



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**MEJORAS AL PROCESO DE FUSIÓN DE ALUMINIO Y MANEJO DE
METAL LÍQUIDO PARA PROCESOS DE INYECCIÓN A PRESIÓN.**

TESIS

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

PRESENTA

FILIBERTO FRANCO ROSALES



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: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

SECRETARIO: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

1er. SUPLENTE: AGUSTÍN GERARDO RUÍZ TAMAYO

2° SUPLENTE: LUIS DARÍO ESCOBAR MEJÍA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: BURNER SYSTEMS INTERNATIONAL DE MEXICO (BSI CELAYA GTO)/FACULTAD DE QUÍMICA. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA METALÚRGICA UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA _____

SUSTENTANTE:

FILIBERTO FRANCO ROSALES _____

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

1 ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS.....	13
1.1 EL ALUMINIO	13
1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES BASE ALUMINIO	13
1.3 ELEMENTOS ALEANTES PARA ALEACIONES BASE ALUMINIO.....	14
1.3.1 Zinc	14
1.3.2 Manganeso	14
1.3.3 Magnesio	14
1.3.4 Silicio	15
1.3.5 Cobre	15
1.3.6 Elementos considerados como impurezas o aditivos	16
1.4 IMPUREZAS QUE AFECTAN A LAS ALEACIONES DE ALUMINIO	16
1.4.1 Impurezas metálicas.....	17
1.4.2 Impurezas no metálicas	17
1.4.3 El corundum	17
1.4.4 Intermetálicos precipitados	18
1.5 ALEACIÓN 380 – A380.....	20
1.6 FUNDICIÓN A PRESIÓN	22
1.6.1 Máquinas utilizadas en fundición a presión	22
1.6.2 Características de aleaciones para Die Casting	25
1.6.3 Hornos de fusión	26
1.7 USO DE ARGÓN Y NITRÓGENO PARA LA DESGASIFICACIÓN DE ALUMINIO	28
1.8 EVALUACIÓN DE POROSIDAD MÉTODO DE PRESIÓN REDUCIDA.....	32
1.9 USO DE FUNDENTES	36
1.9.1 Efecto en la calidad del metal	37
1.9.2 Tipos de fundente	38
1.9.3 Fundentes de cobertura	39
1.9.4 Fundentes de escoreo	40
1.9.5 Fundentes de limpieza	40
1.9.6 Fundentes de limpieza de hornos	41
1.9.7 Fundentes especiales	42

2 CONTROL DE CALIDAD APLICABLE EN BSI	43
2.1 CONTROL DE CALIDAD DE MATERIA PRIMA Y MANEJO DE ALUMINIO LÍQUIDO EN BSI.....	43
2.2 INSPECCIÓN VISUAL DE LA MATERIA PRIMA, RETORNOS, FUNDENTES Y HERRAMENTAL	43
2.3 EVALUACIÓN VISUAL DE LA ESCORIA	44
2.4 ENSAYOS METALGRÁFICOS	45
2.5 EVALUACIÓN DE LA POROSIDAD	46
3 METODOLOGÍA Y RESULTADOS ETAPA 1	47
3.1 METODOLOGÍA ETAPA DE DIAGNÓSTICO DEL PROCESO	47
3.2 RESULTADOS DE DIAGNÓSTICO	49
4 METODOLOGÍA Y RESULTADOS ETAPA 2	65
4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PROPUESTA MEJORA DEL PROCESO ACTUAL EN BSI	65
4.2 RESULTADOS.....	69
5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
6 CONCLUSIONES	91

PROPUESTAS

REFERENCIAS

ANEXOS

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la industria de la fundición de aluminio se ha vuelto de mucha importancia económica debido al aumento en el consumo de productos derivados de la misma. Aunado a las propiedades que proporciona el aluminio lo colocan como un metal no ferroso apto para ser utilizado en una amplia gama de industrias y productos, que van desde aplicaciones en industria automotriz, aeronáutica, construcción, pinturas, etc.

Algunas de estas industrias demandan altos estándares de calidad tanto en el consumo (materia prima) como en su producción de aluminio (piezas terminadas), por lo que se han desarrollado investigaciones encaminadas a la mejora de los procesos, para que estos repercutan en la disminución de defectos y rechazos de piezas de aluminio, lo que directamente disminuiría costos de producción y reprocesamiento.

Para la obtención de piezas de alta calidad, se hacen tratamientos de metal líquido al aluminio, que consiste en la eliminación de impurezas o compuestos no deseables, así como la eliminación de gases que naturalmente son disueltos como el hidrógeno, los que ocasionan la generación de poros y sopladuras, lo que disminuye las propiedades mecánicas de las piezas aumentando la cantidad de rechazos.

Burner Systems International de México S.A. de C.V (BSI Celaya) es una empresa ubicada en Apaseo el Grande, Guanajuato, México, dedicada a la fabricación de sistemas de gas para estufas creada en 1982. Actualmente fabrica familias de productos siendo los principales:

quemadores, tubings de aluminio, tubos manifold, válvulas y termostatos.

El área de fundición es una de las de mayor importancia en la empresa ya que es la encargada de la manufactura de los productos de amplia demanda, como son: quemadores de diferentes diseños y dimensiones, termostatos, válvulas, entre otras piezas.

El proceso de fundición empleado por BSI, es la inyección a presión (Die Casting) de cámara fría. Las máquinas inyectoras son alimentadas con una aleación de aluminio A380, la cual es fundida en un horno de reverbero con capacidad de 4 toneladas.

Se decidió hacer una investigación acerca de uno de los principales problemas que presentan las piezas de aluminio, que es un control inadecuado de porosidades debidas al exceso de hidrógeno y deficiente limpieza del metal en el horno y la olla así como en los hornos de retención.

Este trabajo se realizó en colaboración con la empresa Burner System International (BSI) y la Facultad de Química (Departamento de ingeniería metalúrgica), donde se consideraron las condiciones **“actuales” de operación y se midieron diversos parámetros de relevancia** en la calidad metalúrgica del baño metálico. Posteriormente se realizó un diseño de experimentos considerando nuevos parámetros de operación buscando una mejora del proceso.

En este trabajo se presentan de manera general algunas propiedades del aluminio y sus aleaciones y, tomando en cuenta la filosofía metalúrgica para la dirección de este trabajo se considera la relación

propiedades-procesamiento-microestructura-uso(performance), están interrelacionados que se puede interpretar de acuerdo a los objetivos metalúrgicos perseguidos, en este estudio hecho en BSI, se ha considerado que si se parte de la aleación A380 la cual nos brinda propiedades adecuadas para el proceso de die casting, el cual a su vez genera ciertas características microestructurales que son adecuadas para la gama de productos manufacturados en la empresa, los que finalmente llegan a un consumidor que le dé un uso. Los resultados

obtenidos son presentados para su estudio en forma de gráficos, tablas y fotografías.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente el área de fundición de BSI, dedicada a la fusión de aluminio A380 y al tratamiento de metal líquido, no tiene un control establecido para garantizar la calidad de metal líquido el cual es alimentado a las máquinas de inyección.

La falta de control de calidad en esta fase del proceso puede producir, problemas como alto contenido de hidrógeno disuelto, atrapamiento de escoria y/o inclusiones no deseadas. Lo anterior puede repercutir directamente en la calidad de las piezas terminadas ocasionando, altos índices de porosidad, composición química no homogénea, dificultades en el maquinado, acabados superficiales de mala calidad, mermas y bajos rendimientos, aumento en tiempos de entrega, retrabajos, rechazos y al final de cuentas pérdidas económicas.

OBJETIVOS

Evaluar el proceso de fusión y manejo de metal líquido, en condiciones normales de operación, de la empresa Burner System International SA de CV (BSI Celaya).

Proponer y aplicar mejoras en el proceso de fusión y manejo de aluminio líquido que impacten en el rendimiento de metal y su calidad metalúrgica

Encontrar posibles fuentes de ahorro en cuestión de materia prima y/o insumos.

Crear o mejorar instrucciones de procesos que contengan la información necesaria, para ser ejecutada por los operadores.

HIPÓTESIS

Es posible mejorar el proceso de tratamientos de desgasificación, escorificación y control de temperatura de metal líquido de aluminio, proveniente del horno de reverbero aplicando los procesos y técnicas adecuadas de tratamiento y manejo del aluminio líquido para obtener una mayor calidad metalúrgica que sea adecuada para las máquinas de inyección a presión, lo anterior sin necesidad de invertir en nuevos equipos y/o insumos, ni modificaciones que incluyan un nuevo gasto para la empresa Burner System International SA. de CV. (a petición de la misma).

Aplicando técnicas adecuadas de tratamiento de metal líquido, es posible reducir costos en insumos o mermas, así como tiempos de proceso.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS

1.1 EL ALUMINIO

El uso industrial del aluminio ha hecho de este metal uno de los más importantes, tanto en cantidad como en variedad de usos. El aluminio se usa en forma pura, aleado con otros metales o en compuestos no metálicos.

El aluminio se extrae a partir de la transformación de la bauxita, primero en alúmina mediante el proceso Bayer y posteriormente se utiliza el proceso (Hall-Heroult), el que permite obtener Al metálico mediante la reducción electrolítica a partir de los productos obtenidos del proceso Bayer.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES BASE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN

Las aleaciones de aluminio se clasifican dependiendo de los elementos de aleación que contengan. En la tabla 1.1 se muestra la designación para aleaciones de fundición.

Tabla 1.1 Clasificación de aleaciones para fundición [1].

1XX.X	Aluminio comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2XX.X	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3XX.X	Al-Si-Cu Al-Mg-Si	Algunos son endurecibles por envejecimiento
4XX.X	Al-Si	No endurecibles por envejecimiento
5XX.X	Al-Mg	No endurecibles por envejecimiento
7XX.X	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8XX.X	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9XX.X	----	En la actualidad no se utilizan
6XX.X	----	Series no usadas

1.3 ELEMENTOS ALEANTES PARA ALEACIONES BASE ALUMINIO

El aluminio puro tiene pocos usos comerciales, sin embargo aleado es sumamente utilizado. Los elementos principales de las aleaciones de aluminio, son:

1.3.1 Zinc

Estas aleaciones presentan moderada resistencia a la tensión así como buena fluidez para procesos de colada o die casting. Las temperaturas eutécticas son altas. Las piezas tienen buena maquinabilidad y resistencia a la corrosión, a pesar de ser susceptible a presentar corrosión por estrés. Generalmente estas aleaciones son recomendadas para ser utilizadas a relativamente altas temperaturas. A algunas aleaciones se les puede aplicar tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades.

1.3.2 Manganeso

El manganeso no se considera un elemento de aleación como tal, sino más bien es un recolector de hierro, precipitándolo, pero en cantidades mayores a las requeridas, puede ser perjudicial.

1.3.3 Magnesio

Junto con el aluminio forman esencialmente una típica aleación binaria, que presenta moderada resistencia a la tensión y a la fractura. Son

difíciles de vaciar con tendencia a alta formación de escorias y contracción durante la solidificación. La principal característica de las aleaciones Al-Mg es que presentan alta resistencia a la corrosión especialmente en atmósferas marinas y agua de mar.

1.3.4 Silicio

Es el principal elemento de aleación en la fundición de aluminio, debido a sus propiedades, tales como, buena fluidez en el vaciado, reducción de la deformación en caliente y la contracción durante la solidificación. El silicio aumenta su resistencia mecánica, dureza, aunque con una ligera disminución en su ductilidad y maquinabilidad. Las aleaciones Al-Si pueden ser modificadas aumentando sus propiedades mecánicas.

1.3.5 Cobre

En las aleaciones Aluminio-Cobre, el Cobre oscila entre 4%-5% y el silicio se presenta en cantidades menores disminuyendo la solubilidad de las fases Al-Cu; son susceptibles al tratamiento térmico, generando un precipitado en solución, por medio de temple y envejecimiento. Ofrecen excelentes propiedades como resistencia mecánica, alta dureza y excelente resistencia a la abrasión y corrosión.

1.3.6 Elementos considerados como impurezas o aditivos

- Hierro

Se considera como impureza, aunque está presente de manera habitual en todas las composiciones de las aleaciones, siendo una principal fuente de compuestos intermetálicos complejos, que precipitan en conjunción con los demás constituyentes de la aleación, provocando fragilidad, reducción de resistencia y ductilidad. El hierro en altas concentraciones siempre es perjudicial en las aleaciones de aluminio para los procesos de moldeo en verde, molde permanente, siendo requerido un control estricto del contenido de este elemento en las composiciones químicas de las aleaciones automotrices; en algunas condiciones es beneficioso mejorando la dureza y resistencia al agrietamiento en caliente. Para el proceso de fundición a presión en cantidades de hasta 1.4% es beneficioso para mejorar el desmoldeo y evitar que las piezas se peguen al molde (soldering). Para el caso de aleaciones especiales, se adiciona:

- Níquel
- Estaño
- Plomo

1.4 IMPUREZAS QUE AFECTAN A LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Son llamadas impurezas cualquier compuesto indeseable que se encuentre dentro de las piezas de fundición, hornos de fusión y/o retención, ollas de vaciado, etc. Las impurezas que afectan las aleaciones de aluminio en estado líquido se clasifican como:

- Impurezas metálicas
- Inclusiones no metálicas
- Compuestos intermetálicos
- Hidrógeno disuelto

1.4.1 Impurezas metálicas

Son simplemente elementos metálicos que están fuera de los límites de composición química de la aleación, en algunas ocasiones, los metales pesados como estaño, plomo, zinc, cadmio, hierro y níquel.

1.4.2 Impurezas no metálicas

Se generan durante la fusión por oxidación de los materiales de carga, herramientas sucias, erosión de refractarios y fundentes químicos usados en el proceso de preparación de aleaciones para el vaciado.

1.4.3 El corundum

Es una inclusión que a menudo se encuentra en las piezas de aleación de aluminio para fundición. Es particularmente encontrado en forma de macro inclusiones, siendo un óxido de aluminio tipo alfa; esta forma es sumamente densa y dura, el cual se encuentra en las paredes y piso del horno. La formación es por una baja, calidad de los refractarios usados comúnmente, con bajos contenidos de agentes no-mojables por el aluminio en la composición del refractario, temperaturas altas, atmósferas de horno oxidantes, acción de la flama directa sobre el metal y una ineficiente práctica de remoción de escoria en el interior.

1.4.4 Intermetálicos precipitados.

Hay varios compuestos intermetálicos que se forman naturalmente siendo el resultado de ciertos fenómenos de cristalización-solidificación en estado sólido. Estos microconstituyentes son parte integral de la metalurgia de las aleaciones de aluminio para la fundición y no se pueden evitar. Generalmente, estas fases no son perjudiciales para las propiedades de la aleación durante el procesamiento, y comportamiento de la misma; existen dos excepciones notables en este hecho. En el primer caso, la fase aluminio-silicio contiene cierta cantidad de hierro causando algún problema como la fragilidad en las propiedades mecánicas, resistencia a la fatiga, ductilidad, resistencia al impacto, cuando la fase tiene forma de aguja. La segunda excepción ocurre principalmente en aleaciones de fundición, se conoce normalmente como lodo. Es un compuesto intermetálico consistente de hierro, cromo y manganeso como constituyentes elementales y una matriz de aluminio-silicio; esto da lugar a una expresión llamada factor lodo (SF Sludge Factor):

$$\%Fe + 2 \%Mn + 3 \%Cr < 1.8$$

Al exceder 1.8, entonces la formación del lodo, probablemente ocurra y esta misma, está en función de la temperatura y composición.

La siguiente ecuación muestra la relación entre la temperatura de formación de lodos y el contenido de Fe en la aleación.

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

Jorstad [2] y Gobrecht [3] realizaron gráficos donde se muestra la dependencia de factor de lodos (SF) con la temperatura de formación de

lodos y delimitan áreas donde es posible la formación de lodos, para aleaciones Al-Si-Cu. Estos graficos son mostrados en la figura 1.1

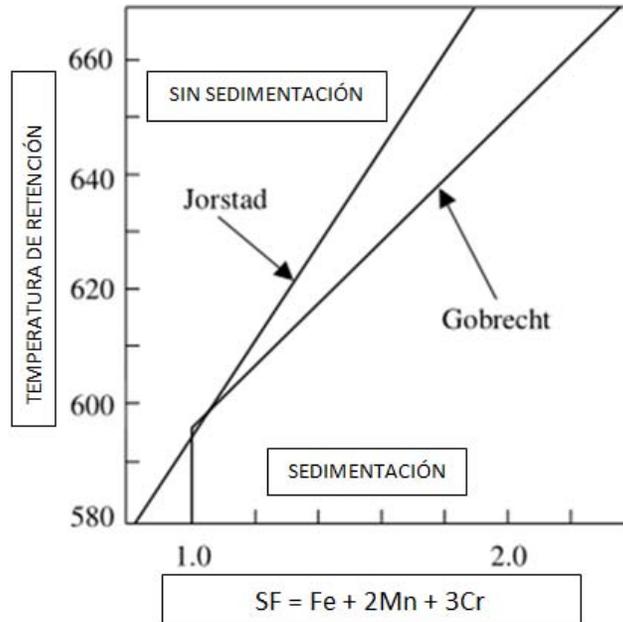


Figura 1.1. Factor de lodos vs temperatura [2,3]

Los lodos son muy perjudiciales ya que esta fase es sumamente dura, afectando a la vida útil de la herramienta de maquinado, su fractura y características de maquinado cuando se producen piezas de alta precisión

1.5 ALEACIÓN 380-A380

La aleación A380 es con la que se trabaja actualmente en BSI Celaya, esta ofrece una adecuada combinación de propiedades de inyección y de características mecánicas y térmicas, la A380 es una de las aleaciones de aluminio más comúnmente especificadas para fundición a presión. Ofrece buenos resultados en cuanto a fluidez, bajo soldering y resistencia al agrietado en caliente.

La aleación A380 tiene una buena capacidad de mecanización: se utiliza para una amplia variedad de productos, incluyendo termostatos, válvulas, quemadores y diversas piezas de ensamble.

El tratamiento térmico de las piezas inyectadas no es habitual por la posibilidad de que se produzcan ampollas o abultamientos, debido a sopladuras bajo la superficie que se manifiesten cuando se calientan a altas temperaturas. Aunado a que el proceso de Die Casting (DC) ofrece altas velocidades de enfriamiento, lo que repercute en una mejora de las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas.

La Tabla 1.2 muestra la composición química promedio de la aleación A380, la tabla 1.3 muestra algunas propiedades de la aleación.

Tabla 1.2 Composición química de la aleación A380, bajo norma ANSI (% en peso) [4].

