



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

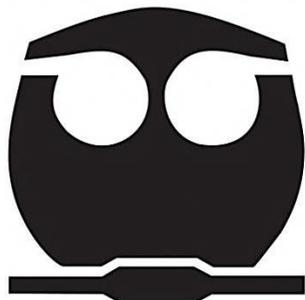
**ESTUDIO DEL EFECTO DE TIEMPO Y
TEMPERATURA SOBRE LA REGASIFICACIÓN Y
FORMACIÓN DE LODOS EN HORNOS DE
RETENCIÓN DE ALUMINIO PARA EL PROCESO
DE COLADA A PRESIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUIMICA METALÚRGICA

PRESENTA:

KARINA BEATRIZ RIVERA BAROJAS



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Prof. José Alejandro García Hinojosa

Vocal: Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

Secretario: Prof. Adrián Manuel Amaro Villeda

1er Suplente: Prof. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

2do Suplente: Prof. Luis Dario Escobar Mejia

Sitio donde se desarrolló el tema:

Burner Systems International de México

(Km 44.2 Apaseo el Grande CP 38160, Celaya, Guanajuato).

Asesor del tema:

Dr. José Alejandro García Hinojosa

Sustentante:

Karina Beatriz Rivera Barojas.

Contenido

Resumen.....	9
Justificación.....	10
Hipótesis	10
Objetivo.....	10
Capítulo 1. Introducción	11
1.1 Generalidades del Aluminio	11
1.2 Aplicaciones de las aleaciones de Aluminio	12
1.2.1 Colada a presión.....	13
1.3 Aleaciones de Aluminio para fundición	15
1.3.1 Efecto de elementos aleantes	19
1.4 Desgasificación de Aluminio.....	22
1.4.1 Solubilidad de Hidrógeno en Aluminio líquido	22
1.4.2 Proceso de desgasificación	24
1.4.3 Métodos de desgasificación	25
1.4.4 Evaluación de porosidad en Aluminio	29
1.5 Formación de lodos.....	33
Capítulo 2. Procedimiento experimental.....	38
2.1 Etapa 1. Caracterización del proceso de fusión y manejo de aluminio líquido.....	38
2.2 Etapa 2. Estudio para determinar la regasificación en aleaciones base aluminio en hornos de retención.....	38
2.3 Etapa 3. Estudio para determinar la formación de lodos en hornos de retención.	39
Capítulo 3. Resultados y discusión	41
3.1 Etapa 1	41
3.1.1 Composición química.....	41
3.1.2 Curva de enfriamiento	42
3.1.3 Caracterización de condiciones de trabajo para Aluminio líquido	42
3.2 Etapa 2.....	44
3.2.1 Caracterización de hornos de retención	44
3.2.2 Evaluación de regasificación en hornos de retención	46

3.3	Etapa 3.....	57
3.3.1	Análisis de lodos metalicos.....	57
	Conclusiones.....	63
	Referencias bibliográficas.....	64

Índice de figuras

Figura 1. Máquina de cámara caliente para fundición a presión.	14
Figura 2. Máquina de cámara fría para fundición a presión.	14
Figura 3. Solubilidad de hidrógeno en aluminio puro y aleaciones de aluminio respecto a la temperatura.	23
Figura 4. Equipo para desgasificado al vacío.	26
Figura 5. Detalle de la desgasificación de aluminio líquido por medio del rotor-inyector.	27
Figura 6. Muestras solidificadas (A) bajo presión atmosférica y (B) bajo presión reducida.	30
Figura 7. Aparato para prueba de presión reducida y diversas formas para el análisis de estas muestras.	31
Figura 8. Ecuación de densidad para un cuerpo sólido, obtenida a partir del principio de Arquímedes.	32
Figura 9. Aspecto H, desarrollado para evaluar el contenido de hidrógeno en aluminio fundido.	33
Figura 10. Microestructura de aleación A380, fusión a 720°C por tres horas. C-Escritura china, N-Aguja o plaquetas, P-poliédrico.	34
Figura 11. Factor de lodos contra temperatura de mantenimiento y temperatura recomendada de trabajo.	36
Figura 12. Factor de lodos contra temperatura de mantenimiento.	37
Figura 13. Curva de enfriamiento experimental para la aleación A380.	42
Figura 14. Abatimiento de temperatura y tiempo promedio de las etapas que conllevan el tratamiento y manejo del aluminio líquido.	44
Figura 15. Quemadores Evo II.	49
Figura 16. Densidad contra tiempo para dos tipos de hornos de retención, con crisol y sin crisol.	45
Figura 17. Variación de densidad durante el turno 1.	49
Figura 18. Variación de densidad durante el turno 2.	49

Figura 19. Densidad, alimentando aluminio desgasificado con lanza.	51
Figura 20. Densidad, alimentando aluminio desgasificado con rotor.	51
Figura 21. Variación de densidad y temperatura alimentando aluminio desgasificado con lanza.	53
Figura 22. Variación de densidad y temperatura alimentando aluminio desgasificado con rotor.	53
Figura 23. Variación de densidad con temperatura de retención variable.	54
Figura 24. Variación de densidad con alimentación de metal controlada.	55
Figura 25. Variación de densidad y temperatura con alimentación de metal controlada.	55
Figura 26. Metalografía de precipitación de lodos en el horno sin crisol.	58
Figura 27. Metalografía de muestra to y t1 para horno de retención con crisol.	60

Índice de tablas

Tabla 1. Designación de las aleaciones de aluminio para fundición.	16
Tabla 2. Composición química de aleaciones de aluminio para inyección a presión.	17
Tabla 3 Propiedades mecánicas y físicas de aleaciones de aluminio para inyección a presión.	18
Tabla 4. Composición química promedio de la aleación A380 en BSI.	41
Tabla 5. Características de las etapas del proceso de fundición en BSI.	43
Tabla 6. Duración de un ciclo de alimentación en Hornos de retención.	44
Tabla 7. Comparación entre densidad y porcentaje de porosidad en muestras sometidas a solidificación por presión reducida.	47
Tabla 8. Parámetros controlados para evitar la variación de densidad en el horno de retención.	56
Tabla 9. Composición química de muestra con lodos y aleación A380.	58
Tabla 10. Composición química de muestras to y t1 para horno con crisol (H1) y horno sin crisol (H2).	59
Tabla 11. Factor de lodos y densidad de muestras to y t1 para horno con crisol (T1) y horno sin crisol (T2).	60
Tabla 12. Composición química promedio y variación estándar de piezas obtenidas por colada a presión.	61

Listado de símbolos

Símbolo	Descripción	Unidades
DI	Índice de densidad	Adim
ρ	Densidad	g/cm ³
ρ_{liq}	Densidad del líquido	g/cm ³
P _r	Peso real	g
P _a	Peso aparente	g
SF	Factor de lodos (Sludge Factor)	Adim
T _t	Temperatura de trabajo	°C

Resumen

Después de realizar la desgasificación del aluminio líquido en aleaciones para colada a presión, este es trasvasado a hornos de retención junto a máquinas de inyección a presión. Los mantenimientos en estas unidades son largos y prolongados, por lo que es posible la regasificación e incluso la formación de intermetálicos de alta densidad FeCrMn (lodos) asociados a las variaciones de temperatura y composición química. La regasificación deteriora la calidad del aluminio líquido tendiendo a la posible obtención de piezas porosas, la formación de lodos reduce la fluidez y tapa los sistemas de colada e incluso introduce residuos de lodos dentro de la pieza fabricada. Por lo que resulta muy importante el conocimiento de estos fenómenos para evitar efectos negativos sobre las piezas finales.

El presente trabajo se realizó en las instalaciones de Burner Systems International Inc., BSI, una empresa con 50 años de éxito, proveedor global de componentes y soluciones a medida para los fabricantes de aparatos de gas ^[1], donde el proceso de fundición es una de las etapas críticas para la fabricación de piezas, obtenidas en su mayoría por die casting o colada a presión, empleando aleaciones base aluminio, por lo que es necesario un adecuado proceso de fusión y limpieza de metal para cumplir con los estrictos requerimientos de calidad.

Justificación

El proceso de inyección a presión ha sido un gran aliado para la creciente demanda de manufactura de piezas mecánicas, eléctricas, automotrices, entre otras. Debido a sus características, elevada fabricación de piezas en lapsos cortos de tiempo, aunado a obtención de geometrías complejas de diversos tamaños y acabados cercanos al de la pieza final.

Es por ello que la técnica de inyección a presión llega a ser altamente eficiente, sin embargo para aprovechar su mayor potencial, es necesario establecer y monitorear estrictamente diversas variables, dentro de las más importantes, se encuentra el material fundido que ingresa a la máquina de inyección.

Hipótesis

En aleaciones de aluminio empleadas en colada por inyección a presión los tiempos largos de retención y variaciones de temperatura pueden provocar la regasificación del metal líquido, formación de lodos en el fondo del crisol y re-suspensión cuando este se agita.

Objetivo

Determinar el efecto de tiempo de permanencia y temperatura, en el horno de retención de aluminio líquido, sobre la regasificación de la aleación y en la formación de lodos para el proceso de colada por inyección a presión, empleando las herramientas y condiciones de Burner Systems International Inc. BSI.

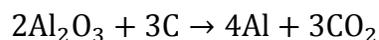
Capítulo 1. Introducción

En el primer capítulo se presentan antecedentes teóricos que introducen al lector al presente trabajo.

1.1 Generalidades del Aluminio ^{[2][3][4]}

El aluminio, de símbolo químico Al, es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, después del oxígeno y silicio. Pertenece al bloque p de la tabla periódica, que están situados junto a los metaloides o semimetales. Este tipo de elementos tienden a ser blandos y presentan puntos de fusión bajos. Existe principalmente en minerales de aluminio silicato, la erosión de estas rocas dan origen a las arcillas con contenido metálico, al continuar la erosión se produce la bauxita, principal mineral de aluminio y del cual se extrae el mismo, contiene $\text{Al}(\text{OH})_3$ e hidróxido de aluminio, $\text{AlO}(\text{OH})$. Las fuentes de bauxita se encuentran principalmente en las regiones tropicales y subtropicales, África, India, Sudamérica y Australia.

El principal método de obtención del aluminio es el proceso Hall-Héroult, donde la alúmina (Al_2O_3) es disuelta dentro de una celda electrolítica revestida interiormente de una mezcla de carbón, como baño electrolítico se emplea una solución con criolita (Na_3AlF_6) fundida. La misma celda actúa como cátodo, mientras que el ánodo se compone de electrodos de carbón. La corriente eléctrica produce la descomposición de la alúmina disuelta en aluminio metálico y oxígeno; el aluminio metálico se deposita en el fondo de la celda, mientras que el oxígeno generado consume el carbón de los ánodos produciendo dióxido de carbono, como se muestra en la siguiente fórmula:



El metal obtenido mediante este proceso es conocido como Aluminio primario, ya que se deriva de la extracción directa de la bauxita, sin embargo debido a

cuestiones monetarias y medio ambientales, el reciclaje de aluminio se ha convertido en una gran fuente de obtención del metal, conocido como Aluminio secundario o reciclado. El proceso de aluminio secundario sólo requiere el 5% de la energía que necesita la producción de aluminio primario, generándose únicamente el 5% de emisiones de gas.

1.2 Aplicaciones de las aleaciones de Aluminio

El aluminio es el segundo metal más utilizado, sólo tras el hierro, siendo posible su empleo en un gran número de aplicaciones, tanto en estado puro como en sus diversas aleaciones. Algunas de las características por las que este metal es tan recurrente en la industria se mencionan a continuación: aspecto superficial agradable y fácilmente coloreable, baja densidad ($2,70\text{Kg/m}^3$), maleable, bajo punto de fusión (660°C), resistente a la corrosión, no magnético, no combustible, impermeable al agua y a olores, gran poder reductor, compatible al alearse con otros metales (Mg, Si, Cu, Zn y Mn) y por último dentro de las propiedades más importantes, fácilmente reciclable. Gracias a estas características en ocasiones es insustituible en sus aplicaciones que comprenden diversos sectores como el alimenticio, transporte, construcción, entre otros.

Existen diversos procesos aplicados al aluminio, principalmente divididos en metalmecánicos como el trefilado, laminación, forja, extrusión, etc. y de fundición, como la colada por gravedad en molde de arena o permanente, cera perdida, modelo evaporable, colada a presión, entre otros, para fines de este trabajo nos concentraremos en las aleaciones obtenidas por fundición empleadas en esta última técnica, colada a presión o Die Casting ampliamente utilizada por su elevada producción y eficiencia.

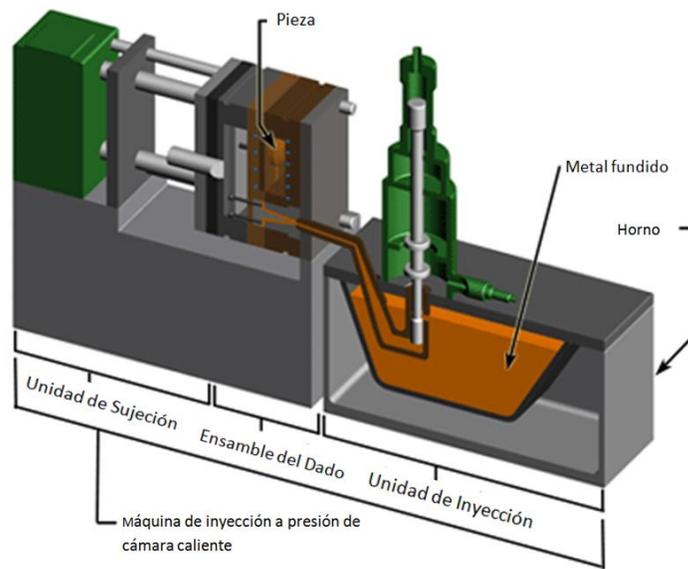
1.2.1 Colada a presión

La fundición de aluminio colado a alta presión (High Pressure Die Casting, HPDC) es un proceso donde el metal fundido es inyectado dentro de un molde metálico precalentado, dicha inyección se efectúa a elevada presión y velocidad, apenas es fracciones de segundo, estas características ayudan a un solidificado casi instantánea de la aleación. Una vez que esto último ha ocurrido, se abre el molde y separa la pieza obtenida. El proceso es rápido, permite obtener geometrías complejas con buen acabado superficial y de tolerancias dimensionales altas; además el molde en términos de coste y rendimiento es uno de los máximos responsables en la eficiencia del proceso, como consecuencia de su prolongada vida útil.

