



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIALES



Evaluación de la calidad de la aleación de aluminio F – 132 durante el proceso de fundición para la fabricación de pistones

Bermúdez, Jorge.
Rodríguez, Oscar.

Naguanagua, 06 de Noviembre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIALES



Evaluación de la calidad de la aleación de aluminio F – 132 durante el proceso de fundición para la fabricación de pistones

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Tutor académico:

Eleazar Díaz. *Ing.*

Tutor externo:

Luis Moros. *Ing.*

Autores:

Bermúdez, Jorge.

Rodríguez, Oscar.

Naguanagua, 06 de Noviembre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIALES



Evaluación de la calidad de la aleación de aluminio F – 132 durante el proceso de fundición para la fabricación de pistones

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Bermúdez, Jorge.
Rodríguez, Oscar.

Naguanagua, 06 de Noviembre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIALES



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada ***“Evaluación de la calidad de la aleación de aluminio F – 132 durante el proceso de fundición para la fabricación de pistones”***, presentada por los bachilleres: **Jorge Bermúdez** y **Oscar Rodríguez**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **C17.891.385** y **18.321.393**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Eleazar Díaz, *Ing.*
Presidente del jurado

Prof. Juan C. Pereira, *Ing.*
Miembro del jurado

Prof. Laura Saenz, *Ing.*
Miembro del jurado

En Naganagua a los 06 días del mes de Noviembre de 2009

Agradecimientos

En primer lugar, les queremos dar las gracias a nuestra familia, quienes siempre estuvieron a nuestro lado en el transcurso de toda la carrera, y que, gracias a su apoyo, esfuerzo y dedicación, nos permitieron superar todos los obstáculos que se nos iban presentando y que nos ayudaron a madurar tanto personal como académicamente.

Agradecer hoy y siempre a todas las personas que compartieron gran parte del tiempo que tomo llevar a cabo este trabajo de investigación, puesto a que, fueron de gran ayuda en momentos de dudas, aportando ideas y consejos que sirvieron de gran soporte.

A los profesores que formaron parte de nuestro desarrollo en durante la carrera, y a los que estuvieron involucrados en la elaboración de este trabajo especial de grado, ya que, con sus observaciones y recomendaciones permitieron el desarrollo de esta investigación.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a todos nuestros familiares y amigos, que estuvieron a nuestro lado durante la ejecución de la presente investigación, apoyándonos y sirviendo de soporte en todo momento.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“EVALUAR LA CALIDAD DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO F – 132 DURANTE
EL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UNA EMPRESA FABRICADORA DE
PISTONES”**

Resumen

El objetivo general de este trabajo de grado es evaluar la calidad de la aleación de aluminio F – 132 durante el proceso de fundición en una empresa fabricante de pistones. Para la realización del presente trabajo se hizo uso de información aportada por los ensayos de espectrometría y de gravedad específica realizados en la empresa; así como de los ensayos metalográficos efectuados en las instalaciones de la Universidad de Carabobo. Además, se llevó a cabo el estudio y especificación de los parámetros de calidad, tales como la microestructura, el tamaño de grano, la composición química, la gravedad específica y el nivel de escoria de la aleación de aluminio; teniendo en cuenta los diversos factores que influyen en cada uno de los parámetros, entre los cuales se tiene el proceso de desgasificado, el refinamiento del grano y la modificación de la microestructura, el contenido de hidrógeno presente en la aleación, las porosidades, entre otros. Las probetas sometidas a los diversos ensayos fueron macizas, en forma de cono truncado, tomadas directamente de los hornos de retención. Establecidos los parámetros de calidad y realizados los ensayos, se estudiaron los resultados obtenidos, para así plantear un buen número de mejoras y recomendaciones, en función de optimizar el proceso de fundición de la empresa.

Palabras clave: Aleación F-132, pistón, fundición, ensayo, parámetros de calidad

Índice de figuras

	Pág.
2.1 Diagrama binario de fase Al – Si	18
2.2 Horno crisol	24
2.3 Efecto de la filtración en la fluidez del metal	34
2.4 Filtros de cerámica	35
2.5 Filtros por adherencia de partículas	35
2.6 Filtro vertical ubicado en horno de fusión	37
2.7 Filtro ubicado en crisol	38
2.8 Mecanismos de captación de partículas en el filtro	38
2.9 Solubilidad del Hidrógeno en el baño fundido de aluminio como función de la temperatura	40
2.10 Muestra sometida al ensayo de magnificación de burbuja mediante el vacío	42
2.11 Probeta con deficiente desgasificado (izquierda), probeta con buen desgasificado (derecha)	43
2.12 Principio de la purga de gas en el baño de fundición	45
2.13 Esquema de un impulsor rotatorio (izquierda); Dispersión de burbujas finas en un modelo de estudio usando un impulsor rotatorio (derecha)	46
2.14 El desempeño del desgasificado de una lanza, una cabeza porosa y un impulsor rotatorio en una aleación hipoeutéctica 357	46
2.15 Eficiencia del desgasificado versus diámetro de burbuja	48
2.16 Manufacturas de Aluminio I C.A	54
2.17 Bulto de lingotes de materia prima, aleación de aluminio F-132	56
2.18 La acción de limpieza del Na_2SiF_6 : (a) antes de la adición y (b) después de la adición	60
2.19 Eje de grafito (izquierda), corona de grafito (derecha)	62
2.20 Motor de unidad desgasificadora	62

	Pág.
2.21 Válvula reguladora de presión de argón	62
2.22 Limpieza de la escoria del horno de retención	63
2.23 Pistón en bruto o primario	64
3.1 Diagrama de flujo del desarrollo de la metodología del proyecto	68
3.2 Horno Guinea	69
3.3 Horno de retención	70
3.4 Crisol para toma de probetas	70
3.5 Probetas obtenidas mediante el crisol	71
3.6 Cámara de vacío	71
3.7 Peso de la probeta al aire (izquierda), peso sumergido en agua (derecha)	73
3.8 Espectrómetro (izquierda), punto de colocación de las probetas en el espectrómetro (derecha)	75
3.9 Pulidora de lijas de grano (izquierda), pulidora de paño (derecha) ...	77
3.10 Campana para ataques químicos	78
3.11 Microscopio óptico para estudio de la superficie atacada de la probeta	80
3.12 Molde “K” ensamblado	81
4.1 Gravedad específica versus tiempo (20-07-09)	86
4.2 Gravedad específica versus tiempo (26-08-09)	87
4.3 Gravedad específica versus tiempo (31-08-09).....	87
4.4 Gravedad específica versus tiempo (02-09-09)	88
4.5 Gravedad específica versus tiempo (03-09-09)	88
4.6 Gravedad específica al cabo de 8 minutos	89
4.7 Probeta desgasificada a los 5 minutos (izquierda), probeta desgasificada a los 8 minutos (derecha)	90
4.8 Eje de prueba de acero	91
4.9 Prueba de eje de hierro nuevo (izquierda), eje de hierro después de tres pruebas (derecha)	92
4.10 Grano revelado antes de agregado el titanio-boro.....	99
4.11 Grano revelado después de agregado el titanio-boro.....	100
4.12 Conteo de granos antes de agregado el titanio boro, según el método planimétrico	101
4.13 Conteo de granos después de agregado el titanio boro, según el método planimétrico	102
4.14 Microestructura revelada antes de agregado el estroncio a 100X ...	108
4.15 Microestructura revelada antes de agregado el estroncio a 200X ...	108
4.16 Microestructura revelada después de agregado el estroncio a 100X	109
4.17 Microestructura revelada después de agregado el estroncio a 200X	109
4.18 Microestructura del silicio sin modificar completamente (tipo 1), 200x	111
4.19 Microestructura del silicio laminar (tipo 2), 200X	111

	Pág.
4.20 Microestructura del silicio modificada parcialmente (tipo 3), 200X ..	112
4.21 Microestructura del silicio no laminar (tipo 4), 200X	112
4.22 Microestructura del silicio modificada (tipo 5), 200X	113
4.23 Microestructura del silicio supermodificado (tipo 6). 200X	113
4.24 Comparación de la microestructura revelada con el silicio modificado parcialmente (tipo 3)	114
4.25 Comparación de la microestructura revelada con el silicio no laminar (tipo 4)	114
4.26 Comparación de la microestructura revelada con el silicio modificado (tipo 5).....	115
4.27 Mazarotas como material de retorno	120
4.28 Porcentajes de hierro en las mazarotas y pistones.....	121
4.29 Carros transportadores de material de retorno	121
4.30 Dimensiones del cubo como materia prima.....	122
4.31 Relación superficie versus el volumen introducido en el horno de fundición	124
4.32 Incidencia de la llama sobre la carga a fundir en el horno Guinea ..	125
4.33 Probetas obtenidas por el molde “K”	126
4.34 Escoria extraída del horno Guinea (a), escoria extraída del horno de retención (b).....	127
A.1 Requerimientos para la entrega de materia prima	140
A.2 Característica de la sal empleada en la empresa	141
A.3 Sal fundente Coverflux 5F	142
A.4 Sal fundente Coverflux EXTRA	143
A.5 Sal fundente Coverflux STD	144
A.6 Evaluación del número de grano en función de diverso parámetros (Norma ISO 643:2003)	145
B.1 Reporte de producción, índices de rechazo (06/10/09)	148
B.2 Reporte de producción, índices de rechazo (07/10/09)	149
B.3 Reporte de producción, índices de rechazo (08/10/09)	150
B.4 Reporte de producción, índices de rechazo (09/10/09)	151
C.1 Grano revelado antes de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el segundo ensayo.....	154
C.2 Grano revelado luego de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el segundo ensayo.....	154
C.3 Grano revelado antes de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el tercer ensayo.....	155
C.4 Grano revelado luego de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el segundo ensayo	155
C.5 Grano revelado antes de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el cuarto ensayo.....	156
C.6 Grano revelado luego de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el segundo ensayo.....	156

	Pág.
D.1 Microestructura revelada antes de la adición de estroncio en el segundo ensayo (200x).....	158
D.2 Microestructura revelada después de la adición de estroncio en el segundo ensayo (200x).....	158
D.3 Microestructura revelada antes de la adición de estroncio en el tercer ensayo (200x).....	159
D.4 Microestructura revelada después de la adición de estroncio en el tercer ensayo (200x).....	159

INTRODUCCIÓN

En la industria metalúrgica es importante realizar un proceso productivo que cumpla con los requerimientos necesarios, para llevar a cabo la manufactura de productos aptos para el mercado al cual están destinados, cumpliendo con las normativas de calidad empleadas por la empresa.

Hoy en día, el desarrollo de los procesos de manufactura se ha visto afectado por diversos factores que influyen sobre el avance del mismo. Un proceso que puede tomarse como ejemplo es el de la fundición, donde se ha identificado un grupo de agentes, tales como el nivel de escoria, las porosidades e inclusiones presentes en la aleación líquida, entre otros, que alteran el progreso normal del proceso.

La calidad de un producto puede estar orientada hacia la necesidad de satisfacer las exigencias del cliente; así como para cumplir con las especificaciones requeridas. Para controlar la calidad de un producto se realizan inspecciones para verificar que las características cumplan con los requerimientos establecidos, y ejercer un control sobre los parámetros que influyen en la calidad final del producto.

En orden de mantener el proceso productivo dentro de los estándares establecidos, se debe llevar a cabo un control de calidad, basándose en las especificaciones determinadas por la ingeniería del producto, ajustando a la producción a las exigencias de estas; además de, proporcionar asistencia al departamento de calidad y de fabricación

En el proceso de manufactura de pistones, existen diversos parámetros que permiten mantener la calidad de la aleación de aluminio líquido, entre los cuales se pueden señalar el tamaño de grano, la composición química, la microestructura, la gravedad específica y el nivel de escoria e inclusiones presente en la aleación líquida.

Actualmente, la empresa lleva un control sobre la gravedad específica, que indica de manera indirecta el grado de porosidad existente en el baño de fundición, y la composición química, registrando los valores obtenidos y realizando una comparación con lo establecido por las normas de calidad.

De allí se vio la necesidad de realizar un estudio de los parámetros y procedimientos empleados en una empresa fabricante de pistones, y señalar si aportan la información requerida para estudiar la calidad de la aleación de aluminio empleada.

En la presente investigación, se realiza un estudio del proceso llevado a cabo en una empresa fabricante de pistones, haciendo énfasis en los diversos factores que afectan al desarrollo normal del proceso, y llevando a cabo un análisis de los diversos parámetros de calidad, a través de pruebas de muestreo, para poder establecer las condiciones óptimas del proceso e implementar mejoras que permitan mantener la calidad del material de fundición.

Índice general

	Pág.
Índice general	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	vii
CAPÍTULO 1	
Introducción	1
1.1 Situación problemática	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 Justificación	4
1.4 Alcance	5
1.5 Limitaciones	5
CAPÍTULO 2	
Marco teórico	7
2.1 Antecedentes	7
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1 <i>El aluminio</i>	10
2.2.2 <i>Aleaciones de aluminio</i>	13
2.2.3 <i>Aleantes</i>	20
2.2.4 <i>Fundición de aleaciones de aluminio</i>	23
2.2.5 <i>Oxidación del aluminio y sus aleantes en el estado líquido</i>	25
2.2.6 <i>Contaminación del metal fundido</i>	30
2.2.7 <i>Inclusiones en las aleaciones de aluminio</i>	32
2.2.8 <i>Desgasificación del baño líquido de aleaciones de aluminio</i>	40

	Pág.
2.2.9 Afinadores de grano	50
2.2.10 Modificadores de estructura	51
2.2.11 Manufacturas de aluminio I C.A	54
2.2.12 Definición de términos	66
CAPÍTULO 3 Marco metodológico	67
3.1 Metodología	67
3.1.1 Gravedad específica	72
3.1.2 Composición química	76
3.1.3 Microestructura de la aleación	76
3.1.4 Tamaño de grano	79
3.1.5 Escoria	81
3.2 Lista de equipos utilizados.....	82
CAPÍTULO 4 Análisis de resultados	85
4.1 Desgasificado.....	85
4.1.1 Prueba del tiempo de desgasificado	86
4.1.2 Prueba del eje de acero para el desgasificado	90
4.2 Refinamiento del grano	93
4.2.1 Cálculo de los incrementos de los aleantes	94
4.2.2 Determinación del tamaño del grano.....	99
4.3 Microestructura	104
4.3.1 Pruebas para la microestructura	107
4.4 Composición química	115
4.4.1 Prueba de composición química	116
4.5 Escoria	119
4.5.1 Prueba de inclusiones	125
CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones	131
5.1 Conclusiones	131
5.2 Recomendaciones	133
Referencias bibliográficas	135

Índice de tablas



	Pág.
2.1 Porcentaje en peso a nivel comercial de aleantes para aleaciones de aluminio (Debandi, 1998)	13
2.2 Límites de solubilidad de aleantes para aleaciones de aluminio (Norma ANSI H35.1, 2004)	14
2.3 Especificación de las aleaciones de aluminio para fundición (Norma ANSI H35.1, 2004).....	16
2.4 Aleaciones para procesos de conformado (Norma ANSI H35.1, 2004).	17
2.5 Composición Química de las más comunes aleaciones Al-Si de uso en fundición (Contenido de elementos, ^w /o)).(Norma ANSI H35.1, 2004)....	19
2.6 Requerimientos de la composición química para la entrega de materia prima, (Manufacturas de aluminio I, 2008)	56
4.1 Condiciones registradas en las pruebas de desgasificado	86
4.2 Resultados obtenidos de la prueba del eje de acero	92
4.3 Cantidades de cada elemento presentes en cada barra añadida	94
4.4 Cantidades presentes en el horno de retención y por cada barra compuesta de titanio-boro	95
4.5 Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de titanio-boro, para una transferencia de 320 Kg	96
4.6 Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de titanio-boro, para una transferencia de 340 Kg	96

	Pág.
4.7 Porcentajes de cada aleante luego de agregado el titanio-boro (final) para ambas transferencias	97
4.8 Incrementos teóricos y recomendados al agregar las barras compuestas de titanio-boro.....	98
4.9 Variables obtenidas para el cálculo del diámetro promedio.....	103
4.10 Índices G (ASTM) correspondientes a cada ensayo	104
4.11 Cantidades presentes en el horno de retención y por cada barra, de estroncio	105
4.12 Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de estroncio, para una transferencia de 320 Kg	106
4.13 Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de estroncio, para una transferencia de 340 Kg.....	106
4.14 Porcentajes de cada aleante luego de agregado el titanio-boro (final) para ambas transferencias	106
4.15 Incrementos teóricos al agregar las barras compuestas de estroncio.....	107
4.16 Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (29/07/09)	116
4.17 Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (30/07/09)	117
4.18 Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (31/07/09)	117
4.19 Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (04/08/09)	118
4.20 Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (05/08/09)	118
4.21 Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (10/08/09)	119
4.22 Superficie de contacto con el ambiente	123
4.23 Índices de rechazos durante el mes de octubre.....	129

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Situación problemática

El pistón es un cilindro abierto por su base inferior, cerrado en la superior y sujeto a la biela en su parte intermedia; básicamente es el órgano que transforma un movimiento rectilíneo en uno giratorio deslizándose alternativamente dentro de su guía (cilindro). Para el año 1911, la Hispano-Suiza introdujo los pistones de aluminio, obteniendo una notable ventaja en cuanto a ligereza y a partir de 1920, gracias a las nuevas técnicas de fusión y de mecanización mejoradas, el pistón de aluminio comenzó a tomar un puesto importante en el mercado automotriz. Hoy en día, existe una gran cantidad de empresas a nivel mundial que tienen como propósito la fabricación, venta y mercadeo de pistones para vehículos, a base de aleaciones de aluminio, entre estas se pueden mencionar algunas establecidas en América Latina, tales como Mahle en Sao Paulo Brasil, Pistones Moresa S.A., localizada en Saltillo – Coahuila, México; Manufacturas de Aluminio I C.A. en Venezuela, entre otras.

El proceso que se lleva a cabo en una empresa fabricante de pistones es dinámico. Se recibe la materia prima (aleación de aluminio preparada) en forma de lingotes, los cuales, son introducidos en un horno de fundición

basculante, a una temperatura de aproximadamente 734 °C, para ser sometidos a un proceso de fundición.

Una vez fundida la aleación de aluminio, es colocada en un crisol de transferencia, donde se mantiene mediante una llama a una temperatura suficiente para realizar el traslado de la aleación líquida. Seguidamente es distribuida a seis hornos de retención, donde es mezclada con sales y aleantes, necesarios para modificar la microestructura y el tamaño de grano, a la espera de ser vertida en los moldes.

Obtenido el pistón en bruto, se realiza una inspección visual en donde son descartados los pistones que no cumplan con las exigencias mínimas establecidas por el departamento de calidad. Seguido a esto, los pistones que cumplen con las exigencias establecidas son introducidos en hornos para recibir un tratamiento térmico de maduración artificial, para aumentar la resistencia a la tracción y la dureza del producto en bruto.

Luego los pistones tratados térmicamente son preparados para el mecanizado, donde le es removida la rebaba y el exceso de aluminio producto de la fundición. Finalizado el proceso de mecanizado, dependiendo de las especificaciones del mercado, el pistón pasa por un proceso de limpieza donde se le define la presentación final, puesto a que puede ser comercializado ya sea con un recubrimiento de estaño o simplemente pulido, y una vez que se le da la presentación final se inspecciona visualmente 100% y se le coloca el pin o pasador, luego es llevado al área de empaquetamiento para dejarlo listo y en la espera de su mercadeo.