A380	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Otros	Al
ANSI	7.5- 9.5	1.3	3.0- 4.0	0.5	0.1	0.5	3.0	0.35	-----	0.5	B

Tabla 1.3 Propiedades típicas de la aleación A380 [4].

PROPIEDADES	
MECÁNICAS	
Resistencia a la tensión	330 MPa
Modulo elástico	71 GPa (10.3x10 ⁶ psi)
Resistencia al corte	195 MPa (28 ksi)
Resistencia a la fatiga	5 × 10 ⁸ ciclos, 138 MPa (20 ksi)
MÁSICAS	
Densidad	2.71 g/cm ³ a 20 °C
TÉRMICAS	
Conductividad térmica	96.2 W/m*K a 25°C
Coefficiente lineal de expansión térmica	De 20 a 200 °C la 380.0 22.0 Um/m * K
Calor específico	963 J/kg · K a 100 °C
Calor latente de fusión	389 kJ/kg
Temperatura de liquidus	595°C
Temperatura de solidus	540 °C
Temperatura de fusión	650 a 760 °C
ELÉCTRICAS	
Conductividad Eléctrica	Volumétrico 27% IACS a 20°C
Resistencia Eléctrica	65nΩ*m a 20°C
FABRICACIÓN	
Temperatura para Die Casting	635 a 705 °C
Temperatura Fusión de Forja	635 a 705°C
Temperatura de Recocido	Para incrementar la ductilidad, 260 a 370 °C mantenido de 4 a 6 horas, enfriamiento en horno o enfriado a temperatura ambiente
Temperatura de relevado de Esfuerzos	175 a 260 °C, mantenido la temperatura de 4 a 6 horas, enfriado en aire.

Otras especificaciones

AMS A380.0: 4291, Former ASTM 380.0:SC84B, A380.0:SC84A, SAE.380.0: 308. A380.0: 306, UNS number 380.0: A03800. A380.0 A13800, Government. A380.0: QQ-A 591, Foreign. 380.0: Canadá, CSA SC84.

1.6 FUNDICIÓN A PRESIÓN

La fundición a presión es un proceso en el cual el metal en estado líquido es inyectado en un molde de acero de dimensiones precisas y en cuyo interior es mantenido bajo presión hasta completar la solidificación. Cuando el material ha solidificado se abre el molde y la pieza fundida es removida (expulsada).

La característica de éste proceso la constituye la obtención de una presión de llenado elevada, por la cual el metal líquido es introducido al molde con alta velocidad. Es evidente que las paredes delgadas, las aristas y las curvas de las piezas a fundir, oponen una resistencia elevada al metal líquido. Estos factores hacen necesario que éste penetre a velocidades relativamente altas en el molde; sin embargo, la velocidad no debe ser tan alta que atomice el metal líquido ni tan baja que solidifique antes de llenar completamente la cavidad del molde.

1.6.1 Máquinas utilizadas en fundición a presión

Se utilizan dos tipos de máquinas en el proceso de inyección a presión, diferentes en lo que a funcionamiento y aplicación se refiere:

1) Máquina de fundición a presión con cámara de Presión caliente; llamada máquina de cámara caliente;

2) Máquina de fundición a presión con cámara de presión fría; llamada máquina de cámara fría.

- Maquinas de inyección de Cámara Caliente

El proceso de cámara caliente se utiliza solamente para la inyección de aleaciones de zinc y otros metales de bajo punto de fusión que no ataquen y erosionen el material refractario de los crisoles, cilindros y pistones del sistema de inyección. El desarrollo de esta tecnología, junto con el uso de materiales avanzados, ha permitido que pueda ser utilizado para ciertas aleaciones de magnesio. Los componentes básicos de una máquina de cámara caliente se ilustran a continuación Figura 1.2

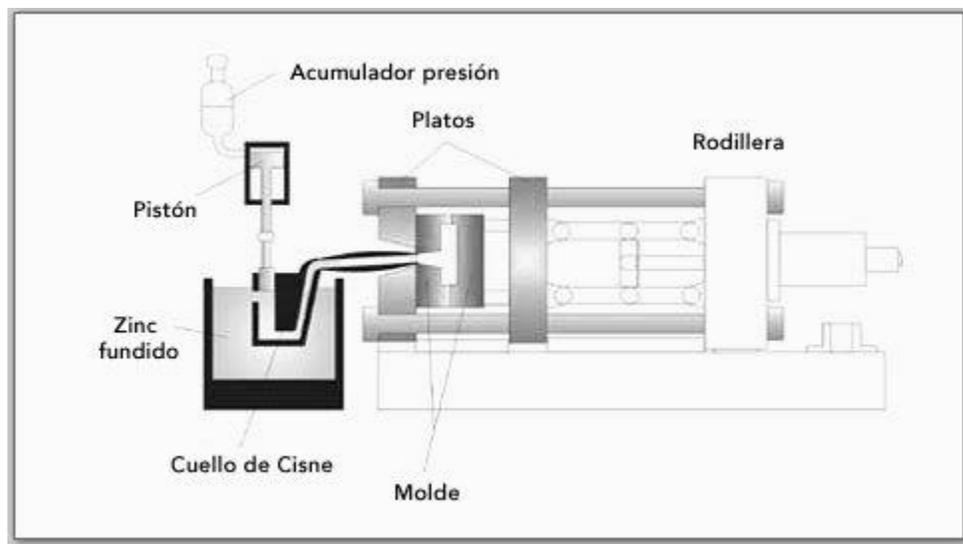


Figura 1.2 Esquema de la máquina de inyección de cámara caliente [5].

En este proceso, el sistema de inyección, incluyendo el cilindro y el pistón, se hallan sumergidos dentro del metal fundido contenido en el crisol, que a su vez es parte integral de la máquina.

- Máquinas de inyección de cámara fría

En este sistema, la cámara de presión se encuentra inmediata a la máquina de inyección, Figura 1.3. Aquí, el metal de colada necesario en cada inyección se vierte de un horno de retención adyacente, mediante una cuchara, en estado pastoso o líquido, en la cámara de presión formada por un cilindro, inmediatamente antes de efectuar su inyección en el molde. La introducción del metal en el molde se efectúa mediante un émbolo operado por un cilindro hidráulico

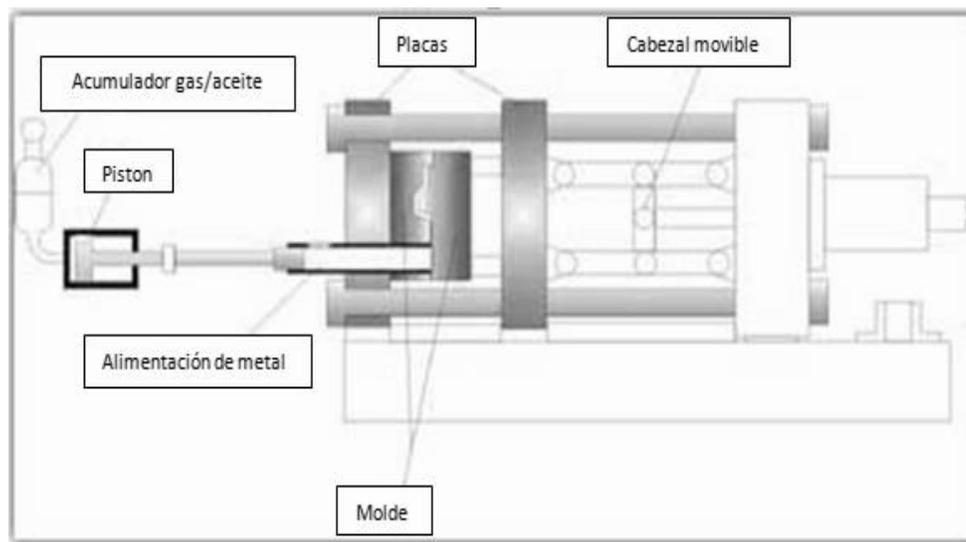


Figura 1.3. Esquema de la máquina de inyección de cámara fría [5].

La cámara es fría, es decir, no está calentada. Naturalmente, en funcionamiento prolongado la cámara de presión fría se calienta y llega a alcanzar aproximadamente la temperatura media del molde. Debido a esto, el cilindro y el émbolo de inyección están sujetos a repetidas expansiones y contracciones en cada inyección, y por tanto, sometidos a esfuerzos mecánicos y térmicos. El émbolo es enfriado por agua para extraer calor y evitar que se sobredimensione cuando está en contacto con el metal.

1.6.2 Características de aleaciones para DC

Aleaciones para colada a presión (DC), demandan alta fluidez, resistencia en caliente, resistencia a la fractura en caliente (hot tearing) y resistencia al soldado (soldering).

Para el proceso de Die Casting no son recomendadas las aleaciones Al-Si usadas para colada en arena, el Mg se debe mantener a bajos niveles para controlar la generación de óxidos, los porcentajes de Fe mayores a 0.70 % para maximizar la resistencia a alta temperatura, facilitar la eyección y minimizar el soldado o adherencia (actualmente estudios de reducción del Fe a 0.25% para incrementar la ductilidad de las piezas)

Las aleaciones hipereutécticas están creciendo debido a sus propiedades y características adecuadas para procesos de DC, especialmente en la industria automotriz.

1.6.3 Hornos de fusión y retención para fundición a presión

Este tipo de horno básicamente tiene la función de fundir la aleación, mantenerla en estado líquido y proveer de metal líquido suficiente para alimentar las máquinas de inyección. Pueden usar como combustible diesel, gas o electricidad; sin embargo, como es esencial que la temperatura de la aleación y de inyección sea regular, se prefiere usar gas o electricidad pues se prestan mejor para la regulación y control.

Para la inyección de piezas se necesita que el proceso se realice de manera continua; por tanto se debe tener metal líquido constante durante un turno de trabajo. Esto encuentra dos obstáculos:

- Fundir la aleación económicamente con el mínimo de variaciones en la calidad metalúrgica.
- Mantener la temperatura necesaria para la colada.

Se divide entonces la fusión en dos operaciones: fusión (propriamente) de la aleación y mantenimiento de la aleación fundida.

La fusión es una operación que demanda una cantidad de energía elevada y la característica de un horno de fusión es asegurar una producción alta (de metal fundido) con bajo consumo específico de energía.

El mantenimiento demanda poca cantidad de energía, y una buena regulación de la temperatura. Como estas dos características no son enteramente compatibles, se evita en la práctica utilizar a la vez el horno de la máquina para fusión y mantenimiento. Se tiene entonces dos tipos de hornos: horno de fusión y horno de mantenimiento.

Los hornos de fusión son, en general, basculantes para permitir fácilmente el llenado de las ollas que transportan la aleación líquida del horno de fusión al horno de la máquina de inyección, llamado horno de mantenimiento (holding). El primer criterio para elegir un horno es el consumo específico de energía, mientras más bajo sea el rendimiento este es más elevado. El segundo criterio a considerar es la pérdida de metal (que se oxida) debido al precio del metal perdido y a riesgos de alteración de la composición química de la aleación.

Entre los diversos tipos de hornos de fusión de aleaciones de aluminio, el más utilizado para la fundición a presión es el horno de reverbero un modelo de este se presenta en la Figura 1.4.

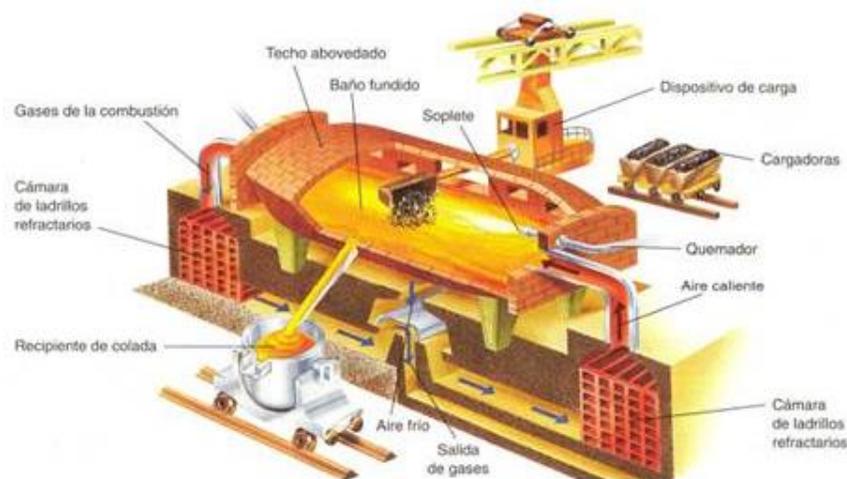


Figura 1.4. Esquema de un horno de reverbero [6].

Los hornos de mantenimiento pueden ser clasificados en tres categorías:

- hornos de crisol calentados por diesel, coque o gas
- hornos de reverbero calentados por combustión directa o resistencias eléctricas
- hornos eléctricos de inducción.

Es importante que la temperatura del baño sea regulada, para esto un termopar es sumergido en el crisol el cual sirve para detectar dicha temperatura y mantenerla en el rango especificado para cada aleación.

1.7 USO DE ARGÓN Y NITRÓGENO PARA LA DESGASIFICACIÓN DE ALUMINIO

Recientemente los procesos de desgasificación de aluminio han logrado substanciales mejoras, estrictas regulaciones en los niveles de contaminación, así como incrementos en las demandas de calidad han obligado a investigar nuevos métodos de desgasificación.

Los desgasificantes tradicionales como cloro, hexacloroetano y diclorodifluorometano (Freón 12), tienden a ser sustituidos debido a su alta emisión de contaminantes que atacan la capa de ozono. Esto ha impulsado el desarrollo de nuevos métodos de desgasificación, tales como, el uso de gases inertes los cuales tienen definitivamente una influencia directa sobre el aumento de la calidad del producto, y en la completa eliminación de los gases contaminantes.

El aluminio y sus aleaciones son muy susceptibles a disolver hidrógeno durante la fusión y la colada. Debido a que la solubilidad del hidrógeno en el aluminio se incrementa exponencialmente al aumentar la

temperatura, como se observa en la Figura 1.5, una gran cantidad de hidrógeno es captado por el aluminio durante la fusión, mismo que es expulsado durante la solidificación formando burbujas; un porcentaje de éstas salen a la atmósfera, pero la cantidad remanente permanece en el aluminio causando por sopladuras en la pieza sólida.

La presencia de inclusiones en el metal, también puede promover la formación de sopladuras ya que éstas actúan como agentes nucleantes para las moléculas de hidrógeno durante la solidificación, de ahí que el objetivo de la desgasificación sea tanto reducir el nivel del hidrógeno en el metal líquido, como el de reducir el número de inclusiones

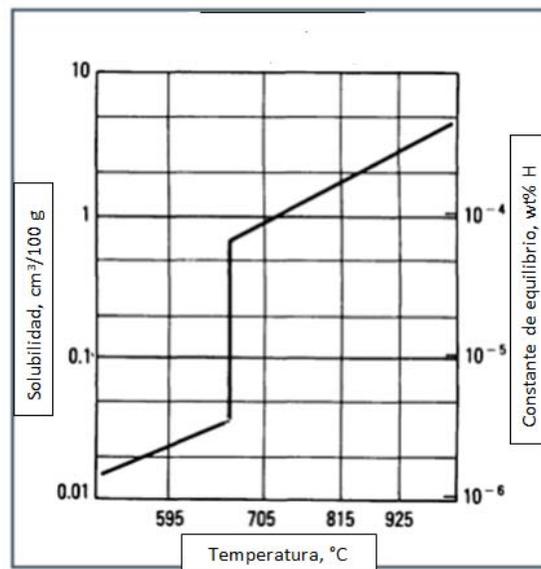
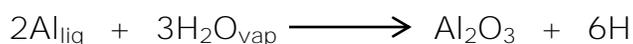


Figura 1.5 Solubilidad de hidrogeno (1 atm) en aluminio [4].

El proceso de desgasificación del aluminio consiste en la inyección de un flujo de gas de arrastre (Argón o Nitrógeno) en el aluminio fundido; dicha inyección debe llevarse a cabo antes de iniciar la colada del metal

fundido. El mecanismo de desgasificación, consiste en la difusión del hidrógeno a las burbujas del gas de adsorción, esto debido a las diferencias de presión parcial de hidrógeno entre el gas de arrastre y el aluminio líquido, lo anterior se lleva a cabo y se representa por la siguiente reacción:



Uno de los parámetros más importantes de la desgasificación del aluminio y que determina el grado de la eficiencia, es el tamaño de la burbuja inyectada; cuando el tamaño de dicha burbuja es grande la desgasificación resulta inadecuada. Figura 1.6 que se presenta a continuación, muestra el efecto del tamaño de la burbuja en la eficiencia del desgasificado. Otros de los factores importantes en la desgasificación del aluminio son: el suministro de un número suficiente de burbujas distribuidas homogéneamente y la protección de la superficie del metal líquido; esto, para evitar la reabsorción del hidrógeno.

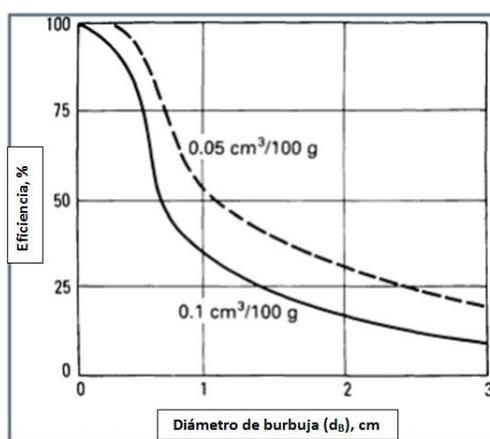


Figura 1.6 Eficiencia de desgasificación (%), como función del tamaño de burbuja para 0.5 cm³/100g y 0.1cm³/100g de Hidrogeno [7].

Los métodos empleados en la desgasificación del aluminio, se diferencian en dos factores: tipo de desgasificante y medio de inyección. Los medios de inyección pueden ser:

- Inyección mediante lanzas.
- Inyección mediante elementos porosos.
- Inyección mediante máquinas de impulsión rotativas.

Tipos de desgasificantes:

Nitrógeno

El Nitrógeno es un gas incoloro, no corrosivo y no flamable, es inerte excepto cuando es calentado a muy altas temperaturas. Como es un gas no corrosivo, no se requieren materiales especiales para su almacenamiento y control. El Nitrógeno ha sido usado como desgasificante con buenos resultados, su costo es inferior al del argón, pero los tiempos de desgasificación son más prolongados y la cantidad usada es mayor, consecuentemente se pueden reducir los niveles de producción y aumentan los costos de energía.