Las principales variables de los procesos de inyección a presión son cámara caliente y cámara fría:

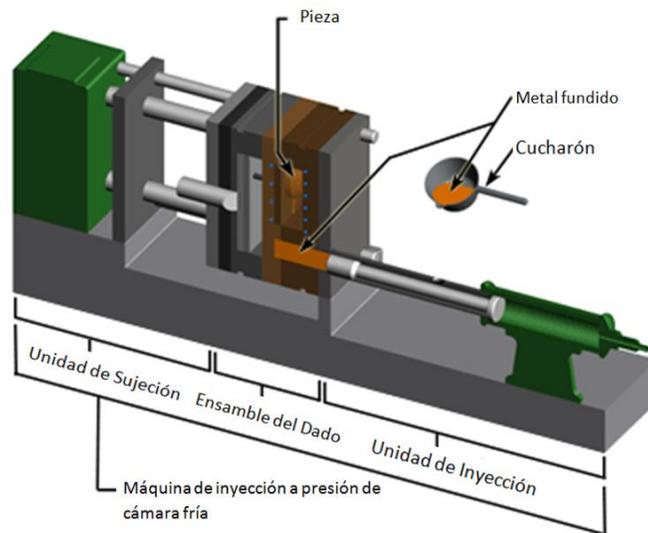
Cámara caliente: empleado para metales con bajo punto de fusión como zinc, plomo, estaño, aluminio y recientemente magnesio; en este proceso se coloca una cámara caliente u horno sobre el cual actúa un émbolo hidráulico en contacto directo con el metal líquido, haciendo pasar la aleación por un cuello que presenta una reducción en su diámetro, con el fin de aumentar la presión de inyección, hasta llenar la cavidad del molde empleado, los principales componentes de este tipo de máquinas se ilustran en la **Figura 1** ^[5].

El proceso de cámara caliente minimiza la turbulencia del metal líquido, la oxidación y las pérdidas de calor durante la transferencia de metal, sin embargo tiempos prolongados de contacto, metal líquido-maquinaria, causan severos efectos sobre el equipo.



Copyright©2008 CustomPartNet

Figura 1. Máquina de cámara caliente para fundición a presión.



Copyright©2008 CustomPartNet

Figura 2. Máquina de cámara fría para fundición a presión.

Cámara fría: este proceso resuelve el problema del daño en los componentes del equipo ocasionado por el contacto continuo con el aluminio líquido, la aleación se encuentra almacenada de forma independiente a la máquina, el contacto sólo ocurre en el molde y cilindro para llenado durante la breve inyección de la pieza. Esta característica permite trabajar con aleaciones base aluminio, cobre y algunas ferrosas, cuyo punto de fusión es superior a las aleaciones empleadas en cámara caliente. En consecuencia al separar el metal líquido de la inyectora, se requiere de constante suministro de aleación y de un volumen determinado de acorde a la pieza fabricada. Los principales componentes de las máquinas de cámara fría se ilustran en la **Figura 2** ^[5].

1.3 Aleaciones de Aluminio para fundición

El aluminio se alea con el fin de obtener una gran gama de propiedades físicas, mecánicas y químicas, dichas propiedades recaen en los elementos mayoritarios de la aleación. El sistema más reconocido de clasificación de aleaciones de aluminio para fundición (Aluminum Cast Alloys, ACA) se presenta en la **Tabla 1**.

En el sistema de 4 dígitos, expresado en la **Tabla 1**, el primer número indica la familia o serie a la que pertenece la aleación, de acuerdo a su principal elemento aleante; los siguientes dos números sirven para identificar cada aleación y no tienen un significado numérico en particular; el dígito localizado después del punto decimal indica a que componente pertenece la composición química evaluada, esta puede ser; XXX.0, para indicar composición química del producto final, pieza; mientras XXX.1 y XXX.2, se refiere a composición química de lingote, normalmente XXX.2 trata de una especificación química más rigurosa que XXX.1, incluso composición de aluminio primario ^[6].

Tabla 1. Designación de las aleaciones de aluminio para fundición.

No. de Serie	Tipo de aleación
1XX.X	>99%Al
2XX.X	Al + Cu
3XX.X	Al + Si + Mg, Al + Si + Cu, Al + Si + Mg + Cu
4XX.X	Al + Si
5XX.X	Al + Mg
6XX.X	Fuera de Uso
7XX.X	Al + Zn
8XX.X	Al + Sn
9XX.X	Fuera de uso

En ocasiones la designación es precedida por letras, las cuales expresan cambios o modificaciones en la composición química de la aleación base (impurezas o pequeños cambios para alterar ciertas propiedades), por ejemplo, A360 y B360.

Con la diversidad de aleaciones de aluminio, se debe definir cuáles poseen las propiedades requeridas para el proceso de inyección a presión, la **Tabla 2** muestra dichas aleaciones y su composiciones químicas, la **Tabla 3** muestra las propiedades mecánicas y físicas.

Tabla 2. Composición química de aleaciones de aluminio para inyección a presión [7].

Aleaciones de Aluminio para Inyección a Presión ^A ^B											
Comercial:	360	A360	380	A380 ^B	383	384 ^B	390*	13	A13	43	218
ANSI/AA:	360.0	A360.0	380.0	A380.0	383.0	384.0	B390.0	413.0	A413.0	C443.0	518.0
Composición Nominal:	Mg 0.5 Si 9.5	Mg 0.5 Si 9.5	Cu 3.5 Si 8.5	Cu 3.5 Si 8.5	Cu 2.5 Si 10.5	Cu 3.8 Si 11.0	Cu 4.5 Si 17.0	Si 12.0	Si 12.0	Si 5.0	Mg 8.0
Composición específica											
Silicio											
Si	9.0-10.0	9.0-10.0	7.5-9.5	7.5-9.5	9.5-11.5	10.5-12.0	16.0-18.0	11.0-13.0	11.0-13.0	4.5-6.0	0.35
Hierro											
Fe	2.0	1.3	2.0	1.3	1.3	1.3	1.3	2.0	1.3	2.0	1.8
Cobre											
Cu	0.6	0.6	3.0-4.0	3.0-4.0	2.0-3.0	3.0-4.5	4.0-5.0	1.0	1.0	0.6	0.25
Manganeso											
Mn	0.35	0.35	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.35	0.35	0.35	0.35
Magnesio											
Mg	0.4-0.6	0.4-0.6	0.30 ^D	0.30 ^D	0.10	0.10	0.45-0.65	0.10	0.10	0.10	7.5-8.5
Níquel											
Ni	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.50	0.10	0.50	0.50	0.50	0.15
Zinc											
Zn	0.50	0.50	3.0	3.0	3.0	3.0	1.5	0.50	0.50	0.50	0.15
Estaño											
Sn	0.15	0.15	0.35	0.35	0.15	0.35	—	0.15	0.15	0.15	0.15
Titanio											
Ti	—	—	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—
Otros Individual											
—	—	—	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—
Otros Total ^C											
—	0.25	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25
Aluminio											
Al	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance

^AEl análisis se realizará ordinariamente sólo para los elementos mencionados en esta tabla. Sin embargo, si se sospecha la presencia de otros elementos o se indica en el curso del análisis de rutina, se realizará un análisis adicional para determinar que el total de estos otros elementos no excede los límites especificados. ^BCon respecto a las propiedades mecánicas, las aleaciones A380.0, 383.0 y 384.0 son sustancialmente intercambiables. ^CFor RoHS (Directiva de la Unión Europea sobre Restricción de Sustancias Peligrosas), la certificación del análisis químico es necesaria para asegurar que la categoría de "Otros Total" no exceda los siguientes límites de porcentaje en peso: 0.01% de cadmio, 0.4% de plomo y 0.1% de mercurio. El cromo hexavalente no existe en las aleaciones y por lo tanto cumple con el límite del 0.1%. ^DNo se requiere el registro para REACH (Directiva de la Unión Europea sobre Registro, Evaluación y Autorización de Productos Químicos) para inyección a presión, incluso si están recubiertos ya que se consideran artículos. Puede ser necesaria la notificación si algunas sustancias contenidas en la fundición por inyección a presión o el revestimiento exceden el 0.1% del peso total del artículo y se enlista como SVHC (sustancias altamente preocupantes). ^ENADCA permite 0.30% de magnesio como máximo en lugar de 0.10%. La A380 con magnesio 0.30% se ha registrado en la Asociación de Aluminio como E380 y la 383 con magnesio 0.30% como B383. *Otras dos aleaciones de aluminio, 361 y 369, están empleándose en aplicaciones limitadas donde la vibración y el desgaste son preocupantes. También hay otras aleaciones especiales tratables térmicamente disponibles para aplicaciones estructurales, como Silafonts y AA365, y alta ductilidad, aleaciones de alta resistencia tales como Mercalloy y K-Alloy. Contacte a su productor de aleación para obtener más información. Fuentes: ASTM B85 - 92a; Asociación de Aluminio.

Tabla 3 Propiedades mecánicas y físicas de aleaciones de aluminio para inyección a presión [idem].

Aleaciones de Aluminio para Inyección a Presión											
Comercial:	360	A360	380	A380 [Ⓔ] [Ⓕ]	383 [Ⓔ]	384	B390*	13	A13	43	218
ANSI/AA:	360.0	A360.0	380.0	A380.0	383.0	384.0	B390.0	413.0	A413.0	C443.0	518.0
Propiedades Mecánicas											
Resistencia a la tensión											
ksi	44	46	46	47	45	48	46	43	42	33	45
(MPa)	(303)	(317)	(320)	(324)	(310)	(331)	(317)	(296)	(290)	(228)	(310)
Esfuerzo de cedencia [Ⓐ]											
ksi	25	24	23	23	22	24	36	21	19	14	28
(Mpa)	(172)	(165)	(159)	(159)	(152)	(165)	(248)	(145)	(131)	(97)	(193)
% Elongación											
% en 2in.(51mm)	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5	<1	2.5	3.5	9.0	5.0
Dureza [Ⓑ]											
BHN	75	75	80	80	75	85	120	80	80	65	80
Resistencia al corte											
ksi	28	26	28	27	—	29	—	25	25	19	29
(MPa)	(193)	(179)	(193)	(186)	—	(200)	—	(172)	(172)	(131)	(200)
Resistencia al impacto											
ft-lb	—	—	3	—	3 [Ⓓ]	—	—	—	—	—	7
(J)	—	—	(4)	—	(4)	—	—	—	—	—	(9)
Resistencia a la fatiga [Ⓒ]											
ksi	20	18	20	20	21	20	20	19	19	17	20
(MPa)	(128)	(124)	(138)	(138)	(145)	(138)	(138)	(131)	(131)	(117)	(138)
Módulo de Young											
psix 10 ⁵	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	—	11.8	10.3	—	10.3	—
(GPa)	(71)	(71)	(71)	(71)	(71)	—	(81)	(71)	—	(71)	—
Propiedades físicas											
Densidad											
lb/in ³	0.095	0.095	0.099	0.098	0.099	0.102	0.098	0.096	0.096	0.097	0.093
(g/cm ³)	(2.63)	(2.63)	(2.74)	(2.71)	(2.74)	(2.82)	(2.71)	(2.66)	(2.66)	(2.69)	(2.57)
Rango de fusión											
°F	1035-1105	1035-1105	1000-1100	1000-1100	960-1080	960-1080	950-1200	1065-1080	1065-1080	1065-1170	995-1150
°C	(557-596)	(557-596)	(540-595)	(540-595)	(516-582)	(516-582)	(510-650)	(574-582)	(574-582)	(574-632)	(535-621)
Calor específico											
BTU/lb°F	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230	—	—	0.230	0.230	0.230	—
(J/kg°C)	(963)	(963)	(963)	(963)	(963)	—	—	(963)	(963)	(963)	—
Coefficiente de expansión térmica											
μin/in°Fx10 ⁻⁶	11.6	11.6	12.2	12.1	11.7	11.6	10.0	11.3	11.9	12.2	13.4
(μm/m°K)	(21.0)	(21.0)	(22.0)	(21.8)	(21.1)	(21.0)	(18.0)	(20.4)	(21.6)	(22.0)	(24.1)
Conductividad térmica											
BTU/ft hr°F	65.3	65.3	55.6	55.6	55.6	55.6	77.4	70.1	70.1	82.2	55.6
(W/m °K)	(113)	(113)	(96.2)	(96.2)	(96.2)	(96.2)	(134)	(121)	(121)	(142)	(96.2)
Conductividad eléctrica											
%IACS	30	29	27	23	23	22	27	31	31	37	24
Coefficiente de Poisson											
	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	—	—	—	—	0.33	—

[Ⓐ] 0.2% de compensación. [Ⓑ] 500Kg de carga, 10mm indentador. [Ⓒ] Curva rotatoria 5x10⁸ ciclos. [Ⓓ] Charpy con muesca, fuente: ASTM B85-92a; ASM; SAE. preocupantes). [Ⓔ] NADCA permite 0.30% de magnesio como máximo en lugar de 0.10%. La A380 con magnesio 0.30% se ha registrado en la Asociación de Aluminio como E380 y la 383 con magnesio 0.30% como B383. [Ⓕ] Una versión de 0.3%Mg de A380 y 383, registrada en la Asociación de Aluminio como E380 y B383. [Ⓖ] Los niveles altos de Mg y adición de Sr en la aleación A380 han demostrado resultados positivos. Los datos de las paginas 3-7 a 3-11, de esta misma referencia, muestran los resultados.

*Otras dos aleaciones de aluminio, 361 y 369, están empleándose en aplicaciones limitadas donde la vibración y el desgaste son preocupantes. También hay otras aleaciones especiales tratables térmicamente disponibles para aplicaciones estructurales, como Silafonts y AA365, y alta ductilidad, aleaciones de alta resistencia tales como Mercalloy y K-Alloy. Contacte a su productor de aleación para obtener más información. Se puede obtener más información en *Microstructures and Properties of Aluminum Die Casting Alloys Book*, NADCA Publicación #215 y en *High Integrity Aluminum Die Casting Book*, NADCA publicación #307.

1.3.1 Efecto de elementos aleantes ^{[6][8][9]}

Los elementos químicos con mayor presencia en las aleaciones de aluminio aplicadas a nivel industrial son: silicio, cobre y magnesio, sin embargo las propiedades de una aleación pueden modificarse de forma positiva o negativa variando aunque sea un elemento residual, por ello es importante conocer el efecto que cada uno aporta.

Silicio (Si): Principal elemento de las aleaciones de aluminio, debido al alto punto de fusión, 1414°C, favorece la fluidez de la aleación, siendo el más importante en relación a la colabilidad, cuanto más silicio contiene una aleación, menor es su coeficiente de dilatación térmica, mejorando la estabilidad dimensional, además de reducir la resistencia a la fractura en caliente. El silicio es una fase muy dura, por lo que contribuye significativamente a la resistencia al desgaste, mejora la tenacidad bajo tensión, además de disminuir la gravedad específica de la aleación, por estas razones se presenta en diversas aplicaciones automotrices. En aleaciones binarias Al-Si, el silicio mejora la resistencia a la corrosión, mantiene una buena conductividad térmica y eléctrica. La mayoría de las aleaciones de colada a presión contienen de 8 a 12% de Si.

Cobre (Cu): Este elemento tiene el mayor impacto sobre la resistencia y dureza de las aleaciones de aluminio, con o sin tratamiento térmico, pero durante la solidificación reduce el porcentaje de contracción en caliente, además disminuye la ductilidad, resistencia a la corrosión y fluidez. Puede ser efectivo si se desea reducir la contracción interna y mejorar la maquinabilidad al endurecer la matriz. Las composiciones con 4 a 6% de Cu responden fuertemente al tratamiento térmico. Generalmente las aleaciones Al-Cu, hasta 10% eran populares en los primeros años de la industria del aluminio, actualmente la mayoría han sido remplazadas por aleaciones Al-Si y Al-Si-Cu.

Magnesio (Mg): El principal objetivo del magnesio es conferir resistencia y dureza, por medio de la fase de endurecimiento Mg_2Si , proporciona además la

base para el tratamiento térmico para la familia de aleaciones, altamente empleada, 356. La solubilidad límite para un efecto benéfico del elemento es aproximadamente 0.7% de Mg (después de esto no se incrementan las propiedades y puede tener lugar el ablandamiento de la matriz). En aleaciones de Al-Si con elevado contenido de Mg se reduce la resistencia a la corrosión y aumenta ligeramente la cantidad requerida de Mn para vencer el efecto de soldadura.

