pero puede ahorrar tiempo al fundir más rápido si es necesario. Aun así tener una temperatura previa al tratamiento por arriba de 755°C implicaría tener la zona de retención de Aluminio líquido del horno de fusión entre 790°C y 820°C, que es demasiada energía en desperdicio y se propicia una mayor concentración inicial de hidrogeno disuelto.

Considerando la temperatura que se pierde durante el vaciado del horno a la olla, más la temperatura que pierde en el traslado, la temperatura de trabajo del aluminio líquido en el horno debe ser de 760°C +/- 10°C. Para tener temperaturas antes del tratamiento en un rango de 710°C a 740°C, con esto aseguramos temperaturas después del tratamiento de 670°C a 690°C. Los intervalos de temperatura se establecieron tomando en cuenta que las temperaturas óptimas de inyección se encuentran entre 630°C a 700°C.

Los niveles de olla por debajo del 50% de su capacidad, presentan características de proceso inestables por las cuales solo se puede trabajar con bajas condiciones de tratamiento, esto se debe al mismo diseño de la olla de tratamiento la cual debe de cumplir con medidas específicas para el volumen de Aluminio líquido a trabajar.

Capítulo VI Conclusiones

El ensayo de presión reducida RPT permite analizar un proceso de desgasificación y se puede utilizar como control de calidad ya sea midiendo la densidad relativa o simplemente seccionando la muestra transversalmente y determinar la porosidad bajo observación y comparación con un patrón para determinar si queda dentro del rango de aceptación en términos de densidad relativa o porcentaje de porosidad.

Uno de los factores más importantes es el diseño del reactor (Olla de tratamiento). Dependiendo de la cantidad de aluminio líquido debe de ser el diseño del reactor y el rotor de tratamiento ya que de esto dependen fenómenos como la relación del gas purgante con el volumen de Aluminio líquido, mezclado del metal líquido y tiempo de residencia de la burbuja.

Por seguridad no se recomienda trabajar el tratamiento de Rotor-Inyector en reactores con altura de Aluminio líquido menor al 60%. Tampoco es recomendable trabajar con velocidades de rotación muy bajas por la proyección de metal líquido.

Con flujos de inyección altos y velocidades de rotor cercanas a la generación del vórtice, se tiene una desgasificación eficiente; y por la turbulencia generada en estas condiciones, se promueve la reacción exotérmica del fundente, disminuyendo la pérdida de temperatura del aluminio líquido durante el tratamiento de desgasificación.

No se recomienda aplicar el tratamiento de desgasificación por Rotor-Inyector en temperaturas superiores a los 740°C.

Con el equipo gerencial de BSI se determinó el rango de densidades adecuadas para las piezas que se obtienen en su planta, por lo tanto se presentan las condiciones en intervalos que se acoplan al tipo de proceso de BSI, estas condiciones se muestran a continuación:

Para niveles de olla entre 75% y 90% de su capacidad, las condiciones más adecuadas del proceso son:

- Flujo de gas Nitrógeno; 10-15 L/min
- Velocidad del rotor; 350 -390 RPM
- Tiempo de tratamiento; de 3 min a 5 min.
- Temperatura del horno; 760°C +/- 10 °C

Para niveles de olla entre 30% y 50% de su capacidad, las condiciones más adecuadas del proceso son:

- Flujo de gas Nitrógeno; 10-15 L/min
- Velocidad del rotor; 197 -247 RPM
- Tiempo de tratamiento; de 3 min a 5 min.
- Temperatura del horno; 760°C +/- 10 °C