En el presente, el proceso de fabricación de pistones posee diversos aspectos críticos que principalmente se observan al momento de realizar la fundición de la aleación de aluminio F – 132, donde se puede mencionar la oxidación del material de fundición, que da como resultado la generación de escoria, la cual se mezcla con la aleación líquida, aumentando las

probabilidades de que se elabore un producto de baja calidad, produciéndose un incremento de los índices de rechazo en la empresa.

Es importante tener un control de la calidad del aluminio líquido en todos sus aspectos, y siendo el nivel de escoria presente un parámetro difícil de cuantificar debe tenerse en cuenta la existencia de parámetros, tales como la microestructura, el tamaño del grano de la aleación, la gravedad específica como medida indirecta de las porosidades, y la composición química, que permiten determinar la calidad de la aleación.

De lo expuesto anteriormente, y debido a la importancia que esta problemática representa para las empresas que se dedican a este oficio, surge la necesidad de realizar un estudio acerca de los diferentes factores que permiten evaluar la calidad del aluminio líquido y, a su vez determinar los parámetros que permiten mantener la misma dentro de las especificaciones requeridas por el fabricante, así como también la elaboración de un plan que contribuya al mejoramiento del proceso de fundición en lo que concierne a su eficiencia y control, para poder contribuir en la elaboración de un producto de buena calidad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la calidad de la aleación de aluminio F – 132 durante el proceso de fundición en una empresa fabricante de pistones.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros que permiten conocer la calidad del Aluminio líquido.
- Considerar qué factores influyen en la calidad del Aluminio líquido.

- Establecer los valores óptimos de los parámetros del Aluminio líquido que garanticen una buena calidad antes del proceso de colado.
- Evaluar las condiciones en las cuales se encuentra el Aluminio líquido actualmente.
- Formular un plan de mejoras que proporcione un proceso más eficiente en la fundición del aluminio.

1.3 Justificación

En una empresa fabricante de pistones, es muy importante el proceso de fundición, debido a que gracias a dicho proceso se realiza la fabricación diaria de una gran cantidad de pistones, de tamaños diversos, a partir de una aleación de aluminio determinada.

Actualmente se han presentado ciertas irregularidades al momento de llevar a cabo el proceso de fundición, ya que se ha observado una generación excesiva de escoria que se escapa a través de la chimenea del horno de fundición, depositándose en los techos en forma de ceniza, y puede deducirse que parte de la escoria permanece en los interiores del horno de fundición, combinándose con el aluminio líquido, pudiendo afectar el grado de calidad del producto que se está elaborando.

Debido a la importancia del proceso de fundición en la fabricación de pistones, es de gran significación verificar que se lleve a cabo de la manera más eficiente posible para poder obtener un producto de la mejor calidad y que no se presenten índices de rechazos elevados por alguna anomalía provocada en la fase primaria del proceso productivo de la empresa.

De tal manera que, en este punto se justifica una investigación como la presente, puesto a que la irregularidad del proceso de fundición en la empresa fabricante de pistones si no es controlada debidamente, realizando los estudios y acciones necesarias, traerá una gran cantidad de problemas a la

empresa a futuro, puesto a que se podrían generar ciertos problemas en el control de calidad de la materia prima empleada en el proceso productivo, y consecuentemente, que los pistones elaborados no posean la calidad más adecuada, obteniéndose pérdidas en la línea de producción. Por todo esto, es de suma importancia que se lleve a cabo esta investigación para poder determinar el origen del problema y reducirlo lo más que se pueda para permitir que se realice el proceso de fundición de la forma más segura y eficiente, tanto para la población como para el medio ambiente.

1.4 Alcance

En el desarrollo de esta investigación se pretende realizar la evaluación del proceso de fundición presente en una empresa fabricante de pistones, de forma tal que se pueda establecer el control sobre este.

Para llevar a cabo el presente trabajo se estudiará todo lo referente al proceso que se ejecuta dentro de la planta hasta el punto en el cual el aluminio líquido se encuentra listo para ser vaciado en el molde, con el fin de llevar un control sobre las variables que modifican la calidad del aluminio líquido y garantizar que el mismo se encuentre en condiciones óptimas.

1.5 Limitaciones

El trabajo será elaborado bajo los requisitos y normativas que establezca la empresa fabricante de pistones, empleando toda la ayuda bibliográfica que se encuentre a la disposición y que sea proporcionada por la empresa como forma de apoyo.

Lo que puede presentarse como una limitante durante el desarrollo de la investigación podría ser el hecho de que en algún momento dado que se requiera de un equipo, máquina o dispositivo para poder determinar

cualquiera de los factores que influyan en la calidad y composición del aluminio líquido dentro del horno de fundición, éste equipo, máquina o dispositivo no sea posible de obtener al momento de ser necesitado debido a que la empresa en donde está siendo aplicado el trabajo de grado no posea este tipo de equipos por diversas razones, lo que conlleva a la búsqueda de algún método que permita obtener la información requerida para poder continuar con la investigación de la manera deseada.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2.1 Antecedentes

Noguera y Barabaschi (1992) realizaron una investigación para buscar la forma de optimizar el proceso productivo de la empresa laminadora de aluminio C.V.G. ALCASA Guacara en su fase primaria, mejorando los procedimientos de extracción de escoria y mezcla de aleantes en los hornos de fusión de aluminio. La empresa C.V.G. consta de 4 hornos de fusión, los cuales son cargados o alimentados con lingotes de Aluminio y con chatarra proveniente del proceso productivo de la misma empresa. Dentro de los hornos ocurren reacciones químicas que generan óxidos que se mezclan con cenizas formando lo que se conoce como escoria, la cual puede originar en el proceso de laminado micro porosidades o inclusiones de oxidación, convirtiéndose la lámina en un producto de mala calidad, por lo que la finalidad del presente trabajo era diseñar un sistema que pudiera mejorar los procedimientos de desescoriado y mezclado de aleantes en los hornos de fusión del aluminio. Finalmente, luego de diversos estudios pudieron determinar diversas causas que generaban grandes daños tanto al piso como a las paredes y puertas de los hornos, tales como el uso inadecuado del montacargas por parte del operador y la mala condición ambiental de trabajo del operario puesto a que este se encontraba muy cercano al horno; razones

por la cual se diseñó un sistema que lograba barrer la superficie del metal extrayendo solamente la escoria del Aluminio contenido dentro del horno, garantizando una mezcla homogénea del aluminio y aleantes y ayudando a disminuir las pérdidas en la fundición. Otro estudio con relación a la fundición del Aluminio fue realizado por Jiménez B.(1992), donde se trató la chatarra de aluminio en la empresa, señalando que la fundición de esta en los hornos presenta un gran inconveniente que surge por la oxidación y volatilización de las láminas delgadas o cintas que entran en contacto con los quemadores que presentan en su interior los hornos de fusión, situación por la cual se llegó a la conclusión de adquirir un horno de inducción, debido a que este tipo de hornos posee la ventaja de fundir metales compactados con poca densidad (cintas livianas de aluminio y otros metales) puesto a que, en lugar de tener en su interior una llama de fuego directa que produciría la volatilización del material a fundir, genera por medio de una bobina un campo magnético que provoca la fundición del material. En conjunto a la decisión de cambiar el tipo de horno empleado para la fundición, se diseñó un sistema para el manejo de los materiales a introducir al horno, para poder controlar la oxidación del material a fundir (aluminio) y que el trabajo pueda efectuarse lo más automáticamente posible, a fin de reducir el mínimo de los costos de trabajo. DeYoung et al (2002), se preocuparon por el aspecto y la calidad de los lingotes de aluminio y de aleaciones de aluminio luego del proceso de fundición, observando ciertas imperfecciones y oxidación en la superficie del lingote y como método para prevenir este tipo de irregularidades han añadido pequeñas cantidades de calcio que ayudan a mejorar la superficie del aluminio fundido, razón por la cual son añadidos como por fundición calcio, aproximadamente 0,25% refinadores de granos, metales alcalinos y metales de transición. La acción de añadir pequeñas cantidades de estos aditivos ha contribuido a substancialmente eliminar hoyos en los lingotes y a evitar que se fracturen. Como resultado final se obtuvo que los lingotes puedan ser trabajados luego del proceso de fundido, sin la necesidad de primero

condicionar la superficie. Kolek et al (2007) se fijaron en las técnicas de procesamiento de las aleaciones de Aluminio en busca de mejorar la calidad en la superficie de los productos de aluminio fundido, para poder controlar el desarrollo de óxido en los lingotes obtenidos por el proceso de fundición. Desarrollaron un método que consta en el rocío de humedad sobre la superficie de la aleación de aluminio durante el proceso de fundición, lo que provoca una mejora en la apariencia y reduce la oxidación sobre la superficie del lingote; y, continuamente exponiendo la superficie de la fundición a condiciones húmedas se eliminan substancialmente hoyos y fisuras en el producto. Shedden C. (2008) realizó estudio acerca del refinamiento del grano, analizando el efecto de las aleaciones titanio boro (TiB) como retardadores de grano en las aleaciones de aluminio; señalando que uno de los métodos más utilizados para controlar el crecimiento de los granos es el uso de refinadores de grano, los cuales introducen partículas que obstaculizan el crecimiento de los granos durante la fusión. Se estudió la aleación maestra Al – 5%Ti – 1%B, a diferentes tasas de adición, realizándole a cada muestra pruebas de tensión y medición del tamaño de grano; finalmente llegó a la conclusión de que cuanto mayor es el porcentaje de titanio presente en la muestra, menor debería ser el tamaño de grano y a menor tamaño de grano más resistente debería ser el material y por lo tanto, mayor el esfuerzo de tensión. En lo que concierne a estudios realizados sobre el aluminio, Díaz y López (1994) investigaron sobre la relación precio calidad como factor que afecta a las industrias consumidoras de aluminio para poder mantener los niveles de competitividad exigidos a nivel comercial. La viruta de aluminio producida durante el proceso de mecanizado de los pistones es vendida a una empresa que se encarga de fundir dicho aluminio para luego venderlo en forma de lingotes. Determinaron que la disminución de desperdicios y la reducción de los costos del aluminio son de gran importancia para mantener la competitividad del producto, por lo que se diseñó un proceso de compactación y ajuste de la aleación de aluminio, partiendo del reciclaje de la viruta, con la

posibilidad de reducir los costos de materia prima, comprobando además que se puede obtener un producto de la misma calidad a bajo costo.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 El aluminio (Díaz y López, 1994)

El aluminio es uno de los materiales más abundantes en la tierra, pero al mismo tiempo es uno de los más difíciles de obtener. Este metal nunca se encuentra libre, sino que está saturado químicamente con otros minerales. El aluminio se obtiene comercialmente a partir de bauxita, que es un mineral con 50 a 60 por ciento de óxido de aluminio o alúmina.

El aluminio se produce por primera vez en la historia como metal puro en 1827, industrialmente, a partir del cloruro de aluminio en 1854; y por el actual método por separación electrolítica del aluminio de la alúmina, inventando y patentado simultáneamente por Raul Heroult (Francés) y Charles Hall (Estadounidense) en 1886.

La producción de aluminio comienza con la separación de la alúmina mediante el proceso de Bayer, que en esencia consiste en el tratamiento de la bauxita con una solución de soda cáustica o de carbonato de sodio a alta presión y temperatura; el líquido resultante contiene una solución de aluminato de sodio y residuos de bauxita que contienen hierro, silicio, y titanio. Estos residuos se van depositando gradualmente en el fondo del tanque y luego son eliminados.

La solución de aluminato de sodio clarificada es bombeada dentro de un enorme tanque llamado precipitador. Se añaden finas partículas de alúmina con el fin de inducir la precipitación de partículas de alúmina puras, una vez que el líquido se enfría. Las partículas se depositan en el fondo del tanque, se remueven y luego son sometidas a 1100°C en un horno o calcinador, a fin de eliminar el agua que contienen, producto de la cristalización. El resultado es

un polvo blanco, alúmina pura, y la soda cáustica es devuelta al comienzo del proceso y usada nuevamente.

La alúmina, mediante el proceso Hall-Heroult, es separada del oxígeno para obtener el aluminio; proceso que consiste en hacer pasar corriente eléctrica por la alúmina disuelta en un baño de criolita.

La reducción del aluminio se realiza en las llamadas celdas electrolíticas, la cual consiste en un recipiente de acero recubierto internamente de carbón, conectado a una fuente de energía y con uno de los electrodos (polo negativo o cátodo), donde dicho recipiente contiene el baño de alúmina y criolita. El otro electrodo de carbón (polo positivo o ánodo) es sostenido sobre la celda con su extremo inferior dentro del baño de alúmina y criolita. Cuando se hace pasar cierta cantidad de corriente la alúmina se descompone en aluminio y oxígeno molecular. Como el aluminio líquido es más denso que la criolita se deposita en el fondo de la cuba, de forma que queda protegido de la oxidación a altas temperaturas. El oxígeno se deposita sobre los electrodos de carbón, quemándose y produciendo el anhídrido carbónico (CO_2) que se escapa a la atmósfera. El aluminio libre depositado en el fondo de la celda se extrae mediante un sifón. El proceso de reducción es continuo, realizándose ininterrumpidamente las 24 horas del día, los 365 días del año. Las celdas operan a bajo voltaje y a muy alto amperaje.

El aluminio tiene las características de ser excepcionalmente ligero y al mismo tiempo resistente ante los ataques corrosivos de la atmósfera y la acción de los productos químicos. Esto ocurre debido a que cualquier producto hecho de aluminio se oxida fácilmente al contacto con el aire, formándose una espesa capa protectora de óxido de aluminio, (Díaz y López, 1994).

El aluminio es un elemento químico perteneciente al grupo III de la tabla periódica, cuyas características son las siguientes:

Parámetros físicos – químicos:

Numero atómico (N.A.): 13

Peso atómico (P.A.): 26,9815 uma

Diámetro atómico: $2,86 \times 10^{-8}$ cm

Estructura cristalina: fcc (cúbicas caras centradas)

Parámetro de red: $4,0496 \times 10^{-8}$ cm

Densidad 2,7 gr/cm³

Parámetros termodinámicos:

Temperatura de fusión: 660 °C

Temperatura de ebullición: 2.450 °C

Calor latente de fusión: 390 joule/gr

Calor específico (líquido): 27.9 Kj/gr mol/ °C (660°C)

Conductividad térmica: 0.9×10^{-2} W/ m/ °C

Entre los aspectos poco favorables, que pueden ser mencionados del aluminio puro, se tiene que, no sirve para la fabricación de piezas fundidas; su colabilidad es pésima; sus propiedades mecánicas no son las adecuadas para un producto que se supone rígido, debido a que es sumamente plástico, maleable; es prácticamente imposible de mecanizar con herramientas de corte; posee un alto valor de la contracción durante la solidificación (del orden de 6%), y un elevado coeficiente de dilatación térmica.

De modo que fue necesario el desarrollo de diversas aleaciones para superar las limitaciones que presentaba el aluminio puro, (Debandi, 1998).

2.2.2 Aleaciones de aluminio

Una aleación es una sustancia, que posee propiedades metálicas, y está formada por dos o más especies dentro de las cuales una tiene que ser un metal. A una temperatura adecuada en estado líquido, es posible mezclar diferentes especies en casi cualquier proporción, (Debandi, 1998).

No se trata de una mezcla de metales. En realidad, una aleación es un arreglo estructural, con proporciones y propiedades definidas, producto de la combinación de diferentes aleantes.

El diseño de aleaciones se basa en la selección de composiciones químicas dentro de un conjunto de elementos que participan dentro de ciertos límites porcentuales, que se detallan a continuación:

Tabla 2.1. Porcentaje en peso a nivel comercial de aleantes para aleaciones de aluminio (Debandi, 1998).

Elemento aleante	Rango de composición comercial
	% Peso
Si	0 – 25
Fe	0 – 3
Cu	0 – 10
Mg	0 – 10
Mn	0 – 2
Zn	0 – 10
Ni	0 – 2
Sn	0 – 20
Cr	0 – 0.5
Ti	0 – 0.25
Sr	0 – 0.05
Co	0 – 0.20
Zr: V	0 – 0.20

Los efectos que estos aleantes producen en las propiedades y características del aluminio son también variados.

Para formar aleaciones de aluminio, se le añade un amplio espectro de los elementos previamente señalados; donde la solubilidad sólida de estos elementos aleantes varía en un amplio rango de composiciones, (Debandi, 1998).

Todos los aleantes enumerados, en mayor o menor grado, pueden formar soluciones sólidas en el aluminio; en general la solubilidad aumenta con la temperatura. Los límites de solubilidad más importantes son:

Tabla 2.2. Límites de solubilidad de aleantes para aleaciones de aluminio
(Norma ANSI H35.1, 2004).

Aleante	Temperatura, °C	Límite de solubilidad
		% Peso
Si	577	1.65
Fe	655	0.05
Cu	548	5.65
Mg	450	17.4
Mn	658	1.8
Zn	443	70.0
Ni	640	0.04
Sn	228	0.1
Cr	661	0.77
Ti	665	0.3
Co	657	0.02

Las aleaciones comerciales de aluminio para la fundición de piezas son, en general, sistemas multicomponentes de composición definida. Los aleantes principales, que otorgan propiedades de interés tecnológico al aluminio son: el silicio, el cobre, el magnesio, el zinc y el estaño. Es en base a ellos que se normaliza la nomenclatura de las diversas aleaciones.

También participan, como aleantes secundarios o como impurezas habituales, los siguientes elementos: hierro, manganeso, cromo, níquel, cobalto, sodio, titanio y boro., los cuales en proporción relativamente menor que los primeros generan o evitan diversos efectos.

Algunos de estos elementos son añadidos para endurecer la solución sólida, tales como el magnesio (Mg) y el cobre (Cu); y estos a su vez, al igual que el litio (Li), silicio (Si) y zinc (Zn), son añadidos para formar varios compuestos intermetálicos deseados, para que haya o no formación de endurecimiento por dispersión, (Debandi, 1998).

Aproximadamente, el 20% de la producción total mundial de aluminio es, en promedio, convertida en partes obtenidas por los procesos de vaciado. La industria del transporte usa en Japón el 70%, en Europa es del 60%, y el Estados Unidos de América es del 44% del tonelaje de producción de aluminio que es transformada en productos vaciados; esas grandes diferencias, se deben principalmente a las variaciones en las cantidades de aleaciones de aluminio usadas en aplicaciones vehiculares, (Quintero, 2001).

Clasificación de las aleaciones

Las aleaciones comerciales de aluminio se clasifican, según su composición química, en dos grandes familias: aleaciones para fundición y para procesos de conformado plástico. Se distinguen, principalmente, por la proporción existente entre el aluminio y el contenido total de aleantes.

Mientras que en las aleaciones para fundición, los aleantes están en proporción relativamente elevada, en las otras, se encuentran en cantidades menores, de modo tal que las aleaciones conservan la ductilidad característica del aluminio puro.