Níquel (Ni): Mejora la resistencia a temperaturas elevadas y mejora la dureza en aleaciones de la familia 2XX y 3XX, aunque en esta última el efecto es menor debido al contenido de silicio.

Estaño (Sn): En la familia 8XX, tiene el propósito de reducir la fricción, lo cual se genera gracias al bajo punto de fusión de la fase que forma el estaño, 227.7°C. Estas aleaciones generalmente no se emplean en el proceso de inyección a presión, las podemos encontrar en cojinetes y casquillos.

Manganeso (Mn): En cantidades pequeñas incrementa la resistencia y la ductilidad, ayuda a minimizar el efecto de adherencia al molde y corrige la morfología en agua de compuestos de Fe a placas o símbolos chinos. La solubilidad del Mn en Aluminio a 600°C es 0.80%, sin embargo disminuye dramáticamente con pequeñas adiciones de hierro, por ejemplo, a 0.25% de Fe la solubilidad del Mn disminuye hasta 0.5%, lo que indica que por encima de 0.5% precipita como $Al_{12}Mn_3Si_2$ y disminuye las propiedades de impacto a altas velocidades de deformación. También el Mn disminuye la conductividad térmica de Al más que cualquier otro elemento de aleación comercial. En general mejora la resistencia a la corrosión y en presencia de Cr propicia la formación de lodos.

Cromo (Cr): Mejora la resistencia a la corrosión, empleado en aleaciones sometidas a tratamiento térmico como el envejecimiento. Ayuda a combatir el efecto de soldadura, pero a costa de aumentar significativamente el problema de la formación de lodos debido a la formación de $CrAl_7$ de limitada solubilidad.

Estroncio (Sr), Sodio (Na), Calcio (Ca) y Antimonio (Sb): En muy bajas cantidades, al añadir individualmente cualquiera de estos elementos y no en combinación, modifica la morfología del silicio eutéctico. Sin un tratamiento modificador, el silicio eutéctico solidifica en plaquetas finas concentradoras de esfuerzos, restando resistencia y ductilidad. El estroncio se ha convertido en el modificador preferencial, debido a que su función no decae tan fácilmente, puede extenderse por horas e incluso al re fundir la aleación.

Hierro (Fe): Principalmente ayuda a reducir la adherencia al molde o efecto de soldadura, por lo que en inyección a presión no se considera impureza, como en la mayoría de las aleaciones para fundición en arena. En contenidos menores al 0.25% mejora la resistencia a la tensión, la dureza y reduce la tendencia a la fractura en caliente, en mayores cantidades afecta negativamente las propiedades mecánicas, en particular la elongación. Se combina con Al, Si y en ciertas condiciones con Cr, Mn y Cu formando fases complejas, generalmente en forma de agujas, las cuales son alteradas benéficamente por la presencia de Mn, a geometrías menos dañinas. En inyección a presión de cámara fría se permite hasta 1.4% e incluso 2% para algunas aleaciones, esto debido a las altas velocidades de inyección y enfriamiento.

Zinc (Zn): Principal elemento de la serie 7XX, sin embargo actualmente no son aleaciones adecuadas para la inyección a presión, por lo que se considera en el resto de las aleaciones como una impureza aceptable, principalmente en las aleaciones secundarias, provenientes de chatarra. Excluyendo la familia 7XX, el zinc es un elemento neutral, no favorece ni desfavorece las propiedades mecánicas, aunque si puede modificar el peso de la aleación, debido a su mayor densidad.

1.4 Desgasificación de Aluminio

En procesos como la colada a presión, es de vital importancia conocer los fenómenos que afectan la calidad del aluminio líquido que será suministrado a las máquinas de inyección con el fin de controlarlos y evitar el menor número de defectos posibles en la pieza final.

1.4.1 Solubilidad de Hidrógeno en Aluminio líquido

La porosidad es una característica indeseable en la fundición. Se degradan propiedades importantes de la pieza de aluminio fundido, tales como, mecanizado, aspecto superficial y cierta pérdida de hermeticidad por parte de los moldes empleados para la fabricación de estas piezas.

El hidrógeno es el único gas soluble en aluminio fundido, este se absorbe en el baño líquido durante la fusión, siendo las principales fuentes:

- La humedad proveniente del medio ambiente.
- Carga: retornos, chatarra y material de reciclaje.
- Herramientales.
- Productos de combustión.
- Flujos de gas y metal (carga y descarga del horno).
- Turbulencia en el vaciado de metal.
- Consumibles como fundentes.

Cuando el aluminio entra en contacto con las moléculas de agua se oxida formando alúmina y liberando moléculas atómicas de hidrógeno, según la reacción:



Una de las principales variables que afecta la solubilidad de hidrógeno en el aluminio fundido, es la temperatura, conforme esta aumenta la solubilidad

también lo hace. Los elementos aleantes representan una alteración en dicha variable, por ejemplo, a una temperatura dada, la aleación 319 presenta menor solubilidad de gas que la aleación 356, aunque las dos reducen los valores de solubilidad respecto al aluminio puro, **Figura 3**. Elementos aleantes como Si, Zn, Cu y Mn también disminuyen la solubilidad de hidrógeno, mientras que el Mg, Ca, Ti, Ni y Li la promueven.

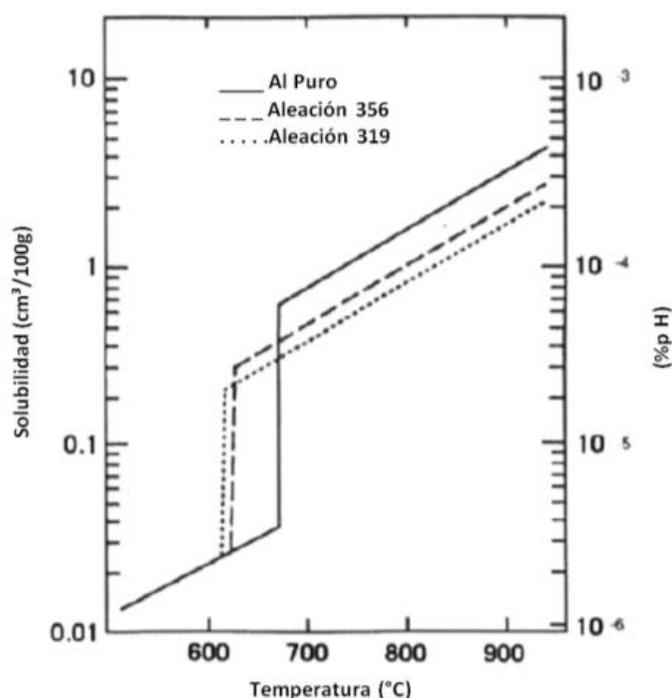


Figura 3. Solubilidad de hidrógeno en aluminio puro y aleaciones de aluminio respecto a la temperatura [10].

Cuando el aluminio solidifica, la solubilidad de hidrógeno disminuye, como consecuencia el gas es rechazado por el metal sólido. La velocidad de solidificación representa una variable importante, ya que si esta es rápida, es decir, toda la pieza solidifica a una misma velocidad, el gas será atrapado en la solución sólida presentando poca porosidad en el producto final, en cambio si la pieza no solidifica a la misma velocidad, el metal líquido acumulará el hidrógeno rechazado por el metal sólido, aumentando la presión parcial del gas, si dicha

presión aumenta hasta provocar la asociación de moléculas atómicas de hidrógeno se formaran poros en la pieza, también llamadas sopladuras.

1.4.2 Proceso de desgasificación

El proceso de desgasificación consiste en el flujo ascendente y continuo de gas inerte, actualmente se emplea nitrógeno o argón dentro del metal fundido para la eliminación de gases contaminantes y partículas indeseables adquiridas durante el proceso de fusión del metal.

Al introducir el gas inerte en el metal líquido, las burbujas generadas, arrastran impurezas a la superficie del baño metálico, este fenómeno se origina por la diferencia de concentración de dichas especies, promoviendo el transporte másico desde el seno de la aleación de aluminio hasta la superficie de las burbujas de gas inerte.

Las etapas de transporte involucradas en la técnica de remoción de impurezas se pueden resumir en la siguiente lista ^[11]:

1. Transporte convectivo.- De los átomos de hidrógeno, disueltos en aluminio líquido, hacia la interfase metal líquido/superficie de la burbuja de gas de remoción.
2. Transporte difusivo.- De los átomos de hidrógeno a través de la capa límite entre el metal líquido/burbuja de gas.
3. Adsorción química.- De los átomos de hidrógeno en la superficie de la burbuja de gas.
4. Reacción de combinación.- Entre los átomos de hidrógeno, para formar hidrógeno molecular ($H + H \rightarrow H_2$), dentro de la burbuja de gas.
5. Transporte difusivo.- Del hidrógeno molecular hacia el seno de la burbuja.

6. Remoción del hidrógeno desde el baño metálico hacia la atmósfera.

La etapa más lenta será la que controle la cinética de desgasificación, por lo tanto, determinará el costo y la productividad del proceso.

1.4.3 Métodos de desgasificación

Existen diversas técnicas para reducir e incluso casi eliminar el hidrógeno de las aleaciones de aluminio, la elección de la misma se realiza básicamente dependiendo del nivel de desgasificación que se desea obtener, así como de la inversión realizada.

Desgasificación natural. Es favorecido por el descenso de temperatura, en el baño líquido y atmósferas libres de humedad. Su aplicación es limitada ya que para ser efectivo se requiere de algunas horas, el descenso de temperatura también puede no ser compatible con la temperatura de trabajo requerida.

Desgasificación al vacío. El principio básico de este proceso es eliminar la presión atmosférica sobre el baño líquido empleando un sistema de vacío **Figura 4**, este promueve la salida de hidrógeno del metal líquido y por medio de un sistema de bombeo se retiran las burbujas de gas. Para obtener un proceso más eficiente se introducen flujos de gas inerte con el fin de agitar el metal y facilitar la remoción de hidrógeno.

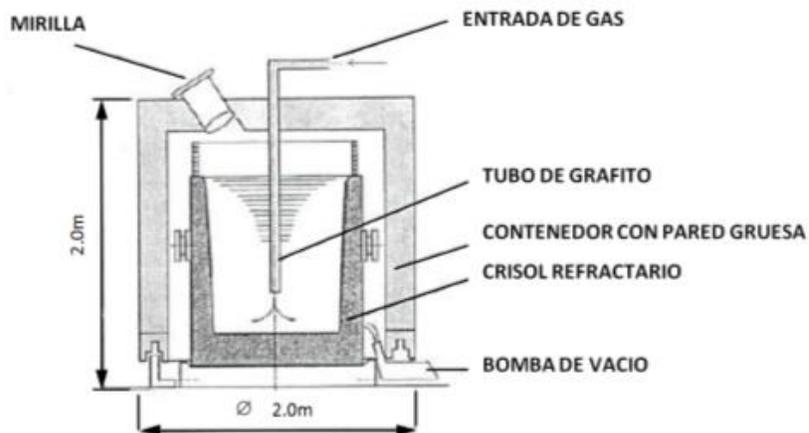


Figura 4. Equipo para desgasificación al vacío.

Desgasificación por fundentes. Se realiza con compuestos de cloro y flúor que contienen sales para desgasificar, por ejemplo las pastillas de hexacloroetano, es un proceso rápido y fácil de aplicar, sin embargo se requiere de varias pruebas para alcanzar niveles de desgasificación altos, se recomienda para aplicaciones que requieran desgasificación moderada. El fundente se introduce al baño líquido en forma de tabletas o granulados, en donde se descompone por acción de la temperatura. Es importante almacenar los fundentes en una atmósfera libre de humedad para no introducir más hidrógeno y evitar proyecciones de metal líquido durante el proceso. Es importante mencionar que compuestos como el cloro han dejado de ser empleados debido a los gases contaminantes que liberan, afectando las áreas de trabajo, personal operativo y medio ambiente.

Lanza de grafito. La desgasificación se realiza por medio de una lanza de grafito u otros materiales de menor costo como el acero, donde se introduce gas inerte o activo al baño líquido. Este método es de baja eficiencia, ya que el tamaño de las burbujas generadas, no es controlable, siendo estas de gran tamaño, contando con una relación superficie-volumen baja, la salida a la superficie es rápida, impidiendo captar grandes cantidades de hidrógeno,

además solo una parte del aluminio se expone al tratamiento, ya que las burbujas se concentran sólo cerca de la lanza, por lo que se recomienda agitarla con la precaución de no generar turbulencias y proyecciones de material fundido o en su defecto emplear varias lanzas para disminuir dichos problemas.

Rotor-Inyector. La desgasificación se realiza con gas inerte, generalmente argón o nitrógeno, el cual se introduce a través de un eje de rotación y es liberado por una propela o rotor, **Figura 5**, el movimiento de dichos componentes promueve la formación y distribución homogénea de burbujas pequeñas de gas con alta relación superficie-volumen, aumentando la eficiencia de remoción de hidrógeno, con lo que también se reduce el tiempo de tratamiento. Este proceso se utiliza cuando se requiere un producto de alta calidad, libre de porosidad, con estricta conservación de propiedades mecánicas y composición química de la aleación.

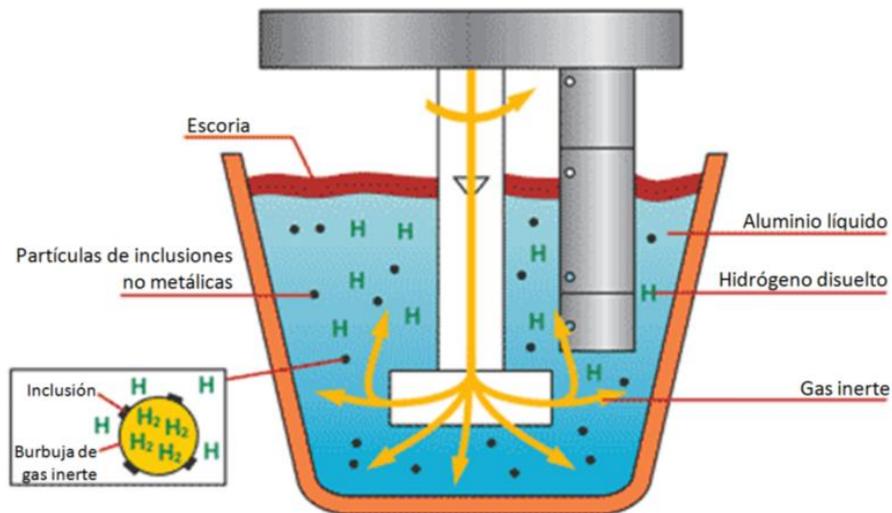


Figura 5. Detalle de la desgasificación de aluminio líquido por medio del rotor-inyector.