REFERENCIAS

- [1] **Burner Systems International, productos** (Disponible en: <http://www.burnersystems.com>) consultado el 20 noviembre del 2014
- [2] **Dişpınar, D.** "Reproducibility of Reduced Pressure Test Results in Testing of Liquid Aluminum Gas Levels", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), (pp. 16-18), May 2011, Elazığ, Turkey
- [3] **Otarawanna, S.** "Production, processing and applications", Fundamentals of aluminum metallurgy, (pp. 141-154), Oxford-Woodhead, Ucrania (2011).
- [4] **Equipos de inyección a presión** (Disponible en: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>) consultado el 12 de febrero de 2015
- [5] **Brown, J. R.** "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook", Edición: 00011, Elsevier Ltd, Noviembre de 1999, United States of America.
- [6] **Horno de reverbero cámara húmeda** (Disponible en: <http://www.nptel.ac.in/courses/112107144/24>) Consultado el 05 de Octubre de 2014
- [7] **Basics Of Stack Melting.** (Disponible en: <http://www.moderneq.com/stack-melting.html>) Consultado el 04 de Octubre de 2014
- [8] **Horno Rotativo FICMA,** (Disponible en: ficma.com.mx) Consultado 04 Octubre de 2014

- [9] **Horno de Fusión basculante PYRADIA** 1400°C. (Disponible en: <http://www.pyradia.com/hornos/horno-de-fusion.html>), Consultado el 25 de Octubre de 2014
- [10] **Makhlouf M. M. ; D. Apelian** "CASTING CHARACTERISTICS OF ALUMINUM DIE CASTING ALLOYS", The Advanced Casting Research Center Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, February 5, 2002, United States of America.
- [11] **Crepeau P.** "Molten Aluminum Contamination: Gas, Inclusions and Dross", Aluminum Alloy Castings, 4th Edition.
- [12] **Campbell, J.** "CASTINGS" (pp. 178-204). 2nd Edition. 2003: Butterworths, Massachusetts, United States of America.
- [13] **Selección y aplicación de fundentes en la fusión de aluminio para piezas de fundición.** (Disponible en [:http://fundytec.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=6](http://fundytec.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=6)), Consultado el 05 de Febrero de 2015
- [14] **Opie, W. R.; N. J. Grant.** "Hydrogen Solubility in Aluminum and Some Aluminum Alloys", Transactions. AIME, Vol. 188, (October 1950) pp. 41. Journal of Metals.
- [15] **Hess, P.D.** "An Empirical Equation for Calculating Solubility of Hydrogen in Molten Aluminium Alloys", Light Metals, pp. 591-597, 1974, Pennsylvania, United States of America.
- [16] **Gruzleski J. E.** "The treatment of Liquid Aluminum - Silicon Alloy", American Foundrymen´s Society, (pp. 57-68, 143-181), Des Plaines, Illinois, USA, 1990.

- [17] **Ramos Gómez E. A.** "Modelado Físico Y Matemático del Desgasificado de Aluminio Líquido Equipado con Rotor – Inyector". Tesis de Maestría, UNAM Facultad de Química, México 2011.
- [18] **Makhlouf M. M. ; L. Wang; D. Apelian** "Measurement and Removal of Hydrogen in Aluminum Alloys" (pp.29-38). United States of America: American Foundrymen´s Society, 1998.
- [19] **Neff V. D.** "Understanding Aluminum Degassing: Modern Casting" (pp. 24-26), Mayo 2002, Vol. 92.
- [20] **Unidad de desgasificación DFU** Foseco, (Disponible en: <http://www.foseco.com>)
- [21] **Campbell J.; R. A. Harding** "Training in Aluminum Applications Technologies: **The Liquid Metal**", Lecture 3202, (Disponible en: www.eaa.net/eea/education/TALAT/lectures/3205.pdf), consultado el 30 Enero de 2015
- [22] **Cuevas R.** "Ingeniería de Reactores I (Reactores Homogéneos)" 1642-2 (Disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/amyd/docs.php?curso=194>)
- [23] **Bäckerud L.; G. Chai; J. Tamminem** "Solidification Characteristics of Aluminum Alloys", Foundry Alloys, Vol. 2, (pp. 152-196) Department of structural chemistry, Arrhenius laboratory, University of Stockholm, Sweden.