Argón

El argón es un gas monoatómico, incoloro, inodoro, no corrosivo y no flamable. El Argón no reacciona con ningún elemento ni compuesto, por lo que no requiere tanques de almacenamiento ni equipos de control de flujo especiales. Su eficiencia como desgasificante es muy alta y su emisión de contaminantes es nula; la remoción de hidrógeno es mayor y los tiempos de desgasificación son menores que los del nitrógeno, esto dependiendo de cada proceso y condiciones del mismo, así como pureza de los gases utilizados.

1.8 EVALUACIÓN DE POROSIDAD MÉTODO DE PRESIÓN REDUCIDA

La evaluación de porosidad por el método de presión reducida es una técnica cualitativa para evaluar la relación hidrógeno/porosidad. Debe hacerse en forma consistente y metódica. Con equipo en buenas condiciones y alcanzar la presión reducida en un tiempo corto. En general se usa una presión de 60 mm de Hg presión, el vacío es generado por un equipo como el observado en la Figura 1.7.



Figura 1.7 Equipo utilizado para realizar la prueba de presión reducida marca RATE®.

Las pruebas obtenidas se evalúan mediante patrones comparativos y también puede evaluarse en función de la densidad relativa. El ensayo no determina como tal la cantidad de hidrógeno, ya que éste en presencia de inclusiones puede nuclear. Sin embargo es un método rápido y económicamente fiable en la mayoría de los casos, la

evaluación visual consiste en cortar la muestra a la mitad, pulir la muestra mediante métodos de preparación metalográfica y compararlo con patrones de porosidad.

El método de presión reducida se puede utilizar para realizar una evaluación semicuantitativa, los cuales se obtienen calculando la densidad relativa de las muestras enteras de las probetas solidificadas utilizando el equipo de presión reducida. La densidad relativa; consiste en pesar la muestra al aire y luego en agua. La determinación de la densidad relativa se da dividiendo el peso de la probeta pesado al aire entre el peso de la probeta al aire menos el peso en el agua, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad relativa } (\rho_{\text{rel}}) = \frac{\text{Peso de la probeta al aire}}{\text{peso de la probeta al aire} - \text{peso de la probeta en el agua}}$$

La densidad relativa se utiliza como indicador del contenido de hidrógeno en el baño metálico, entre más alta es la densidad relativa, menor es el contenido de hidrógeno disuelto y que posteriormente nuclea formando las indeseables porosidades en la mayoría de procesos.

La Figura 1.8 muestra la relación entre la densidad relativa y el contenido de hidrogeno para una aleación de aluminio comercial, la cual sirve a motivo de comparación para el análisis de contenido de hidrógeno en otras aleaciones base aluminio.

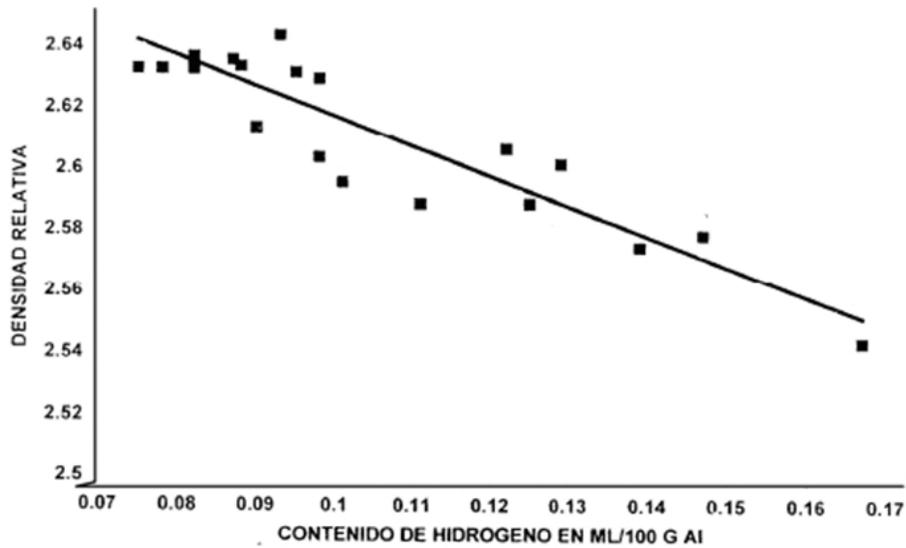


Figura 1.8 Relación entre la densidad relativa y el contenido de hidrógeno para una aleación de aluminio comercial [7].

La Figura 1.9 muestra los patrones comparativos para aleaciones Al-Si, [8] donde el número del centro indica el porcentaje del área de la porosidad y el número inferior indica la densidad relativa. Estos patrones visuales son de fácil y rápida utilización en planta, además de ofrecer una guía visual para los operadores los cuales con una sencilla capacitación pueden interpretar las probetas sin necesidad de personal especializado.

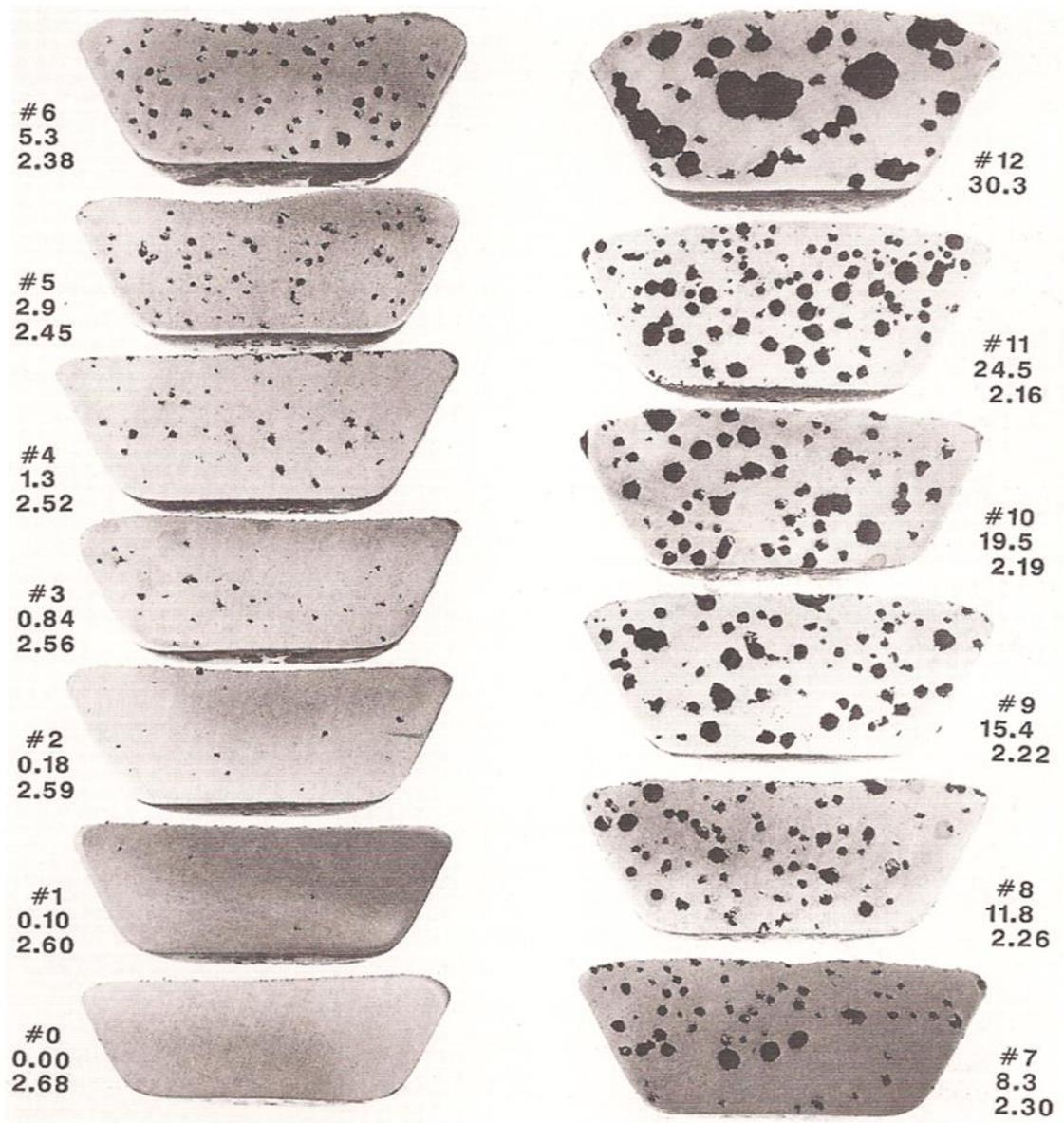


Figura 1.9 Patrones comparativos de porosidad, muestras tomadas de aleación A356 con 100mm de Hg [8].

1.9 USO DE FUNDENTES

Todo proceso de fundición promueve la generación de escoria en la fusión de aluminio, la cual es parte inherente del proceso mismo, sin embargo se sabe que la cantidad de escoria está influenciada, por el tipo de horno, los ajustes del quemador, el tipo de carga metálica al horno, las temperaturas de proceso y las propias condiciones del horno.

La escoria son óxidos de los componentes de la aleación los cuales tienden a atrapar aluminio líquido y también, si no es retirada adecuadamente en los procesos anteriores al vaciado de las piezas, podría ser la causa de inclusiones no metálicas, también la cantidad de esta escoria es un indicador de la cantidad de mermas que se tienen de la carga metálica, el desarrollo de innumerable cantidad de fundentes a lo largo de los últimos 20 años hace necesario que los fundidores de aluminio conozcan las diferentes características de un fundente que dependerán de la parte del proceso donde será utilizado en el manejo del aluminio.

Los óxidos de aluminio generados son películas delgadas de óxidos estos son una parte intrínseca del proceso del manejo del metal fundido la parte benéfica de estas películas de óxido es la de proteger al metal debajo de la película de oxidación adicional, Sin embargo, la parte nociva se observa en las operaciones subsecuentes de transferencia, escoreo, limpieza, desgasificado, y vaciado, donde el metal tiene algún movimiento que rompe las películas promoviendo una oxidación mayor de la aleación y una aglomeración de estas películas, estas operaciones causan que las películas delgadas de óxido de aluminio se rompan y reoxiden formando la escoria espesa que se observa en los hornos de

fusión o en las ollas de transferencia. También el movimiento constante del metal y la interacción física y química con esta escoria, propicia el encapsulamiento de pequeñas gotas de aluminio no oxidado y forma lo que se conoce como una escoria húmeda, el contenido del aluminio metálico en las escorias húmedas es de alrededor de 60% a 80% mientras el restante 40 a 20 % es óxido de aluminio. Esta cantidad de aluminio puede ser reducido hasta niveles menores de 30% con la utilización de técnicas apropiadas de adición de fundente y escoriado.

1.9.1 Efecto en la calidad del metal

Además de la formación y la eliminación de esta escoria, otro problema son las inclusiones no metálicas que se forman en el baño fundido de metal que se suspenden y flotan en el baño. Los óxidos y las impurezas permanecerán suspendidas en el metal líquido porque su estructura es porosa y algunas veces contienen algún gas incluido. Este problema podría empeorarse si se tiene un proceso de fusión inadecuado principalmente en hornos de reverbero donde un mal ajuste en los quemadores puede oxidar demasiado la carga metálica en el periodo de fusión, aun cuándo se parta de aluminio primario. También los retornos de metal (del sistema de llenado del molde y mazarotas), normalmente tienen una mayor cantidad de inclusiones metálicas y no metálicas, por lo que según el tipo y el origen del metal de retorno o chatarras externas y a las condiciones de almacenamiento, el metal puede contener las cantidades considerables de ambas impurezas metálicas y no metálicas.

En la Figura 1.10 se muestran los diferentes tipos de óxido encontrados en las fundiciones de aluminio.

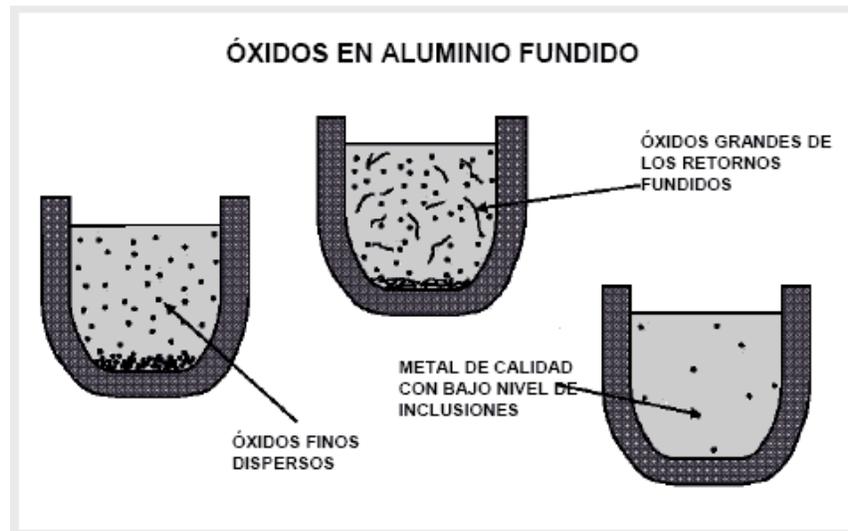


Figura 1.10 Diferentes tipos de óxidos suspendidos en aluminio fundido [6].

1.9.2 Tipos de fundente

En la fusión y manejo del aluminio, se reconocen 5 tipos de fundentes necesarios en todo el proceso.

- Fundentes de cobertura
- Fundentes de escoriado
- Fundentes de limpieza
- Fundentes para limpieza de paredes (Hornos)
- Fundentes especiales (Modificadores, refinadores)

Cada uno de estos fundentes tiene una aplicación específica y por tanto características bien definidas las cuales deben ser perfectamente

comprendidas para poder desarrollar la técnica más apropiada y efectiva para el proceso en el que vayan a ser aplicados. Una técnica bien desarrollada debe incluir los siguientes puntos:

- Fundente adecuado (cobertura, escoriado, limpieza etc.)
- Cantidad de fundente definida mediante análisis de escorias y calidad de metal.
- Momento de adición
- Forma de adición, dependiendo del equipo o el proceso que se trate (limpieza en las ollas, escoreo, cobertura en desgasificado, limpieza de paredes, etc.)
- Establecimiento de un buen contacto del fundente con la escoria, el metal, las paredes, según sea el caso y el objetivo que se esté buscando.

1.9.3 Fundentes de Cobertura

Originalmente este tipo de fundentes estaba dirigido principalmente a las fundiciones de aluminio primario donde la función principal es crear una barrera líquida entre la atmósfera del horno (las flamas), y el aluminio fundido. El fundente ayudará en la prevención de la oxidación del metal y evitará la absorción de hidrógeno. Una de sus características era su temperatura de fusión que oscila entre los 420 a 600 °C. Algunas fundiciones reportaron una mayor interacción química con los refractarios de este tipo de fundentes de carácter líquido y hoy en día se encuentran en el mercado fundentes de carácter sólido, que forman una buena barrera de protección con la atmósfera de los hornos con poca

interacción química con los refractarios de los hornos con excelente desempeño en la fusión de chatarra delgada de aluminio, rebabas, latas, etc. reduciendo las pérdidas por oxidación (mermas).

1.9.4 Fundentes de Escoreo

Los fundentes de escoreo sirven para aglomerar y facilitar el retiro de la escoria del metal fundido, la escoria que se encuentra en los hornos al final de la fusión, contiene aluminio líquido atrapado, la función principal de estos fundentes es separar este aluminio de la escoria.

Esto se lleva a cabo mediante la exotérmicidad controlada del fundente, el calor que se genera mejora la "mojabilidad" de la escoria y se produce un efecto de coalescencia que hace que las pequeñas gotas de aluminio escurran formando gotas más grandes que fácilmente se separan de la escoria para integrarse al metal base. Es importante en estos fundentes que la exotérmicidad no sea excesiva ya que parte de esta reacción se lleva a efecto en un medio oxidante que en exceso **puede "quemar" u oxidar las gotas de aluminio que se requiere recuperar o incluso oxidar metal de la interfase con la escoria.**

Existen en el mercado infinidad de marcas con características exotérmicas, la recomendación es evaluar el fundente midiendo el porcentaje de aluminio en la escoria, la cantidad de escoria generada y la compatibilidad química del fundente con la aleación base, sobre todo en aquellas que se requieren bajos niveles de Ca, Na, u otros elementos.

1.9.5 Fundentes de limpieza

Los fundentes de limpieza tiene como objetivo principal el de ayudar a eliminar los óxidos del metal un fundente diseñado específicamente para la limpieza del metal promueve una escoria ligeramente menos seca que un fundente de escoreo ya que su función es reaccionar en el seno del metal y no tanto en la escoria que se encuentra en la superficie.

Todos los fundentes deben ser agitados enérgicamente con la escoria o con el metal para que se establezca un contacto íntimo y se lleven a cabo las reacciones buscadas y los efectos deseados, bien sea en la escoria o en el metal, por lo que se recomienda contar con las herramientas necesaria para llevar a cabo la agitación del fundente al momento de la adición.

1.9.6 Fundentes de limpieza en Hornos

Estos fundentes están diseñados para ablandar y ayudar en la eliminación de las aglomeraciones de óxidos sobre las paredes de los **hornos que tienden a reducir la capacidad de los hornos y "ensuciar"**, más el metal, dada la gran exotérmicidad de estos productos no se recomienda agregarlos a la escoria del metal, para la limpieza de paredes se debe bajar el nivel de metal a manera de dejar libre la línea de escoria para poder aplicar el fundente abajo y arriba de la línea normal de nivel de metal, después de la limpieza se debe retirar perfectamente la escoria y adicionar fundente de cobertura, es muy importante agregar el fundente de limpieza de paredes con equipo de protección adecuado, como son tanques presurizados o pistolas de

aspersión , la presión de aire en estos equipos es crítica ya que el fundente debe atravesar el tubo de aplicación con una velocidad tal que no dé tiempo a que reaccione dentro del tubo y lo tape. El error más común en la limpieza de paredes es agregar poco fundente y no escoriar lo suficiente, lo que provoca que queden muchos óxidos en el seno del metal, y estos se incrementaran con las fusiones subsecuentes.

1.9.7 Fundentes especiales

Existen fundentes especiales, que suelen ser inyectados al metal para diversos propósitos el ejemplo más ilustrativo de este tipo de aplicaciones son los equipos de inyección de fundente que cuentan hasta con 3 depósitos de fundente con los que se lleva a cabo una limpieza profunda del metal, después una modificación de la aleación y por ultimo una refinación de grano, todo ello inyectando fundente durante el periodo de desgasificado.

Algunas otras especialidades son fundentes son los eliminadores de magnesio, eliminadores de calcio y los fundentes libres de calcio o sodio.