La eliminación eficiente de hidrógeno depende de diversas variables ^[11], **Figura 5:**

- Concentración inicial de hidrogeno. Mientras más alta sea, la fuerza motriz para el transporte másico será mayor, si la concentración es muy baja, la etapa controlante será el control químico, removiendo hidrogeno lentamente.
- Tamaño de burbuja de gas inerte. Cuando el gas inerte forma pequeñas burbujas, el área de contacto entre estas y el baño de metal líquido es alta, en consecuencia se obtiene mayor área para transportar el hidrógeno fuera de la aleación.
- Velocidad de rotación. Se controla con el fin de permitir la agitación homogénea y evitar la formación de un vórtice pronunciado, el cual puede introducir escoria al seno de la aleación.
- Flujo de gas inerte. Se requiere de flujo de gas suficiente para evitar la saturación de hidrogeno en las burbujas, mientras llegan a la superficie, pero sin exceder su uso ya que representa gastos de operación.
- Cantidad de metal tratado. Repercute en la homogenización de burbujas dentro del baño líquido, a mayor cantidad de metal, mayor flujo de gas requerido.
- Profundidad de inmersión de la propela o rotor. Afecta el tiempo de ascenso de las burbujas de gas a la superficie del baño, mientras mayor sea el tiempo de ascenso, las burbujas captan y eliminan más hidrogeno hasta su saturación. También se verá afectada la homogeneidad del proceso, debido a la ubicación de generación de burbujas, las cuales deben migrar a toda la aleación.

- Diseño del rotor. Determina la forma en la que se dispersan las burbujas de gas en el metal líquido, muchas veces esta variable está limitada por factores económicos y de disponibilidad.
- Tiempo de tratamiento. Es un factor crítico, ya que su alteración puede significar la modificación de otras variables como, flujo de gas, velocidad de rotación, cantidad de metal, etc.

1.4.4 Evaluación de porosidad en Aluminio

El nivel de hidrógeno contenido en el aluminio puede ser medido cuantitativamente, de forma experimental a nivel laboratorio e industrial, obteniendo mediciones de moderada a alta precisión. A nivel laboratorio y planta se emplean técnicas como, prueba de presión reducida (RPT) y análisis metalográfico; a nivel industrial se cuenta con equipos como ALSPEK H® de FOSECO, que ofrece mediciones más precisas que los métodos a nivel laboratorio. A continuación se ofrece una breve explicación de cada técnica mencionada.

Prueba de presión reducida

La prueba de presión reducida (RPT), a veces referida como prueba de solidificación a vacío (VST) o prueba de Straube - Pfeiffer, es una herramienta básica de fundición que permite al operador evaluar cualitativamente la limpieza de aluminio fundido.

El principio fundamental de esta técnica se basa en la formación de porosidad debido al gas atrapado por el metal, cuando el aluminio líquido se enfría a presión reducida, generalmente entre 26 y 28 plgHg ^[12], el tamaño de la porosidad formada se amplifica, resultando en una muestra visiblemente porosa tal como se muestra en la **Figura 6**.

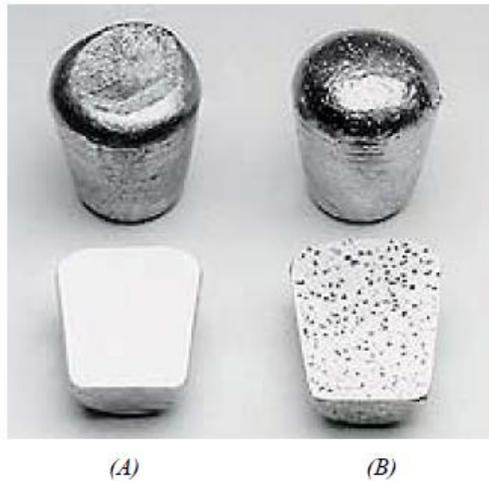


Figura 6. Muestras solidificadas (A) bajo presión atmosférica y (B) bajo presión reducida.

La evaluación cualitativa del contenido de hidrógeno en el aluminio líquido se puede realizar mediante un examen visual de la muestra solidificada a presión reducida, una superficie superior hinchada o convexa, corresponde al alto contenido de gas, mientras que una superficie lisa o cóncava, representa un nivel bajo de hidrógeno. En ocasiones, las muestras se seccionaron y pulen con el fin de observar mejor el perfil de porosidad a través de patrones gráficos estándar e incluso algunos medios sofisticados, tales como analizadores de imagen.

Otra forma de evaluar estas muestras es determinando la densidad, en donde a mayor densidad, el aluminio contiene menor cantidad de hidrógeno por lo tanto menos porosidad, incluso se puede determinar un índice de densidad (**DI**), al solidificar dos muestras, una a presión reducida y otra a presión atmosférica, posteriormente se sigue la relación [idem]:

$$DI = \frac{\sigma A - \sigma B}{\sigma A} \times 100$$

Donde:

DI = Índice de densidad.

σ_A = Densidad de la muestra solidificada bajo presión atmosférica.

σ_B = Densidad de la muestra solidificada bajo presión reducida.

La popularidad de la prueba de presión reducida se debe a su simplicidad. A través de los años, se ha demostrado que ser rápida, barata y eficaz. Los operadores requieren poco entrenamiento y la prueba se realiza rápidamente. Sin embargo, una desventaja importante es que la prueba no es cuantitativa y es insensible a los contenidos muy bajos de hidrógeno obtenido. Además, los resultados son influenciados por otros factores tales como inclusiones presentes en las masas fundidas, la misma presión reducida y velocidad de solidificación, **Figura 7**.

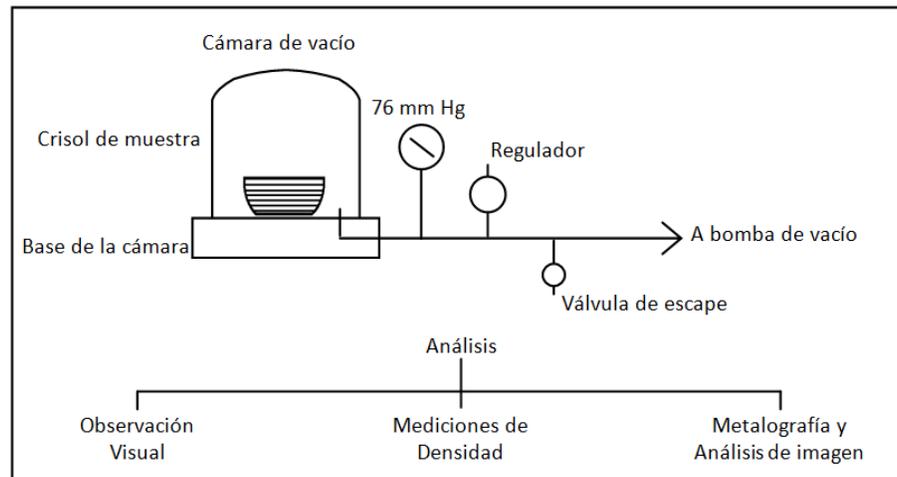


Figura 7. Aparato para prueba de presión reducida y diversas formas para el análisis de estas muestras.

Para complementar el análisis de esta prueba y ofrecer un dato cuantitativo, se puede recurrir a la medición de densidad de la muestra sometida a vacío, con procedimientos simples basados en el principio de Arquímedes, el cuál postula “Todo cuerpo sumergido dentro de un fluido experimenta una fuerza

ascendente llamada empuje, equivalente al peso del fluido desalojado por el cuerpo”.

El concepto de empuje ayuda a determinar la densidad de un cuerpo sólido (ρ). Para ello se determina primero el peso real (P_r) del cuerpo, empleando una balanza. Después, se sumerge el objeto en un líquido de densidad conocida (ρ_{liq}), por ejemplo, agua y se determina el peso aparente del objeto (P_a), la cual será menor que la anterior. De acuerdo al principio de Arquímedes, esta diferencia se debe al empuje del agua, por lo tanto la diferencia entre ellas es igual a la masa del agua desalojada por el cuerpo. La densidad del cuerpo queda expresada por la siguiente ecuación, **Figura 8**:

$$\rho = \frac{P_r}{(P_r - P_a)} \rho_{liq}$$

Donde:

ρ = Densidad del cuerpo solido.

ρ_{liq} = Densidad del líquido.

P_r = Peso real del cuerpo sólido.

P_a = Peso aparente del cuerpo sólido.

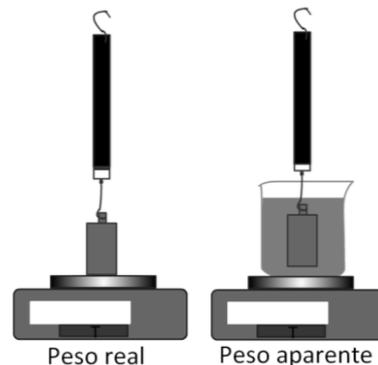


Figura 8. Ecuación de densidad para un cuerpo sólido, obtenida a partir del principio de Arquímedes.

ALSPEK H ^[13]

ALSPEK H, **Figura 9**, es un analizador de hidrógeno, desarrollado por FOSECO, permite al fundidor controlar el contenido de hidrógeno antes, durante y después del proceso de desgasificación. Sus principales características son:

- Corto tiempo de respuesta

- Valores fiables
- Resultados reproducibles
- Larga vida en el entorno de la fundición
- Fácil funcionamiento

La facilidad de uso de ALSPEK H significa que las mediciones puntuales, rápidas y precisas de las concentraciones de hidrógeno se puede realizar en cucharas y hornos, además el dispositivo puede quedar sumergido en una ubicación para proporcionar una medición continua en tiempo real de los niveles de hidrógeno, por ejemplo durante un tratamiento de desgasificación. Todos los valores medidos se registran automáticamente y se puede descargar, proporcionando datos importantes para el control de calidad y certificación.

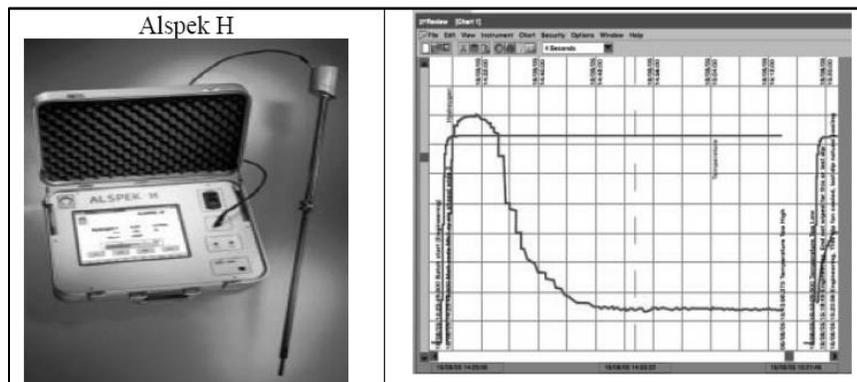


Figura 9. Alspek H, desarrollado para evaluar el contenido de hidrógeno en aluminio fundido.

1.5 Formación de lodos ^{[14][15]}

Generalmente en una fundición de aluminio se encuentran compuestos pesados, en el fondo del crisol o en el piso del horno fusor y principalmente en los hornos de mantenimiento o retención, reduciendo la capacidad efectiva de los mismos, estos compuestos se catalogan como lodos, se trata de compuestos intermetálicos de alta densidad, razón por la cual se depositan en

el fondo de las unidades. El lodo se compone de óxidos, tales como alúmina (Al_2O_3) y magnesia (MgO), además de cristales primarios que contienen Al, Si, Fe, Mn, Mg y Cr y se forman por la acción del tiempo, temperatura y composición química de la aleación.

En cuanto a composición química se refiere, el principal promotor de la formación de lodos es el hierro, en las aleaciones empleadas en inyección a presión contienen niveles más altos de este elemento, respecto a otras aleaciones de fundición, valores entre 0.9 y 1.5 por ciento, donde la saturación de hierro en aluminio suele alcanzarse a la temperatura de colada, la adición de este elemento se realiza con el fin de eliminar o aliviar efectos de adherencia entre los moldes o dados de la máquina inyectora y el metal líquido.

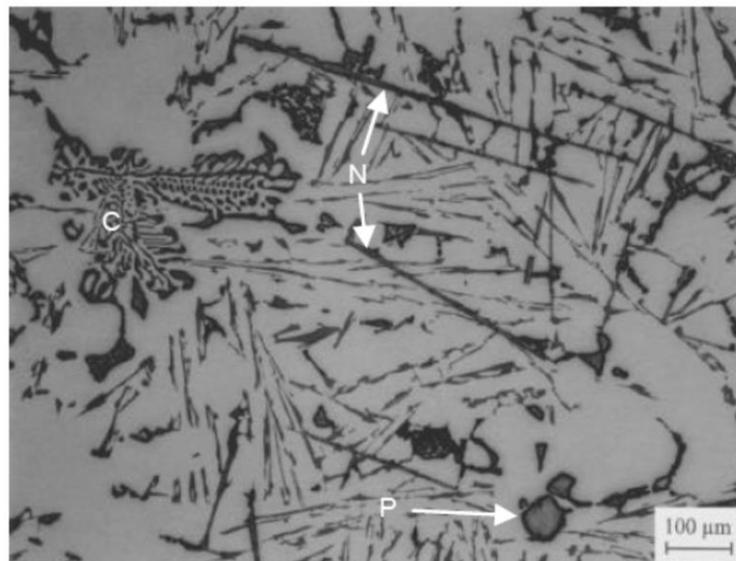


Figura 10. Microestructura de aleación A380, fusión a 720°C por tres horas. C-Escritura china, N-Aguja o placas, P-poliédrico [idem].

El hierro es la impureza más dañina en piezas de aleación de aluminio ya que su estructura laminar actúa como concentrador de esfuerzos, para minimizar su efecto se añaden elementos como manganeso o cromo, de forma controlada,

ellos modifican dichas geometrías a otras menos dañinas, sin embargo también pueden formar complejos en forma de escritura china, $Al_{15}MnSi_2$, además estructuras poligonales, compuestos de hierro, como $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$, que también precipitan en los lodos mencionados, **Figura 10**. Los intermetálicos poseen puntos de fusión y pesos específicos elevados, por lo que, actúan como nucleantes para otros complejos además de acumularse en el fondo del horno y reducir la capacidad efectiva del mismo.

La disminución en aluminio fundido de elementos aleantes, por precipitación de intermetálicos, aumenta la tendencia a la soldadura y los mismos compuestos pueden generar capas en la superficie del dado, contribuyendo al fenómeno de adherencia. Cuando los lodos son arrastrados a la inyección de piezas, obstruyen el flujo de aleación, propician porosidad y forman inclusiones que dificultan el mecanizado y degradan las propiedades mecánicas del componente fabricado.

Factor de lodos

La formación de lodos no sólo muestra dependencia de la composición química de la aleación también depende de condiciones de fusión, temperatura, velocidad de enfriamiento, tiempo de mantenimiento, entre otras.

Shabestari y colaboradores encontraron que los lodos se forman hasta descender a cierta temperatura, además de tener en cuenta el contenido de hierro, así expusieron una relación para describir la dependencia de la temperatura en la formación de lodos en función del contenido de hierro en la aleación de aluminio,

$$\text{Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = 645.7 + 34.2(\%p\text{Fe})^2$$

Jorstad y Gobrecht emplearon curvas para demostrar la dependencia de la temperatura y definen un factor de lodos (SF por su nombre en inglés, Sludge

Factor) para aleaciones Al-Si-Cu. Este factor es calculado a partir de contenidos en porcentaje peso de Fe, Mn y Cr en la aleación, tal como sigue:

$$\text{Factor de lodos (SF)} = \%p\text{Fe} + 2(\%p\text{Mn}) + 3(\%p\text{Cr})$$

Estos mismos autores utilizaron curvas para mostrar la dependencia del SF respecto a la temperatura y delimitar áreas propensas de formación de lodos en las aleaciones Al-Si-Cu. Las curvas generadas se muestran en la **Figura 11**.