En ambas familias se distingue una subdivisión entre aleaciones tratables y no tratables térmicamente. Las primeras de éstas poseen respuestas elevadas a las solicitudes mecánicas; las segundas, en el caso de

las aleaciones destinadas a conformado, se endurecen sólo por deformación en frío.

Las aleaciones para fundición se distinguen según el tipo de molde o proceso, ya sea, si el molde es de arena, metálico permanente, ó, si son aleaciones para inyectado a presión. En cambio, en aleaciones para conformado plástico se diferencian según los procesos, ya sea, para laminación, extrusión o forja.

Tabla 2.3 Especificación de las aleaciones de aluminio para fundición (Norma ANSI H35.1, 2004).

N° AA	Sistema Base	Molde o Proceso
1XX.X	Al > 99,0	
2XX.X	Cobre	Arena; Shell
3XX.X	Silicio con Cu y/o Mg	Arena; metálico
4XX.X	Silicio	Metálico; inyección
5XX.X	Magnesio	Arena; metálico
7XX.X	Zinc	Antifricción
8XX.X	Estaño	

En la serie 1XX.X, el segundo y tercer dígito indican las centésimas del valor de porcentaje mínimo de aluminio, por ejemplo: si la composición es 99.98% Al se designa como 198.X.

En el resto de las series, los segundos y terceros dígitos no indican nada en especial, sirven solamente para designar distintas aleaciones.

El dígito a la derecha del punto, en todos los casos, vale 0, 1 ó 2; el 0 designa si es producto final; el 1 indica estado de lingote y al 2 indica rangos de composición de lingotes más estrechos (calidad alta), (Norma ANSI H35.1, 2004).

Tabla 2.4. Aleaciones para procesos de conformado (Norma ANSI H35.1, 2004).

N° AA	Sist. base	Proceso	Tratamiento Térmico
1000	Al puro	Laminación	No
2000	Al – Cu	Laminación- Extrusión-Forja	Si
3000	Al – Mn	Laminación	No
4000	Al – Si	Forja	No
5000	Al – Mg	Laminación	No
6000	Al – Mg – Si	Extrusión	Si
7000	Al – Zn + (Cu)	Laminación- Extrusión-Forja	Si
8000	Otras		

Características de los sistemas de aleaciones para fundición

A pesar de la nomenclatura de la Asociación del Aluminio (AA) de las tablas 2.3 y 2.4, cada país ha desarrollado nomenclatura propia para designarlas cuando han realizado desarrollos de piezas para fines específicos. Estas aleaciones para usos en piezas vaciadas, desde el punto de vista de sus composiciones químicas de los elementos mayoritarios, se les puede clasificar en seis tipos básicos:

- Aleaciones aluminio – cobre.
- Aleaciones aluminio – cobre – silicio.
- Aleaciones aluminio – silicio.
- Aleaciones aluminio – magnesio.
- Aleaciones aluminio – zinc – magnesio.

- Aleaciones aluminio – estaño.

Aleaciones aluminio-silicio

Las aleaciones aluminio – silicio, constituyen entre el 85 y 90 % del total de las aleaciones vaciadas.

Es un sistema de aleaciones binarias que no contiene cobre y se les usa cuando se requiere buena vaciabilidad, buena resistencia a la corrosión, y buenas mecanización y soldabilidad. Partes automotrices, para usos alimenticios, y bombas, todas ellas vaciadas en moldes de arena y moldes permanentes, son la mayor selección de estas aleaciones.

En la figura 2.1, se esquematiza los diferentes tipos comerciales de las composiciones químicas de esas aleaciones, que dependiendo del contenido de silicio se dividen en tres grupos: hipoeutécticas, eutécticas, e hipereutécticas.

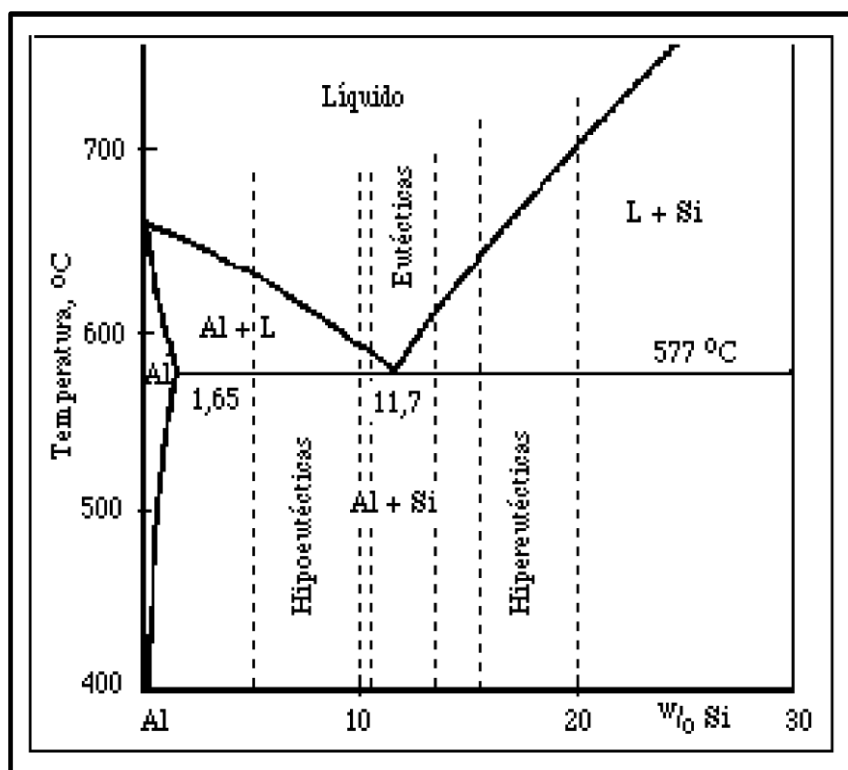


Figura. 2.1. Diagrama binario de fase Al – Si. (Quintero, 2001)

En la Tabla 2.5, se presenta la mayoría de las más comunes especificaciones químicas de estas aleaciones de uso en fundición. Se aprecia además, que el cobre (Cu) y el magnesio (Mg) son aleantes, añadidos con propósitos de aumentar la resistencia mecánica y la templabilidad del material vaciado; los elementos impurezas, tales como el hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), parcialmente se disuelven en la solución sólida matriz y forman parte de las segundas fases; todo ello sucede durante el proceso de solidificación.

Las letras colocadas en la técnica de moldeo más conveniente a usar para la fabricación de las piezas es la siguiente: S, arena; P, molde permanente; D, inyección a alta presión.

Tabla 2.5. Composición Química de las más comunes aleaciones Al-Si de uso en fundición (Contenido de elementos, %_w). (Norma ANSI H35.1, 2004).

Aleación	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Otros	Técnica
319.0	6,0	3,5	< 0,10	< 1,0	< 1,0		S, P
332.0	9,5	3,0	1,0	1,2	1,0		P
355.0	5,0	1,25	0,5	< 0,06	< 0,35		S, P
A356.0	7,0	< 0,20	0,35	< 0,2	< 0,1		S, P
A357.0	7,0	< 0,20	0,55	< 0,2	< 0,1	0,05 Be	S, P
380.0	8,5	3,5	< 0,1	< 1,3	< 3,0		D
383.0	10,0	2,5	0,10	1,3	3,0	0,15 Sn	D
384.0	11,0	2,0	< 0,3	< 1,3	< 3,0	0,35 Sn	D
390.0	17,0	4,5	0,55	< 1,3	< 0,1	< 0,1 Mg	D
413.0	12,0	< 0,1	< 0,10	< 2,0			D
443.0	5,25	< 0,3	< 0,05	< 0,8	< 0,5		S, P

La adición de pequeñas cantidades de cobre, magnesio o níquel produce endurecimiento de las aleaciones aluminio-silicio; en esta familia de aleaciones de composición eutéctica, el silicio provee de buenas propiedades de vaciado, de volumen de rechupe y el cobre mejora la resistencia tensil, la

maquinabilidad y la conductividad térmica a expensas de una reducción en la ductilidad y en la resistencia a la corrosión, (Quintero, 2001).

2.2.3 Aleantes

Tomando en cuenta las desventajas que posee el aluminio puro, fue necesario el desarrollo de diversas aleaciones, conformadas por la adición en pequeñas proporciones de uno o varios elementos, para poder obtener un mejor metal que cumpla con todas las exigencias del producto a elaborar.

Es interesante analizar las características e influencias que ejercen los diferentes aleantes que se utilizan con el aluminio, para poder comprender el porqué de las muchas aleaciones comerciales existentes en el mercado

Entre los principales en el caso de la aleación F-132 se encuentran el magnesio, cobre, silicio y hierro.

Silicio (Si): Es el aleante principal de uso más generalizado en la elaboración de piezas fundidas.

Los efectos más notables que produce el Si en el aluminio son: mejora en la colabilidad; disminución del coeficiente de dilatación a medida que crece su concentración; en cuanto a las propiedades mecánicas, con el contenido de Si aumenta la dureza y la resistencia a la tracción, a la vez que disminuye la ductilidad, aunque, si el contenido de Si es mayor al 10 – 12%, la ductilidad es prácticamente nula, por lo que se deben usar modificadores de estructura, como el sodio (Na) o el estroncio (Sr) para generar ductilidad; en compañía del cobre o magnesio otorgan buenas propiedades mecánicas.

Las aleaciones Al – Si, además, son fácilmente soldables, presentan buenas condiciones de estanqueidad en piezas que deben encerrar fluidos, tienen buena resistencia al desgaste y a la corrosión.

Hierro (Fe): Este elemento es una impureza natural del aluminio, ya que está contenido en la bauxita y en la alúmina; además, se incorpora durante cualquier etapa del proceso, debido a la inevitable presencia del acero como

material de equipos y herramientas; el cual se disuelve con facilidad en el aluminio líquido.

Cuando el hierro supera porcentajes de algunas décimas por ciento, su presencia es considerada dañina, puesto a que forma compuestos frágiles con el aluminio y otros aleantes, como por ejemplo el FeSiAl_5 , que deterioran las propiedades mecánicas. Esto se puede contrarrestar añadiendo manganeso o cromo, los cuales actúan formando compuestos con el hierro menos peligrosos.

Por otra parte, en aleaciones de bajo contenido de silicio, la presencia del hierro es positiva ya que hace que disminuya la tendencia al agrietamiento en caliente de las piezas.

En general el Fe es considerado una impureza negativa dentro del aluminio, puesto a que forma fases que producen un descenso en la ductilidad y en otras propiedades; sin embargo, es conveniente siempre tener bajo control el contenido de Fe de la aleación que se utiliza y verificar que su valor es el autorizado por la norma respectiva.

Cobre (Cu): La virtud del Cu dentro de las aleaciones de aluminio se debe al notable aumento o mejora que introduce en la maquinabilidad del metal, ya que no sólo aumenta a las propiedades mecánicas como la dureza, sino que permite obtener una viruta discontinua durante la operación con la herramienta de corte, facilitando el trabajo y la duración del afilado de la herramienta.

A medida que se incorpora cobre al aluminio, la resistencia mecánica aumenta progresivamente hasta un porcentaje de cobre de alrededor del 12%, por lo que es el aleante principal de las aleaciones conocidas como duraluminios, las cuales adquieren elevada resistencia mecánica mediante tratamientos térmicos.

El Cu mejora sustancialmente el comportamiento durante el mecanizado, sin embargo, disminuye la resistencia a la corrosión y la colabilidad se ve muy desmejorada por la presencia del Cu. Las mejoras que produce en las propiedades mecánicas desaparecen por completo cuando la pieza trabaja a temperaturas mayores a los 100 °C.

En general, como aleante para la fundición de piezas cumple un buen papel acompañando, en bajo tenor, al Si, con contenidos de éste mayores que el 6-7% para asegurar una buena colabilidad.

Magnesio (Mg): Las aleaciones Al-Mg poseen buenas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y facilidad de mecanizado. No poseen buena colabilidad, aunque su principal problema reside en la fácil oxidación del magnesio en el estado líquido de la aleación, lo cual hace complicado su manipulación. Para evitar la reducción por oxidación del magnesio (Mg) suele agregarse berilio (Be), el cual forma en la superficie un óxido más estable evitando que el magnesio (Mg) tome contacto con el aire.

Las aleaciones con porcentaje de Mg superior al 5% son susceptibles de tratamiento térmico. Cuando el porcentaje es mayor que el 10%, las aleaciones tienen el problema de que no se terminan de estabilizar, mecánicamente, por muchos años.

En piezas fundidas, el Mg es utilizado generalmente en pequeñas proporciones acompañando al Si, mejorando las propiedades mecánicas de la aleación al formar el compuesto endurecedor Mg_2Si ; y, en porcentajes del orden de 0.3-0.4% permiten obtener, mediante tratamientos térmicos, excelentes respuestas mecánicas.

Efectos de otros aleantes: En las aleaciones comerciales intervienen otros aleantes, en menor proporción, para producir distintos efectos: el titanio es incorporado para reducir el tamaño de grano de las fases ricas en aluminio en cualquiera de sus aleaciones; manganeso y/o cromo se emplean como

correctores del contenido de hierro, ya que neutralizan la formación de fases tales como FeSiAl_5 ; el estroncio es empleado como modificador de la estructura eutéctica de las aleaciones Al–Si, con ello se logra una notable mejora en la ductilidad de estas aleaciones. El proceso de modificación es importante cuando se fabrican piezas sujetas a impactos en servicio, (Debandi, 1998).

2.2.4 Fundición de aleaciones de aluminio

La fabricación de piezas fundidas, se inicia con la fusión del material metálico para hacer posible la manufactura de la aleación, que luego va a ser vaciada en los moldes donde se le deja solidificar y enfriar hasta la temperatura ambiente.

La preparación correcta del metal líquido se efectúa en hornos adecuados, a los cuales se les suministra calor en cantidades apropiadas, donde se realiza la fusión de la materia prima, es decir, se funde la carga.

Existen diversos factores que pueden influir en la calidad del metal líquido, entre los cuales pueden ser mencionados:

- El desgasificado, tomando en cuenta el método empleado, las condiciones presentes durante el proceso y el tiempo de duración,
- Los elementos afinadores de grano y modificadores de estructura, señalando la cantidad empleada y la forma en que son incorporados al baño de metal fundido,
- Las condiciones ambientales presentes,
- La carga introducida al horno de fundición,
- La cantidad de sales fundentes agregadas para la limpieza y desescoriado del baño fundido,
- La eficiencia del operario durante la ejecución de sus funciones, entre otros.

En fundición se puede definir un horno como una unidad de fusión donde se lleva hasta la temperatura de vaciado a una determinada cantidad de metal de una composición química requerida o especificada; y su capacidad está influenciada por consideraciones de producción de la planta, (Quintero, 2001).

Hornos de crisol

Son los más simples y los típicos hornos de quemado indirecto de combustible; consisten de una coraza de acero recubierta con refractario. Esta cubierta de refractario o crisol normalmente es de carburo de silicio, aísla los gases de combustión de la carga metálica. Se esquematiza en la figura 2.2 un ejemplo de este tipo de horno.

La capacidad del horno está limitada por el tamaño del crisol, que puede ser de arcilla-grafito (plombagina) o de arcilla-silicio-grafito (carborundo). La carga metálica debe ser limpia para evitar la formación de escoria que puede atacar al refractario del crisol. En aluminio, los hornos de crisol se usan en fundición para la fusión, el mantenimiento, o ambas etapas, debido a la facilidad de cambio de aleación.

Pueden añadirse refinadores de grano, efectuarse modificaciones con sodio ó estroncio, o aplicarse tratamientos de desgasificación, una vez que se ha fundido el metal.

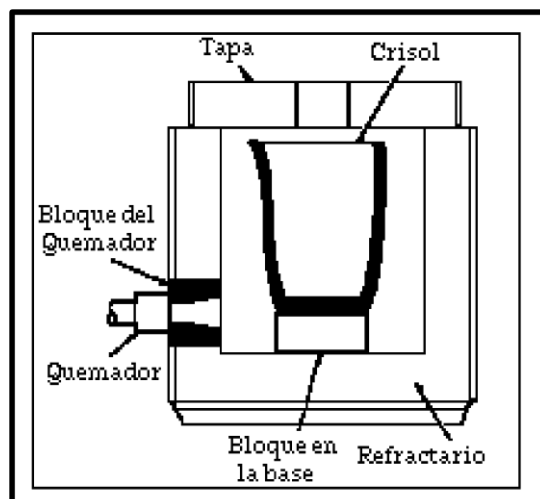


Figura. 2.2 Horno de crisol.

Para lograr una buena eficiencia de fusión y optimizar la vida del crisol, es necesario mantenerlo siempre caliente para evitar áreas frías y calientes. De esta manera, se obtiene larga vida del crisol, mejor eficiencia de combustible, rápida velocidad de fusión, y bajos niveles de ruido.

Materias primas para la fundición de aleaciones

En cuanto a la calidad de la materia prima, se deben considerar aspectos como la clasificación tanto por tipos de aleación como por tamaño y forma. Su clara identificación y orden de ubicación, junto a precauciones de limpieza y humedad permiten una conveniente disponibilidad y fácil selección para determinar los balances de carga al horno.

El control de calidad de todas las materias primas utilizadas, normalmente se efectúa por inspección o por muestreo y análisis. La forma particular de realizarlo y la cantidad de control a ser aplicado van a depender principalmente del conocimiento que se tiene sobre sus orígenes, sobre su calidad y de su confiabilidad.

La humedad es un factor importante a ser considerado, ya que se genera aún al transportar material desde una zona fría y húmeda hasta otra cálida; también cuando el almacenamiento se realiza en zonas cerradas donde hay variaciones notables de temperatura. Por supuesto, el almacenamiento de la chatarra a la intemperie, ocasiona que además de absorber humedad, se contamine con polvo y basura, (Quintero, 2001).

2.2.5 Oxidación del aluminio y sus aleantes en el estado líquido.

Formación de óxidos.

Se define como oxidación a la reacción química mediante la cual un metal “M” se combina con el oxígeno. Suponiendo la existencia de oxígeno libre en contacto con el metal, la reacción puede ser descrita como:



Sin embargo, la oxidación de M puede originarse al entrar en contacto con otras sustancias, por ejemplo frente a otro óxido:



Los óxidos metálicos son, en general, compuestos cristalinos muy estables (de difícil disolución); de alto punto de fusión; duros y frágiles, (Debandi, 1998).

El aluminio se oxida rápidamente a temperatura ambiente, la superficie del metal sólido se cubre rápidamente de una delgada capa de alúmina de bajo espesor (0,02 – 0,03 mm aproximadamente) que, frente a la dificultad de difundir o desprenderse actúa como una cobertura pasivadora, impidiendo que el proceso de oxidación penetre en el material.

En estado líquido, en el rango de temperaturas 700 – 800°C, en la superficie del metal en reposo se forma una capa delgada de alúmina que flota a expensas de la tensión superficial y protege al resto del baño del O₂ atmosférico.

Las principales fuentes que proveen de O₂ al aluminio fundido son:

- El aire atmosférico, que permite que se produzca la reacción de oxidación (ecuación 2.1)
- La humedad de la atmósfera del horno, proveniente de los gases de combustión; la humedad existente en los fundentes (higroscópicos) o pinturas de herramental; la humedad incluida en la porosidad de los lingotes de la carga
- Los óxidos metálicos de los aleantes, fundentes o refractarios.