CAPÍTULO 2

CONTROL DE CALIDAD APLICABLE EN PLANTA BSI

2.1 CONTROLES DE CALIDAD DE MATERIA PRIMA Y MANEJO DE ALUMINIO LÍQUIDO EN BSI

Actualmente la planta BSI Celaya esta carente de metodologías de control de calidad de las materias primas, así como deficiencia el control en el manejo del aluminio líquido, lo que repercute en una menor eficiencia del proceso. Por tanto es importante establecer metodologías de control de calidad de las materias primas así como del metal líquido.

Para llevar a cabo dicho control del metal, es aplicable utilizar en planta algunos controles de calidad, utilizando la infraestructura actual y el personal de piso. Cabe mencionar que la empresa cuenta con un pequeño laboratorio metalúrgico el cual actualmente está en desuso, así como un equipo para realizar ensayos de presión reducida el cual está en buenas condiciones de trabajo y calibrado frecuentemente.

2.2 INSPECCIÓN VISUAL DE LA MATERIA PRIMA, RETORNOS, FUNDENTES Y HERRAMENTALES

La inspección visual es uno de los primeros filtros para lograr una mejora en la calidad de cualquier proceso, puede ser aplicada por cualquier personal capacitado. La inspección visual consta de una

observación de la materia prima, lingotes, retornos, así como de fundentes y herramental, en busca de anomalías o deficiencias en el almacenado, mantenimiento y limpieza en los mismos, que pueda perjudicar en la calidad del metal.

En la inspección visual se pueden detectar lotes o piezas de lingotes con gran contenido de escoria, retornos con excesiva suciedad, fundentes almacenados en lugares con alta humedad, herramental inapropiado para el proceso o sucio.

2.3 EVALUACIÓN VISUAL DE LA ESCORIA

Cuando el tratamiento de escorificación es incorrecto, las escorias presentan alto contenido metálico, lo que directamente representa una merma de material, un tratamiento correcto presenta escorias sin aglomeraciones de metal, se observan cómo polvos o cenizas. Una observación de la escoria es necesaria para determinar si el proceso de escorificación se está llevando de manera adecuada y si no es así poder hacer los ajustes pertinentes a modo de corregirlos oportunamente. En la Figura 2.1 se presentan muestras de escorias con tratamiento incorrecto y con tratamiento correcto.

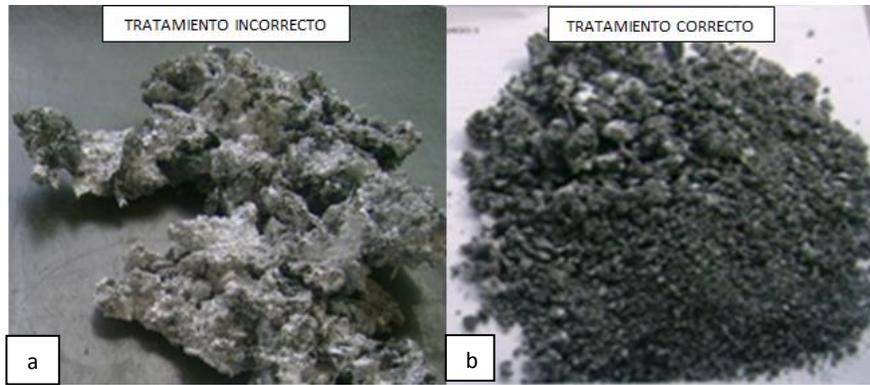


Figura 2.1 escorias con tratamiento incorrecto (a) y correcto (b).

2.4 ENSAYOS METALGRÁFICOS

La metalografía se puede definir como una técnica de preparación de la superficie de un metal para estudiar las características estructurales (micro y macroscópicas), que definen la constitución de los metales y sus aleaciones, las herramientas básicas para este análisis es la microscopía óptica y electrónica. Las etapas básicas para la preparación metalográfica son: muestreo, montaje, desbaste, pulido y ataque.

En el proceso de tratamiento de metal líquido, no es necesario conocer la microestructura del metal ya que este aún pasará por el proceso de inyección a presión, lo que modificaría su microestructura, sin embargo un análisis metalográfico puede ser útil para determinar si la limpieza del metal es adecuada o en su defecto se encuentran contenido de escorias, impurezas y/o inclusiones.

2.5 EVALUACIÓN DE POROSIDAD

Considerando la infraestructura de la empresa, se puede utilizar el equipo de presión reducida, en el que la muestra es tomada con un crisol de acero previamente cubierto con pintura refractaria, la muestra se puede tomar en la zona de retención del horno, la olla o en los hornos de retención, la muestra tomada se deja solidificar bajo presión reducida (60 mm de Hg. Aprox). A medida que la presión reduce, las sopladuras se expanden y producen poros mayores comparados con los que se forman por solidificación bajo presión atmosférica. La porosidad de la probeta se evalúa por observación visual en un corte central y luego compararlas con el patrón de porosidad presentado en la Figura 1.9, esta comparación puede llevarse a cabo después de pulir ambas secciones de la muestra, con métodos de preparación metalográfica.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA Y RESULTADOS ETAPA 1

3.1 METODOLOGÍA ETAPA 1 DE DIAGNÓSTICO DEL PROCESO

El proyecto se llevó a cabo en dos etapas:

Etapa 1

Revisión de las hojas de proceso actuales de BSI, dando seguimiento al proceso tal y como se lleva a cabo cotidianamente, si no hay hojas de proceso se recabara información directamente de los operadores o personal de BSI.

Evaluación de la calidad del metal con las técnicas usadas actualmente en la empresa. Para este fin se siguió la siguiente metodología.

Para realizar una evaluación estadística del proceso se dio seguimiento a 10 cargas y fusiones, donde se consideraron dos puntos de muestreo.

El primer punto de muestreo el cual se observa en la Figura 3.1, corresponde al metal vaciado en la olla de transferencia directamente desde el horno, donde el parámetro a medir es la temperatura de colada, posteriormente se tomaron muestras del metal solidificándolas en el equipo de presión reducida, con un vacío de 60 mm de Hg para determinación de porosidad.

El segundo punto de muestreo Figura 3.1, se realizó en la olla de transferencia después del tratamiento del metal líquido (desgasificación y escorificación), donde los parámetros medidos son: cantidad de fundente utilizado, tipo de gas, flujo, tiempo de desgasificación y

temperatura después del tratamiento. De manera similar se toman muestras solidificadas al vacío.

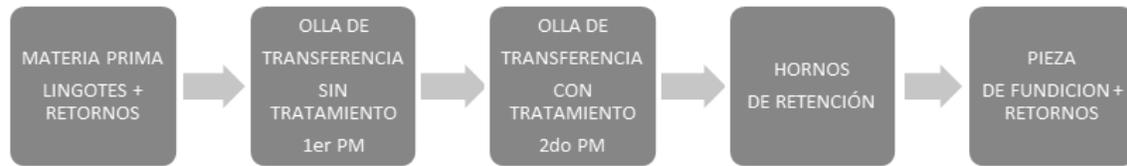


Figura 3.1 Diagrama del proceso de fundición en BSI, donde PM son los puntos de muestreo.
*Donde PM es punto de muestreo
**Tratamiento (desgasificación y escorificación)

A las muestras para análisis de porosidad se tomaron de acuerdo a lo estipulado en el capítulo 2.5, una vez adquiridas se les realizó un análisis metalúrgico, el cual comprende la revisión visual, análisis químico y metalográfico, evaluación de porosidad por medio de la prueba de presión reducida. Adicionalmente se realizó la evaluación de algunas muestras de materia prima (lingotes y retornos). El análisis metalográfico servirá para valorar cómo mejora el tratamiento de metal líquido a la calidad metalúrgica del material, para esto las muestras son tomadas mediante el equipo de presión reducida, esto para facilitar el análisis de las muestras ya que a veces es difícil distinguir entre sopladuras y microrechupes o huecos dejados por inclusiones desprendidas mediante la preparación metalográfico, tomando las muestras de esta manera las porosidades encontradas solo serían las debidas a la concentración de hidrógeno disuelto y no a las causadas por la contracción natural en la solidificación del metal, así se pueden observar zonas donde se concentran impurezas como óxidos, escorias o inclusiones no metálicas y diferenciarlas claramente de las porosidades.

3.2 RESULTADOS DE LA ETAPA DE DIAGNÓSTICO

Evaluación de la Composición química del lingote.

La materia prima con la que trabaja la empresa es lingote de la aleación A380 cuya composición requerida por la empresa bajo norma interna se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química requerida del lingote bajo norma interna BSI, los datos están en % peso

	%Si	%Cu	%Mg	%Fe	%Mn*	%Ni	%Zn	%Ti	%Ca	%Pb	%Sn	%Cr
MÍNIMO	7.50	3.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
MÁXIMO	9.50	4.0	0.50	1.20	0.50	0.50	3.00	0.50	0.005	0.25	0.35	0.05

Los proveedores de lingotes con los que trabaja actualmente la empresa son tres, la composición promedio de varios lotes se muestra en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4.

TECNOLOGÍAS Y METALES EL TEJÓN

Tabla 3.2 Composición química promedio de 12 lotes de Tecnologías y Metales el Tejón.

	%Si	%Cu	%Mg	%Fe	%Mn	%Ni	%Zn
X	8.53	3.35	0.33	0.84	0.14	0.19	1.22
σ^* (\pm)	0.38	0.19	0.04	0.13	0.04	0.04	0.45

* σ es la desviación estándar

INDUSTRIAL LIGAS METÁLICAS S.A DE C.V

Tabla 3.3 Composición química de 10 lotes de industrial ligas metálicas S.A de C.V

	%Si	%Cu	%Mg	%Fe	%Mn	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
x	8.66	3.12	0.37	0.67	0.14	0.13	2.08	0.046	0.020	0.045
σ^* (\pm)	0.22	0.12	0.06	0.10	0.02	0.02	0.63	0.002	0.005	0.006

GRUPO INDUSTRIAL HAC, S.A DE C.V

3.4 Composición química de 5 lotes de grupo industrial HAC S.A de C.V

	%Si	%Cu	%Mg	%Fe	%Mn	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
X	8.27	3.67	0.20	0.85	0.21	0.08	2.08	0.05	0.055	0.055
σ (\pm)	0.18	0.16	0.05	0.12	0.06	0.008	0.70	0.004	0.004	0.002

En relación a los proveedores de lingotes se comenta lo siguiente:

El Grupo industrial HAC S.A de C.V es el proveedor con el cual actualmente la empresa BSI adquiere la mayor parte de los lingotes. Hay lotes de materias primas que permanecen en el almacén por largos periodos de tiempo debido a que cuando llegan los nuevos pedidos los lotes rezagados no son sacados a piso antes que los nuevos. Esto

ocasiona la oxidación de estos lotes los cuales se observan considerablemente más opacos.

La aceptación o rechazo de los lotes de lingote A380 se basa únicamente en que los certificados de composición química presentados por el proveedor cumplan con lo establecido por la norma interna BSI. Sin embargo se encontraron lingotes que presentaban la composición química requerida por la empresa, pero al hacer una inspección visual estos tenían visiblemente altos contenidos de escoria en su superficie como se puede observar en la figura 3.2.



Figura 3.2 Imagen de lingote con escoria encontrado en BSI

Cabe mencionar que los reportes de composición química que presentan todos los proveedores de lingote se encuentran dentro de los intervalos requeridos por la norma interna BSI (Tabla 3.1). No obstante el proveedor Ligas Metálicas S.A de C.V, presenta dentro de sus reportes de composiciones químicas un $\%Fe = 0.67 \pm 0.10$. Es importante mantener el $\%Fe$ mayor al 0.8% con el fin de evitar que las piezas una

vez solidificadas se pegan al molde "soldering", por lo que no es recomendable seguir manejando los lingotes de este proveedor, a menos que modifique la composición de Fe, de tal manera que sea afín para el proceso de fundición a presión. Lo anterior debe quedar estipulado en la orden de composición química interna de BSI.

Fundentes

Se utilizan dos tipos de fundentes:

1.- Fundente para escorificar el metal líquido en la olla de transferencia Coveral[®]75

Componentes: Na_3AlF_6 , Na_2SiF_6 85%, NaHSO_4 , NaCl , Otros Balance

Datos físicos: Apariencia color rosado

Punto de fusión 700 °C

Solubilidad en agua 90%

Cantidad recomendada a usar: 1.2 – 1.6 Kg/m² de área por cubrir.

Tiempo de reacción de 1 a 2 min.

2.- Flux para limpieza del horno de reverbero Coveral[®]OR-1

Datos físicos: Apariencia color rojo

Cantidad recomendada a usar: No estipulada por el proveedor.

De este fundente el proveedor no proporciona composición química.

Los fundentes se almacenan en bolsas cerradas, el lugar está alejado de fuentes de humedad, sin embargo cuando se lleva al área de fundición se almacena en recipientes abiertos y expuestos a fuentes de humedad atmosférica. El fundente utilizado para el tratamiento de metal líquido es

ligeramente exotérmico y está indicado como escoriador, su propósito es retirar escoria del metal líquido aglomerándola para su fácil remoción con una cuchara de acero con orificios, previamente cubierta con pintura refractaria. El fundente utilizado en el horno de reverbero es fuertemente exotérmico, esta característica es muy útil para ablandar la escoria acumulada en las paredes de horno, la cual es retirada con un rastrillo igualmente protegido con pintura.

Retornos

El área reporta que usan cerca del 70% de retornos, esto debido a que las piezas hechas por Die Casting son pequeñas y complejas y el sistema de colada es cerca del 60 % a esto se le suman las piezas rechazadas por defectos en los diversos puntos de control de calidad. Los retornos no reciben un tratamiento de limpieza previo a cargarlos al horno.

No se encontraron datos específicos y confiables de la cantidad neta de retornos utilizados, por ejemplo que porcentaje corresponde a los sistemas de colada, cuántos a defectos del proceso de fundición y cuántos corresponden a retornos debidos a defectos de conformado mecánico.

Acondicionamiento del horno

El horno de fusión utilizado, es un horno de reverbero marca Hormesa® con capacidad de 2 toneladas en fusión y 2 toneladas en retención, usa como combustible gas LP. El horno trabaja de manera continua de lunes 12:00 am a jueves 6:00 pm.

La carga de retornos y lingotes se realiza por la parte superior del horno, una vez que se abre la compuerta de carga. La cantidad de retornos y lingotes a cargar depende de la producción y disponibilidad de lingotes en existencia, un detalle del horno de reverbero utilizado en BSI para la fundición de la aleación A380 se encuentra en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Detalle horno de reverbero de BSI.

Una vez cargada la materia prima en el horno, ésta se precalienta con los gases los cuales están a una temperatura aproximada de 450°C. Posteriormente la carga en forma pastosa desciende a la zona de fusión la cual está programada para alcanzar 820°C, una vez que el aluminio

esta fundido llega a la zona de mantenimiento. La empresa tiene un rango de control de temperatura del **"baño de metal líquido"** la cual oscila entre 750°C y 830°C.

Se realizaron 10 mediciones **de las temperaturas del "baño"**, estas mediciones se hicieron en la zona de retención del horno de reverbero y se dio seguimiento a cada una de las coladas hasta los hornos de retención de las máquinas de inyección a presión donde también se midió temperatura también, las mediciones se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Temperaturas de metal líquido en bóveda de retención del horno.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatura en la zona de retención del horno de fusión (°C)	789.0	787.0	788.6	789.0	785.0	804.3	790.0	801.2	795.0	800.3
Temperatura en los hornos de retención de las máquinas de inyección (°C)	687.0	647.0	659.3	650.2	673.6	654.0	657.2	680.0	690.6	675.0

En promedio la temperatura del metal líquido en la zona de retención del horno de fusión es: 793.0 °C ± 6.8 °C y en los hornos de retención de las máquinas de inyección fue de: 667.5 ± 15.8°C.

Limpieza del horno

El horno se limpia alrededor de 2 veces cada turno. La limpieza se lleva a cabo con el fundente Coveral[®]OR-1 este se aplica esparciendo directamente una o dos cucharas con fundente directamente dentro del horno o metiendo una cantidad dentro de una bolsa plástica, la cual contiene alrededor de 2 Kg de fundente. En 3 minutos aproximadamente se lleva a cabo la reacción del fundente, posteriormente se procede a retirar la escoria utilizando herramientas como rastrillos y cucharas perforadas. La limpieza se lleva a cabo por dos compuertas como se observa en el siguiente esquema (Figura 3.4):

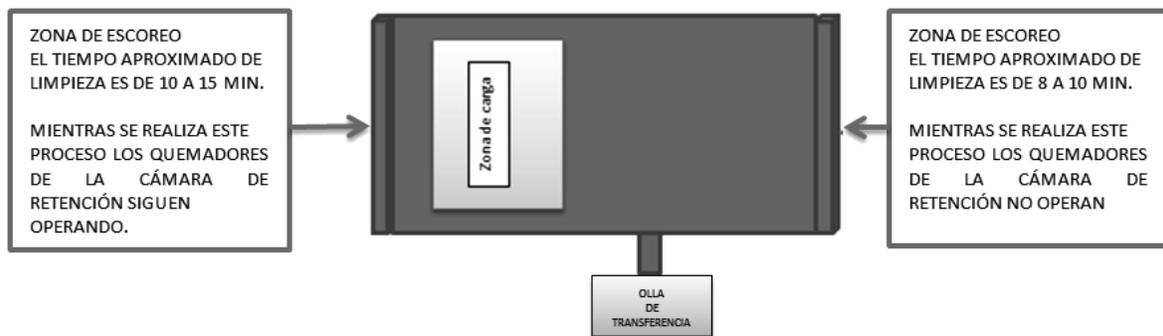


Figura 3.4 Vista superior del horno de fusión.

Llenado de la olla de tratamiento

Una vez que se requiere metal para los hornos de retención realiza el llenado de la olla de transferencia, la cual se realiza basculando el horno de fusión, esta operación dura de 20 a 30 segundos. La olla se llena al 90%, las dimensiones de la olla se muestran en la Figura 3.5. La olla

tiene un volumen de 0.1797 m^3 el cual equivale a una carga de alrededor de 438 Kg de metal líquido, considerando el 90% de llenado.

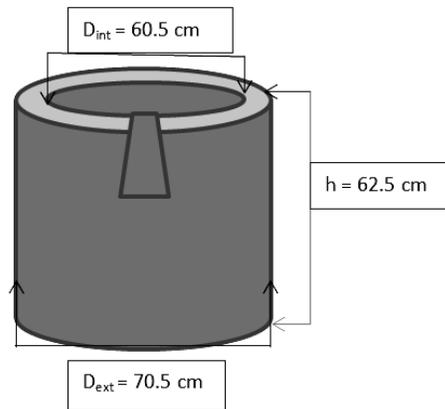


Figura 3.5 Esquema representativo de la olla de transferencia.