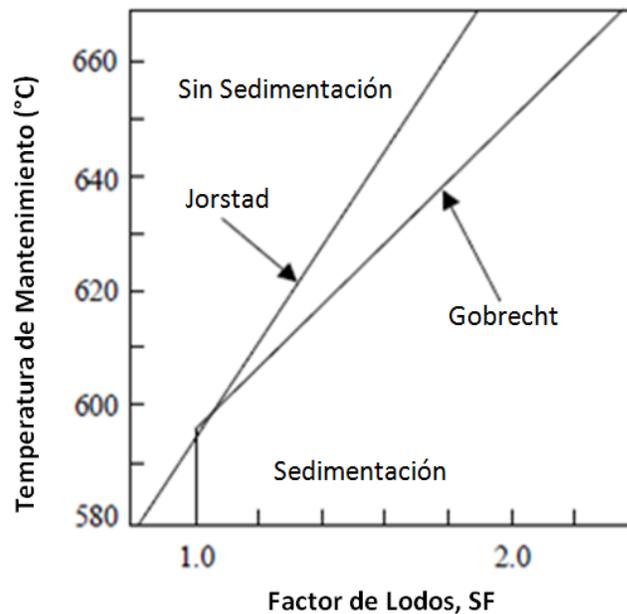


Figura 11. Factor de lodos contra temperatura de mantenimiento y temperatura recomendada de trabajo [15].

Aunque las curvas de Jorstad y Gobrecht son las más aceptadas y empleadas en la actualidad, es importante mencionar que se han desarrollado otros trabajos con el propósito de pronosticar el fenómeno de precipitación de lodos, una de las gráficas se muestra en la **Figura 12** [idem].

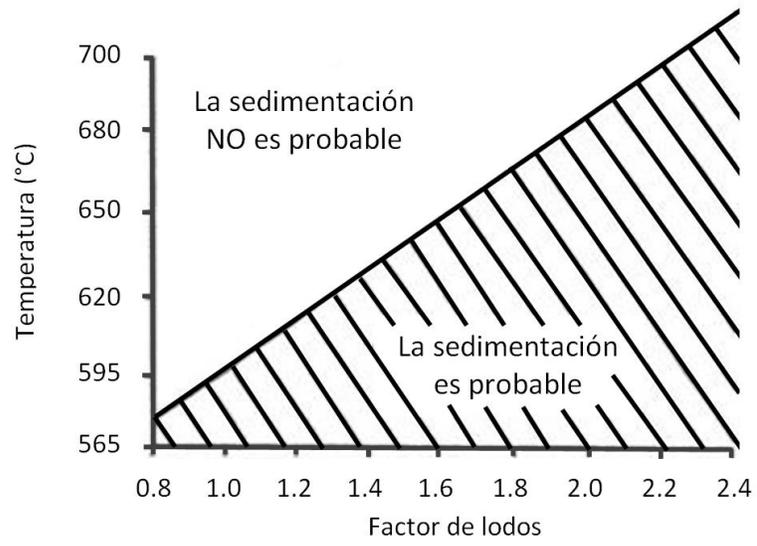


Figura 12. Factor de lodos contra temperatura de mantenimiento.

Capítulo 2. Procedimiento experimental

Se realizan tres etapas experimentales para cumplir el objetivo del presente trabajo, las cuales se describen a continuación.

2.1 Etapa 1. Caracterización del proceso de fusión y manejo de aluminio líquido.

Consiste en:

1. Identificar la composición química de la aleación de trabajo, a partir de especificaciones de lingotes.
2. Realizar la curva de enfriamiento para el aluminio empleado en el proceso de colada a presión.
3. Medir las principales variables del proceso de fusión, tratamiento, transporte y mantenimiento de aluminio.

2.2 Etapa 2. Estudio para determinar la regasificación en aleaciones base aluminio en hornos de retención.

Consiste en:

1. Identificar, en base a temperatura, tiempo de mantenimiento y características del horno de retención, los hornos con mayor probabilidad de regasificación y formación de lodos.
2. Obtener en los hornos de retención seleccionados, muestras para el ensayo de presión reducida, registrar tiempo de retención y temperatura del metal líquido. Para evaluar la posible regasificación, realizar el muestreo en los siguientes puntos.

- a. *Muestra T_0* . Cuando el metal en retención se encuentre en su nivel de horno, más bajo posible.
 - b. En la olla de tratamiento, antes y después de la desgasificación con lanza del aluminio líquido (muestra de referencia para evaluar la densidad del metal desgasificado y alimentado al horno de retención).
 - c. *Muestra T_1* . En el horno de retención, después de vaciar el metal desgasificado.
 - d. *Muestra T_2, T_3, \dots, T_n* . A partir del punto anterior tomar muestras aproximadamente cada media hora, hasta regresar al punto "a".
 - e. Repetir el muestreo al menos durante tres ciclos de vacío y llenado.
3. Generar gráficos de porosidad y densidad contra diferentes tiempos de mantenimiento.
 4. Explicar la relación entre tiempo de permanencia y temperatura del aluminio líquido respecto a la regasificación.
 5. Repetir desde el punto 1, reemplazando la desgasificación con lanza por desgasificación con rotor y explicar si existe algún cambio con respecto a la prueba anterior.

2.3 Etapa 3. Estudio para determinar la formación de lodos en hornos de retención.

Consiste en:

1. Obtener muestras del fondo de los hornos de retención seleccionados en el punto 2.2. Evaluar su composición química y realizar metalografía.
2. Caracterizar la morfología del lodo formado y relacionar con el tipo de intermetálico correspondiente.

3. Evaluar composición química y metalografía de panques, antes y después del llenado del horno, correspondientes al punto 2.2.
4. Obtener mínimo tres piezas procesadas por colada a presión, aplicar selección aleatoria a lo largo de una semana y evaluar composición química.
5. Explicar la relación entre tiempo de permanencia y temperatura del aluminio líquido con respecto a la formación de lodos.

Capítulo 3. Resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a partir de las tres etapas del procedimiento experimental.

3.1 Etapa 1

Se presentan las características del proceso llevado a cabo en Burner Systems International Inc.

3.1.1 Composición química

La **Tabla 4**, muestra la especificación de la aleación A380, empleada en la planta de BSI para el proceso de colada a presión, además de la composición química promedio obtenida a partir de especificaciones aprobadas por el departamento de calidad en un periodo de tres meses. En dichos análisis químicos, no se encuentra especificado el porcentaje de Cr, el cual es uno de los elementos promotores de formación de lodos, por lo que no se puede calcular el Factor de lodos. Es necesario solicitar la proveedor incluir el análisis de Cr para fines de control.

Tabla 4. Composición química promedio de la aleación A380 en BSI.

Elemento	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ni	%Otros
A380*	7.5-9.5	<1.2	2.0-4.0	0.5 max	0.5 max	3.0 max	0.5 max	0.5
\bar{x}	8.37	0.83	3.30	0.21	0.28	1.50	0.08	0.18
$\pm\sigma$	0.49	0.17	0.14	0.02	0.08	0.37	0.02	0.05

*Especificación requerida por la empresa BSI.

3.1.2 Curva de enfriamiento

La **Figura 13** muestra la curva de enfriamiento experimental de la aleación A380, la temperatura de liquidus es de 582°C, el propósito de este dato es determinar el grado de sobrecalentamiento de liquidus, al cual se debe trabajar el metal para impedir su solidificación en cada una de las etapas del proceso de fundición de BSI.

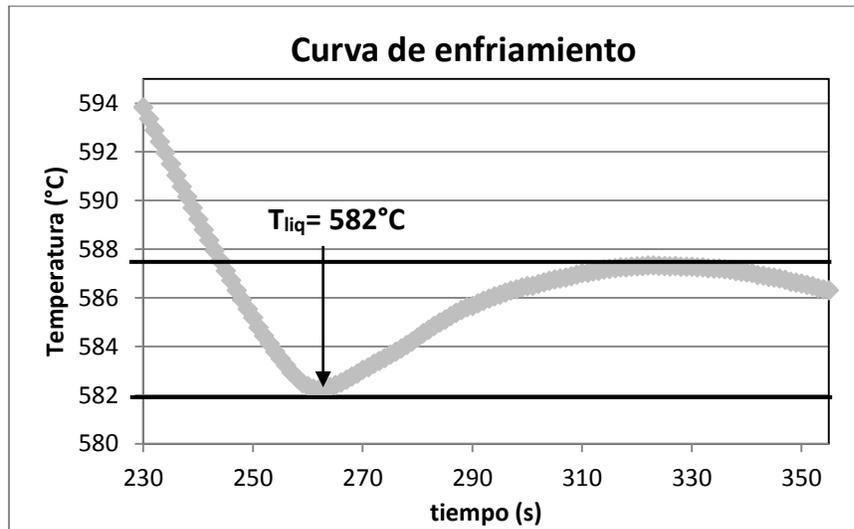


Figura 13. Curva de enfriamiento experimental para la aleación A380.

3.1.3 Caracterización de condiciones de trabajo para Aluminio líquido

En la **Tabla 5**, se muestran las etapas que sigue el aluminio dentro de la planta, desde la fusión en el horno de reverbero hasta el mantenimiento en los hornos de retención, así como características. Se incluye la desgasificación con rotor, dicho proceso se encuentra en proceso de validación, por lo que se decidió emplear las condiciones que señala el procedimiento de desgasificación con lanza, flujo de nitrógeno de 10L/min durante 5min., aunque en la práctica los operadores emplean 20L/min en un tiempo de 5 a 7 minutos.

La **Figura 14** es complemento de la **Tabla 1**, expresa el abatimiento de temperatura en cada una de las etapas de manejo del aluminio. El proceso de

desgasificación es la etapa con mayor pérdida de temperatura debido a la duración del tratamiento y turbulencia del aluminio.

Tabla 5. Características de las etapas del proceso de fundición en BSI.

Etapas	Equipo empleado	Características del proceso
Fusión de aleación A380	Horno de reverbero (2ton Al).	Fusión continua de Lunes a Viernes, temperatura de trabajo 750-780°C
Tratamiento al metal líquido (Desgasificación)	Olla de tratamiento (500kg Al) y desgasificación con lanza	Flujo de nitrógeno grado industrial, 20L/min, 5 a 7 minutos, a pie de horno. Temperatura de tratamiento 680-750°C.
	Olla de tratamiento (500kg Al) y desgasificación con rotor.	Transporte a unidad de desgasificación, flujo de nitrógeno grado industrial de 10L/min, 5 min. a 390 rpm (velocidad máxima de equipo). Temperatura de tratamiento 660-750°C.
Escoriado del metal líquido	Fundente Coveral ®75	1.2-1.6 kg/m ² de área por cubrir.
Traslado	Olla de tratamiento (500kg Al) mediante montacargas.	3 a 6 minutos, temperatura de aluminio 640-660°C
Mantenimiento	Horno de crisol (300kg Al)	Temperatura de mantenimiento 620-640°C
	Horno de caja (800kg Al).	Temperatura de mantenimiento 620-640°C

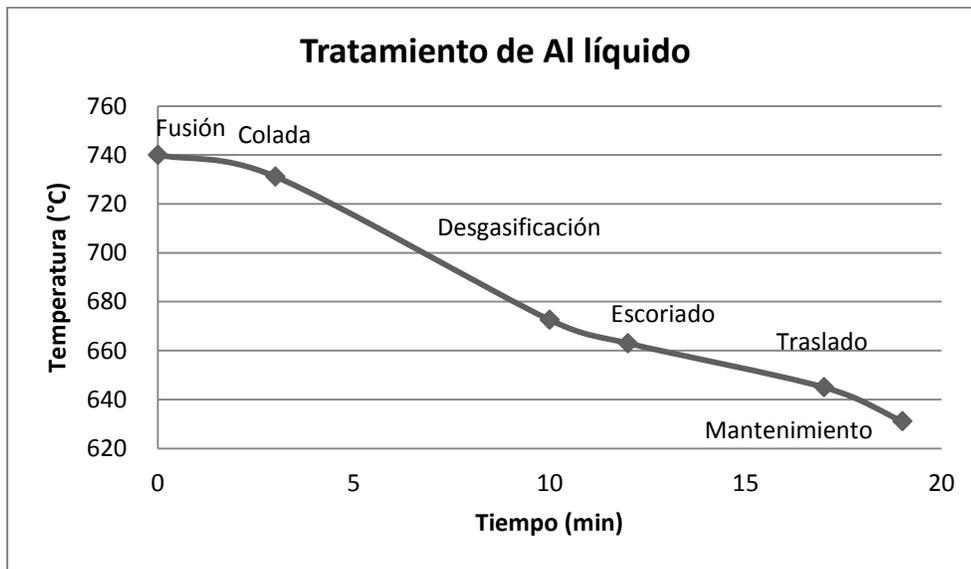


Figura 14. Abatimiento de temperatura y tiempo promedio de las etapas que conllevan el tratamiento y manejo del aluminio líquido.

3.2 Etapa 2

Se presentan los resultados y discusión referentes a la regasificación dependiente del tiempo de retención en hornos de aluminio líquido.

3.2.1 Caracterización de hornos de retención

Para determinar las características del muestreo a los hornos de retención, se cuantifico el tiempo transcurrido entre una alimentación de aluminio y otra, obteniendo los resultados de la **Tabla 6**.

Tabla 6. Duración de un ciclo de alimentación en Hornos de retención.

Tiempo (min)	0	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135
Horno de crisol														
H4														
H5														
Horno de caja														
H7														
H8														

Las principales diferencias en el tiempo de alimentación de los hornos de retención se encontraron en el tipo de pieza fabricada, independientemente del tipo de horno, BSI cuenta con diversos productos en fabricación, tan sólo en la línea de quemadores, produce distintos tamaños, **Figura 15**, lo que implica mayor o menos consumo de aluminio en cada inyección.



Figura 15. Quemadores Evo II [1].

Por otra parte también se realizaron tres muestreos para determinar la variación de densidad entre un tipo de horno a otro, la **Figura 16** representa el comportamiento obtenido, la mayor variación de densidad se obtiene en el horno de crisol, donde el contacto del aluminio con la atmósfera es mayor ya que no cuenta con tapa a diferencia del horno de caja.