La oxidación del baño de aluminio se traduce en dos hechos negativos a los fines de los procesos metalúrgicos:

1. Reducción del metal

2. Formación de partículas duras, insolubles, que quedan ocluidas en las piezas sólidas constituyendo una forma de defecto, (Debandi, 1998).

Escorias y sedimentos

El metal reacciona con el oxígeno, el bióxido de carbono y con el nitrógeno para formar productos sólidos que se mantienen sobre la superficie del baño de metal fundido. Cuando el aluminio se expone a la atmósfera se forma una película de oxido sumamente adherente y protectora que impide posteriormente el incremento en la velocidad de oxidación. Los productos de los procesos de oxidación de las aleaciones fundidas pueden ser clasificados en escorias y sedimentos, (Díaz y López, 1994).

El concepto de escoria es muy amplio y poco definido; puede describirse como un material semilíquido, que sobrenada en el caldo. La escoria del aluminio se encuentra formada por una mezcla metálica como óxidos, nitruro, carburos, suspendidos en una capa de metal líquido de la aleación que se está fundiendo, (Debandi, 1998).

En un baño fundido puede haber escoria en todas partes: en la superficie, en las paredes refractarias, en el fondo, a medias aguas, etc.

En el caso del aluminio y sus aleaciones, a la escoria se le denomina nata; y está constituida principalmente por óxidos de aluminio, de magnesio, de silicio, de manganeso y demás elementos constituyentes de las aleaciones de base aluminio.

La nata es un subproducto de la fusión de la aleación de aluminio resultando en la creación de óxidos; como es mojada por la aleación y su densidad es menor pero muy cercana a la de ésta, a menudo se distribuye con facilidad y en consecuencia su separación se dificulta; además, de mantenerse dentro de la aleación líquida, donde la parte no metálica representa el 10% y el crecimiento de la misma se controla mediante la

difusión de oxígeno en la interfase metal-óxido; resultando la cantidad de escoria que se puede generar durante la fusión en los hornos muy variable, (Díaz y López, 1994).

La cantidad de nata formada durante la fusión aumenta con: el empleo de chatarra fina muy expuesta a la intemperie o corroída; la presencia de magnesio en las aleaciones cargadas; una fuerte turbulencia que rompe la superficie de óxido en el baño líquido; y, la temperatura de los gases en contacto con la superficie del baño metálico, (Quintero, 2001).

Teniendo en cuenta que en las escorias superficiales se suelen encontrar las temperaturas más altas del baño fundido, es importante considerar la posible reacción que aquellas puedan tener con los materiales refractarios.

Desde el punto de vista físico, una propiedad de interés de las escorias es la viscosidad: escorias fluidas y delgadas pueden servir de capa protectora durante el mantenimiento del metal fundido; escorias porosas, espesas, no realizan buena cobertura ya que permiten el flujo gaseoso. Si la escoria es viscosa y densa, se puede comportar como un aislante térmico que impide el acceso de calor al metal.

Una escoria que contenga mucho metal genera gran merma durante el desescoriado. La viscosidad de la escoria depende de la temperatura y de su composición.

Calentar en exceso el horno para disminuir la viscosidad de la escoria puede resultar peligroso, porque se producen violentas reacciones exotérmicas que pueden iniciar el fenómeno de aluminotermia, que consiste en la oxidación violenta de las pequeñas gotas de Al (o Mg) que contiene la escoria, las cuales entran en ignición y si no se detiene el proceso a tiempo, inicia la reacción de todo el baño líquido, con el efecto de altas mermas metálicas, (Debandi, 1998).

Operaciones desoxidantes

Acción física: flotación mediante gases.

Una de las técnicas de remoción de óxidos presentes en el interior del baño líquido se basa en la hipótesis de que las partículas de óxido se equilibran a medias aguas gracias a su porosidad, que retiene gases atrapados.

En el mismo sentido actúa el efecto de burbujas gaseosas adheridas; esto hace que un método eficaz para eliminar tales óxidos sea el generar una corriente gaseosa ascendente mediante el burbujeo de gases inertes como el nitrógeno ó el argón, ó gases activos como el cloro o una mezcla apropiada de éste con los anteriores.

Los óxidos reflatados se adhieren a la escoria flotante, y de allí son eliminados

Acción química: fundentes desoxidantes

El fundente desoxidante recibe también el nombre de flujo escorificante, puesto a que modifica la relación de tensión superficial metal-óxido, con lo cual pequeñas gotas del metal retenidas en la escoria son liberadas.

Otra propiedad que se les puede atribuir, es que pueden modificar la viscosidad de la escoria, con lo cual se simplifica su manejo y se evita arrastrar metal al realizar el desescoriado, (Debandi, 1998).

Estos fundentes son compuestos de mezclas salinas, razón por la cual reciben el nombre de sales fundentes; poseen un punto de fusión inferior al del aluminio y tienen la función de depurar al metal de las impurezas y óxidos durante el proceso de fusión.

Estos tipos de sales pueden ser sólidas o gaseosas y reaccionan en forma exotérmica con elementos no deseables que se encuentran disueltos en el metal líquido, convirtiéndolos en óxidos y recubriéndolo superficialmente

para prevenir su absorción de gases y la nueva formación de óxidos; además, debe señalarse que estas sales deben mantenerse libres de humedad. El fundente tiene un efecto aislante, lo que permite proteger al metal contra la oxidación, así como evitar excesivas pérdidas de calor, (Quintero, 2001).

En el aluminio y sus aleaciones, la adición de fundentes debe hacerse al líquido en las mejores condiciones para cada tipo de fundente. Para alcanzar la máxima efectividad de la sal fundente hay que tomar en cuenta dos aspectos:

- La temperatura a la cual debe añadirse la sal, necesaria para el cabal desarrollo de las reacciones de limpieza
- La agitación del metal líquido después de añadir la sal.

Las temperaturas de tratamiento con sales fundentes para el aluminio y sus aleaciones, oscilan entre 690 °C y 760 °C.

Desnatado o desescoriado

El desnatado es una operación de limpieza de la superficie del baño líquido durante el proceso de fusión, con el propósito de dejarlo libre de la nata. Es necesario realizar el desnatado del horno de fusión después de haber añadido sales fundentes.

El desnatado debe ejecutarse de manera cuidadosa para que no se produzca agitación del metal líquido, lo que conduciría a la floculación de los óxidos y por lo tanto tenderían a sumergirse, contaminando de esta forma al baño de fundición, (Quintero, 2001).

2.2.6 Contaminación del metal fundido, (Debandi, 1998).

Este fenómeno trata sobre la incorporación a la estructura de la aleación de elementos químicos ajenos al diseño de composición establecido; puede incluirse, dentro del mismo concepto, la variación del porcentaje de un aleante.

Los elementos contaminantes de las aleaciones provienen de distintas fuentes; elementos tales como el hierro, cobre, manganeso, etc., aparecen, en general, incluidos en la chatarra que compone la carga, de modo tal que su control debe establecerse en el proceso de selección de aquella.

El hierro, merece ser destacado entre los elementos contaminantes por el hecho que su tenor tiende siempre a aumentar en la composición, admite también como una importante fuente de procedencia a la disolución del material de los herramientas que se utilizan para operar la aleación líquida. Un modo de prevenir esta contaminación es asegurándose de que todo el herramental esté protegido por pinturas adecuadas y que al fundir piezas rechazadas, estas no conserven tornillos o insertos ferrosos.

Elementos tales como el calcio, sodio, potasio, etc., suelen tener su origen en los fundentes, pinturas, materiales refractarios, que son de uso indispensable en el proceso.

Estos elementos tienen la capacidad de formar compuestos complejos con el aluminio, o con los otros aleantes, que pueden perjudicar a las propiedades de algunas aleaciones, mientras que en otras pueden jugar un papel benigno. Por ejemplo: el calcio suele ser considerado un envenenador de la estructura de muchas aleaciones; el sodio, es altamente nocivo en aleaciones destinadas a procesos de laminación.

Otros compuestos contaminantes son los hidrocarburos, nitruros, carburos, sulfuros, que se originan en las reacciones de los gases de combustión de los hornos. Estas junto a los óxidos, constituyen partículas insolubles que quedan atrapadas en las piezas. Los carburos y carbonatos pueden provenir también de la descomposición de aceites o grasas contenidas por la chatarra.

Debe ser mencionada también la contaminación gaseosa que es la responsable de la formación de microporos en los lingotes y piezas fundidas.

Son varios los gases que tienen la posibilidad de disolverse en el aluminio líquido, pero es el hidrógeno el que merece especial atención por las cantidades en que se puede involucrar.

La disolución de H_2 en el aluminio líquido asciende rápidamente a partir de los $700^{\circ}C$. Su origen es múltiple: el aire; la descomposición de hidrocarburos del combustible del horno; los aceites o grasas contenidos en la carga; y, la descomposición de moléculas de agua provenientes de distintas humedades que pueden llegar al líquido, tales como atmosférica, sales fundentes higroscópicas, pinturas, etc.

La descomposición de moléculas de agua en el interior del aluminio líquido genera un doble efecto negativo: el oxígeno liberado produce óxido; y, el hidrógeno se transforma en un contaminante gaseoso.

Cuando un baño de líquido de aluminio conteniendo hidrógeno disuelto se enfría, produce una disminución de la solubilidad gaseosa; el gas queda en exceso y es segregado por el líquido en la forma de pequeñas burbujas. Si en esas condiciones se inicia la solidificación, las burbujas quedan atrapadas por el sólido en forma de microporos.

2.2.7 Inclusiones en las aleaciones de aluminio.

Las inclusiones han sido reconocidas como un problema en el área de fundición; ellas son frecuentemente una causa del rechazo de productos, ya que su presencia puede conducir a la reducción de las propiedades mecánicas, un pobre acabo superficial, aumento de la porosidad o a la tendencia a la corrosión.

Las inclusiones en las fundiciones de aleaciones de aluminio pueden ser generalmente de dos tipos: exógenas o endógenas. Las inclusiones exógenas se originan desde el exterior de la fundición e incluyen partículas refractarias tales como alúmina y sílice. Las inclusiones endógenas se generan por

reacciones químicas dentro de la aleación, o son restos de un tratamiento mal realizado al baño de fundición, (Gruzleski y Closset, 1990).

Es necesario realizar una limpieza de toda la aleación líquida para poder obtener productos de buena calidad y satisfacer las exigencias del consumidor, por lo que en la fundición un metal en estado líquido limpio es deseado por diversas razones relacionadas con las propiedades mecánicas, la porosidad y la fluidez del metal.

Propiedades mecánicas, (Gruzleski y Closset, 1990)

Las inclusiones promueven el inicio de las fracturas en el material y contribuyen en el esparcimiento en toda la superficie, por lo que su remoción resulta en propiedades mecánicas más definidas y consistentes.

El comportamiento de las inclusiones en el inicio de grietas por fatiga en el material bajo condiciones de carga dinámica es bien conocido. Un modo para evitar este tipo de comportamiento es filtrar la aleación líquida, lo que produciría un incremento a la resistencia a la fatiga, produciendo así productos por fundición aceptables.

Porosidad, (Gruzleski y Closset, 1990)

En cuanto a la formación de las porosidades en aleaciones de aluminio fundido, las partículas sucias o inclusiones presentes brindan mayores posibilidades de que se generen defectos en la pieza fundida, en comparación a un metal limpio prácticamente libre de impurezas.

Fluidez, (Gruzleski y Closset, 1990)

Las películas de óxido existen como sólidos en conjunto a la fase líquida de la aleación fundida, por lo que particularmente si se presenta en grandes dimensiones o cantidades reduce la fluidez de la aleación líquida. En orden de aumentar la fluidez se debe realizar la remoción de estas películas de óxido, a través de la filtración (ver figura 2.3).

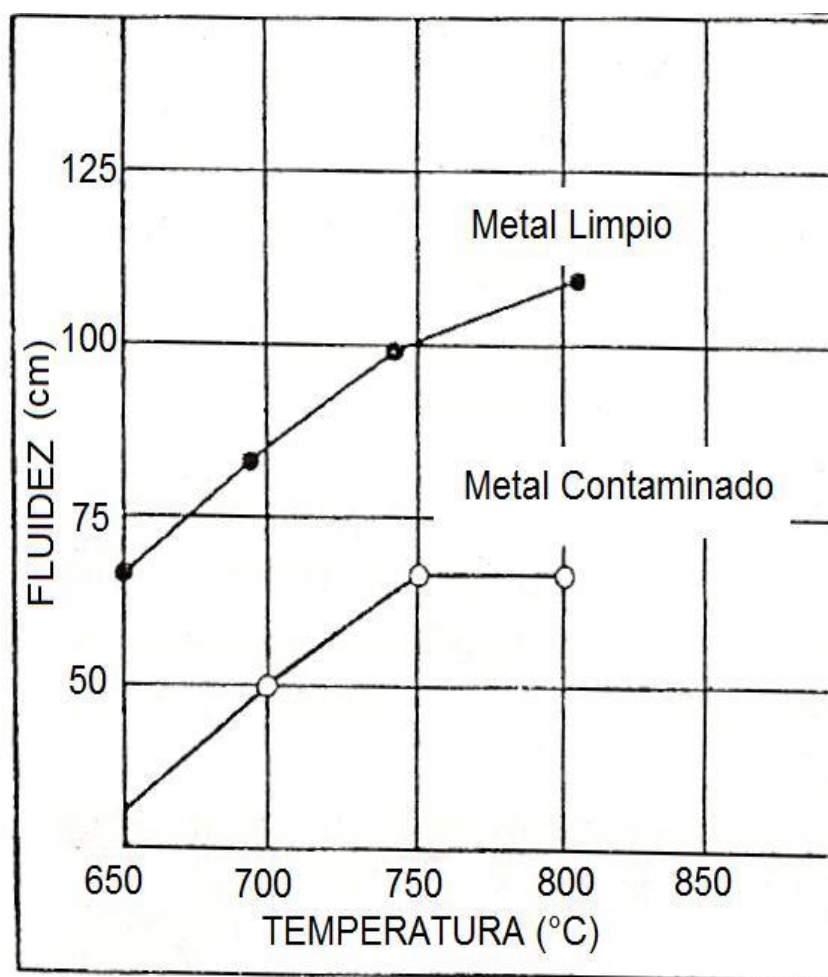


Figura 2.3. Efecto de la filtración en la fluidez del metal. (Gruzleski Closset, 1990)

Tipos de filtros, (Gruzleski y Closset, 1990)

Filtro de cama: Se emplearon en un principio por varios años. En estos, la aleación fundida es vertida a través de una cama de pelotas de alúmina y las inclusiones quedaban atrapadas mientras la aleación viajaba a través de los espacios comprendidos entre las pelotas.

Filtros de cerámica: La alta porosidad presentes en estos filtros les otorga una ventaja en el peso puesto a que son muy livianos, pero para ciertas aplicaciones pueden resultar muy frágiles, y su alto grado de porosidad pueden hacer muy difícil la filtración de finas partículas de inclusiones.



Figura 2.4. Filtros de cerámica.

Filtros por adherencia de partículas: En estos filtros la cantidad de porosidad es variada debido al cambio del tamaño de grano de las partículas del material del cual están compuestos.

En general, estos filtros son más densos que los filtros de cerámica y por ende poseen menor porosidad y han desarrollado un poco mas de resistencia.



Figura 2.5. Filtros por adherencia de partículas.

Ubicación de los filtros

Los filtros pueden ser ubicados tanto en el horno como en el crisol de fundición, o en el molde mismo. La selección de la localización está dictada básicamente por el tipo de operación de fundición.

Por ejemplo en la fundición a presión, la aleación es filtrada al momento en que esta deja al horno de fundición o mientras esta se mantiene en un cucharón o un crisol.

Filtros por adherencia de partículas poseen una gran eficiencia en la filtración debido a su robusto aspecto por naturaleza y rangos de flujos bajos, y encuentra aplicación en hornos de fundición y crisoles.

En la figura 2.6 y 2.7, se muestran la ubicación de un filtro vertical en el horno de fundición y un filtro en un crisol respectivamente.

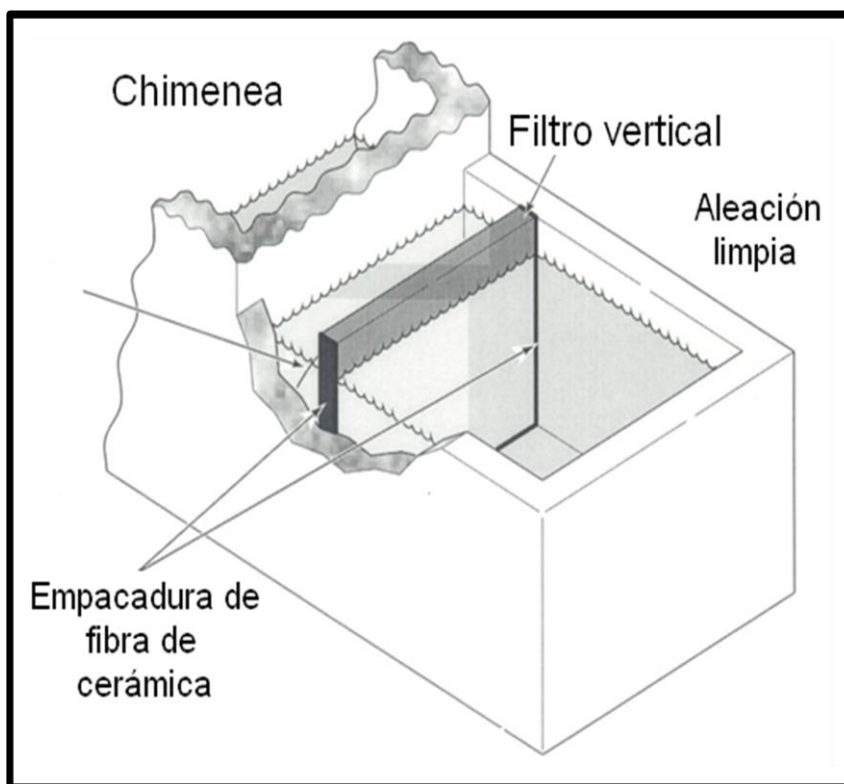


Figura 2.6. Filtro vertical ubicado en horno de fusión.

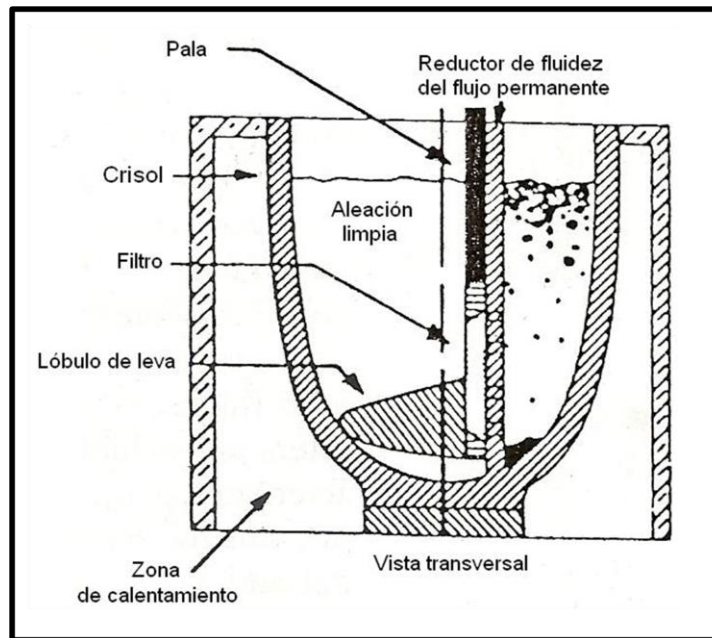


Figura 2.7. Filtro ubicado en crisol.