Tratamientos del metal líquido

En el área de fundición de BSI solo se trabaja con la aleación A380, los únicos tratamientos de metal líquido que se realizan son la desgasificación y posteriormente la escorificación por medio de fundentes.

1.- Desgasificación se realiza con Nitrógeno grado industrial, el cual se aplica mediante una lanza (tubo) de acero de aproximadamente 1.4 m de longitud y de diámetro interno 1 pulgada. El tiempo de desgasificación oscila entre 7 a 10 minutos. La manera de desgasificar es introducir la lanza dentro de la olla dejándola en una sola posición durante el tiempo de tratamiento, el flujo de nitrógeno empleado es de $20 \text{ ft}^3/\text{h}$, este es medido mediante un flujómetro el cual es regularmente calibrado.

2.- Después de la desgasificación se procede a escorificar, se utiliza el fundente Coveral[®]75, el cual se aplica la cantidad de ½ cucharada correspondiente a una masa de 1000 Kg ± 0.1Kg, este se distribuye de manera no homogénea sobre la superficie de metal, se espera a que reaccione y se agita con una cuchara con pequeños orificios, posteriormente se retira la escoria con la misma.

En todos los herramentales utilizan pintura refractaria marca Wolfrakote[®] top paste, la cual es base grafito.

Resultados de la medición de los parámetros en los puntos de muestreo establecidos.

Los dos puntos de muestreo establecidos para la etapa de diagnóstico fueron en la olla de colada sin tratamientos y en la misma olla después de los tratamientos (Figura 3.1). Los parámetros medibles fueron, en el primer punto de muestreo temperatura, la cual es medida con un lanza equipada con un termopar tipo K (Cromel-Alumel), y es periódicamente calibrado y la medición cualitativa de porosidad, utilizando el patrón comparativo (Figura 1.9). En el segundo punto de muestreo los patrones medidos fueron: flujo de gas, tiempo de desgasificación, cantidad de fundente utilizado y temperatura.

Los resultados obtenidos se resumen en las Tablas 3.6 y 3.7.

Tabla 3.6 Resultados punto de muestreo 1, olla sin tratamiento.

Muestra	Temperatura (°C)	Porosidad de acuerdo a patrón comparativo (Fig. 1.8)
1	763	#8 11.8 2.26
2	790	#8 11.8 2.26
3	796	#8 11.8 2.26
4	780	#8 11.8 2.26
5	751	#9 15.4 2.22
6	802	#7 8.3 2.30
7	805	#9 15.4 2.22
8	795	#8 11.8 2.26
9	790	#9 15.4 2.22
10	800	#7 8.3 2.30
Promedio	787 ± 18	#7 - #9 8.3 - 15.4 2.30 - 2.22

Tabla 3.7 Resultados punto de muestreo 2, olla con tratamiento (actual BSI).

Muestra	Flujo (ft ³ /h)	Tiempo (min)	Cantidad De fundente (g)	Temperatura (°C)	Porosidad de acuerdo a patrón (Fig. 1.8)
1	20	7	1100	695	#6 5.3 2.38
2	20	8	948	688	#6 5.3 2.38
3	20	10	842	663	#5 2.9 2.45
4	20	8	1009	698	#6 5.3 2.38
5	20	8	1050	680	#6 5.3 2.38
6	20	7	899	702	#5 2.9 2.45
7	20	7	1001	707	#5 2.9 2.45
8	20	10	950	668	#5 2.9 2.45
9	20	9	968	690	#6 5.3 2.38
10	20	9	1200	700	#5 2.9 2.45
Promedio	20	8 ± 1	1000 ± 100	689 ± 15	#5 - #6 2.9 - 5.3 2.45 - 2.38

En la Tabla 3.8 se resumen las condiciones actuales de operación y la porosidad y pérdida de temperatura.

Tabla 3.8 Parámetros con los que trabaja actualmente BSI y resultados medidos con dichos parámetros.

Fundente (g)	Flujo ft ³ /h	Tipo de gas	Tiempo de desgasificación	Porosidad De acuerdo a patrón	$\Delta T =$ (temperatura antes de tratamiento - temperatura después de tratamiento)
1000 \pm 100	20	Nitrógeno	8 min	#5 - #6 2.9 - 5.3 2.45 - 2.38	98 °C \pm 21°C

Adicionalmente se llevó a cabo análisis químico de algunos lingotes, así como de muestras de la aleación sin tratamiento y después del tratamiento de desgasificación y finalmente del metal en los hornos de retención. Los análisis fueron efectuados en las instalaciones de la UNAM por un espectrómetro de emisión atómica. Los resultados se muestran en las Tablas 3.9 y 3.10.

Tabla 3.9 Comparación de composiciones químicas entre los análisis hechos por los proveedores y análisis de la UNAM, para la materia prima (lingotes) de dos proveedores.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Otros	Al
ANSI	7.50-9.50	1.30	3.00-4.00	0.50 Max	0.10 Max	0.50 Max	3.0 Max	0.35 Max	----	0.50	B
BSI	7.50-9.50	1.20	3.00-4.00	0.50 Max	0.50 Max	0.50 Max	3.0 Max	0.35 Max	0.5 Max	0.30	B
Ind. Ligas Met.	8.13	1.08	3.03	0.26	0.06	0.04	0.81	0.02	0.01	0.35	B
UNAM	8.26	1.12	2.95	0.19	0.21	0.07	2.38	0.02	----	----	B
Grupo Ind. HAC	8.27	0.78	3.24	0.25	0.20	0.07	0.94	0.02	0.04	----	B
UNAM	7.85	0.87	3.18	0.20	0.15	0.09	0.09	0.03	0.05	----	B

Tabla 3.10 Seguimiento de la composición química en las diferentes etapas de fusión (evaluados en la UNAM).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni
Materia Prima (lingote)	7.85	0.87	3.18	0.20	0.15	1.67	0.93
Olla S/T*	8.18	0.89	3.52	0.19	0.08	1.50	0.09
Olla C/T**	8.09	0.87	3.45	0.20	0.08	1.50	0.08
Retención	8.55	0.91	3.67	0.20	0.08	1.57	0.09

*S/T, sin tratamiento

**C/T, con tratamientos (desgasificación y escorificación)

Los datos resumidos en la Tabla 3.9, donde se muestra la comparación de los análisis entregados por dos proveedores y comparados con los hechos en la UNAM, estos muestran estar dentro de la norma interna de BSI y se puede confiar en los análisis entregados por estos proveedores, pero sería recomendable hacer periódicamente análisis químicos por un tercero.

En la Tabla 3.10 se hizo un seguimiento de una carga desde la materia prima (lingote) hasta el metal depositado en los hornos de retención. En esta tabla se puede observar que hay variaciones en la composición química en cada parte del proceso, la disminución de elementos reactivos como el Mg es de esperarse después de la fusión, no obstante **hay elementos que "aumentan" su porcentaje en hornos de retención** con respecto a la olla de transferencia, esto se le puede atribuir a que siempre queda un remanente de metal líquido de aproximadamente 1/3 en los hornos de retención.

Las Figuras 3.6 y 3.7 muestran micrografías de las aleaciones antes y después de los tratamientos de desgasificación y escorificación.

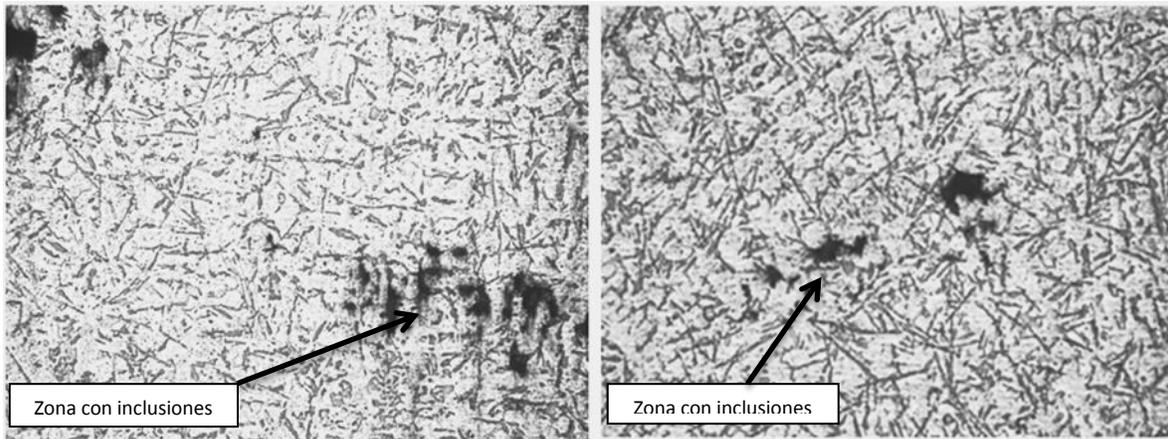


Figura 3.6 Micrografía de la aleación A380, sin tratamiento a 200x

Figura 3.7 Micrografía de la aleación A380 después del tratamiento (BSI) a 200x

Se observa la aleación antes y después del tratamiento del metal líquido, con los parámetros de la Tabla 3.8, donde se percibe que con el tratamiento hecho en BSI se encuentran zonas con impurezas, esto se encontró en todas las piezas analizadas. Aunque este estudio está centrado principalmente en una reducción del contenido de hidrógeno disuelto, no obstante la presencia de impurezas e inclusiones sirven como agentes nucleantes que pueden conllevar a la formación de porosidades.

El proceso de Die Casting está diseñado para minimizar el contenido de inclusiones e impurezas, esto lo logra mediante el control de las velocidades de inyección y un adecuado sistema de colada, en el cual las piezas solo ocupan alrededor del 40% y hay piezas más complejas que solo corresponden al 20% del modelo, por lo que la mayoría de impurezas se quedan retenidas en el sistema de colada a esto le sumamos que las piezas trabajadas en BSI no requieren ser sometidas a

altos esfuerzos mecánicos. Por lo tanto el contenido de inclusiones e impurezas no es el parámetro más importante a tratar, sin embargo es importante desde el punto de vista metalúrgico reducir el contenido de impurezas e inclusiones no deseadas por lo que en la figura 3.6 se puede observar que sin tratamiento del metal líquido se observa lo que parecería ser escoria atrapada, en la Figura 3.7 el material presenta una mejora con respecto al metal sin tratamiento no obstante aún se aprecian zonas con cierto contenido de impurezas.

Por otro lado en el proceso de inyección a presión es de suma importancia reducir la cantidad de hidrógeno disuelto, ya que al solidificar la pieza este se manifiesta como sopladuras y otro remanente puede quedar disuelto en el metal sólido en forma monoatómica (H), que mediante mecanismos de difusión pueden formarse moléculas de H₂ gaseoso, que aparecen en el metal sólido a manera de ampollas, así como las sopladuras de tamaño muy pequeño se pueden expandir debido a los ciclos térmicos, si a esto se le suma el hecho que algunas de las piezas fabricadas en BSI son quemadores, los cuales son sometidos a ciclos de calentamiento en su uso cotidiano los mecanismos de difusión pueden verse acelerados y provocar ampollamientos en piezas ya estando con el consumidor final, lo que acarrearía mayores pérdidas de acuerdo a la cadena de valor.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA Y RESULTADOS ETAPA 2

4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO ACTUAL EN BSI

En base a los resultados del diagnóstico se propuso un diseño de experimentos con la finalidad de encontrar las condiciones de mejora del proceso.

Los factores a estudiar son:

- Cantidad de fundente (g)
- Tipo de gas (Nitrógeno, Nitrógeno de rehúso, argón)
- Flujo de gas (20 ft³/h)
- Tiempo de desgasificación (min)

Los parámetros de respuesta a medir son:

Porosidad de acuerdo a patrón (Figura 1.9).

Caída de temperatura (ΔT (°C) = temperatura antes de tratamiento – temperatura después del tratamiento)

Lo anterior se presenta en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Esquema de las variables y respuestas a medir.

Para estudiar el proceso de tratamiento del metal líquido en la olla se realizó un diseño de experimentos donde los factores estudiados y sus niveles se resumen en la Tabla 4.1. Los factores seleccionados en este trabajo tienen influencia sobre la desgasificación del baño metálico [4] y los niveles de estudio fueron elegidos de acuerdo a la recomendación de los proveedores (en el caso del fundente), ingenieros y personal de piso que están familiarizados con el proceso, así como de pruebas preliminares que llevaron a cabo.

De acuerdo a la Tabla 4.1 hay 4 factores con 3 niveles cada uno por lo que se optó, en este escrito, trabajar el modelo taguchi [9] ortogonal L9 resumido en la Tabla 4.2. Con este tipo de arreglo se garantiza que todos los parámetros tengan el mismo peso en el diseño, es decir que los experimentos hechos representan estadísticamente todas las combinaciones posibles de los factores, solo que utilizando una fracción del total de experimentos posible, esto reduce la cantidad de recursos utilizados, además de ser idóneo considerando las limitaciones de tiempo para el proyecto.

4.1 Factores y niveles considerados en el diseño de experimentos

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Fundente	1000 g	600 g	400 g
Gas	Nitrógeno	Argón	Nitrógeno de rehúso
Flujo	20 ft ³ /h	15 ft ³ /h	10 ft ³ /h
Tiempo	8 min	5 min	2 min

Las mediciones de temperaturas se efectuaron antes del tratamiento de desgasificación y de escorificación y, después del mismo. Las muestras para análisis de porosidad son hechas mediante prueba de vacío de 60 mm de Hg, las cuales son posteriormente cortadas transversalmente y pulidas para finalmente ser comparadas y evaluadas con el patrón de porosidad (Figura 1.9).

El nitrógeno de rehúso, se refiere al N₂ que es utilizado para ejercer la presión de los pistones en los equipos de inyección a presión, éste se recircula durante cierta cantidad de ciclos hasta que los cilindros que lo contienen no cuentan con la presión requerida en el proceso, por lo que algunas veces estos cilindros son utilizados para desgasificar el metal líquido en la olla de transferencia.

Tabla 4.2 Diseño de experimentos, matriz L9 de Taguchi para la mejora del proceso de tratamiento de metal líquido (aleación A380) en una olla de 475Kg.

Prueba	Fundente (g)	Tipo de Gas	Flujo (ft ³ /h)	Tiempo (s)
1	1000	Nitrógeno	20	8
2	1000	Argón	15	5
3	1000	Nitrógeno de Rehusó	10	2
4	600	Nitrógeno	15	2
5	600	Argón	10	8
6	600	Nitrógeno De Rehusó	20	5
7	400	Nitrógeno	10	5
8	400	Argón	20	2
9	400	Nitrógeno De Rehusó	15	8

Adicionalmente se observó la calidad metalúrgica de muestras de aluminio mediante análisis metalográfico de muestras tratadas con 1000g, 600g y 400g de fundente para ayudar junto con el diseño de experimentos a discernir sobre la cantidad adecuada de fundente a utilizar, y observación de la escoria en cada caso.

4.2 RESULTADOS

Cabe resaltar que cada prueba se realizó por duplicado y considerando orden aleatorio para realizarlas. Los resultados experimentales son resumidos en la Tabla 4.3, las muestras de las que se determinó la porosidad se muestran en la Figura 4.2

Tabla 4.3 Resultados experimentales de la etapa 2.

Prueba	Fundente (g)	Tipo de Gas	Flujo (ft ³ /h)	Tiempo (s)	Porosidad de acuerdo a patrón.	$\Delta T_{prom.}$ (°C)
1	1000	Nitrógeno	20	8	#6 5.3 2.38	101
2	1000	Argón	15	5	#7 8.3 2.3	40
3	1000	Nitrógeno de Rehusó	10	2	#6 5.3 2.38	36
4	600	Nitrógeno	15	2	#8 11.8 2.26	30
5	600	Argón	10	8	#6 5.3 2.38	70
6	600	Nitrógeno de Rehusó	20	5	#5 2.9 2.45	62
7	400	Nitrógeno	10	5	#6 5.3 2.38	50
8	400	Argón	20	2	#9 15.4 2.22	43
9	400	Nitrógeno de Rehusó	15	8	#4 1.3 2.52	87

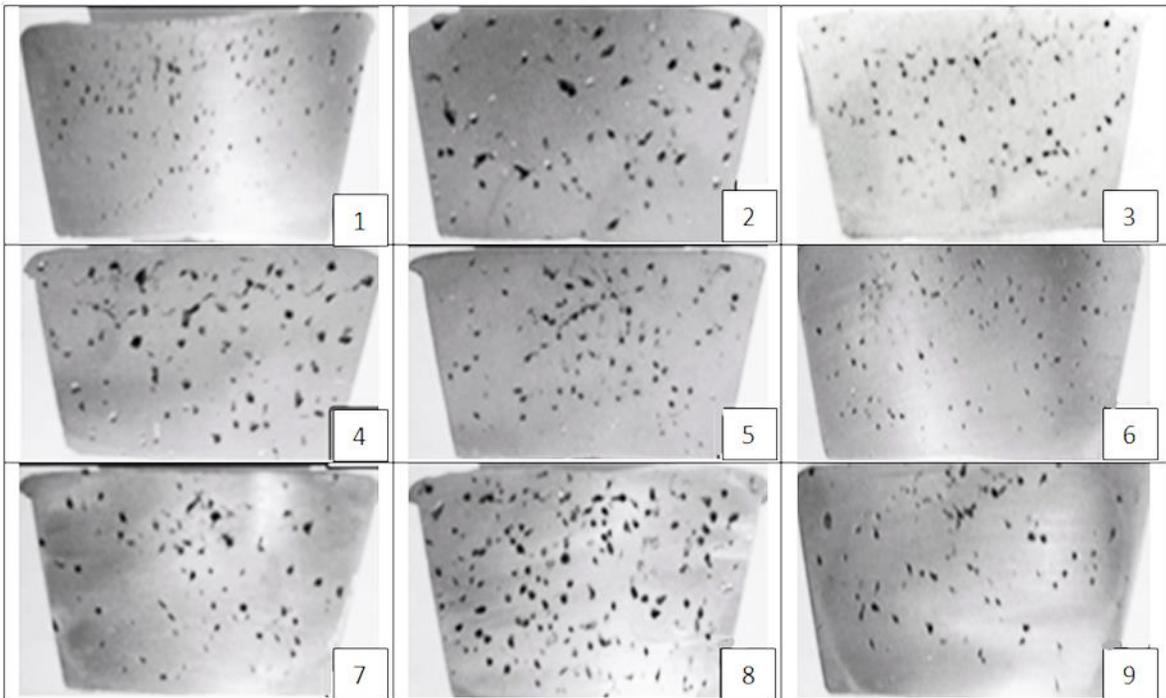


Figura 4.2 Muestras obtenidas de acuerdo a la metodología establecida.