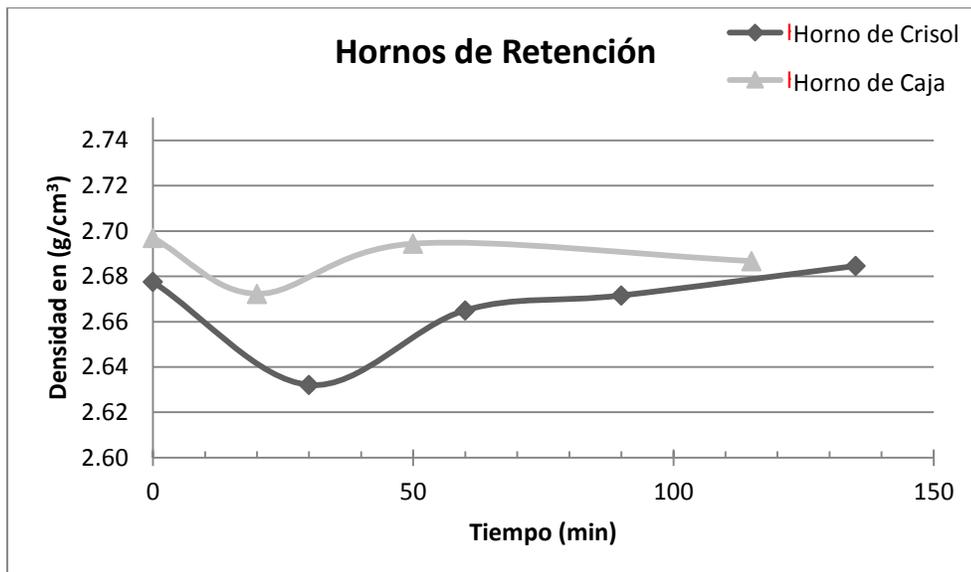


Figura 16. Densidad contra tiempo para dos tipos de hornos de retención, con crisol y sin crisol.

De acuerdo a la información anterior, el muestreo de las siguientes pruebas, se realizó de acuerdo a los siguientes parámetros:

1. Selección del horno con mayor tiempo de retención de aluminio. Horno con producción de la pieza más pequeña.
2. Muestreo en horno con mayor exposición del aluminio a la atmósfera. Horno de crisol.
3. Establecer los tiempos de muestreo de acuerdo al proceso de producción. Antes y después de alimentar aluminio líquido y en tiempos intermedios.

3.2.2 Evaluación de regasificación en hornos de retención

En esta sección se muestran las curvas de seguimiento, tiempo de retención contra densidad de aluminio (eje primario) y temperatura (eje secundario) para encontrar las variables de mayor regasificación.

Es importante mencionar que el valor de densidad se obtuvo con la siguiente relación,

$$\rho = \frac{P_r}{(P_r - P_a)} \rho_{liq}$$

Donde:

ρ = Densidad del cuerpo sólido.

ρ_{liq} = Densidad del líquido.

P_r = Peso real del cuerpo sólido.

P_a = Peso aparente del cuerpo sólido

Se empleo este método de análisis debido a los cortos tiempos de muestreo, donde no era posible obtener muestras solidificadas al vacío y a temperatura ambiente para obtener un índice de densidad. Para visualizar la relación crítica de densidad con respecto al porcentaje de porosidad se empleo el programa

ImagePro Plus, donde se cuantifico el porcentaje de porosidad en muestras solidificadas a presión reducida y preparadas a lija 600, como se muestra la **Tabla 7**.

En la **Tabla 7** observamos la notable diferencia física entre muestras con distintos valores de densidad, desde 2.580g/cm^3 hasta 2.722g/cm^3 , como referencia la densidad teórica para la aleación 380 a condiciones estándares es de 2.71g/cm^3 [9].

Tabla 7. Comparación entre densidad y porcentaje de porosidad en muestras sometidas a solidificación por presión reducida.

Densidad (g/cm^3)	%Porosidad	Imagen
2.580	2.944	
2.620	2.760	
2.711	0.470	
2.722	0.347	

Para explicar el efecto del tiempo y temperatura en el problema de regasificación en los hornos de retención se evaluaron las siguientes variables, con el fin de entender mejor las variables de estudio,

1. Turno (Equipo de trabajo)
2. Método de desgasificación
3. Calidad del metal de alimentación

A continuación se presentan los gráficos obtenidos, donde se evalúa cada variable, procurando mantener en la mayor estabilidad posible el resto de ellas.

Variable: Turno

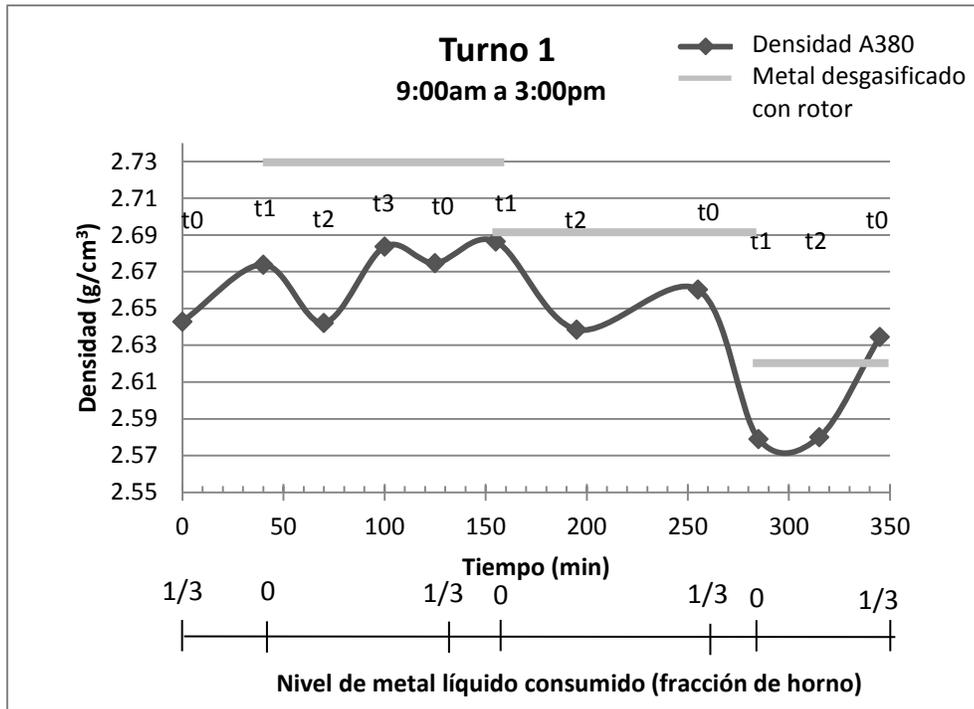


Figura 17. Variación de densidad durante el turno 1.

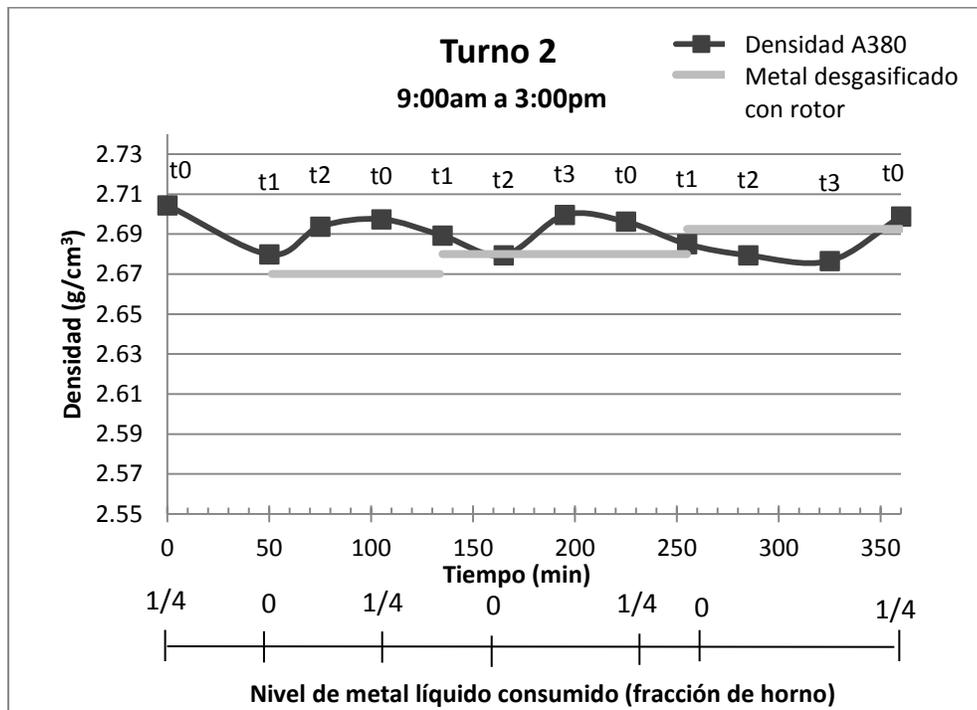


Figura 18. Variación de densidad durante el turno 2.

En la **Figura 17** y **Figura 18** se observa la variación de densidad en los hornos de retención, durante tres ciclos de alimentación, entre turno 1 y turno 2. El turno 1 presenta una diferencia de densidades de 0.11g/cm^3 con valor máximo en 2.69g/cm^3 , mientras el turno 2 presenta una diferencia de 0.035g/cm^3 , tres veces menor al turno 1, con valor máximo en 2.71g/cm^3 . También se observa que el turno 1 varía la calidad del desgasificado del aluminio alimentado visible en las líneas horizontales, cada línea representa un ciclo de alimentación, a pesar de obtener mejor calidad que el turno 1, en los dos primeros ciclos, el efecto no se refleja en la densidad del aluminio en retención.

El comportamiento de los dos turnos es un reflejo del factor humano y su capacitación en procesos manuales o semi-automáticos, ya que los dos turnos fueron evaluados en el mismo intervalo de tiempo, misma técnica de desgasificado y mismo tipo de horno. En este estudio se cuenta con un proceso manual, la alimentación de aluminio a la máquina inyectora en hornos de crisol, si el operador genera turbulencia al ingresar la cuchara donde transportará el metal líquido y no cubre la superficie del aluminio ya sea con fundente de cobertura o la misma capa oxidada del metal superficial, permite el ingreso de hidrógeno al baño metálico, disminuyendo la densidad de la aleación sin importar cual elevada sea la calidad del aluminio re-abastecido, además el contenido de hidrógeno va constantemente en aumento dentro del horno de retención. Por otra parte el proceso de desgasificado con rotor es semi-automático, el operador debe controlar la temperatura del aluminio a desgasificar y el vaciado de la olla de tratamiento a los hornos de retención, procurando no realizar turbulencia, evitar pausas innecesarias en el tiempo de traslado y abastecer primero al horno más lejano, de lo contrario se promueve la solubilidad del hidrógeno en el aluminio.

Variable: Método de desgasificación

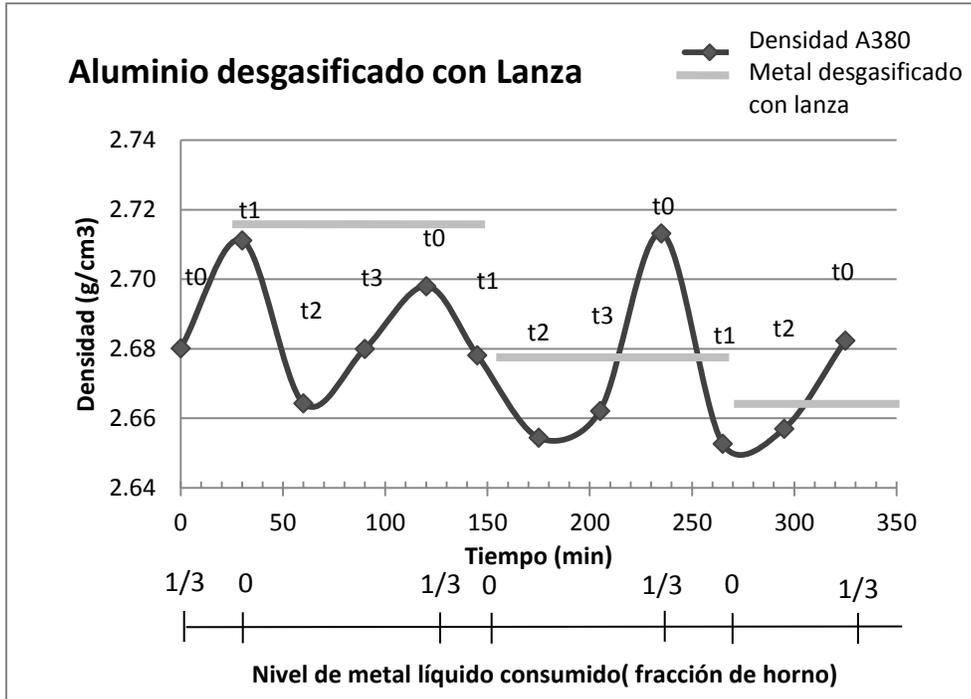


Figura 19. Densidad, alimentando aluminio desgasificado con lanza.

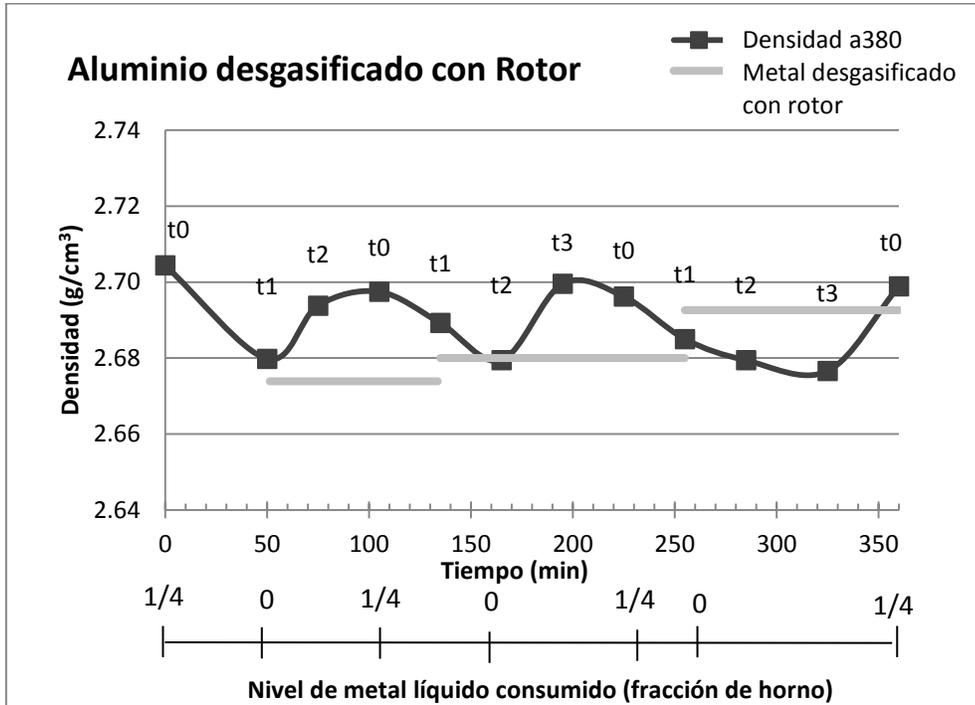


Figura 20. Densidad, alimentando aluminio desgasificado con rotor.

La **Figura 19 y Figura 20**, refleja la variación de densidades que se genera cuando el metal es desgasificado con la técnica de lanza y la técnica de rotor-inyector. El primero es un proceso totalmente manual, expuesto a la pericia del operador, mientras el segundo es semi-automatizado, generando mayor repetitividad. En esta prueba se monitorea abastecer los hornos de retención con aluminio mínimo a 2.67g/cm^3 (media entre los valores de 6.62g/cm^3 y 6.72g/cm^3 expuestos en la tabla 7 y considerado un aspecto físico aceptable), observamos que el proceso con rotor proporciona mayor estabilidad en la densidad del aluminio, esto puede ser generado por la homogenización del metal, el desgasificado con lanza puede generar zonas con mayor o menor hidrógeno aunado se encuentran las turbulencias generadas en el re-abastecimiento de los hornos.