Funcionamiento de los filtros.

Dos tipos fundamentales de filtración han sido identificados: filtración profunda de cama y filtración de torta.

Filtración profunda de cama: En este método de filtración, las partículas son atrapadas por el cuerpo del filtro, a medida que la aleación líquida fluye a través de este. Usualmente, estas partículas son de menor tamaño que los poros del filtro, y la captación va a depender del contacto establecido entre las partículas y las paredes del poro, quedando adheridas en su lugar.

Existen tres mecanismos a través de los cuales las inclusiones hacen contacto con la pared porosa del filtro: la partícula es atrapada por fuerzas inerciales, si su peso evita que esta siga el trayecto del fluido, quedando depositada sobre la pared del filtro; las partículas pueden ser también interceptadas por la pared porosa del filtro en el paso del fluido a través de este; ó, por efectos generados debido a la baja velocidad de la aleación líquida cerca de la pared del filtro, lo que puede causar que las partículas se

ubiquen en los poros de la superficie del filtro. Estos tres mecanismos se encuentran esquematizados en la figura 2.8.

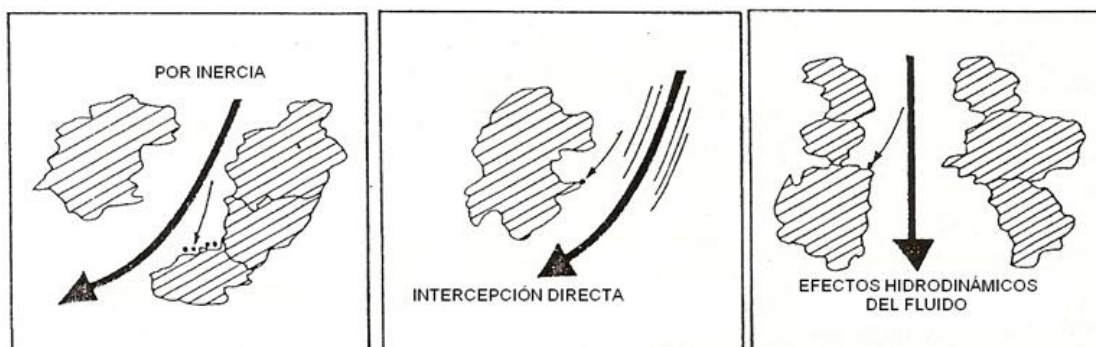


Figura 2.8. Mecanismos de captación de partículas en el filtro.

Filtración de torta: Este tipo de filtración ocurre en la superficie del filtro, y es esencialmente una acción de tamizado. Inicialmente, partículas de un tamaño mayor a las dimensiones de los poros del filtro son atrapadas a la entrada del filtro. Los espacios que quedan libre entre estas partículas atrapadas son más finos que los poros originales del filtro, por lo que, partículas más pequeñas pueden ser detenidas. Eventualmente, otra torta se va formando en la parte superior, sirviendo de filtro también a la aleación.

En la filtración por torta, la función cumplida por el filtro original es simplemente atrapar las partículas más grandes, para luego servir de mecanismo de soporte al filtro de torta. Sucesivamente, los poros de la pared del filtro se tornan más gruesos, impidiendo el flujo de la aleación líquida hasta quedar bloqueado.

Medición del nivel de limpieza de la fundición.

Gran parte de las metodologías empleadas para cuantificar el nivel de limpieza de la fundición están basadas en propiedades químicas, metalográficas o físicas de la fundición.

Métodos químicos: Mientras que un variado número de análisis químicos pueden considerarse como una simple vía para determinar el contenido de

inclusiones, es muy limitado el uso de dichos ensayos, puesto a que no dicen nada acerca del número y forma de las inclusiones contenidas en el baño de fundición.

Métodos metalográficos: Un conteo de inclusiones en una muestra pulida, puede ser visto como una simple forma de determinar tipos y tamaños de las inclusiones. La dificultad reside es que la fundición limpia contiene, relativamente, pocas partículas sucias por unidad de volumen, quedando este método designado como poco certero.

Métodos físicos: Entre las dos técnicas conocidas más prometedoras, la primera emplea ultrasonido, y la segunda maneja medidas de la resistencia al pulso.

La técnica por ultrasonido emplea una sonda de titanio para medir la atenuación y discontinuidad de una señal ultrasónica. Un aumento en alguno de estos dos factores indica un descenso en la calidad de la fundición. Una de las desventajas de esta técnica es la incapacidad de detectar pequeñas inclusiones. El límite de detección de este método es de 50 μm o más, (Gruzleski y Closset, 1990).

El uso de la resistividad al pulso, se basa en el sistema LIMCA (Analizador de la limpieza del metal líquido), donde se mide el cambio en la resistividad de un tubo delgado con un metal líquido, a medida que las inclusiones no conductivas pasan a través de él. Un cambio en la resistividad o un aumento en el potencial a lo largo del tubo, resulta del paso de una inclusión. La novedad de esta técnica es su aplicación a altas temperaturas, y el uso de altas corrientes requerido por la alta conductividad de los metales líquidos. El número de inclusiones es medido fácilmente. Las limitantes que presenta el sistema LIMCA son el costo y la necesidad de un operario habilidoso en el desarrollo del método. Esta técnica es, sin embargo, la más prometedora y sofisticada en el conteo de inclusiones presentes en la aleación

2.2.8 Desgasificación del baño líquido de aleaciones de aluminio

Absorción y disolución de gases en el aluminio

Son varios los gases que admiten ser disueltos por el aluminio fundido: hidrógeno, dióxido de carbono, nitrógeno; sin embargo, es el hidrógeno el que alcanza tenor suficiente como para que su efecto oculte el del resto. En la figura 2.10, se representa la solubilidad del hidrógeno en el baño fundido de aluminio como función de la temperatura.

Se observa que a partir de los 700°C la solubilidad comienza a crecer marcadamente. Los átomos de hidrógeno se absorben a través de la superficie del baño o se generan como producto de reacciones químicas en el interior del mismo, a partir de sustancias ajenas al metal, que lo poseen.

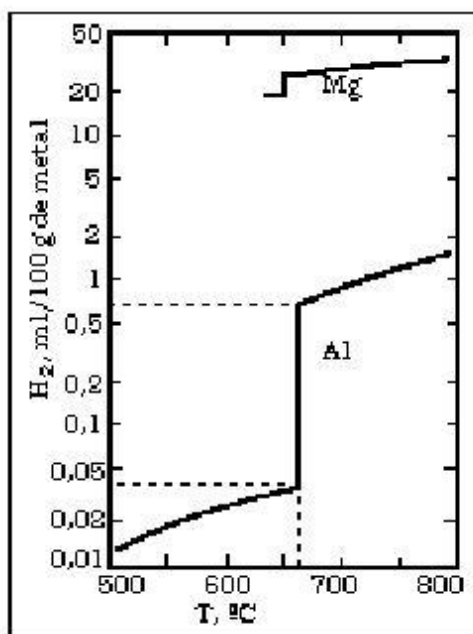


Figura 2.9. Solubilidad del Hidrógeno en el baño fundido de aluminio como función de la temperatura. (Quintero, 2001).

De modo que un baño fundido de aluminio, o aleación de aluminio, contendrá en solución una cantidad de hidrógeno en equilibrio con la respectiva temperatura a la cual se encuentra

Cuando el metal es obligado a solidificar, la disminución de la temperatura de la aleación se traduce en un descenso de la solubilidad del hidrógeno disuelto a escala atómica. Es entonces segregado del metal, adoptando la forma molecular H_2 y generando burbujas que ascienden a la superficie. Todo este proceso lleva su tiempo, las burbujas que no llegan a alcanzar la superficie son atrapadas por la solidificación y quedan constituidas en poros del metal sólido.

Las fuentes de provisión de hidrógeno al baño fundido son variadas:

- Absorción de hidrógeno presente en el aire, o presente en la atmósfera creada por los gases de combustión.
- La reacción $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2$, que genera por un lado óxidos, y por otro lado hidrógeno libre que se disuelve en el metal.
- La humedad en cualquiera de sus formas: ambiental o atmosférica, ó como residuo de la combustión; presente en la carga; como agua de cristalización de fundentes; etc.

El fenómeno de la absorción y disolución de hidrógeno en el aluminio líquido, y su variación de la solubilidad con la temperatura, genera en el metal sólido un defecto perjudicial: la porosidad.

La presencia de poros en las piezas de aluminio se traduce en un descenso de sus propiedades mecánicas, ya que pueden considerarse como sitios de nucleación de fisuras que pueden conducir a la fractura prematura.

Un método conocido para realizar el conteo del contenido de hidrógeno en el metal líquido es la magnificación de las burbujas mediante el vacío. Consiste en solidificar una probeta bajo vacío mecánico; el vacío aumenta el tamaño de las burbujas formadas por el hidrógeno atrapado, las cuales serán evaluadas mediante corte y pulido de la muestra o por el conteo del número de burbujas que afloran en la superficie.

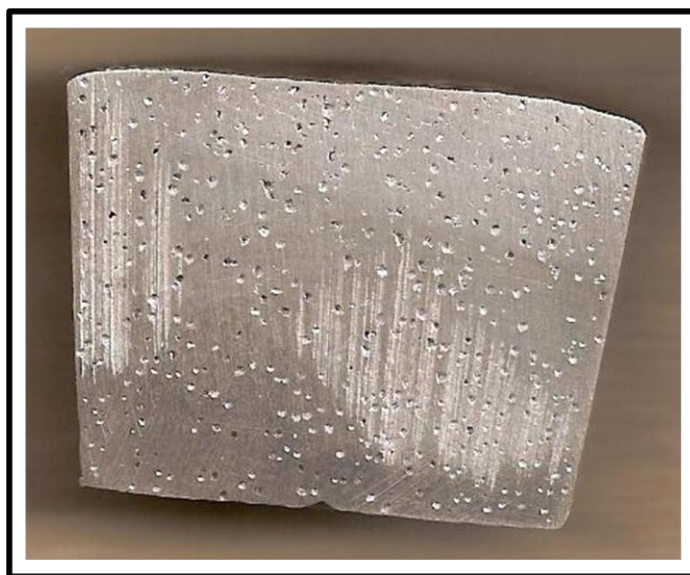


Figura 2.10. Muestra sometida al ensayo de magnificación de burbuja mediante el vacío.

Para eliminar la mayor cantidad de hidrógeno posible en la aleación líquida, se procede a realizar un proceso de desgasificado, con el fin de arrastrar todos los gases no deseados al exterior del baño de aluminio líquido, (Debandi, 1998).

La formación de estas porosidades es promovida, además, por la presencia de inclusiones en el metal, de ahí surge el objetivo de la desgasificación, de reducir tanto el nivel de hidrógeno en el metal líquido como el número de inclusiones.

El arrastre de las burbujas de hidrógeno es ocasionado por la diferencia de presión parcial entre el hidrógeno y el gas de arrastre, (Gruzleski y Closset, 1990).

En la siguiente figura, se muestran imágenes de dos probetas seccionadas, una representa un desgasificado eficiente, y la otra representa un proceso de desgasificado deficiente, con porosidad provocada por el gas (hidrógeno) atrapado en la aleación líquida:

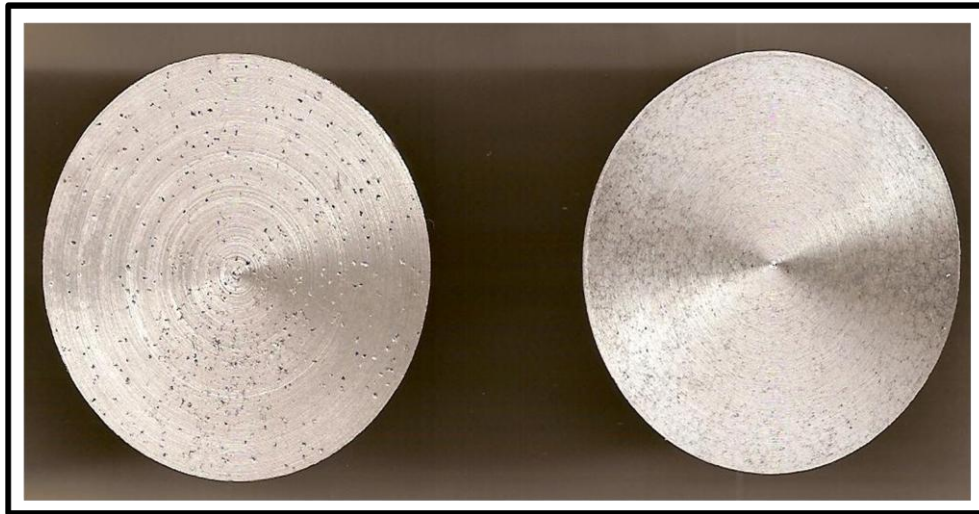


Figura 2.11. Probeta con deficiente desgasificado (izquierda), probeta con buen desgasificado (derecha).

Desgasificación del metal fundido.

El proceso de desgasificado se apoya en diversos fenómenos físicos y químicos que son de gran importancia describir:

- Difusión de hidrógeno al interior de las burbujas: Al producirse una burbuja de gas inerte en el interior de un metal fundido, el H fluye hacia allí; esta acción se debe a los gradientes de concentración química, ya que en el interior de la burbuja no hay hidrógeno, removiendo el hidrógeno hacia la superficie.
- Descenso de solubilidad de hidrógeno: La disminución de la temperatura y/o la presión disminuyen la solubilidad del hidrógeno en el aluminio fundido, (Debandi, 1998).

Desgasificación mediante inyección de gases.

El método consiste en producir un burbujeo en el interior del baño fundido mediante gases introducidos por lanzas de grafito. Los gases empleados normalmente son: nitrógeno, cloro, argón, helio, o mezclas de ellos.

Desgasificación con cloro: El uso de cloro tiene dos ventajas; mecánicamente crea burbujas de baja presión que transportan a la superficie hidrógeno y otras impurezas; químicamente, forma cloruro de aluminio (AlCl_3) que saca a flote las inclusiones no metálicas, (Norma Dana, 1990).

Resulta muy eficiente el uso de cloro como agente limpiador en el proceso de desgasificado, aunque, el empleo del cloro genera diversos problemas como los siguientes:

- Altas pérdidas de magnesio (Mg) cuando está presente como aleante.
- Los productos clorados pueden dañar los refractarios.
- El cloruro de aluminio formado reacciona con la humedad del aire, produce hidrógeno (H) y cloro (Cl), y genera contaminación ambiental.
- El manejo de cloro gaseoso es complicado y requiere de instalaciones especiales. (Debandi, 1998).

Desgasificación con gas inerte: El gas se hace burbujear en el baño de tal manera de remover el hidrógeno. El hidrógeno disuelto en el aluminio se difunde en la burbuja de gas inerte y es sacado del baño junto con ella.

La inyección de gas inerte provoca un enfriamiento y homogenización del baño, como consecuencia de ello disminuye la solubilidad del hidrógeno según visto en la figura 2.10. Debido a la acción mecánica del burbujeo se transportan también a la superficie óxidos. El efecto es puramente físico y además, no existe ningún contaminante de la atmósfera, (Norma Dana, 1990).

El gas puede ser introducido al baño de metal líquido de diversas maneras. La más simple, pero menos efectiva, es empleando una lanza de grafito con un agujero interno. Esta lanza produce burbujas de diámetros entre 2 y 3 cm, las cuales ascienden cerca de la superficie de la lanza, por lo que el

contacto con el metal líquido es mínimo. Para su mayor efectividad, se deben emplear varias lanzas, o designar a un operario que cumpla la función de mover la lanza constantemente, con la finalidad de cubrir gran parte del volumen ocupado por la aleación líquida, (Gruzleski y Closset, 1990).

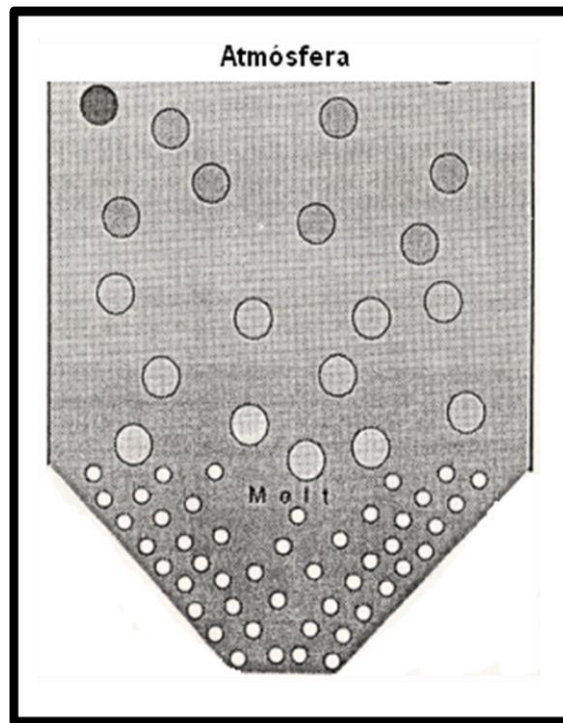


Figura 2.12. Principio de la purga de gas en el baño de fundición.

Una manera un poco más eficiente, para lograr la dispersión de las burbujas de gas, es ensamblando una cabeza porosa de grafito a una lanza de grafito. Las burbujas tienden a seguir la superficie de la lanza mientras ascienden a la superficie, por lo que debe moverse constantemente ó introducir varios ensambles para lograr un mayor contacto entre las burbujas y el metal líquido.

El método más sofisticado e innovador es el uso de un impulsor de corona rotatoria desgaseficadora, la cual, ensamblada a una lanza de grafito, gira rápidamente cortando la corriente de gas en pequeñas burbujas, que luego son dispersas por todo el cuerpo del metal líquido.