Para el análisis del diseño de experimentos se utilizó el software Minitab 15 cuyos resultados son presentados en forma de gráficos, donde se muestra el efecto medio de las variables sobre la respuesta densidad relativa (Gráfico 4.1) y sobre la caída de temperatura debida a los tratamientos ΔT (Gráfico 4.2)

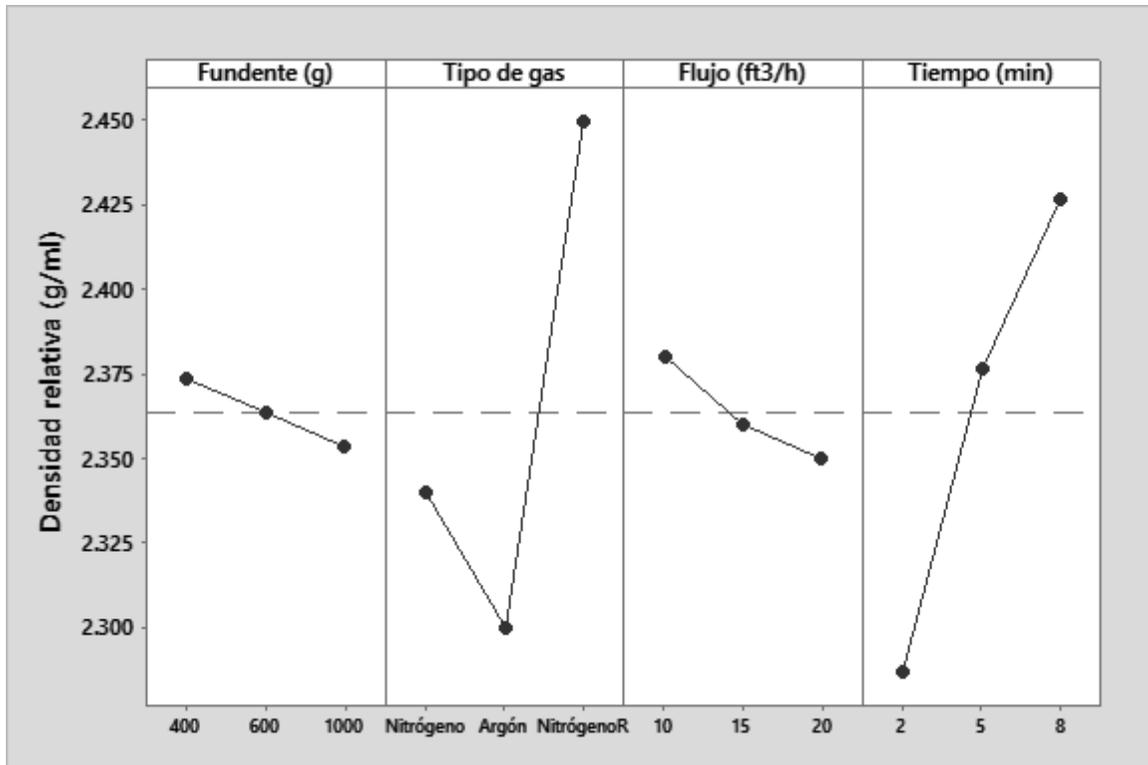


Gráfico 4.1 Medias de efectos principales de los factores (cantidad de fundente, tipo de gas, flujo y tiempo) sobre la porosidad (densidad relativa).

Tabla 4.4 Respuestas de los factores de estudio sobre la densidad relativa.

Nivel	Fundente (g)	Tipo de gas	Flujo (ft3/h)	Tiempo (min)
1	2.373	2.340	2.380	2.287
2	2.363	2.300	2.360	2.377
3	2.353	2.450	2.350	2.427
Delta	0.020	0.150	0.030	0.140
Clasificar	4	1	3	2

***Delta:** mide el tamaño del efecto al tomar la diferencia entre el valor más alto y el valor más bajo de cada característica de respuesta.

***Clasificación:** ordena los factores del efecto más grande (con base en los valores delta) al efecto más pequeño sobre la característica de respuesta

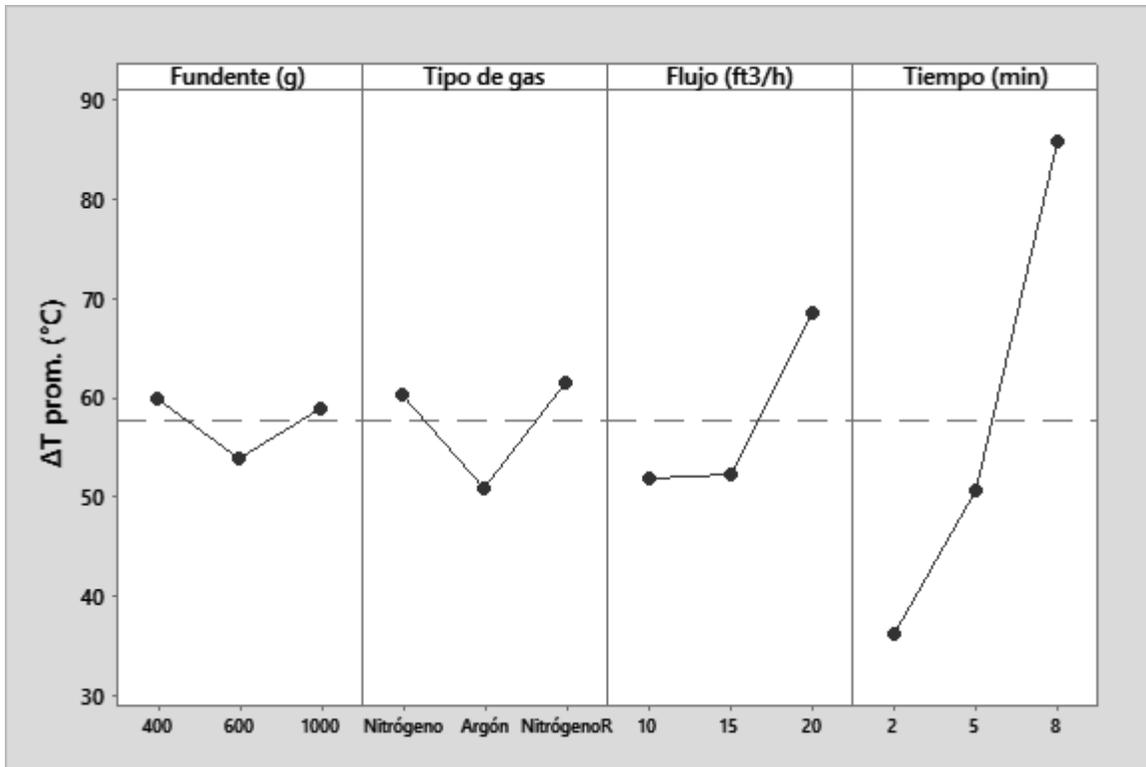


Grafico 4.2 Medias de efectos principales de los factores (cantidad de fundente, tipo de gas, flujo y tiempo) sobre la caída de temperatura ΔT .

Tabla 4.5 Respuestas de los factores de estudio sobre la caída de temperatura ΔT .

	Fundente (g)	Tipo de gas	Flujo (ft3/h)	Tiempo (min)
Nivel 1	60.00	60.33	52.00	36.33
Nivel 2	54.00	51.00	52.33	50.67
Nivel 3	59.00	61.67	68.67	86.00
Delta	6.00	10.67	16.67	49.67
Clasificar	4	3	2	1

Para apoyar el análisis de la cantidad adecuada de fundente a utilizar, se tomaron fotografías de la escoria y se realizó el análisis metalográfico correspondiente, los cuales se presentan en las Figuras 4.3.

Las microestructuras correspondientes a cada cantidad de fundente se muestran en las Figuras 4.4.



Figura 4.3a Escoria usando 400g de fundente



Figura 4.3b Escoria usando 600g de fundente



Figura 4.3c Escoria usando 1000g de fundente



Figura 4.4a Metalografía usando 400g de fundente ataque HF a 100x

Figura 4.4b Metalografía usando 600g de fundente ataque HF a 100x

Figura 4.4c Metalografía usando 1000g de fundente ataque HF a 100x

En las figuras 4.4 se trata de encontrar la cantidad adecuada de fundente (de los estudiados), tomando como referencias las imágenes metalográficas, se aprecia que con la cantidad de 400g se encontró atrapamiento de escoria (4.4a), esto debido a que la cantidad de 400g no es suficiente para cubrir la totalidad del baño de manera eficiente y hay zonas donde el fundente no alcanza a desescorificar, mientras que con la cantidad de 600g (4.4b) y 1000g (4.4c) no se observan contenidos de inclusiones ni impurezas, por lo que es confiable desescorificar con 600g o 1000g.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En primera instancia para determinar entre que rangos de porosidad son aceptables trabajar en el proceso de inyección a presión en la empresa BSI, fue necesario un consenso donde personal de piso e ingenieros relacionados con el proceso de Die Casting tomaron la decisión de determinar que la porosidad encontrada en las muestras fuera evaluada con el patrón visual de comparación y dadas las características del proceso, los índices de porosidad aceptable son entre #4 y #5 basadas en el patrón visual (Figura 1.9) como se mencionó con anterioridad.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el "diagnóstico" y específicamente en lo concerniente a dar seguimiento al proceso, se **encontraron algunas de las llamadas "malas prácticas" en fundición**, las cuales pueden ocasionar mayores pérdidas en insumos y/o repercutir en la obtención de un metal de baja calidad.

Algunas de estas "malas prácticas" que se identificaron fueron:

La empresa solo cuenta como criterio de selección de su materia prima (lingotes A380) que esta cumpla con la norma interna de composición química. Sin embargo esto no garantiza recibir material de buena calidad ya que a falta de otro tipo de inspección (visual y/o metalúrgica), lingotes que cumplen con la composición química pueden presentar alto contenido de inclusiones, escoria, presentar suciedad, como las observadas en la Figura 3.2.

Los fundentes son almacenados correctamente en sacos cerrados y libres de cualquier fuente de humedad en la bodega, no obstante una vez que

se saca de las bolsas contenedoras, el fundente está expuesto a fuentes de humedad atmosférica ya que este se encuentra en un contenedor destapado y dado que el fundente es higroscópico, es una posible fuente de humedad que puede aumentar la cantidad de hidrógeno disuelto en el baño metálico.

No se realiza limpieza de la carga, principalmente de los retornos que en muchas ocasiones llevan suciedad o grasa, esto puede afectar el rendimiento del metal así como aumentar el número de impurezas en el metal líquido.

Cuando se realiza la desgasificación la lanza solo es puesta en una posición por lo que las burbujas no se distribuyen homogéneamente en todo el baño metálico, disminuyendo la eficiencia de desgasificado ya que las burbujas no se dispersan por todo el volumen de la olla y de esta manera no se ven beneficiados los mecanismos de transporte masa donde las etapas involucradas en la cinética de desgasificación (remoción del hidrógeno) son [10]:

- a) Transporte de hidrógeno a través del aluminio líquido hacia la interfase aluminio/burbuja de gas inerte.
- b) **Transporte difusivo de hidrógeno a través de la capa límite (δ_L)** del lado del líquido a la intercara metal/gas.
- c) Adsorción de los átomos de hidrógeno en la superficie de la burbuja.
- d) Reacción entre dos átomos de hidrógeno para la formación de hidrógeno molecular H_2 dentro de la burbuja de gas inerte.
- e) Expulsión del H_2 hacia la atmósfera.

La aplicación de fundente de escorificación Coveral® OR-1 en la olla no se realiza uniformemente sobre toda la superficie de metal expuesta, por lo que solo se retira la escoria en algunas zonas, además de la cantidad agregada tiene mucha variación $1000 \pm 100\text{g}$ (Tabla 3.7).

En el proceso de fundición por inyección a presión utilizado en BSI el principal motivo para rechazo de piezas terminadas es la presencia de porosidades, las cuales pueden presentar diferentes orígenes, dentro de estos encontramos: Aquellos debidos a la contracción normal durante la solidificación, porosidad causada por mal ajuste en los parámetros de inyección de las máquinas de DC (como son alta velocidad de inyección o demasiado baja, distancia recorrida del pistón y tiempos de inyección), residuos del lubricante y desmoldante aplicado en los moldes, algunas que se manifiestan en el corte y son debidos a la presencia de inclusiones o impurezas que son removidas en el maquinado, porosidad por llenados defectuosos en la cavidad del molde, bajas temperaturas de colada que puede ocasionar que el metal se solidifique antes de llenar la cavidad total del molde, desgaste de la maquina (piezas o moldes) etc.

Pero dentro de todas las probables causas de incidencias de porosidades una de las más importantes es la cantidad de hidrógeno disuelto en el metal líquido, ya que este al nuclear puede afectar directamente la pieza terminada, por esa razón se decidió que el parámetro más importante en este trabajo era reducir la cantidad de porosidades debidas a los gases disueltos, de esta manera aunque es difícil determinar en una pieza de Die Casting el origen exacto de la porosidad porque como se mencionó con anterioridad hay muchas fuentes causantes de estas, no obstante al menos es posible reducir la probabilidad de que la porosidad provenga

de hidrógeno captado por el aluminio líquido y así **poder “entregar” a las máquinas de inyección un metal con mejor calidad metalúrgica.**

Debido a que la empresa no contaba con un control adecuado ni protocolos para el manejo de metal líquido, este trabajo se centró en crear esos protocolos y mejorar la calidad del metal líquido. Se creó un diseño experimental dentro de una filosofía de mejora continua, para encontrar una mejora al proceso y eficientar recursos, así de esta manera se presenta en la Tabla 5.1, los resultados obtenidos utilizando la técnica propuesta en comparación con la usada con anterioridad en BSI.

Tabla 5.1 Comparación de parámetros usados actualmente y los propuestos.

	Fundente (g)	Tipo de gas	Flujo (ft ³ /h)	Tiempo (min)	Porosidad de acuerdo a patrón	ΔT (°C)
Técnica Actual	1000	Nitrógeno	20	8	#5 - #6 2.9 - 5.3 2.45 - 2.38	98
Técnica propuesta	600	Nitrógeno	10	5	#4 - #5 1.3 - 2.9 2.52 - 2.45	44
Técnica* Propuesta (con disponibilidad de nitrógeno de rehúso)	600	Nitrógeno de rehúso	10	5	#4 - #5 1.3 - 2.9 2.52 - 2.45	45

*Regularmente hay disponibilidad de nitrógeno de rehúso, pero a falta de este se puede utilizar nitrógeno grado NF.

De acuerdo a la Tabla 5.1, se destaca que la mejora propuesta incluye el **análisis tanto de porosidad como de caída de temperatura ΔT** . En este caso es de interés encontrar las condiciones de operación en las cuales se obtienen índices de porosidad que entren dentro de las especificaciones de la empresa y a la vez bajas pérdidas de temperatura en el tratamiento, **ya que a menores ΔT** se puede considerar trabajar a menor temperatura en la bóveda de retención de metal líquido en el horno, la cual opera actualmente alrededor de 792 °C. Este repercutiría en un ahorro de combustible y al mantener el metal a una temperatura menor podría reducir la oxidación de algunos elementos y el atrapamiento de gases en el metal líquido.

Con los parámetros propuestos se obtienen piezas con porosidad menor que los encontrados en la **"técnica actual"**, **estos índices de porosidad se encuentran dentro de los solicitados por la empresa (#4 y #5)**, en comparación de los índices que BSI estaba obteniendo (#5 y #6), por lo que este cambio en los parámetros y metodología del proceso de tratamiento de metal líquido implica una mejora.

Si se observa la Tabla 5.2, la cantidad de fundente seleccionada para la mejora en el proceso, corresponden a una cantidad de 600g la cual es ligeramente superior al propuesto por el proveedor el cual recomienda el uso de 460g a 520g de acuerdo a las dimensiones de la olla usada en BSI, pero inferior a los 1000g usados normalmente en la empresa.

Para ayudar a discernir sobre la cantidad adecuada a utilizar nos apoyamos de las Figuras 4.3 a las 4.4, donde se puede apreciar que la escoria obtenida con 400 g (Figura 4.3a) y 600g (Figura 4.3b) gramos es muy similar, esta es polvosa y presenta pocas aglomeraciones de metal

por lo que representa una escoria con bajos contenidos metálicos, a comparación de la escoria obtenida usando 1000g (Figura 4.3c) la cual visiblemente concentra cantidades mayores de metal al presentar una **escoria "húmeda" como la presentada en la Figura 2.1a**, lo que repercute directamente en pérdidas de metal, estas disminuyen la eficiencia y representan pérdidas.

Por otro lado en las figuras correspondientes al análisis metalográfico se puede observar que la pieza escorificada con 400g de fundente (Figura 4.4a) presenta lo que probablemente sea un atrapamiento de escoria, por lo que la escorificación con esta cantidad de fundente puede no ser la más adecuada ya que está cantidad de fundente no es suficiente para cubrir la totalidad de la superficie expuesta a la atmósfera quedando áreas en las que el fundente no tiene contacto, por lo que la escorificación no es homogénea en toda la superficie de la olla, a comparación con las cantidades de 600g (Figura 4.4b) y 1000g (Figura 4.4c) en las que no se observan atrapamiento de escoria o concentración de inclusiones, lo que representa una **muestra más "sana" y** con calidad adecuada para las máquinas de inyección a presión, con estas cantidades de fundentes se cubre la totalidad de la superficie metálica expuesta a la atmósfera.

En la gráfica 4.1 se puede apreciar que la cantidad de fundente no tiene un efecto importante sobre el contenido de porosidad, ya que la pendiente de la gráfica es poco pronunciada, esto es de esperarse debido a que el fundente utilizado es solo de escorificación y de igual manera se observa en el gráfico 4.2, que el fundente no tiene efecto sobre la caída de temperatura ΔT , atribuido a que el fundente solo es ligeramente exotérmico.

Con base a lo anterior y apoyándose con los resultados del diseño de experimentos se puede aseverar que la cantidad de 600g es adecuada para para la escorificación de la olla de transporte usada en BSI, ya que con esta cantidad se cubre la totalidad de la superficie (metal líquido-atmósfera) y en las pruebas realizadas con esta cantidad no se encontraron muestras con contenido de inclusiones, escorias o impurezas, además el uso de esta cantidad de fundente implica un menor gasto comparado con los 1000g que aproximadamente se usaba para la escorificación de la olla.