Una observación importante en la **Figura 19 y Figura 20**, es que independientemente del proceso de desgasificación, el aluminio disminuye su densidad mientras transcurre el tiempo de retención, generalmente la mayor densidad se obtiene en los puntos donde el metal tiene mayores tiempos de retención, to, antes de la alimentación del aluminio desgasificado, la densidad sufre un descenso debido a la turbulencia de la alimentación pero transcurrido el tiempo vuelve a aumentar, entendiéndose que el hidrógeno llega a una homogeneización en el mismo aluminio. El proceso con rotor-Inyector se encarga de homogenizar la aleación desde la desgasificación, por lo que el aluminio en el horno presenta menores variaciones de densidad.

La **Figura 21 y Figura 22**, observamos el comportamiento de la temperatura de las mismas curvas revisadas en la **Figura 19 y Figura 20**, con el fin de descartar que el comportamiento se vea afectado por dicha variable, observamos la temperatura permanece constante en ambos casos entre 625°C y 635°C .

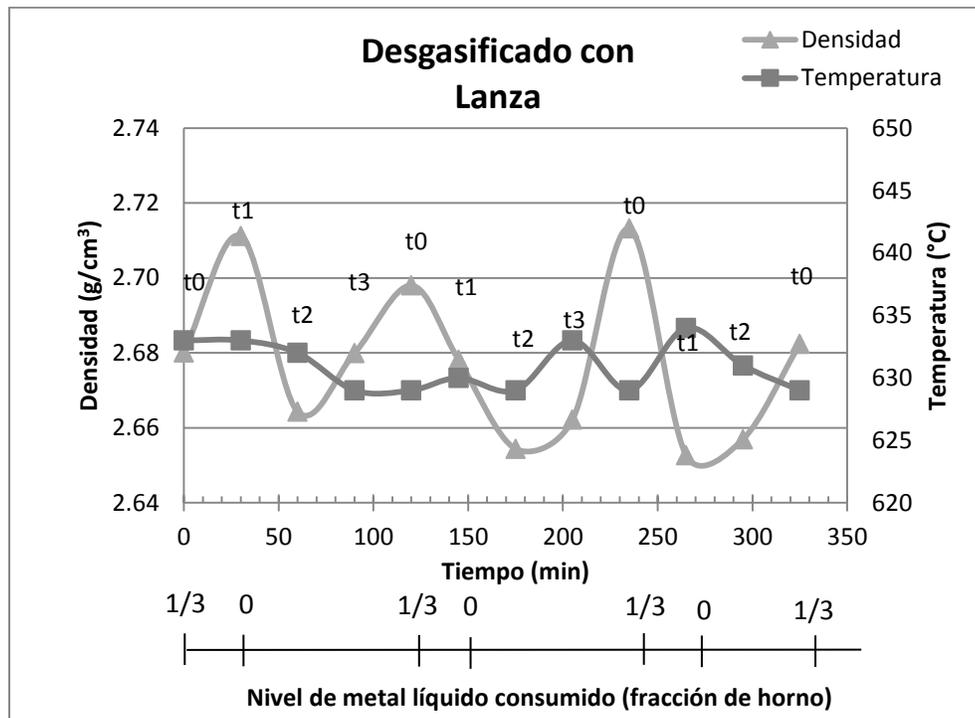


Figura 21. Variación de densidad y temperatura alimentando aluminio desgasificado con lanza.

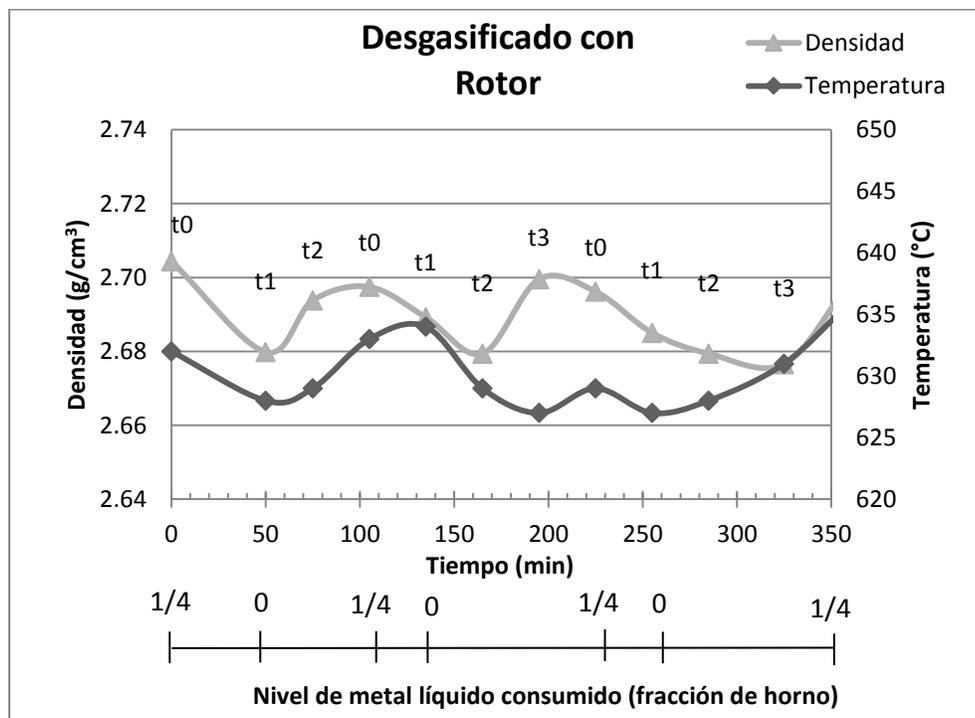


Figura 22. Variación de densidad y temperatura alimentando aluminio desgasificado con rotor.

Variable: Temperatura

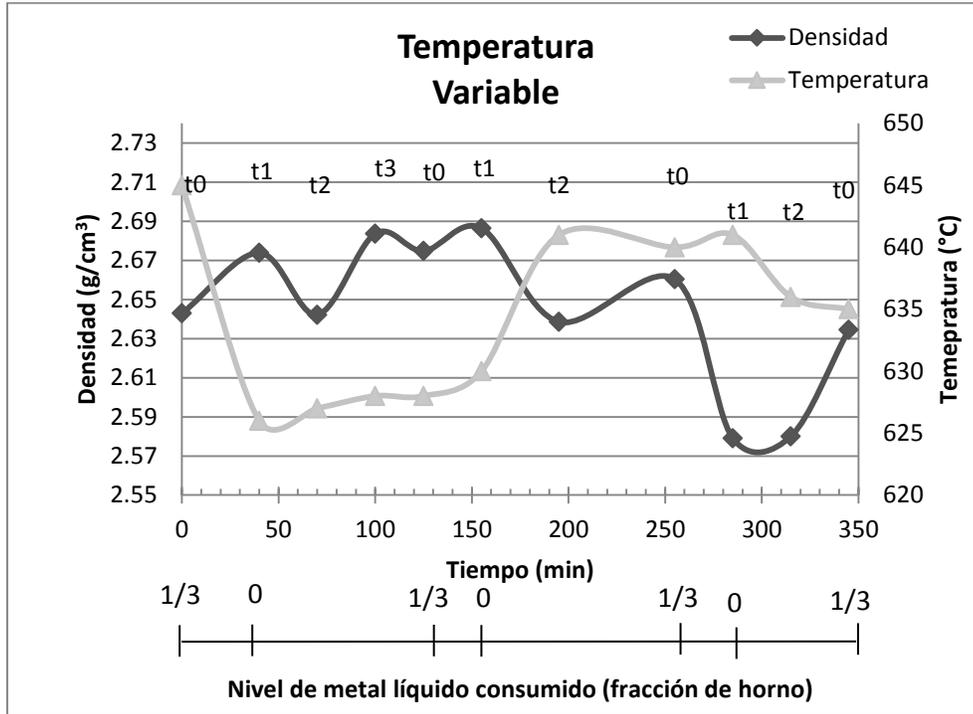


Figura 23. Variación de densidad con temperatura de retención variable.

La **Figura 23** muestra la variación de densidad en el metal de retención cuando la temperatura del horno varía aunque sea 10°C de lo establecido, en este caso de 635°C a 645°C . La densidad se altera junto con la temperatura, donde a mayor temperatura, menor densidad y viceversa, comportamiento provocado por la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido, además del incremento de hidrógeno en el horno, una vez que se eleva la temperatura y empieza el descenso de densidad, aunque se restablezca dicha variable y el aluminio disminuya su solubilidad de hidrógeno (interrumpiendo la energía térmica o retirando aluminio para facilitar el enfriamiento), la densidad no se ve afectada en la misma magnitud ya que requiere de tiempo para liberar el exceso de hidrógeno y llegar al equilibrio nuevamente.

Variable: Calidad del metal de alimentación

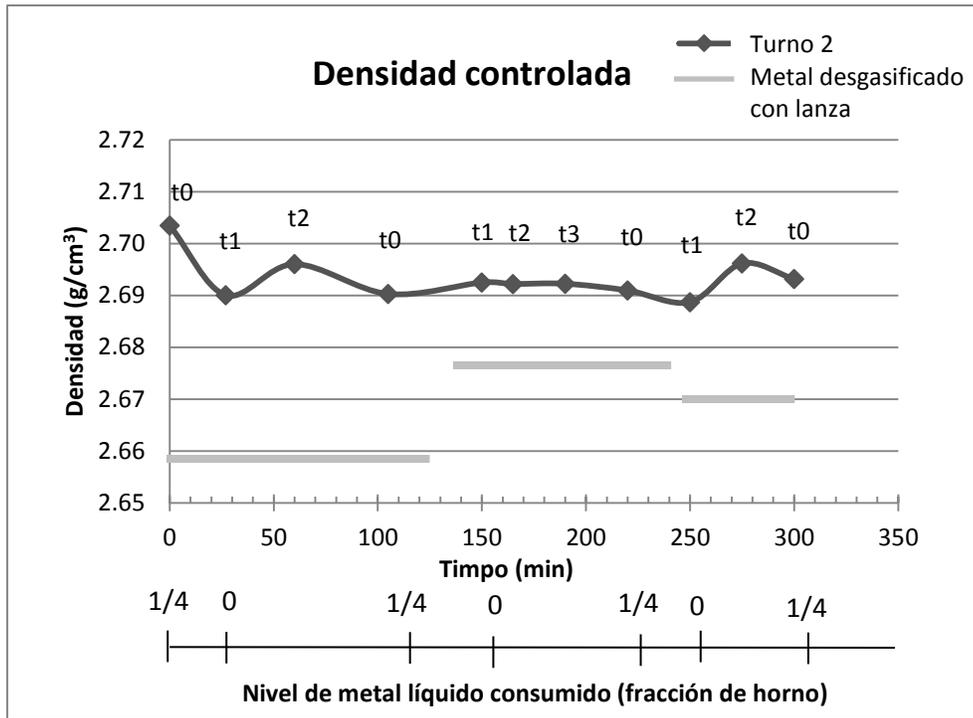


Figura 24. Variación de densidad con alimentación de metal controlada.

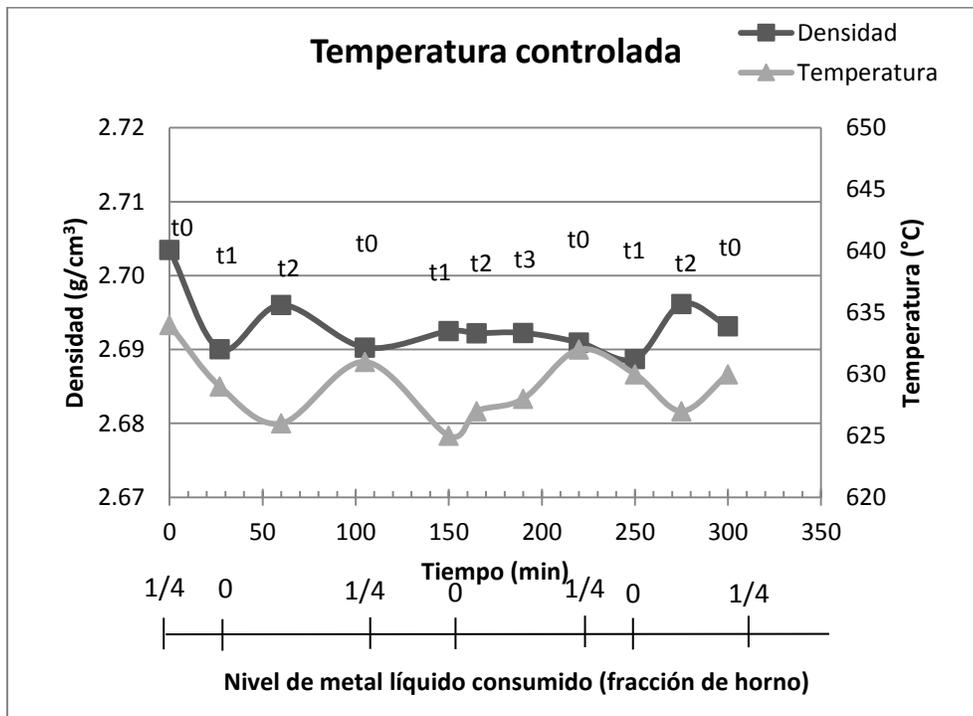


Figura 25. Variación de densidad y temperatura con alimentación de metal controlada.

En la **Figura 24 y Figura 25**, muestran cómo es posible controlar la densidad del aluminio en retención, manteniendo el resto de las variables controladas. Para lograr este procedimiento fue necesario control riguroso en cada etapa, **Tabla 8**.

Tabla 8. Parámetros controlados para evitar la variación de densidad en el horno de retención.

Etapa	Variable	Descripción
Desgasificación de Aluminio	Temperatura de inicio	700°C a 710°C
	Temperatura final	660°C a 670°C
	Cobertura de fundente	1.2-1.6 kg/m ²
	Flujo de nitrógeno	20L/min, 5 minutos
Alimentación	Tipo de Horno	Crisol y Caja.
	Tiempo después del desgasificado	4 min, primer horno abastecido.
	Temperatura de alimentación	635°C a 645°C
Mantenimiento	Re-alimentación	A ¼ de descenso de aleación
	Operación de máquina	Automática
	Temperatura de retención	624°C a 635°C

La **Figura 23 y Figura 25** muestra que la característica más importante a controlar en los hornos de retención es la temperatura, si esta permanece en valores bajos, 625°C aproximadamente y constantes $\pm 5^\circ\text{C}$, siempre evitando la pérdida o incremento de la misma, coadyuva a mantener valores altos de densidad, recordando que la solubilidad del hidrógeno es menor a bajas temperaturas y dando lugar a la desgasificación natural, lo cual se refleja en la **Figura 24**, donde el metal en retención posee mayor densidad que el metal desgasificado y alimentado a la unidad de fusión. La homogenización del

aluminio dentro del horno de retención también es de gran importancia, ya que la densidad del metal se ve menos afectada por la recarga de aluminio desgasificado, como se expreso en la **Figura 20 y Figura 24**.

Es posible obtener un comportamiento excelente de densidad con técnicas básicas como la lanza para desgasificar, sin embargo los errores y variables del proceso deben ser mínimos, por lo que técnicas como la desgasificación con Rotor ofrecen sistemas más automáticos, minimizando las variables de operación, además de reducir algunos consumos importantes como el flujo de gas inerte y el tiempo que impactan en el costo del proceso y los convierte en procesos muy rentables.