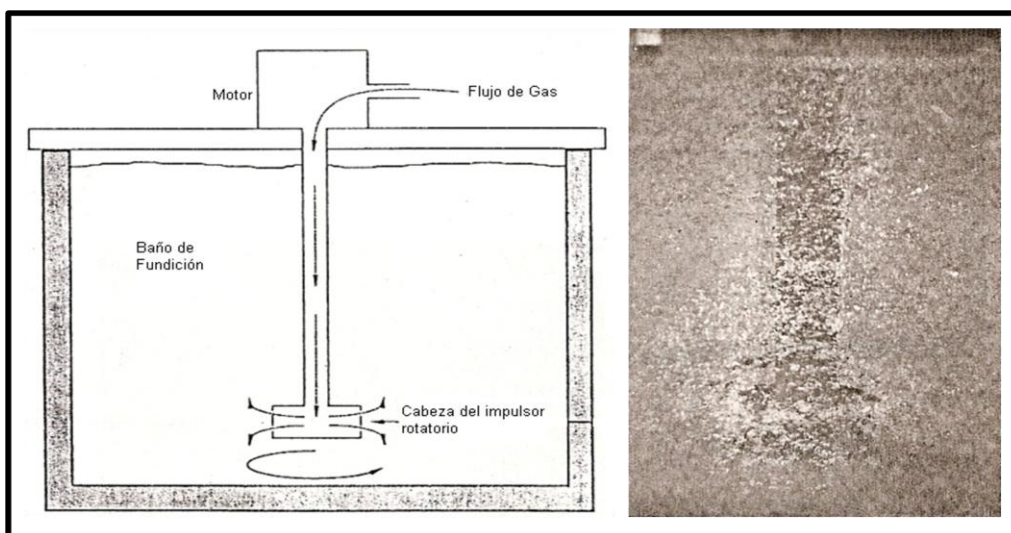


Figura 2.13. Esquema de un impulsor rotatorio (izquierda); Dispersión de burbujas finas en un modelo de estudio usando un impulsor rotatorio (derecha)

De los métodos empleados para introducir el gas de arrastre al metal fundido, es el uso del impulsor de corona rotatoria desgasificadora el más eficiente, tal como se puede observar en la figura 2.14 Además de generar burbujas de pequeño tamaño, el rotor empleado logra un mayor contacto entre las burbujas y la fundición, (Gruzleski y Closset, 1990).

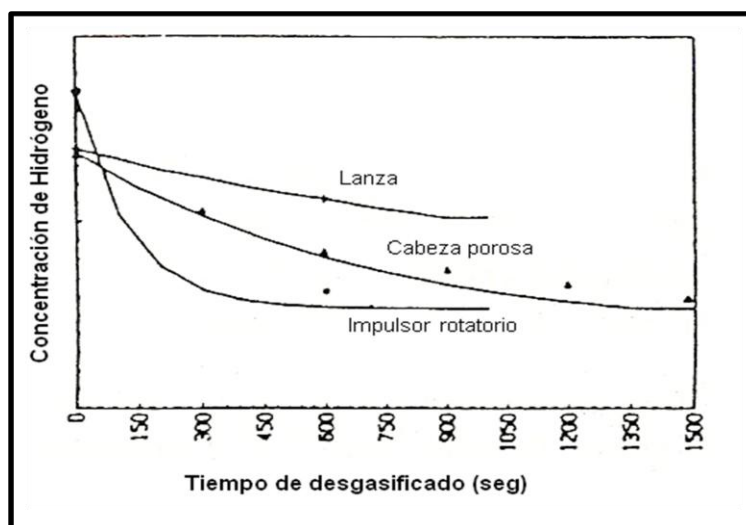


Figura 2.14. El desempeño del desgasificado de una lanza, una cabeza porosa y un impulsor rotatorio en una aleación hipoeutéctica 357. (Gruzleski y Closset, 1990).

Como gases inertes, pueden ser empleado el nitrógeno y el argón.

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 argón, pero los tiempos de desgasificación son más prolongados y consecuentemente se reducen los niveles de producción y aumentan los costos de energía.

El argón es un gas monoatómico, incoloro, inodoro, no corrosivo y no flamable, no reacciona con ningún elemento ni compuesto, por lo que no requiere tanques de almacenamiento ni equipos de control de flujos especiales.

Su eficiencia como desgasificante es muy alta y su emisión de contaminantes es nula; la remoción es mayor y los tiempos de desgasificación son menores que los del nitrógeno. Debido a que en la empresa es necesario tener altos niveles de producción, así como altos niveles de calidad el gas apropiado para su proceso de producción es el argón, (Grupo INFRA, 2008).

Eficiencia del desgasificado, (Gruzleski y Closset, 1990).

En orden de apreciar que es lo que determina la eficiencia del proceso de desgasificado, es necesario considerar el proceso ilustrado en la figura 2.13 más detalladamente. La remoción de hidrógeno puede ser expresada por un proceso que consta de los siguientes pasos:

- El traslado del hidrógeno en la aleación fundida hasta la superficie de una burbuja de gas de purga, es usualmente dado por una combinación de difusión y movimiento convectivo.
- El transporte de átomos de hidrógeno por difusión, a través de una capa límite delgada de líquido estancado en la superficie de la burbuja.

- Absorción química de los átomos de hidrógeno en la superficie de la burbuja.
- La reacción de los átomos de hidrógeno para formar moléculas de gas de hidrógeno ($H + H = H_2$) y el desorción de estas moléculas de la superficie de la burbuja.
- Difusión del hidrógeno gaseoso en el volumen principal de la burbuja.
- Remoción de las burbujas que contienen hidrógeno de la superficie del metal fundido.

Dependiendo del proceso de desgasificado empleado, la mayoría de estos pasos pueden ser capaces de controlar la eficiencia del proceso; aunque el factor más importante en determinar la eficiencia del desgasificado es el tamaño de la burbuja. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 2.15, donde se presenta la concentración de hidrógeno de dos fundiciones, en función del diámetro de la burbuja.

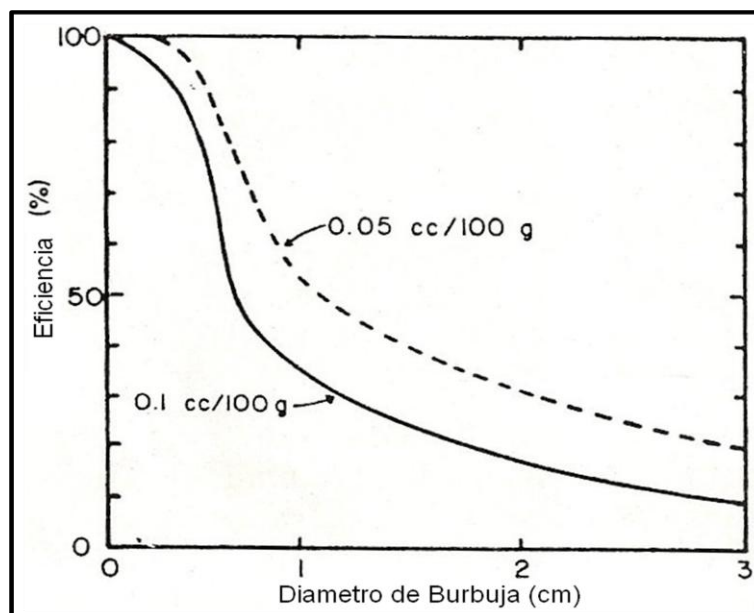


Figura 2.15. Eficiencia del desgasificado versus diámetro de burbuja. (Gruzleski y Closset, 1990).

Un sistema operando al 100% de la eficiencia está definido como uno donde la presión parcial del hidrógeno en la burbuja del gas de purga es igual a la presión parcial del hidrógeno disuelto en la fundición. En otras palabras, la burbuja de gas ascendente está saturada con respecto al hidrógeno. Similarmente, un sistema al 50% de eficiencia es debido a que las burbujas de gas ascendentes contienen solamente una mitad del hidrógeno termodinámicamente posible.

Se puede observar que eficiencias altas pueden ser alcanzadas con burbujas de un tamaño pequeño, por lo que se consideran necesarias de 5 mm o menos.

Para un flujo dado, las burbujas de gran tamaño se encuentran lejos unas de otras, por lo que los átomos de hidrógeno deben difundirse en mayor espacio para alcanzar la superficie de la burbuja. Puesto a que las burbujas son grandes y los átomos de hidrógeno tienen dificultad en llegar hasta ellas, solo contienen una pequeña fracción del hidrógeno contenido en la fundición, razón por la cual la eficiencia del desgasificado es baja.

Un gran número de burbujas pequeñas estarán más cerca unas de las otras y los átomos de hidrógeno tendrán una distancia más corta a recorrer para llegar a la superficie de la burbuja.

El transporte en la fase líquida no es un problema, pero el poco volumen de las burbujas rápidamente se satura de hidrógeno; por lo que, en este punto, un aumento en el rango del desgasificado puede lograrse aumentando el flujo del gas.

Adicionalmente, grandes y pequeñas burbujas tienen otras diferencias importantes relacionadas con la eficiencia del desgasificado; entre ellas, la rapidez con la que emergen en la fundición. Burbujas pequeñas flotan más lento y tienen un mayor tiempo de contacto, durante el cual pueden absorber el hidrógeno. Las burbujas de gran tamaño ascienden más rápido, razón por

la cual poseen un menor tiempo de contacto con la fundición, (Gruzleski y Closset, 1990).

2.2.9 Afinadores de grano.

El estricto control de las estructuras de colada es uno de los principales requerimientos en la producción de piezas de alta calidad en aleaciones de aluminio.

Los afinadores de grano sirven de apoyo o asiento para que sobre ellos se formen los primeros núcleos; razón por la cual se agiliza el proceso de formación de cristales en zonas donde no es natural su formación. Los granos se originan e inmediatamente le siguen otros muy cercanos, lo cual le impide seguir creciendo.

Un elemento químico considerado afinador por excelencia de las estructuras de aluminio, es el titanio (Ti). Su uso por adición es beneficio en, prácticamente, todas las aleaciones de aluminio.

El titanio, combinado con cantidades menores de boro (B), tiene la virtud de reducir el tamaño de las partículas de fase rica en aluminio en todas sus aleaciones. Este afinamiento de la estructura se traduce en una mejora sustancial en las propiedades mecánicas de las aleaciones.

El afinado de grano tiene varios efectos en la colabilidad; algunas ventajas son:

- Incrementa la presión de estrechamiento. La porosidad está mejor distribuida entre los pequeños espacios de grano.
- Menos roturas o fracturas en caliente.
- Menor porosidad de rechupes.
- Mejora en las propiedades mecánicas; del 10 a un 20% aproximadamente.
- Consistentes propiedades después de tratamiento térmico.

- Mejoras en la característica de alimentación.
- Mejora la apariencia y aspecto.
- Mejora la maquinabilidad

2.2.10 Modificadores de estructura

Se trata de un fenómeno curioso que puede ser provocado por varios elementos. Como el nombre del fenómeno lo indica se trata de un cambio estructural en la organización interna del material sólido, mediante el cual, aleaciones que no tienen ductilidad, aumentan su capacidad de deformación.

El proceso de modificación se utiliza siempre que se produzcan piezas que necesiten resistencia al impacto, es decir, que no puedan presentar comportamiento frágil.

La adición de modificadores de estructura a las aleaciones de aluminio silicio que contienen de 6 a 13 % de silicio produce una colada de superior tracción y ductilidad.

En una estructura típica de una aleación de Al – Si sin modificación, puede notarse que el Si se encuentra distribuido en forma de agujas y algunas veces rectangulares. Alrededor existe una matriz, área blanca blanda y dúctil, conformada principalmente de aluminio.

Cuando una pequeña cantidad de modificador es añadido a un baño de fundición de Al – Si, las agujas de Si son transformadas en finas partículas globulares o redondeadas; esta estructura es más dúctil y de mejores propiedades mecánicas.

Existen varios modificadores de la estructura, entre ellos se pueden mencionar el sodio (Na) y estroncio (Sr).

El sodio fue muy usado hace algunos años, pero resultó peligroso su almacenaje pues es muy propenso a explosiones al contacto con agua.

Además, su efecto dura muy poco tiempo, unos 20 minutos aproximadamente; de modo que la inoculación se realiza inmediatamente antes del moldeo.

Otra desventaja que presenta el sodio como elemento modificador es que disminuye la fluidez del metal y su habilidad para llenar el molde, además, baja el contenido de magnesio de la aleación.

El estroncio es el más usado actualmente; su efecto modificador es mucho más largo que el producido por el sodio, aproximadamente seis horas. Es empleado en proporción menor, y la tendencia a la captura del hidrógeno es mucho mayor luego de su adición. Se presenta en alambres, barras, en pastillas o electrolítico.

El empleo de estroncio trae mejores propiedades de alimentación, durante el moldeo; y, no presenta el problema de producir humos tóxicos, (Adrian, 1992).

Para garantizar la calidad de una aleación de aluminio, es necesario controlar los siguientes parámetros: Composición química, gravedad específica, tamaño de grano, microestructura y el nivel de escoria presente, considerando los diferentes procedimientos para disminuir las inclusiones.

La composición química: Esta referida a la aleación en sí y a los rangos en que los elementos pueden aceptarse. En parte, se ve afectada por la cantidad de titanio – boro y estroncio que se le agregan a la aleación de aluminio.

La gravedad específica: Es usada como una medida indirecta para determinar la cantidad de porosidades presentes en la aleación; mientras mayor sea el valor más pesada será la probeta, y por ende menor será su porosidad.

Se ve afectada directamente por la presión de inyección de argón, por las condiciones en que se encuentre el eje de desgasificado, el tiempo de duración del desgasificado, el hidrógeno atrapado durante el proceso de

combustión y las condiciones operativas del motor encargado de proporcionarle giro al eje.

El tamaño de grano: Está íntimamente ligado con las propiedades mecánicas, es decir, cuanto más pequeños sean los granos (monocristales) mejores son sus propiedades mecánicas, como la ductilidad y la resistencia al impacto. Es por esta razón que es necesario el uso de refinadores, los cuales introducen partículas en el metal fundido que obstaculizan el crecimiento de los granos durante el proceso de solidificación.

El titanio-boro es el refinador que posee mayor factor de restricción de crecimiento del grano, por lo que es importante para obtener un buen desempeño de la aleación, tener en cuenta los siguientes factores: La tasa de adición del refinador, ya que cuanto mayor sea el porcentaje que se agregue menor será el tamaño del grano, la presencia de elementos que producen la sobresaturación de los diboruros de titanio y las condiciones de solidificación, (Shedden, 2008).

La microestructura: La estructura de las aleaciones que contienen entre 9 y 13% de silicio consiste en gruesos cristales de silicio sobre una matriz de aluminio. Esta estructura resulta cristalina y gruesa con características mecánicas bajas.

Para modificar la estructura, se usan inoculantes válidos para aleaciones del sistema aluminio silicio, con un contenido de Si mayor al 5-6 % y menor que el 14 %.

Es preferible añadir el estroncio antes de desgasificar, debido a que es un capturador de gases y tiene mucha afinidad con el hidrógeno; mejora la fluidez de las aleaciones de aluminio silicio; reduce defectos de micro rechupes; provee más flexibilidad en los cristales; y, mejora las propiedades mecánicas, particularmente la elongación, con incremento en la fluencia. (Adrian, 1992).

Para obtener una modificación adecuada se debe tener en cuenta una temperatura de 700 °C, sin superar los 800 °C ya que se produce una pérdida substancial del elemento modificante; agregando una cantidad de estroncio menor al 0.15%, para evitar la sobremodificación que pudiera afectar desfavorablemente a la ductilidad de la pieza; y el tiempo de reposo, de aproximadamente 20 minutos, para cumplir con la completa acción modificante del mismo, (Berg, 2008).

Estas variables varían, dependiendo de la química del proceso y del diseño de los equipos; algunas, se encuentran sujetas al control mediante instrumentos, pero, al mismo tiempo, muchas dependen de la atención y destreza del operario.

2.2.11 Manufacturas de Aluminio I, C.A. (MAICA)



Figura 2.16. Manufacturas de Aluminio I C.A.

Misión de MAICA

La misión de MAICA es ofrecer productos y servicios de calidad con un personal capacitado, identificado y con cultura de liderazgo; basados en la optimización de procesos, que consoliden el crecimiento en el mercado.

Visión de MAICA

La visión de MAICA es, ser el proveedor favorito de nuestros Clientes a través de la oferta de productos y servicios que superen sus expectativas.

Valores de MAICA

En MAICA se fomenta la honestidad, para lograr transparencia y rectitud en todo momento; respeto a la gente y los procesos; compromiso de iniciativa y logro; responsabilidad en el cumplimiento de normas y objetivos; ética; credibilidad, practicando lo que predicas; y, ciudadanía, contribuyendo al cuidado del ambiente y la comunidad.

Política de ambiente de MAICA

Manufacturas de Aluminio I, C.A., empresa fabricante de pistones, esta comprometida con la prevención de la contaminación bajo un sistema de mejoramiento continuo, a través de la revisión de objetivos metas y programas ambientales, cumpliendo con la legislación ambiental vigente y otros requisitos, proporcionando capacitación y entrenamiento a todo su personal, creando cultura y responsabilidad ambiental, garantizando la preservación del medio ambiente, (PC pistones, 2009).

El proceso productivo manejado actualmente dentro de la empresa fabricante de pistones es relativamente dinámico. El aluminio utilizado como materia prima en la planta es una aleación de aluminio preparada. La aleación que se encuentra en uso actualmente está identificada bajo el nombre de F-132, ver requerimientos en la tabla 2.6.

La aleación de aluminio es trasladada por lotes, en forma de lingotes, y, una vez que llega a la planta, es ubicada en la zona de almacenamiento en la espera de ser utilizado.

Tabla 2.6. Requerimientos de la composición química para la entrega de materia prima, (Manufacturas de aluminio I, 2008).

Aleante	Porcentaje de cada aleante (%)
Si	8,5 – 10,5
Fe	0,00 – 0,55
Cu	2 – 4
Mn	0,0 – 0,3
Mg	0,5 – 1,5
Ni	0,0 – 0,5
Zn	0 - 1
Ti	0,00 – 0,25
Ca	0,000 – 0,002
Otros	0,00 – 0,45



Figura 2.17. Bulto de lingotes de materia prima, aleación de aluminio F-132.

El horno empleado para realizar el proceso de fundición es un tipo de horno basculante conocido con el nombre de Guinea; el cual, maneja un punto de consigna de 720 °C aproximadamente, logrando así que se obtenga una temperatura apta para que se lleve el proceso de fusión de la aleación de aluminio.

Mediante el uso de tres llamas se alcanzan temperaturas de entre 690°C y 750 °C; dos ubicadas frente a la cámara de fusión, que resultan ser las llamas de quemado, las cuales calientan la materia prima que es arrojada al horno Guinea hasta alcanzar su punto de fusión; y, una tercera llama que se ubica en la parte superior del área interna del horno, que tiene por función mantener la alta temperatura interna.

La materia prima es arrojada al horno a través de la entrada de la cámara de fusión, en donde entra en contacto con las llamas de quemado, de forma casi directa, logrando que el metal alcance el punto de fusión.

Una vez que se lleva a cabo la fusión del material, este reposa dentro del horno Guinea a una temperatura suficiente, para mantenerlo en condiciones aptas para su posterior uso en el proceso productivo de la planta. La capacidad del horno Guinea es de cinco (5) toneladas.

Seguidamente, se vierte material líquido en el crisol de transferencia, el cual realiza el traslado de la aleación líquida a cada uno de los hornos de retención con ayuda de un montacargas.

Debe señalarse que cuando el crisol de transferencia no está siendo usado, por acción de una llama se mantiene a alta temperatura en la espera de realizar el próximo traslado de material de fundición. Este calentamiento forzado es realizado con el fin de evitar que al momento de entrar en contacto la aleación líquida con el crisol de transferencia, no ocurra una solidificación rápida e inoportuna y pueda ser descargada en los hornos de retención sin ningún problema.

Los hornos de retención contienen la aleación de aluminio lista para ser vertida en los moldes de fundición. Estos hornos están compuestos de un crisol en su interior, el cual se encuentra rodeado, dejando una pequeña distancia de separación, de una pared hecha de material refractario.