Para el caso del tratamiento de desgasificación, el uso de gas nitrógeno perteneciente a cilindros nuevos, nitrógeno de rehúso y argón, presentaron variación de los resultados entre ellos, siendo el nitrógeno de rehusó el que ofrece un menor contenido de porosidad (Gráfico 4.1), analizando este hecho se le atribuye a que el nitrógeno de rehúso que es utilizado en las máquinas de inyección es grado 4.8 ($N_2 = 99.998\%$ mínimo) a comparación del nitrógeno utilizado en la olla que es grado NF ($N_2 < 95\%$) y el argón que es grado industrial ($Ar < 95\%$), así que probablemente debido a la pureza del nitrógeno grado 4.8 utilizado en las máquinas de die casting este dio mejor eficiencia de desgasificado.

Sin embargo comparando el uso de gas argón contra el uso de nitrógeno los dos presentaron características similares en el caso de porosidad, aunque la pérdida de temperatura en el caso del uso de argón es menor (Gráfico 4.2) esta no justifica el uso de este gas dado su elevado precio (245 pesos/m^3) en comparación con el nitrógeno (46 pesos/m^3), por lo que se propone seguir trabajando con el gas nitrógeno, ya que a pesar que el nitrógeno de rehúso presento las mejores condiciones de desgasificación, éste no siempre se encuentra disponible para su uso, por

lo que se puede utilizar cualquiera de los dos de acuerdo a la disponibilidad.

El flujo de gas que presenta una menor porosidad es $10 \text{ ft}^3/\text{h}$ ya que se encontraron diferencias en cuestión de porosidad utilizando los diferentes flujos como se aprecia en el Gráfico 4.1, esto contrario a lo que cabría esperar de que flujos mayores presenten piezas con menores índices de porosidad, este comportamiento puede ser atribuible a que en este proceso de desgasificación con lanza los flujos de $15 \text{ ft}^3/\text{h}$ y $20 \text{ ft}^3/\text{h}$ generan excesiva turbulencia en la superficie del baño metálico la cuál puede promover la captación de gases entre ellos el perjudicial hidrógeno así como la generación de óxidos que funcionan como centros de nucleación así incrementando la posibilidad de generar mayores índices de porosidad, en la Figura 5.1 se presenta un esquema de lo explicado anteriormente.

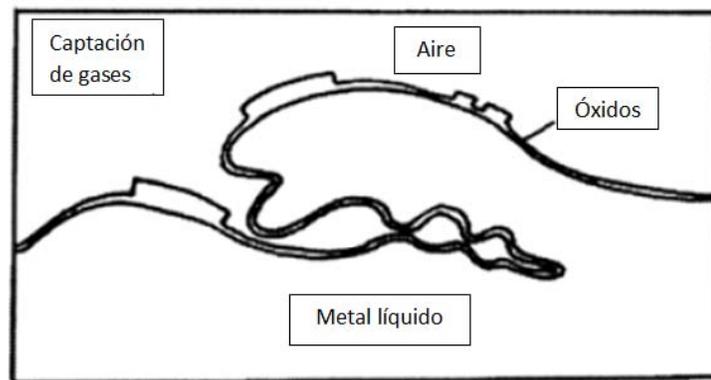


Figura 5.1 Esquema representativo de la formación de óxidos y captación de gases debido a la turbulencia excesiva en la superficie del baño metálico [11].

Por otro lado el movimiento de la lanza alrededor de todo el baño ayuda a promover la formación de burbujas dispersas por toda la olla, a comparación de lo que se hacía con regularidad en BSI de solo dejar la lanza en una posición durante todo el proceso lo que ayuda a acelerar el desgasificado, ya que al estar bien dispersas promueven a que el gas disuelto encuentre siempre una burbuja de gas, lo que facilita su eliminación.

Utilizando un flujo de $10 \text{ ft}^3/\text{h}$ y manteniendo los demás parámetros como los propuestos se obtiene una pérdida de temperatura de alrededor de $44 \text{ }^\circ\text{C}$ a comparación de la pérdida de 62°C utilizado los $20 \text{ ft}^3/\text{h}$ que se utilizan actualmente en la empresa, esto se puede observar en el gráfico 4.2, por lo que al utilizar en el proceso tiene un beneficio adicional en el ahorro de 50% de gas nitrógeno.

El tiempo de desgasificación propuesto es de 5 minutos, ya que basándonos en los Gráficos 4.1 y 4.2 se puede aseverar que con tiempos de 5 y 8 minutos se obtienen muestras con porosidad aceptable para el proceso de Die Casting en cambio las piezas trabajadas con 2 minutos de desgasificación están fuera del estándar de aceptación, no obstante el tiempo de desgasificación de 5 minutos, presenta una pérdida de **temperatura (ΔT) de 54°C** manteniendo los demás parámetros bajo la técnica propuesta a comparación de los 81°C que se pierden utilizando un tiempo de 8 minutos, por lo que se declinó utilizar el tiempo de 8 minutos.

Basándose en los parámetros estudiados, el software minitab 15 corre una optimización teórica la cual se puede observar en la Tabla 5.1, donde se comparan las respuestas obtenidas con la técnica actual y la técnica propuesta. Cabe destacar que la técnica de mejora propuesta se validó

experimentalmente encontrando los valores de porosidad y pérdida de **temperatura ΔT esperados** mostrados en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.1 se muestra el análisis metalúrgico de la muestra número 1.

Tabla 5.2 Comprobación de la optimización propuesta por el software Minitab 15.

Muestra	Porosidad de acuerdo A patrón	ΔT (°C)
1	#4 1.3 2.52	56
2	#5 2.9 2.45	40
3	#5 2.9 2.45	51



Figura 5.1 Corrida de validación de la muestra 1 para la mejora propuesta.

Analizando la Tabla 5.2 se puede decir que los índices de porosidad se encuentran bajo los estipulados por BSI, adicionalmente que la calidad de metal en materia de porosidad y calidad metalúrgica se conserva o se ve mejorada ligeramente, así en la Figura 5.1 se corrobora que la calidad del metal líquido se encuentra dentro de los resultados pronosticados.

No obstante cabe señalar que el proceso de desgasificación con lanza es rustico y poco eficiente, ya este método genera burbujas grandes y tiempos de residencia en el baño metálico muy cortos, lo cual repercute en una baja eficiencia [12]. Hoy en día existen mejores métodos de desgasificación como el uso de tapones porosos y/o rotores. El uso de rotores para inyectar gases de purga ha demostrado ser uno de los métodos más eficientes de desgasificado en la actualidad [13], por lo que sería recomendable hacer una inversión para el cambio de desgasificado con lanza a rotor, esto a corto o mediano plazo en BSI de tal manera de que su proceso de desgasificación sea mejorado sustancialmente.

Si hacemos un análisis de la caída de temperatura nos podemos dar cuenta al poder trabajar con una temperatura menor en la bóveda de retención también puede haber un ahorro de combustible ya que con la técnica actual se pierden alrededor de 98°C (Tabla 3.7) en el tratamiento del metal y con los parámetros propuestos se pierde solo cerca de 45°C (Tabla 5.1) ,lo que deja un margen de cerca de 50°C para poder disminuir la temperatura de retención del metal la cual es actualmente de 793°C (Tabla 3.5), esto sin perjudicar procesos posteriores ya que el aluminio liquido llega a la misma temperatura a los hornos de retención además trabajar a temperaturas menores en los hornos puede disminuir la captación de gases perjudiciales para el aluminio, así como una menor oxidación de la aleación.

Para reforzar lo dicho con anterioridad con respecto a la oportunidad de trabajar con menor temperatura en el horno, dentro de la zona de retención, se le dio un seguimiento térmico a 5 muestras, las cuales son obtenidas manteniendo los parámetros “propuestos” en este escrito, pero adicionalmente se trabajó con una temperatura en la zona de retención del horno de aproximadamente 40°C menos con respecto a la temperatura con la que se trabaja normalmente en BSI, esto es 750°C vs 793°C, el seguimiento se da desde el horno en la zona de retención, hasta los hornos de retención de las máquinas de inyección, estos resultados se comparan con el seguimiento térmico que se realizó a las piezas con el tratamiento que cotidianamente se daba en BSI (Tabla 5.1), las temperaturas a las que el metal líquido llega a los hornos de **retención con la técnica “actual”** se muestran en la Tabla 3.5.

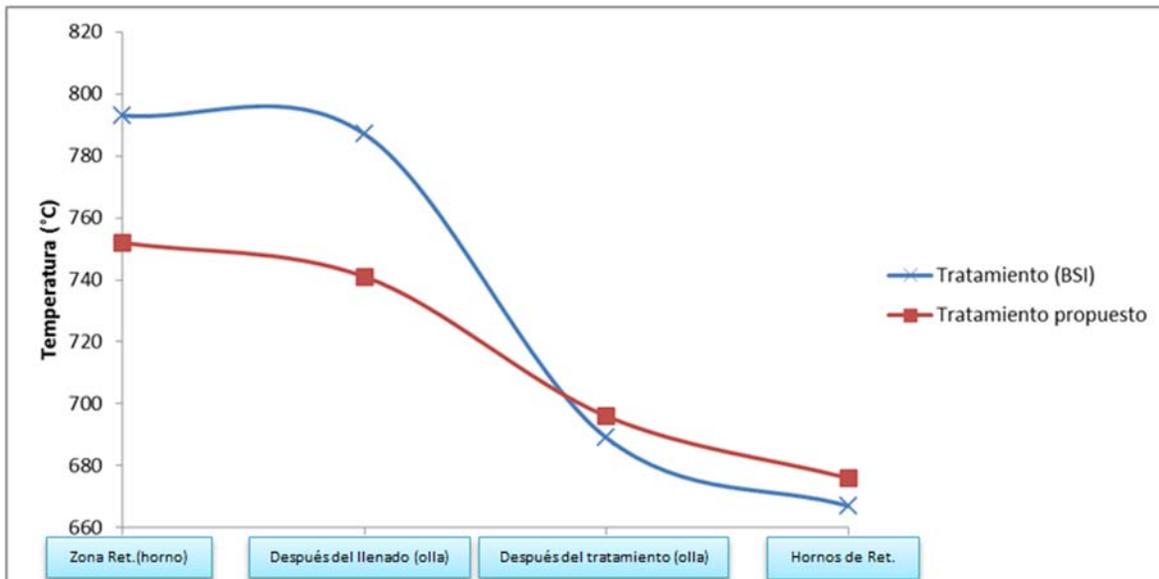
Los resultados promedio del seguimiento de las 5 muestras trabajando el horno a 750 se presentan en la Tabla 5.3, así como el seguimiento de las pruebas con el tratamiento “actual”. Los comparativos se muestran en el Gráfico 5.1.

Tabla 5.3 Caídas de temperatura en los diferentes puntos de muestreo, para muestras con tratamiento hecho en BSI y la técnica propuesta.

Punto de muestreo	Tratamiento BSI* (°C)	Tratamiento propuesto** (°C)
Zona Retención (horno)	793	752
Después del llenado (olla)	787	741
Después del tratamiento (olla)	689	696
Hornos de Retención	667	676

*El panel automático del horno trabajando a 790°C en bóveda de retención.

** El panel automático del horno trabajando a 750°C en bóveda de retención.



Grafica 5.1 Comparación de las caídas de temperatura, para muestras con tratamiento (BSI) y con el propuesto.

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 5.3 y el Grafico 5.1, se ve reforzado el argumento de que en el horno en la zona de retención, puede trabajar con seguridad un promedio de 40 °C por debajo de lo que se trabaja cotidianamente en BSI, ya que el metal desgasificado y escorificado llega a los hornos de retención a la temperatura solicitada (635 °C a 705 °C).

Para poder imprimir hojas de procesos BSI solicita intervalos de trabajo en el horno, así que en base a los resultados obtenidos, se propuso trabajar en la zona de retención en un intervalo de temperaturas de [730°C - 770°C], lo cual queda estipulado en la instrucción de operación IO-MPR-06 (Anexo A). Trabajar en este intervalo de temperaturas y aplicando adecuadamente el tratamiento de metal líquido propuesto en

este escrito, existe la seguridad de que el metal llegue a la temperatura requerida para el proceso de inyección a presión de 635 °C a 705 °C, instrucción IO-MPR-11 (Anexo D).

El programa minitab ofrece cálculos para aproximar el peso o influencia **que tiene cada factor sobre la respuesta (densidad y ΔT) y los ordena**, clasificando cada factor de acuerdo a mayor o menor efecto sobre la variable de respuesta. Así de esta manera observando la Tabla 4.4 minitab clasifica de mayor a menor influencia sobre la densidad (porosidad): tipo de gas (1)-tiempo (2) - flujo (3) – fundente (4). Para la **caída de temperatura (ΔT) tabla 4.5: tiempo (1) - flujo (2) - tipo de gas (3) - fundente (4).**

Comparación entre las pruebas realizadas, olla sin tratamiento – olla con tratamiento “actual” BSI - Olla con tratamiento propuesto “mejora”

Con el fin de reforzar las propuestas hechas en este trabajo se realizó una comparación de las diferentes etapas de estudio utilizando una de tantas herramientas de calidad de procesos.

Hay dos tipos de comparación de performance. En el primero se comparan 2 performance de muestras individuales, en este caso la comparación es directa. En el segundo caso se comparan el performance de 2 grupos. Tradicionalmente se ha usado el valor promedio de cada grupo para realizar la comparación. En la aproximación propuesta por Taguchi se usa el promedio- cuadrado de la desviación, este cálculo contiene ambos el promedio y la desviación estándar de cada grupo para

calcular el mejor performance. Consistentemente se compara el resultado de cada grupo con la definición de calidad hecha pertinentemente.

Así es nuestro caso la definición de calidad radica en una menor presencia de porosidad, es decir entre menor cantidad de porosidad se considera que el metal líquido tiene una mejor calidad con respecto a piezas con elevada porosidad. De acuerdo a la tabla comparativa Figura 1.9, una menor porosidad está asociada a una mayor densidad, así que utilizando datos continuos (densidad relativa) se pueden facilitar los cálculos para comprar cual es el grupo de datos que brinda una mejor calidad. Para el uso en este trabajo se utilizara la característica de calidad, es decir lo que se está definiendo como calidad de acuerdo a la respuesta medida (porosidad): $QC=B$, donde: QC = Característica de calidad y B = entre mayor sea la densidad y mejor, esto equivale a decir que entre menor sea la porosidad mejor.

Se procederá a comparar los tres grupos de datos involucrados en este trabajo.

1. Olla sin tratamiento
2. **Olla con tratamiento "actual" BSI**
3. **Olla con tratamiento propuesto "mejora"**

Para realizar el cálculo del mejor grupo de datos se tomaron los resultados de las Tablas 3.6, 3.7 y 5.2

El cálculo se realizó con la siguiente ecuación:

Datos medidos (Densidad relativa): $Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n$

$$\text{MSD(Promedio - cuadrado de la desviación)} = \frac{\left(\frac{1}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{y_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{y_3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{y_n}\right)^2}{n}$$

Donde n es el numero de pruebas realizadas.

Los resultados del calculo de la MSD se resumen en la Tabla 5.4, a fin de compararlos y elegir el grupo que brinda una mejor calidad de proceso.

Tabla 5.4 Comparacion mediante MSD de las diferentes etapas de estudio.

Pruebas	Olla sin tratamiento	Olla con tratamiento "actual" BSI	Olla con tratamiento propuesto "Optimización"
MSD	0.19657	0.17156	0.16355

*nota una MSD menor implica que ese grupo de datos esta mas cerca del objetivo, en este caso una mayor densidad relativa (entre mayor mejor), lo que asu vez se manifiesta con un contenido de porosidad menor y de acuerdo a la defincion de calidad es un proceso con mejor calidad o con una mejora.

En Figura 5.2 se muestra el comparativo de las muestras obtenidas mediante el test de presión reducida para la olla sin tratamiento, olla con tratamiento "actual", olla con parámetros de mejora propuestos.



Figura 5.2a Olla sin los tratamientos

Figura 5.2b Olla con tratamiento
"actual" BSI

Figura 5.2c Olla con tratamiento
propuesto "mejora"

Como se puede observar en la Tabla 5.3 y las Figuras 5.2 la desviación (MSD) del grupo de datos analizados con los tratamientos de

desgasificación y escorificación con el que se trabaja actualmente en BSI es menor que la MSD de la olla sin tratamiento, esto quiere decir que al hacer el tratamiento del metal líquido de la manera cotidiana como se hacía en BSI mejora la calidad del metal destinado a las máquinas de inyección.

En primera instancia analizando lo anterior se puede decir que es de suma importancia hacer los tratamientos de metal líquido de desgasificación y escorificación, no obstante en una filosofía de mejora continua se buscan mejorar los procesos de tal manera que se maximicen los beneficios y se reduzcan pérdidas de cualquier índole asociada al proceso. En base al argumento de filosofía de mejora continua la propuesta hecha en este trabajo hace una contribución para mejorar la calidad del proceso, presentando piezas con menor porosidad con respecto a la olla sin tratamiento y a la olla con tratamiento **“actual”**, porque aunado a los análisis hechos con anterioridad a lo largo de este escrito, la aproximación de comparación realizada cálculo de MSD es menor con respecto al MSD de la olla sin tratamiento y olla con **tratamiento “actual” BSI, por lo que, la “nueva técnica” demuestra un beneficio tangible al proceso.**

Con base a todo el análisis hecho con anterioridad y tomando en cuenta los resultados de la etapa de diagnóstico y el diseño experimental se generó la instrucción de operación IO-QEM-20 (Anexo A) y el cambio de la instrucción IO-MPR-06 (Anexo B), donde se resume toda la información pertinente a modo que sea entendida y aplicada por los operadores.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Fue posible mejorar el proceso de fusión de aluminio de la empresa BSI Celaya, reduciendo los índices de porosidad y pérdidas de temperatura, aplicando un mejor control en el tratamiento de metal líquido para la desgasificación, así como la implementación de procedimientos adecuados en el uso de fundentes y control de temperatura para reducir pérdidas metálicas y ahorro de insumos, esto manteniendo la infraestructura actual y sin la necesidad de compra de nuevos equipos y/o insumos, ni modificaciones que incluyan un nuevo gasto, como lo solicito la empresa BSI.

El diseño de experimentos y análisis metalúrgico del mismo determinó que trabajando con gas nitrógeno (99.998 % de pureza), flujo de 10 ft³/h, tiempo de desgasificación de 5 min y posteriormente realizar el tratamiento de escorificación con 600g de fundente Coveral ®75 ofrece una mejor calidad metalúrgica, adecuada para este proceso.