3.3 Etapa 3

En esta etapa se presentan los análisis químicos de muestras obtenidas en el horno con crisol y sin crisol, con el fin de evaluar posibles cambios en los porcentajes de elementos químicos en la aleación A380 y las microestructuras donde se evalúa la formación de lodos e intermetálicos en la aleación.

3.3.1 Análisis de lodos metalicos

El horno sin crisol en pocas ocasiones es vaciado completamente, debido al prolongado tiempo de acondicionamiento que requiere; su funcionamiento es continuo, siempre mantiene aluminio a un nivel superior de la mitad del horno. Cada mes, aproximadamente, se realizan limpiezas con fundente, en donde se retira la tapa de la unidad y se remueve escoria con óxidos alojados en paredes del horno y superficie del metal líquido, sin embargo esta limpieza únicamente es superficial.

La **Tabla 9** muestra la composición química del precipitado encontrado en el fondo del horno sin crisol, obtenida por espectrometría de emisión atómica en el

laboratorio de Fundición del DIM. Los porcentajes de Fe, Mn y Cr se encuentran por encima de los límites de detección del espectrómetro, principales responsables de la precipitación de lodos intermetálicos; en cambio otros elementos se encuentran disminuidos respecto a la composición de aleación de trabajo, A380, por ejemplo Cu, que reduce su valor medio en 1.6%, saliendo de la especificación normativa.

Tabla 9. Composición química de muestra con lodos y aleación A380.

Elemento	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Pb	%Cr
Lodos	7.75	>2.520	1.429	>6.00	0.0906	0.523	0.0753	>0.4800
A380	7.5-9.5	1.2min	2.0-4.0	0.5máx	0.5máx	3.0máx		

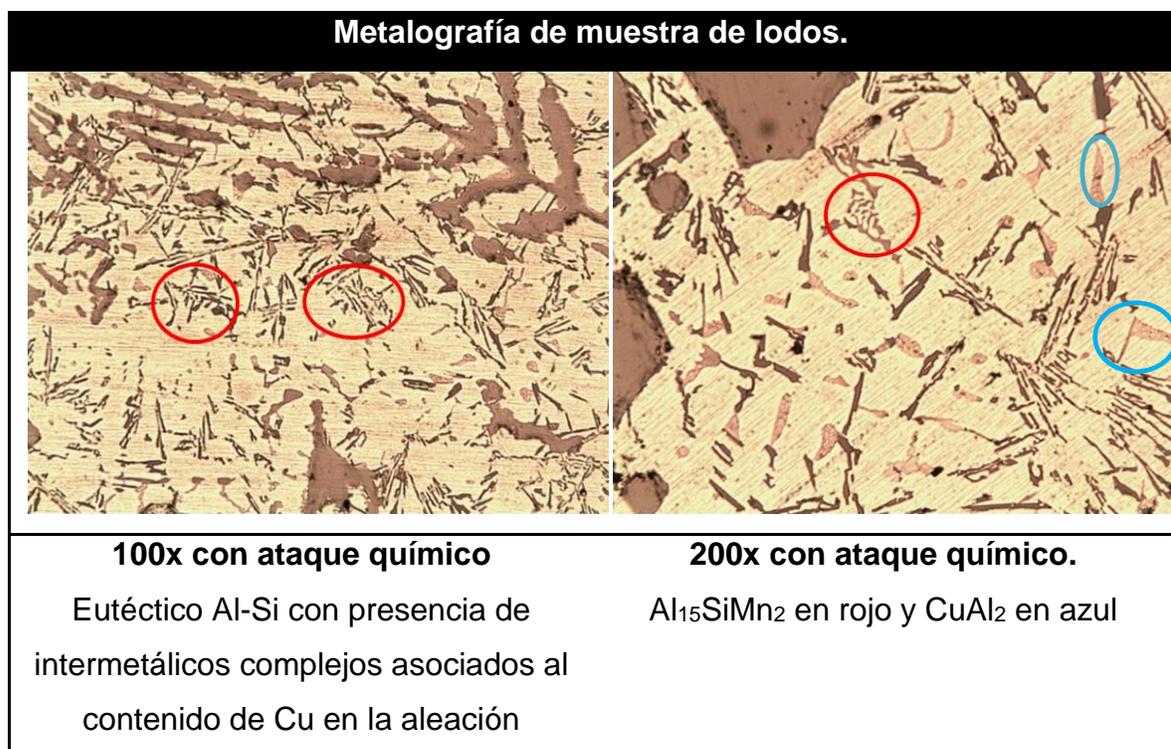


Figura 26. Metalografía de precipitación de lodos en el horno sin crisol.

La **Figura 26** muestra la metalografía del precipitado encontrado en el fondo del horno sin crisol, en donde se presentan varios intermetálicos. Observamos en

rojo $Al_{15}SiMn_2$, en la forma característica de escritura china y $CuAl_2$ que corresponde a la disminución de cobre mostrada en la **Tabla 9**. Esta formación de intermetálicos y modificación de composición química puede afectar las propiedades de la aleación, confiriendo menor resistencia, a falta de cobre, menor fluidez, mayor soldabilidad entre otros problemas.

Una vez confirmada la presencia de intermetálicos en los lodos del horno de retención, se procedió a observar este mismo efecto en la aleación inyectada, en los tiempos t_0 y t_1 , antes y después de rellenar el horno sin crisol.

Las composiciones químicas obtenidas se observan en la **Tabla 10**; existe poca variación entre los valores obtenidos; por otra parte el factor de lodos aumenta discretamente en la primer muestra ya que la aleación retenida por él, contiene mayor porcentaje de Fe, Mn y Cr, observamos que las densidades de las muestras con mayor tiempo de retención, t_0 , presentan densidades más altas que las muestras t_1 , donde el aluminio es alimentado, este fenómeno puede estar interferido por la desgasificación del aluminio como se analizó en la sección anterior, por lo cual se continuará su análisis. El factor de lodos es relativamente bajo, es decir, con un valor de 1.2, se requiere una temperatura inferior a los $620^{\circ}C$ para precipitar lodos, esta temperatura en pocas ocasiones se alcanza, aun así se realiza la observación de trabajar a $670^{\circ}C$ como temperatura de trabajo (T_t) durante el traslado del metal, **Tabla 11**.

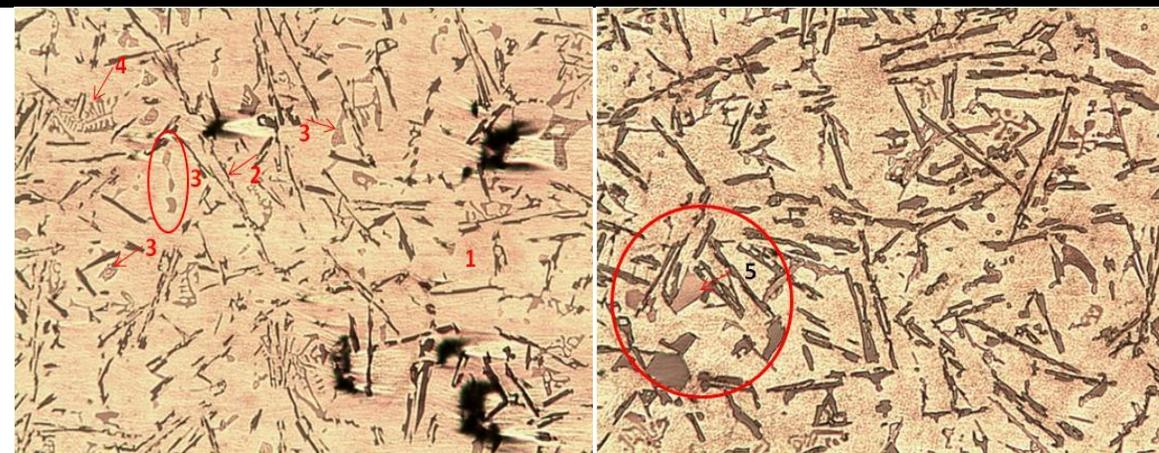
Tabla 10. Composición química de muestras t_0 y t_1 para horno con crisol (H1) y horno sin crisol (H2).

Muestra	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Pb	%Cr	%Al
H1 t_0	8.20	0.807	3.370	0.177	0.142	1.149	0.112	0.030	85.9
H1 t_1	8.32	0.786	3.266	0.173	0.136	1.126	0.109	0.030	85.9
H2 t_0	9.49	0.728	2.955	0.140	0.127	1.013	0.110	0.026	85.3
H2 t_1	9.65	0.753	3.087	0.140	0.131	1.013	0.122	0.026	85.0

Tabla 11. Factor de lodos y densidad de muestras to y t1 para horno con crisol (T1) y horno sin crisol (T2).

Muestra	SF	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Tt(°C)
H1t0	1.252	2.708	668
H1t1	1.223	2.668	667
H2t0	1.086	2.726	664
H2t1	1.111	2.701	665

Metalografía de horno con crisol.



Muestra to 100x c/ataque

Muestra t1 100x c/ataque

Fases y microconstituyentes

1. Matriz de solución sólida Al(α)
2. Placas de Si eutéctico
3. Intermetálico CuAl₂
4. Al₁₅MnSi₂
5. Posible Si primario debido a la cercanía con el eutéctico.

Figura 27. Metalografía de muestra to y t1 para horno de retención con crisol.

La **Figura 27** presenta las microestructuras de las muestras obtenidas en el horno sin crisol, de acuerdo con la **Tabla 11**, se eligen las de factor de lodos

más alto. Las metalografías revelan la presencia de intermetálicos como CuAl_2 y $\text{Al}_{15}\text{MnSi}_2$, mismos encontrados en el fondo del horno sin crisol, sin embargo la composición química en este caso, **Tabla 10**, se encuentra dentro de la especificación requerida por la planta, **Tabla 4**, por consiguiente, parte de estos precipitados pueden ser tolerados en la aleación sin perjudicar el rango de composición química de trabajo. Es notable que en la muestra to, existe mayor cantidad de intermetálicos ya que se trata de la muestra con mayor tiempo de permanencia. Este mismo efecto ocurre con el precipitado recolectado en el fondo del horno sin crisol, el incremento en el tiempo de retención ocasiona el deterioro de la composición química original.

Por último la **Tabla 12**, tiene por objetivo mostrar la composición química promedio de 10 piezas obtenidas al azar en las máquinas de inyección a presión alimentadas por los hornos monitoreados en el presente proyecto. Se encontró que los porcentajes de elementos aleantes se encuentran dentro de especificación, además de presentar un factor de lodos bajo.

Tabla 12. Composición química promedio y variación estándar de piezas obtenidas por colada a presión.

	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Pb	%Cr	SF
\bar{x}	9.74	0.803	3.290	0.158	0.163	0.963	0.108	0.0234	1.190
$\pm\sigma$	0.53	0.065	0.388	0.009	0.063	0.297	0.017	0.0002	0.082
A380	7.5- 9.5	1.2	2.0- 4.0	0.5	0.5	3.0			

A pesar de contar con un factor de lodos bajo y composición química homogénea durante el proceso es inevitable la formación de lodos, esta formación se atribuye al tiempo de retención del aluminio. Continuar con la limpieza de horno mensual y la inyección de metal con horno de retención a

media capacidad, son factores que seguirán evitando la inyección de intermetálicos a las piezas finales. Se recomienda trabajar en limpiezas más continuas y profundas, cada 15 días, ya que se demostró la alteración de composición química en el fondo del horno. También se debe lograr una mayor eficiencia en el proceso de desgasificado, siendo la etapa donde mayor abatimiento de temperatura se obtiene, de esta forma, el aluminio alimentado en los hornos de retención tendrá una mayor temperatura, disminuyendo efecto de tiempo de retención en la formación de lodos.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, en relación a la regasificación en los hornos de retención se concluye

1. La regasificación de aluminio se efectúa al momento de llenar el horno con aleación desgasificada, debido a la turbulencia generada y al diferencial de hidrógeno diluido, reflejado como variación de densidad del aluminio.
2. El tiempo de retención no es significativo en la regasificación del aluminio si se mantiene constante la temperatura de retención. El tiempo de retención puede beneficiar la desgasificación natural y homogenización del aluminio, aproximadamente 30 minutos después de llenar el horno con aleación desgasificada, reflejada en el aumento de densidad.
3. La porosidad del metal en retención es constante cuando la calidad de la aleación desgasificada permanece al paso de los ciclos de abastecimiento sin importar el método de desgasificado ya que promueve la rápida homogenización del aluminio abastecido y retenido.
4. Cualquier variable estará expuesta a la pericia del personal, es recomendable emplear el proceso de desgasificado por rotor-inyector, detallar el proceso y capacitar constantemente al personal.

Para el tema de formación de lodos las conclusiones son las siguientes

1. La precipitación de lodos se atribuye al tiempo de retención del aluminio en los hornos, días e incluso semanas.
2. La formación de lodos no afecta el proceso de inyección a presión, ya que el nivel de metal líquido siempre es superior a la mitad de la capacidad del horno, impidiendo el transporte de lodos a la máquina inyectora.

Referencias bibliográficas

1. Sobre nosotros, Burner Systems International. Fecha de consulta 10 de Enero de 2017. (Disponible en: <http://www.burnersystems.com/about-us>).
2. Abundancia del aluminio. Fecha de consulta 15 de Enero de 2017. (Disponible en: <http://www.windows2universe.org>).
3. Propiedades del aluminio. Fecha de consulta 15 de Enero de 2017. (Disponible en: <http://elementos.org.es/aluminio>).
4. Rubinos G. David., 2007, "Utilización de lodos rojos de bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos", Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, pp.30-48.
5. Die Casting. Fecha de consulta 15 de Enero de 2017. (Disponible en: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>).
6. Apelian, D., "Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance", 2009, North American Die Casting Association, Illinois, Estados Unidos, pp. 5-17.
7. North American Die Casting Association, "NADCA Product Specification Standards for die Casting", 2015, 9ª edición, Illinois Estados Unidos, pp. 3-5, 3-6.
8. Efecto de elementos aleantes. Fecha de consulta 16 de Enero de 2017. (Disponible en: <http://www.substech.com>).

9. ASM Handbook Vol. 2, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", ASM International, 10° edición, 1992, pp. 137, 164-177.
10. Neff, David V., "Understanding Aluminum Degassing: Modern Casting", Vol. 92, 2002, American Foundrymen's Society, Estados Unidos, pp. 24-27.
11. Torres P. Iván, "Estudio de una nueva técnica de desgasificación con rotor-inyector asistido por modelo físico y matemático", México 2010 p.p 93, Trabajo de licenciatura, UNAM, Facultad de Química.
12. Djurdjevic, Mile B., et. al., "Melt Quality Control at Aluminum Casting Plants", 2010, Association of Metallurgical Engineers of Serbia, MJoM Vol. 16 (1), (pp. 63-76).
13. Quality control. Fecha de consulta 15 de Enero de 2017. (Disponible en: <https://www.researchgate.net>)
14. Sludge Factor, Fecha de consulta 15 de Enero de 2017. (Disponible en: http://metalcasting.govtools.us/reports/casting_characteristics_of_aluminum.pdf).
15. Aluminum Alloys 101. Fecha de consulta 15 de Enero de 2017. (Disponible en: <https://www.mercalloy.com/aluminum-alloys-101/>).