El crisol del horno de retención tiene 800 Kg de capacidad, valor que es reducido a causa de la escoria que se adhiere a las paredes del mismo, disminuyendo el volumen y, por ende, su capacidad.

Los crisoles poseen un nivel mínimo (aproximadamente a la mitad de su capacidad) que le indica al fundidor el momento en el cual debe detener la extracción de material del mismo e iniciar seguidamente actividades en el otro horno. Este nivel mínimo es tomado en cuenta para que exista, en todo momento, material a alta temperatura dentro del crisol, logrando reducir en menor grado el choque térmico al momento de verter la aleación líquida proveniente del horno Guinea.

En la parte inferior del horno de retención está instalado un quemador, el cual proporciona la llama que se encarga de calentar el crisol, que, además, sirve de mantenedor térmico para la aleación líquida, conservándola a una temperatura apta para el proceso de fundición.

Se debe tener en cuenta que cada horno de retención maneja un punto de consigna en cuanto a la temperatura de la aleación líquida, por lo general, es tomado 700 °C; de esta forma, puede ser regulada la intensidad de la llama del quemador, ya sea, si la temperatura se encuentra por encima o por debajo del valor establecido.

Una vez que el material de fundición alcanza el nivel mínimo en el horno de retención, el hornero debe encargarse de rellenar con la aleación líquida el horno de retención, para ser empleado por el fundidor una vez que vuelva a iniciar actividades en dicho horno.

Para rellenar el horno de retención se sigue el siguiente procedimiento:

- Agregar los modificadores de estructura y refinadores de grano, con el propósito de obtener un producto de buena calidad, mejorando las características y propiedades de las estructuras sólidas que se forman durante la solidificación.
- Verter material de fundición proveniente del horno Guinea, empleando el crisol de transferencia con ayuda de un montacargas.
- Llevar a cabo la desgasificación del metal líquido para liberar los gases que absorbe el metal con el aumento de temperatura, y que debilitan la estructura de la pieza.
- Realizar limpieza de la superficie de la aleación líquida una vez culminada la desgasificación de la aleación líquida.

Las sustancias y elementos empleados en la preparación de la aleación para el proceso de fundición son:

- Sales fundentes:

Son sales, que con acciones combinadas físico – químicas y mecánicas disuelven los óxidos transformándolos en compuestos de peso específico diverso de la aleación, que emigran hacia la superficie del baño, arrastrando eventuales impurezas y formando una escoria seca fácilmente eliminable, o depositándose en el fondo de la cuchara.

Su propósito general es de acción escorificadora y de limpieza. Permite un bajo contenido metálico en la escoria y, además, permite mantener las paredes de los hornos de fundición limpias. El ingrediente que sirve de reactivo para la limpieza, es el fluorosilicato de sodio (Na_2SiF_6).

El fluorosilicato de sodio se encarga de cubrir toda la interface presente entre el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el aluminio sin reaccionar.

El óxido es despojado, envuelto por el fundente, y arrastrado hacia la escoria ubicada en la superficie del baño de fundición. En la figura 2.18, se ilustra el mecanismo descrito anteriormente:

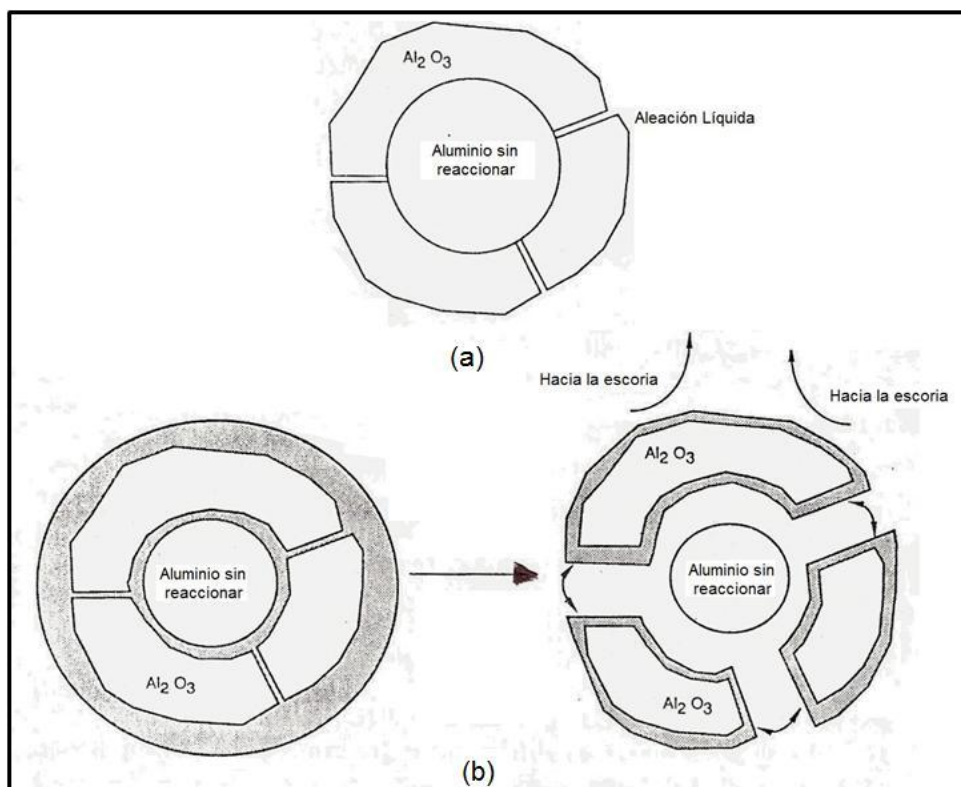


Figura 2.18. La acción de limpieza del Na_2SiF_6 : (a) antes de la adición y (b) después de la adición. (Gruzleski y Closset, 1990).

- Titanio – boro (TiB).

El titanio – boro (TiB) es empleado como afinador de grano, puesto a que tiene la virtud de reducir el tamaño de las partículas de fase rica en aluminio en todas sus aleaciones. Este afinamiento de la estructura se traduce en una mejora sustancial en las propiedades mecánicas de las aleaciones, mejorando también, la maquinabilidad y la terminación superficial.

- Estroncio (Sr).

El estroncio (Sr) es usado como modificador de estructura. Este elemento es prácticamente permanente, puesto a que es capaz de durar

varias refusiones; además, se conoce que después de la adición de estroncio en el metal, la tendencia a la captura del H_2 es mucho mayor, durante el desgasificado, que sin él.

Al colocar muy poca cantidad de estroncio no se logra la transformación requerida de la microestructura, y de añadirse una cantidad excesiva se produce el efecto de sobre-modificación, haciendo que las partículas de silicio se forman mas toscas revirtiendo las finas fibras de este a unas placas interconectadas, a su vez la formación de fases intermetálicas en la microestructura del estroncio, tal como partículas de Al_4SrSi_2 , haciendo que la existencia de estos dos efectos reduzcan las propiedades de la aleación revirtiendo la misma a una material no tratado, (Gruzleski y Closset, 1990).

En cuanto a la desgasificación del material de fundición, el método empleado actualmente en la empresa es el de inyección de gases, a través de un impulsor rotatorio desgasificador.

El impulsor rotatorio posee un extremo libre, que entra en contacto con la aleación líquida, la cual gira rápidamente, mientras va introduciendo el gas inerte, siendo el argón el gas empleado en el proceso.

Para el proceso de desgasificado, se emplea una unidad desgasificadora, la cual consta de los siguientes elementos:

- Un impulsor rotatorio desgasificador, el cual consta de un tubo de grafito recubierto de material refractario, que cumple la función de eje desgasificador, y, una corona de grafito adaptada en la parte inferior del tubo. (Ver figura 2.20)
- Un motor, que tiene por función generar la potencia requerida por el eje desgasificador para realizar el movimiento giratorio. (Ver figura 2.21).
- Una válvula de paso que permite el paso del argón desde el termo hasta el eje desgasificador, efecto que se logra por la diferencia

de presiones generada entre el termo y la atmosfera. (Ver figura 2.22)

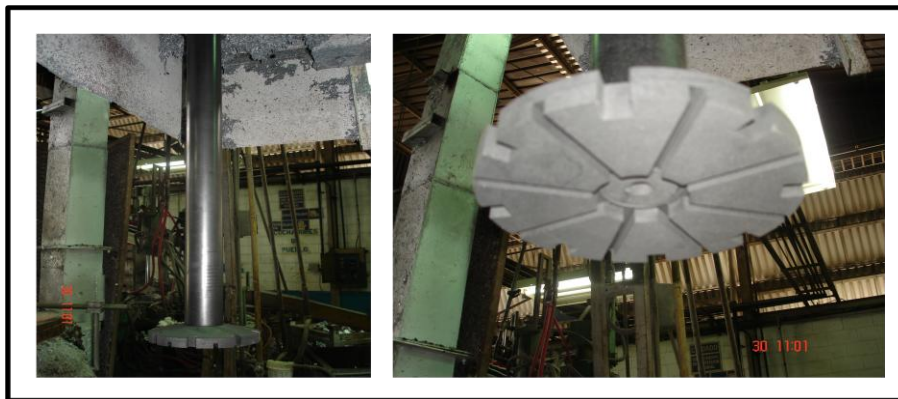


Figura 2.19. Eje de grafito (izquierda), corona de grafito (derecha)



Figura 2.20. Motor de unidad desgasificadora.



Figura 2.21. Válvula reguladora de presión de argón.

El proceso de desgasificado tiene una duración de aproximadamente unos 12 minutos, tiempo establecido por la empresa. Una vez finalizada la desgasificación, se puede observar en la superficie de la aleación líquida una película de escoria, la cual emerge durante el desgasificado por acción de las sales fundentes agregadas previamente.

Seguidamente, se limpia la aleación líquida desgasificada, realizando un barrido de la superficie del metal líquido, empleando una paleta de acero perforada, para remover la escoria (véase figura 2.22).



Figura 2.22. Limpieza de la escoria del horno de retención.

Luego de haber realizado la limpieza, se deja reposar el metal fundido por 30 minutos aproximadamente, para permitir que la aleación se normalice; esto implica que los diversos inoculantes, tales como el estroncio y el titanio – boro, reaccionen dentro del baño de aleación líquida, ejerciendo sus funciones de modificadores de estructura y de grano respectivamente.

Culminado el tiempo de reposo, ya el metal fundido se encuentra en condiciones operativas. El fundidor, usando una cuchara de acero, toma una cierta cantidad de aleación líquida y la vierte en el molde para que solidifique y de origen al casting o pistón primario (véase figura 2.23).

Este pistón primario, producto de la fundición, es llevado hasta la cortadora de mazarotas.

Luego de que al pistón primario se le cortan las mazarotas, es trasladado hasta los hornos de tratamiento térmico, para recibir un tratamiento del tipo t – 5, donde se somete a maduración artificial, a una temperatura de 205 °C por un tiempo de 8 horas. Este tipo de tratamiento térmico le proporciona a los productos fundidos una mejora en sus características mecánicas y/o su estabilidad dimensional.

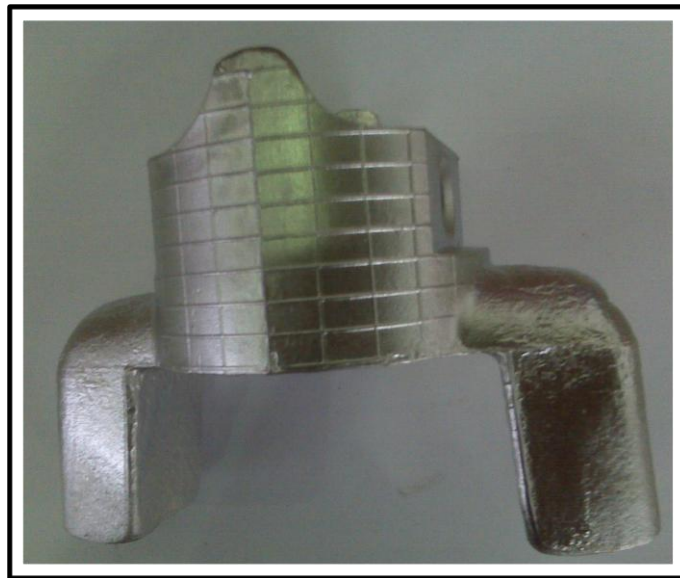


Figura 2.23. Pistón en bruto o primario.

Finalizado el tratamiento térmico, el casting o pistón primario es llevado al área de mecanizado, la cual consta de seis celdas, cada una con varios tornos cnc, para darle los últimos detalles al pistón. Terminado el proceso de mecanizado, el pistón pasa por un proceso de limpieza para definir el acabado final del producto, puesto a que, dependiendo de las especificaciones del mercado, se le puede dar un recubrimiento de estaño al pistón ó simplemente un pulido.

Una vez que se le da el acabado definitivo al pistón, es llevado a la línea de inspección final, en donde es examinado para buscar defectos, según las

normas de calidad de la empresa; y, consecutivamente, se le coloca el pin o pasador al pistón. Finalmente, el pistón terminado es llevado al área de empaque para colocarlo en cajas, listo para la venta.

Hoy en día, las industrias de la rama metalúrgica tienen diversos problemas en cuanto al control de calidad. Con respecto a las materias primas, las pequeñas variaciones en las características del metal empleado ejercen influencia en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto final, por lo que existen operaciones que tienen por objeto la concentración y eliminación de impurezas perjudiciales, logrando así mayor uniformidad.

Muchas de las materias primas se compran con arreglo a especificaciones comerciales. La industria, sin embargo, lleva a cabo una gran cantidad de muestreos y análisis.

La mayoría de los procesos de fusión poseen la flexibilidad suficiente para un funcionamiento eficiente con los diversos tipos de materias primas, si se pueden prever los cambios. El adecuado conocimiento de la calidad de la materia prima permite llevar a cabo la mezcla de materiales de muy distintas calidades y conseguir un mineral bruto uniforme para el proceso de fusión, (Juran et al, 2005).

Luego de prestar la debida consideración al control de las materias primas, el plan de control del proceso debe tratar importantes variables operativas como, por ejemplo, la modificación en la microestructura del metal fundido, las impurezas que permanecen hasta llegar al proceso de moldeo, los gases que quedan atrapados durante el proceso de fusión y los numerosos tiempos de reposo en los hornos, en donde el metal puede reaccionar de diversas maneras.

Muchas de las características de calidad de los productos metálicos, las adquieren éstos en el momento en que el metal fundido se moldea en forma

adecuada para una posterior fabricación. La composición del metal o de la aleación metálica se determina en esta etapa del proceso.

El metal procedente de la fusión debe sufrir una posterior operación de afino o modificación mediante la adición de ingredientes de aleación con objeto de alcanzar el nivel deseado de composición química, (Juran et al, 2005).

2.2.12 Definición de términos.

Baño de aluminio: Aleación líquida contenida en el horno de retención y de fusión; también descrito como baño de fundición.

Casting: Pistón en bruto o primario sin mecanizar, producto del proceso de fundición.

Estabilidad dimensional: Uniformidad de las dimensiones de la pieza fundida.

Inoculantes: Sustancias que se incorporan durante el estado líquido de las aleaciones con el objeto de operar en la mejora de las características y propiedades sólidas que se formarán durante la solidificación.

Maduración artificial: Envejecimiento que sufre el material por el tratamiento térmico aplicado para la mejora de sus propiedades mecánicas.

Mazarota: Es la parte del molde del pistón, donde se depositan las partículas de mayor densidad durante la colada, siendo estas por lo general, impurezas contenidas en la aleación; además, contribuye en el conformado de la pieza fundida dentro del molde.

Nata: Conocida también bajo el nombre de escoria, es un subproducto de la fusión del aluminio resultando en la creación de óxidos.

CAPÍTULO 3

Marco metodológico

3.1 Metodología

Para el desarrollo de la presente Investigación se emplea una metodología específica que facilita el estudio del problema objeto del presente trabajo especial de grado, así como también la obtención de datos validos y fiables, a través de la investigación monográfica y documental, la observación, y la experimentación.

Para llevar un orden sobre los pasos a seguir durante el desarrollo de la investigación, se implemento un esquema tipo diagrama, en donde se siguió cada punto señalado (ver figura 3.1).

En primer lugar se procede al establecimiento de los objetivos generales y específicos de la presente investigación, con el propósito de delimitar el campo de estudio de la misma, y encausar la labor investigativa a la consecución de los mismos.

Una vez establecidos los objetivos que rigen la presente investigación, se procede a la recopilación de fuentes documentales y monográficas con la finalidad de obtener información relativa al objeto de estudio de la misma, incluyendo fuentes teóricas relativas a la aleación de aluminio empleada por la

empresa fabricante de pistones, la cual se encuentra bajo la norma Covenin 332.1, y recibe la designación F-132.

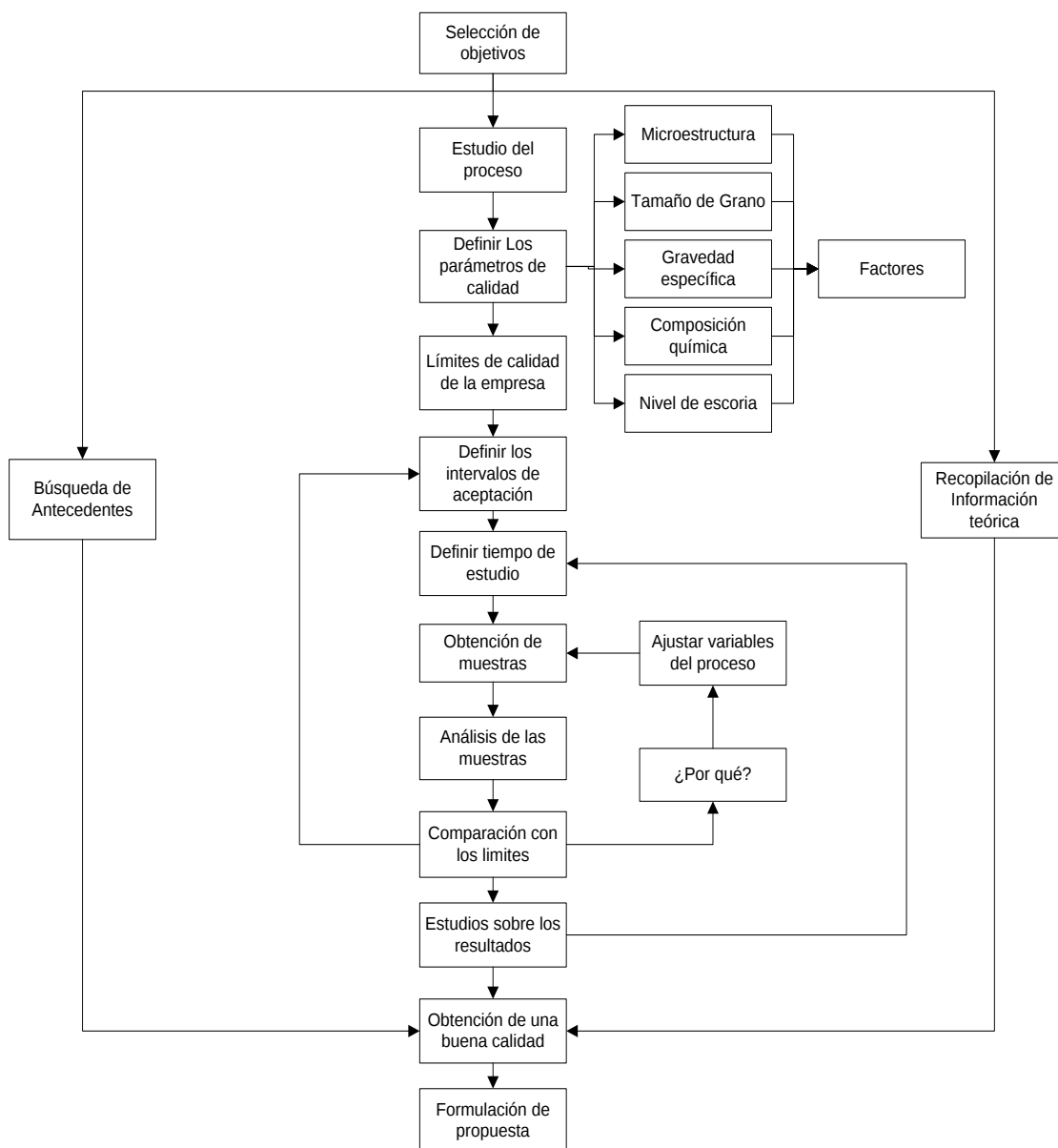


Figura 3.1. Diagrama de flujo del desarrollo de la metodología del proyecto

Seguidamente, se realiza un estudio del proceso llevado a cabo en la planta, el cual va desde la primera etapa en la que se coloca la materia prima en el horno, hasta la fase en que la aleación está lista para ser vertida en los moldes.