En la bóveda de retención del horno de reverbero utilizado en BSI se trabaja adecuadamente en un intervalo de temperaturas de [730°C-770°C] garantizando que el metal líquido llegue dentro de la temperatura requerida por las máquinas de inyección a presión.

Las fuentes de ahorro encontradas son:

Menor uso de fundente de 1000 g a 600 g.

Menor uso de gas nitrógeno de 20 ft³/h a 10 ft³/h.

Menor tiempo de desgasificación de 8 minutos a 5 minutos.

Menor pérdida de temperatura en el tratamiento de metal líquido de 98°C a 45°C

Los ahorros económicos estimados (semestrales) son:

Fundente en la olla	1382 Kg	\$22,000
Nitrógeno	15 Cilindros	\$6,400
Gas Lp	2304 Lt	\$16,000
Ahorro estimado		\$44,400

Adicionalmente hay ahorro en el contenido metálico de la escoria y reducción del tiempo de proceso de tratamiento del metal líquido, en un 37.5% de 8min a 5min.

Se realizó la instrucción de operación IO-QEM-20 (Apéndice A), resultado del trabajo realizado en BSI.

PROPUESTAS

Implementar instrucción de operación IO-QEM-20 20, Desgasificación de Aluminio líquido en contenedor de transporte (anexo C).

Cambiar la instrucción de operación IO-MPR-06, Fundición de Aluminio A380 en horno de reverbero, (Anexo A)

Implementar más controles en la aceptación o rechazo de materia prima, adicional al análisis químico, ejemplo análisis visual y/o metalográfico.

El almacenamiento del fundente debe ser en un lugar seco y libre de posibles fuentes de humedad no solo en el almacén sino también en su lugar de uso.

Para la adición de fundente en la olla utilizar un recipiente especial, de tal manera que la cantidad que pueda contener sea 600g, esto es para reducir la variabilidad que pueda introducir el operador al agregar al fundente (poka-yoke).

Se debe realizar la limpieza de los retornos, especialmente si estos tienen suciedad o residuos de aceites o grasas.

Siempre precalentar todo el herramental utilizado y protegerlo con pintura refractaria.

Se recomienda cambiar el proceso de desgasificación ya sea con tapones porosos o desgasificadores rotatorios, ya que la desgasificación con lanza utilizada en BSI es poco eficiente en comparación a los recomendados.

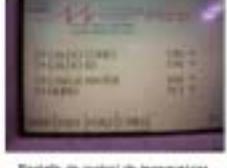
REFERENCIAS

1. ASM Handbook Vol 2 Properties and Selection: No Ferrous Alloy and Special-Purpose Materials, ASM International 9^a edition, paginas 484-514 (USA), 1991.
2. **Jorstad J.L. "Understanding Sludge", Proc. Of the 14th SDCE** International Die Casting Congress and Exposition, Toronto, Ont, Canada, May 11-14, 1987, Paper No. G-T87-011.
3. **Gobrecht J. "Gravity-Segregation of Iron, Manganese and Chromium in an Aluminum-Silicon Casting, Part I", Giesserei, Vol. 61, No. 10, 1975, pp 263-265 (USA).**
4. ASM Handbook Vol 12, Casting, ASM International 9a edition, pp 1622-1640 (USA), 1991.
5. Biedermann A. Tratado moderno de fundición a presión de metales no férreos, PP 255-260, 1a. Edición, Buenos Aires: Editorial J. Montesó, 1952).
6. <https://sites.google.com/site/conocerlosmateriales/home/el-alto-horno>
7. Opie W.R. and N.J. Grant. Hydrogen Solubility in Aluminium and some Aluminium Alloys. Trans AIME (USA) 1995.
8. Hufnagel W. Manual del aluminio. Ed. Reverte. Barcelona España. 1992.
9. Roy, Ranjit K. Design of Experiments Using the Taguchi Approach 16 Steps to Product and Process Improvement. John Wiley & Sons, Inc. (USA). 2001.
10. Sigworth, G.K and T.A. Engh, Chemical and kinetic factors related to hydrogen removal from aluminium. Metallurgical and Materials Transactions B, 1982. 13(3), pp 447-460.
11. http://fundytec.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=6 (MEX, 2015).
12. Robles Flores Iván. Modelado Físico de la Fluidodinámica Durante la Desgasificación de Al por la Técnica del Rotor-Inyector. Tesis de licenciatura, UNAM Fac. de Química. México 2009.
13. Camacho Martínez, J.L, Novel Desgasification Design for Aluminium Using an Impeller Desgasification Water Physical Model. Materials and Manufacturing Processes, 2012. 27(5), pp 556-560.

ANEXOS

En esta sección se incluye parte del trabajo realizado en BSI, de igual manera las portadas de las instrucciones de control de procesos en el área de fundición, así como control de los parámetros de desgasificación estudiados en este trabajo y control de temperatura en la bóveda de mantenimiento del horno.

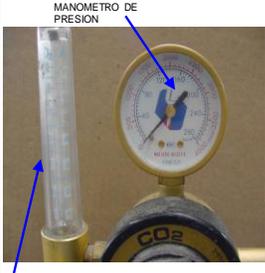
Anexo A. Cambio de la instrucción IO-MPR-06 (fundición de aluminio A380 en horno de reverbero) en los parámetros de temperatura del caldo y la bóveda de mantenimiento.

PRODUCTO		DOCUMENTO		OPERACIÓN	
Código del cliente: N/A	Revisión: N/A	Fecha: 08/03/2016	Revisión: 3	Revisión: 3	Nombre: REZAS DE ALUMINIO
Código de BOM: N/A	Revisión: N/A	Nombre: REZAS DE ALUMINIO	Descripción: FUNDICIÓN DE ALUMINIO AL 380 en horno de reverbero		
INSTRUCCIÓN DE OPERACIÓN					
DATOS CRÍTICOS DE CONTROL DEL PROCESO					
Fuentes de variación					
Temperatura de hornos de fundición, peso y composición química del aluminio					
Planes de control			Planes de reacción		Método de verificación
TEMPERATURA DE FUSIÓN DEL ALUMINIO			AVISAR AL SUPERVISOR		Visual
CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN					
Materia		Materia		Materia	
Número: 8P7007	Descripción: Aluminio aleación 380	Número: N/A	Descripción: N/A	Número: N/A	Descripción: N/A
Consumo mínimo: 400-450 Kg		Consumo mínimo: N/A		Consumo mínimo: N/A	
Máquina			Dispositivo		
Número: 1025			Número: N/A		
Instrucción de preparación: N/A			Método de montaje y desmontaje: N/A		
Parámetros de maquinado: N/A					
MÉTODO					
Antes de la operación		Durante la operación		Después de la operación	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Prender el horno desde el panel de control accionando botones de encendido de quemadores. 2. Esperar a que el horno esté por lo menos a 600 °C en la cámara de fusión para iniciar la carga. 3. Vaciar el material a fundir en el contenedor de alimentador (lingote y recortes) dejando los lingotes en el fondo. 4. Checar que todas las puertas estén cerradas para evitar pérdidas de calor o fugas de material. 5. Observar que en la cámara de fusión no contenga materiales sin fundir. 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Revisar el nivel de Aluminio Fundido en la cámara de mantenimiento antes de realizar una carga para evitar derrames. 2. Iniciar la carga presionando el botón de Ciclo de Carga de panel de Alimentador automáticamente se realizará la carga de material. 3. Cuando el material haya sido completamente alimentado esperar hasta que su funde completamente y se realice el espumamiento a la zona de mantenimiento donde el rango promedio de temperatura es 730 a 770 °C 4. Se deberá asegurar que el aluminio este por encima de los 730 °C para iniciar el vaciado. 5. Accionar la palanca de vaciado para inclinar el horno y tener material por la boca del horno. 6. Ajustar la posición y altura del montacargas y ota de transporte de material a los hornos de relación. 7. Ajustar parámetros de trabajo en la pantalla de control de temperaturas a: Temperatura del metal líquido 730 °C, Temperatura de bóveda de mantenimiento 750 °C, Temperatura Humos 425 °C, Temperatura de Fusión 830 °C 8. Llenar nuevamente el contenedor de material a fundir para iniciar el ciclo de Fundición 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Limpiar las cámaras de fusión y de relación cada turno para eliminar la escoria de proo y de las paredes de las mismas con ayuda de las herramientas para este fin. Ver Instrucción de operación IO-MPR-10 2. Llenar el correspondiente check list de limpieza del horno FOP-23-7.3.1. 3. Antes de apagar el horno por más de 2 turnos se debe vaciar el contenido de material de la cámara de mantenimiento y limpiar muy bien dicha cámara así como también la de fusión. 	
A YUDA VISUAL				REGISTROS	
 <p>Tablero control del alimentador de aluminio</p>		 <p>Torno de elevación de material para horno</p>		 <p>Pantalla de control de temperaturas</p>	
 <p>Zona de vaciado</p>		 <p>Tablero de control general del horno</p>		<p>Check List FOP-23-7.3.1</p>	
APROBACIONES					
INGENIERIA					
OPERACIONES					
ASEG. DE CALIDAD					

Anexo B. Instrucción de operación IO-MPR-10 (limpieza de horno de reverbero).

PRODUCTO		DOCUMENTO		OPERACIÓN	
Código del cliente: N/A Revisión: N/A Código de BST: N/A Revisión: N/A Nombre: PIEZAS DE ALUMINIO		Número: IO-MPR-10 Fecha: 01/10/2009 Revisión: 2 N. C.: Sustituye a:		Número de operación: Descripción: Limpieza de horno de Reverbero	
DATOS CRÍTICOS DE CONTROL DEL PROCESO					
Fuentes de variación: Temperatura de horno de fundición					
Planes de control:			Planes de reacción		Método de verificación
SIN OXIDOS POR FUSION EN PAREDES Y SOBRE EL METAL LIQUIDO			DETERMINAR LA CAUSA Y CORREGIR		Visual
CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN					
Material		Material		Material	
Número: 1080290 Descripción: COVERAL OR-1 Consumo mínimo: 300 GRS		Número: Descripción: Consumo mínimo		Número: N/A Descripción: N/A Consumo mínimo: N/A	
Máquina			Dispositivo		
Número: 1098 Instrucción de preparación: N/A Parámetros de maquinado: N/A			Número: N/A Método de montaje y desmontaje: N/A		
Personal y su seguridad					
Ésta operación requiere personal certificado. Equipo requerido: Zapatos de seguridad, careta facial, tapones auditivos, traje aluminizado, guantes de asbesto y guantes de algodón.					
MÉTODO					
Antes de la operación		Durante la operación		Después de la operación	
<ol style="list-style-type: none"> Colocarse por completo el equipo de protección personal. Tener a la mano la barra y el rastrillo de limpieza, asegurándose de que no tengan humedad. Acercar la escalera rampa al horno. 		<ol style="list-style-type: none"> Abrir la puerta de limpieza de la cámara de fusión del horno accionando la válvula. Llenar la pistola aspersora con Coveral OR-1 y aplicar en las paredes del horno, esperar de 10 a 15 minutos para que reaccione, esta operación también se puede hacer manualmente sin utilizar la pistola aspersora, introduciendo el coveral OR-1 en bolsas de plástico. Con la barreta empezar a limpiar las paredes del horno hasta quitar todos los óxidos adheridos a las paredes. Utilizando el rastrillo sacar todas las impurezas jalándolas hacia la charola de escorias. Al terminar esta operación cerrar la puerta de limpieza accionando la válvula. Abrir la puerta de limpieza de la cámara de retención del horno. Repetir los pasos 2, 3 y 4 para la sección de retención. La limpieza de la cámara de fusión se debe realizar cada turno y la limpieza de la cámara de retención 2 veces por turno. 		<ol style="list-style-type: none"> Anotar de realizados los trabajos en el registro FOP-23-7.5.1 	
AYUDA VISUAL				REGISTROS	
   <p>Herramientas</p>				FOP-23-7.5.1	
Pistola Aspersora 		Coveral OR-1 		 <p>Aplicación del Coveral OR-1</p>	
APROBACIONES					
INGENIERÍA					
OPERACIONES					
ASEG. DE CALIDAD					

Anexo C. Instrucción de operación IO-QEM-20 (Desgasificación de Aluminio líquido en contenedor de transporte) generada por los resultados de este escrito.

PRODUCTO		DOCUMENTO		OPERACIÓN	
Código del cliente: N/A Revisión: N/A Código de BSI Mex: N/A Revisión: N/A Nombre: PIEZAS DE ALUMINIO		Número: IO-QEM-20 Fecha: 02/09/2008 Revisión: "3" N. C.: REVISIÓN COMPLETA DE I. O. Sustituye a: N/A		Numero de operación: 2 Descripción: DESGASIFICADO DE ALUMINIO LIQUIDO EN CONTENEDOR DE TRASPORTE	
DATOS CRÍTICOS DE CONTROL DEL PROCESO					
Fuentes de variación:					
Tiempo de desgasificado de metal Volumen gas / minuto					
Planes de control:			Planes de reacción		Método de verificación
Metal libre de escorias			DETERMINAR LA CAUSA Y CORREGIR		FLUJOMETRO MANOMETRO
CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN					
Material		Material		Material	
Número: 5100104 Descripción: Nitrógeno Consumo mínimo: 1.2 LT		Número: 1080291 Descripción: FUNDETE COVERAL 75 Consumo mínimo 600 GRS.		Número: Descripción: Consumo mínimo:	
Máquina			Dispositivo		
Número: 1080 Programa de mantenimiento N/A Instrucción de preparación: N/A Parámetros de maquinado: N/A			Número: N/A Programa de servicio: Método de montaje y desmontaje:		
MÉTODO					
Antes de la operación		Durante la operación		Después de la operación	
1. Revisar condiciones generales del equipo antes de iniciar cada proceso de DESGASIFICADO. 2. Revisar si el tanque de NITRÓGENO contiene material en el manómetro debe marcar mínimo 200 PSI si se requiere cambie el tanque por uno nuevo. 3.- Revisar las condiciones y largo del tubo desgasificador y si se requiere, cambiar por otro de 1.4 mts de largo de tubo galvanizado.		1. Introducir el tubo desgasificador en el contenedor de metal con aluminio líquido , moviendo alrededor de la olla, tratando de abarcar la mayor parte de la misma. 2. Abrir la Válvula de control de nitrógeno hasta que marque 200 PSI min. (FOTO 1). 3. Ajustar el flujo de Nitrógeno en el flujometro de vaso hasta que marque 10 Pies cúbicos / Hr. 4. Dejar operando de 5 Minutos y Sacar el tubo del metal líquido. 5. Cerrar la válvula del tanque de nitrógeno hasta que el flujometro marque CERO. 6. Aplicar el fundente Coveral 75 sobre la superficie del metal, permita la reacción de 1 a 2 minutos y retire la escoria antes de vaciar. Nota: Al Sacar el tubo del metal líquido tener cuidado de alguna quemadura , así mismo cuidar que el tubo no toque las mangueras de conexión para evitar pérdidas de nitrógeno		1. Realizar limpieza del metal con un cucharón perforado Ver foto 3 y retirar la " NATA que se forma en la superficie del metal. 2. Las natas deben depositarse en el contenedor de escoria . 3. El metal estará listo para vaciarse en los contenedores a pie de maquina. 4. Cualquier incidencia reportarla al supervisor en turno.	
AYUDA VISUAL				REGISTROS	
 <p>MANOMETRO DE PRESION</p> <p>FLUJOMETRO</p>		 <p>TUBO DE DESGASIFICADO</p>		 <p>LIMPIEZA ELIMINANDO LA ESCORIA</p>	
FOTO 1		FOTO 2		FOTO 3	
				FOP-23-7.5.1	
APROBACIONES					
INGENIERIA					
OPERACIONES					
ASEG. DE CALIDAD					

Anexo D. Instrucción de operación IO-MPR-11(Transporte de aluminio fundido entre horno de fusión y hornos de retención)

 INSTRUCCION DE OPERACION 		
PRODUCTO	DOCUMENTO	OPERACION
Código del cliente: N/A Revisión: N/A Código de área: N/A Fecha: N/A Nombre: PIEZAS DE ALUMINIO	Número: IO-MPR-11 Fecha: 24/03/2009 Revisión: 2 N.C.: REVISION COMPLETA DE I. O. Sustituye a: N/A	Número de operación: N/A Descripción: Transporte de aluminio fundido entre horno de fusión y hornos de retención.
DATOS CRÍTICOS DE CONTROL DEL PROCESO		
Fuentes de variación: Cantidad de aluminio fundido a transportar; temperatura del aluminio en cámara; temperatura de aluminio en olla al momento de vaciar.		
Planes de control		Planes de reacción
TEMPERATURA DE FUSION		AVISAR AL SUPERVISOR
Método de verificación: Promedio		
CONDICIONES INICIALES DE OPERACION		
Materia	Materia	Materia
Número: MP1007 Descripción: Aluminio fundido Consumo mínimo: N/A	Número: N/A Descripción: N/A Consumo mínimo: N/A	Número: N/A Descripción: N/A Consumo mínimo: N/A
Hoja	Dispositivo	
Número: Aplica para todos los hornos de retención Instrucción de preparación: N/A Parámetros de maquinado: N/A	Número: N/A Método de montaje y desmontaje: N/A	
Personal y seguridad		
Esta operación requiere personal certificado. Equipo requerido: Zapatos de seguridad, Tapones auditivos, careta de protección, mangas largas y Guantes tipo japonés.		
MÉTODO		
Antes de la operación	Durante la operación	Después de la operación
<ol style="list-style-type: none"> 1. Conocerse por completo el equipo de protección personal. 2. Verificar el buen estado de la olla de transferencia y de montacargas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Auxiliándose del montacargas, acercar la olla de transferencia a pie del horno de fusión. 2. Utilizando la palanca de inclinación del horno de fusión iniciar el vaciado de la olla de transferencia. 3. Una vez que se ha vaciado la cantidad de aluminio fundido requerida, inclinar el horno a su posición normal para detener el llenado de la olla y medir en este momento la temperatura del metal fundido (620°C a 700°C) y registrar este dato en el formato FOP-23-7.3.1. 4. El paso siguiente es desgasificar la olla (ver instrucción de trabajo IO-QUEM-20). 5. Terminada la operación anterior transportar la olla a su respectivo horno de retención. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retirar la olla al área del horno de fusión para próximas cargas. 2. Llenar registro FOP-23-7.3.1
AYUDA VISUAL		REGISTROS
   		FOP-23-7.3.1 APROBACIONES INGENIERA OPERACIONES ASEG. DE CALIDAD
OLLA DE TRANSFERENCIA	VACIADO DE LA OLLA	MEDICION DE TEMPERATURA
		TRANSPORTE AL HORNO DE RETENCION