El estudio realizado en planta se realiza mediante los métodos de observación y evaluación continua de las condiciones del aluminio, haciéndose necesario conocer los diversos parámetros que garantizan la calidad del baño líquido.

Para la evaluación de cada parámetro, se procede a la toma de probetas directamente del horno de retención, acción que fue estandarizada de la siguiente manera:

- Registrar la temperatura del horno Guinea, horno donde se funde la materia prima.



Figura 3.2. Horno Guinea.

- Registrar la temperatura del horno de retención, horno en el cual se mantiene la aleación en estado líquido a temperaturas adecuadas.



Figura 3.3. Horno de retención.

- Tomar nota de las condiciones ambientales presentes durante la ejecución de cada ensayo, tales como la humedad relativa y temperatura atmosférica, con la ayuda del programa Accu Weather, a través de un dispositivo móvil, con el propósito de poder estudiar la posible influencia que ejercen sobre la eficiencia del proceso.
- Calentar el crisol para la toma de probetas, hasta alcanzar un color rojizo, aproximadamente unos cincuenta (50) segundos, evitando que la aleación fundida solidifique rápidamente.



Figura 3.4. Crisol para toma de probetas.



Figura 3.5. Probetas obtenidas mediante el crisol.

- Colocar la muestra en la cámara de vacío por un tiempo de cuatro (4) minutos y medio, a una presión de vacío generada de -610 mmHg.



Figura 3.6. Cámara de vacío.

- Llevar el crisol hasta el tanque de enfriamiento, y sumergir la probeta por un tiempo de un (1) minuto y treinta (30) segundos.
- Una vez que se obtiene la muestra lista (solidificada y a temperatura apta para su manipulación), se traslada al laboratorio

de calidad de la empresa, en donde se somete a un variado cúmulo de pruebas y ensayos, entre los que se encuentran el de gravedad específica, composición química, análisis de la microestructura y macroscópico; los análisis metalográficos para estudiar la microestructura y el tamaño de grano se realizan en el laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo.

Durante el tiempo de estudio es necesario conocer el nivel de calidad que posee la aleación de aluminio líquido, de tal forma que, en el caso de que la calidad no se corresponda con los requisitos previstos en la norma, se acuda a la manipulación controlada de los factores que influyen en los parámetros para buscar la manera de optimizar la misma.

Es importante la evaluación específica de la aleación líquida, para lo cual se toman muestras del aluminio fundido directamente de los hornos de retención, todo esto bajo las directrices de un operario autorizado, y cumpliendo con el procedimiento estandarizado anteriormente para la toma de muestras, y las condiciones de seguridad necesarias para este tipo de actividades.

A continuación se mencionan los parámetros a estudiar, en conjunto con las actividades que se realizarán con cada uno de ellos, estandarizando los mismos para cada parámetro en específico:

3.1.1 Gravedad específica:

Es considerada como un valor indirecto de las porosidades. Para la obtención de este parámetro, se emplea las ecuaciones 3.1 y 3.2:

$$Pr - Pa = D \quad (3.1)$$

$$G.E = Pr/D \quad (3.2)$$

Siendo:

Pr: Peso de la probeta real o al aire (g)

Pa: Peso de la probeta sumergida en agua (g)

D: Diferencia entre pesos (g)

G.E: Gravedad específica
$$\left(\frac{\left(\frac{g}{cm^3} \right)_{aleación(probete)}}{\left(\frac{g}{cm^3} \right)_{agua}} \right)$$



Figura 3.7. Peso de la probeta al aire (izquierda), peso de la probeta sumergido en agua (derecha).

En la empresa se maneja un valor mínimo de referencia (G.E. min=2,64), valor establecido mediante ensayos previos realizados por el departamento de calidad (Norma DANA, tratamiento metalúrgico de aleaciones de aluminio, 1990), que permite detectar cuando una muestra no se encuentra dentro de los límites de aceptación, obligando al chequeo y estudio del baño de fundición del cual se obtuvo.

Tomando en cuenta todas las condiciones estandarizadas para la obtención de probetas, es necesario tomar una cada vez que se realice un desgaseado, para comprobar los niveles de porosidades que contiene la

aleación de aluminio líquido, seguido de esto se utilizan las ecuaciones para calcular la gravedad específica antes mencionadas.

En los hornos de retención es donde se realiza el proceso de desgasificación, en el que se inyecta un gas inerte (argón) al baño de fundición para reducir al máximo el nivel de hidrógeno contenido en la aleación líquida, disminuyendo las porosidades que puedan presentarse en el producto final una vez que se vierte el aluminio líquido en el molde (etapa de solidificación).

Es importante tener presente los factores que influyen en la ejecución de un buen desgasificado, que, según la hoja de proceso de desgasificado de aluminio en el horno de retención de Manufacturas de Aluminio I, son: La presión de inyección de argón fijada en 276 kPa y un flujo de 1.7 m³/h aproximadamente; las condiciones del eje, el cual tiene una durabilidad cerca de 15 días hábiles, la funcionabilidad del motor y el tiempo de desgasificado.

Manteniendo constante los valores de presión de inyección de argón, flujo, que el eje se encuentre óptimo para la realización del desgasificado y el motor que proporciona el giro al eje se encuentre operativo, se determina así el tiempo necesario para obtener un buen desgasificado.

Se fijan diferentes tiempos en intervalos de 5 minutos siendo 15 minutos el máximo, en cada intervalo se toma una probeta para estudiarla y obtener los valores de gravedad específica correspondientes.

En primer lugar fue seleccionado un horno de retención como objeto de estudio, para poder tener las mismas condiciones de trabajo en cada ensayo. En cada ensayo se extrajeron cuatro muestras; una primera antes de realizar el desgasificado, inmediatamente luego de realizar la transferencia del material de fundición proveniente del horno Guinea; una segunda muestra a los cinco (5) minutos de haberse iniciado el proceso de desgasificado; la

tercera muestra a los diez (10) minutos del inicio del desgasificado; y, la última muestra a los quince (15) minutos, ya finalizado el proceso de desgasificado.

Una vez obtenidas las muestras para cada ensayo, se empleó como elemento comparativo el parámetro de la gravedad específica, determinándose su valor para cada tiempo de desgasificado indicado.

La gravedad específica de cada probeta representa, de forma indirecta, el nivel de porosidades que se presenta en la aleación, a causa del hidrógeno que no se extrajo durante el desgasificado; gracias a los límites de referencia establecidos por la empresa, fueron analizados los valores obtenidos.

Dicho valores son graficados para visualizar cómo se comporta la gravedad específica con respecto al tiempo de desgasificado, se repite dicho procedimiento para 9 ensayos más.

3.1.2 Composición química:

El conocimiento del valor de la composición química de la aleación líquida depende de la espectrometría realizada a cada probeta.

El equipo empleado es un espectrómetro, en donde se le aplica a la probeta un chispazo, empleando el argón purificado para la combustión, para determinar el porcentaje de cada aleante presente en la aleación líquida. Una vez aplicado el chispazo sobre la superficie de la probeta, los resultados son reflejados en un monitor conectado al espectrómetro.



Figura 3.8. Espectrómetro (izquierda), punto de colocación de las probetas en el espectrómetro (derecha).

Para obtener un buen análisis de la composición química de la aleación, se le aplican tres chispazos a la muestra, cada uno en un punto diferente de la superficie de la probeta; luego el equipo realiza un promedio entre los tres datos, arrojando un resultado final que señala el porcentaje de cada aleante presente.

En el estudio de la composición química, se toman muestras en las diferentes etapas del baño de fundición: Una vez vertida la aleación líquida del horno guinea, por estar libre de inoculantes; y luego de haber agregado los inoculantes. Dichas etapas se fijan para poder analizar el grado de variación del porcentaje de los aleantes, tomando en cuenta las impurezas absorbidas dentro del horno Guinea y los diversos efectos provocados por los inoculantes.

Las probetas son seccionadas transversalmente por ser estas de forma redondeada, y la superficie donde se realizará la espectrometría debe ser lo más plana posible, para obtener resultados adecuados.

Las probetas seccionadas son desbastadas mediante limas, hasta quedar lo más lisa posible, para asegurar que el chispazo sea producido en toda la cara de contacto entre el electrodo encargado de generar el chispazo y la probeta.

Los valores obtenidos mediante el espectrómetro son graficados y de esta manera visualizar el comportamiento de los aleantes, antes y después de los inoculantes.

3.1.3 Microestructura de la aleación

En lo que respecta al estudio de la microestructura, se realiza un análisis microscópico para determinar la distribución de las fases en la matriz de aluminio.

Se aplica el mismo proceso de toma de probetas y son seccionadas transversalmente. Tomando una de las mitades generadas se realiza un

desbaste con cuatro lijas diferentes, 240/P280, 320/P400, 400/P800 y 600/P1200 Buehler-Met II, desde un grano grueso hasta un tipo de grano más fino, siendo estas del mismo orden en que fueron mencionadas

Finalizado el desbaste es necesario aplicar un mejor pulido de la probeta, para esto se utiliza la pulidora de paño con alumina, observando que la probeta adquiriera una superficie tipo espejo, o de ser posible en un microscopio y detectar la presencia de rayas, de ser así se debe continuar con el pulido hasta eliminarlas.

Para el pulido es usado un paño Buehler Finest Quality Polishing Cloth (Microcloth), adicionando Alumina de 1 micra durante todo el proceso; el tiempo de pulido no fue constante, puesto a que las probetas no presentaban uniformidad en la superficie a pulir. La empresa cuenta con un microscopio Olympus Tokyo Polaroid para comprobar que el pulido se estaba realizando correctamente.



Figura 3.9. Pulidora de lijas de grano (izquierda), pulidora de paño (derecha).

Culminado el proceso de pulido, de acuerdo a las normas establecidas, las probetas preparadas se trasladaron al laboratorio de la Universidad de Carabobo para realizar los análisis de microestructura, debido a que el laboratorio de calidad de la empresa no posee un área apta para llevar a cabo los ensayos metalográficos de las muestras.

La superficie preparada de la muestra se frota con un algodón humedecido en una solución conocida bajo el nombre de Kellers, la cual posee la siguiente concentración:

- 5 partes de HNO_3
- 3 partes de HCl
- 2 partes de HF
- 190 partes de agua

El tiempo de ataque es de 20 a 25 segundos, asegurándose de que este se lleve a cabo en un área óptima para la realización del mismo, ya que dicho proceso expulsa gases que deben ser tratados cuidadosamente, para eso se implemento la campana de ataques químicos situada en el laboratorio de la Universidad de Carabobo (ver figura 3.10).

Culminado el tiempo de ataque se lava la probeta con agua y se le rocía un poco de alcohol para lograr, con la ayuda de un secador, que la pieza quede completamente seca y libre del químico, evitando que la misma se sobreataque, (Norma DANA, preparación y análisis metalográficos de probetas, 1990).



Figura 3.10. Campana para ataques químicos.

Dicho proceso es aplicado a una probeta para comprobar que el tiempo de ataque es el indicado y evitar ocasionar daños a todas las muestras, establecido dicho tiempo finalmente se llevan las probetas a un microscopio óptico (véase figura 3.11), para captar imágenes en distintos puntos de la superficie de cada probeta, con un aumento de 100X, 200X y 400X, para observar la microestructura y cada fase de la aleación revelada.

La microestructuras de las probetas se comparan con microestructuras patrones de aleación, y cualquier observación será estudiada para determinar las causas y tomar los correctivos que sean necesarios, (The American Foundrymen`s Society, 1990).

3.1.4 Tamaño de grano

En la determinación del tamaño de grano, se lleva a cabo un examen macroscópico.

El preparado de las probetas es un proceso similar al utilizado en el estudio de la microestructura, diferenciándose en el tipo de ataque empleado.

Una vez pulidas todas las probetas se frota la superficie lisa de la misma, con un algodón humedecido con una solución conocida bajo el nombre de Tuckers, la cual posee la siguiente concentración:

- 45 partes de HCl
- 15 partes de HNO_3
- 15 partes de HF
- 25 partes de agua

El tiempo de ataque fue de 5 segundos. Luego se lava la probeta con agua y se le rocía alcohol para que seque completamente al exponerla frente al secador, e inmediatamente, se lleva la probeta al microscopio para confirmar que el grano ha sido revelado, (Norma DANA, preparación y análisis metalográficos de probetas, 1990).

Se utiliza la misma campana empleada en el ensayo de microscopia. Finalmente, se llevan las probetas al microscopio para proceder a la captación de imágenes con aumento 100X para observar el grano revelado.

Para determinar el tamaño de grano promedio, se emplea la norma ISO 643:2003, utilizando el método planimétrico mencionado en la misma, haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$n_{100} = n_1 + \frac{n_2}{2} \quad (3.3)$$

$$m = 2 \cdot n_{100} \quad (3.4)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{m} \quad (3.5)$$

$$\bar{d} = \bar{a}^{1/2} \quad (3.6)$$

Siendo:

n_{100} : Número total de granos equivalentes a 100x.

m : Número total de granos por milímetro cuadrado.

$\bar{a}$: Área media del grano (mm)

$\bar{d}$: Diámetro medio del grano (mm).



Figura 3.11. Microscopio óptico para estudio de la superficie atacada de la probeta.

Posteriormente se establecen los intervalos de aceptación, con el fin de garantizar la calidad deseada del aluminio líquido. En este sentido es necesario indagar en los criterios de diferentes investigaciones realizadas así como en las normas referidas a la aleación bajo estudio (F-132) por las cuales se orienta la empresa fabricante de pistones, (The Amercian Foundrymen`s Society, 1990).

La norma empleada por la empresa, se encuentra registrada bajo el título de aleación de aluminio F-132 T-5, donde se identifica la aleación que está siendo empleada y el tipo de tratamiento térmico aplicado.

3.1.5 Escoria

Este es uno de los parámetros más difíciles de abordar, siendo esta causante de la aparición de inclusiones y elementos no deseados en el aluminio líquido, los cuales por sus pequeñas dimensiones es muy difícil cuantificarlas o detectarla.

La empresa cuenta con un dispositivo conocido como molde “K” (ver figura 3.12), el cual consta de dos partes que uniéndose forman una especie de molde para la realización de probetas en donde se detectan visualmente las posibles inclusiones presentes en la aleación.



Figura 3.12. Molde “K” ensamblado.

Es importante el precalentamiento del molde para evitar solidificaciones en la mitad del mismo y permitir que la aleación de aluminio líquido cubra todos los espacios; una vez se halla solidificado por completo, se desensambla obteniendo la probeta, para efectuar el análisis.

Sabiendo lo complicado de detectar las inclusiones en la aleación de aluminio líquido, se aportará todo lo necesario en el proceso para minimizar las mismas.

Los resultados obtenidos proporcionan información necesaria para la comparación con los parámetros de calidad establecidos con anterioridad, evaluando de esta manera los resultados obtenidos y observando si estos se adhieren o no a los límites de aceptación previamente señalados.

Es importante acotar que se debe indicar si algún aspecto del proceso debe ser modificado para poder cumplir con las condiciones necesarias relativas al aluminio líquido, constituyendo un imperativo el que las mismas se adecuen a los estándares señalados por las normas de la empresa, garantizando así la calidad deseada.

Finalmente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos como consecuencia del proceso investigativo, los cuales permiten formular una propuesta contentiva de todas las condiciones y aspectos que se deben tomar en cuenta durante el proceso de fundición en la empresa fabricante de pistones, siendo indispensable el apego a los estándares y normas establecidas en la empresa, permitiendo de esta forma, la obtención de un producto final cuya calidad, confiabilidad y propiedades mecánicas, se traduzca en una disminución en el índice de rechazo de la empresa.

3.2 Lista de equipos utilizados.

- Espectrómetro:

Marca: AMETEK

Modelo: Spectromaxx

Espectroscopio de plasma y de sensibilidad de detección del nitrógeno a 20 ppm

- Pulidoras de metales para desbaste, con gabinete:

Marca: Buehler

Modelo: Supermet Grinder 15-1232

Motor: 3 hp

Máxima velocidad: 600 rpm

- Pulidoras de metales para pulido, sin gabinete:

Marca: Buehler

Modelo: Supermet Grinder 15-1231

Motor: 3 hp

Máxima velocidad: 600 rpm

- Balanza electrónica:

Marca: AND Electronic Balance

Modelo: FX3000

Máxima carga: 3.100 gramos

Apreciación: 0,001 gramos

- Microscopio (empresa):

Marca: Olympus

Modelo: Tokyo

Aumentos: 100X, 200X, 250X y 400X.

Módulo Polaroid

- Flujómetro:

Marca: DWYER

Modelo: RMB-53D-SSV

Tipo: Rotámetro

Rango: 5 – 45 litros/min

Apreciación: 1 litro/min

- Manómetro

Marca: NITO

Escala: 0 – 200 psi.

Apreciación: 5 psi.

- Vacuómetro:

Marca: WIKA

Rango: 0 – (-760) mmHg

Apreciación: 25 mmHg

CAPÍTULO 4

Análisis de resultados

En este capítulo se realiza una comparación entre los resultados obtenidos con los valores ya manejados por la empresa para el correcto proceder en el estudio de la calidad del aluminio líquido empleado en la fabricación de pistones para motores de combustión interna; para lograr así establecer un orden en los diversos métodos y parámetros que permiten obtener una calidad deseada del aluminio F-132, facilitando la manufactura de productos de alta calidad y reducir los aspectos negativos que presente el proceso de fundición llevado a cabo en la elaboración del pistón.

4.1 Desgasificado

En la búsqueda de optimizar el proceso de desgasificado, se realizaron dos pruebas; la primera fue hecha con la finalidad de establecer el tiempo de desgasificado necesario para cumplir con las exigencias del proceso; y, una segunda prueba para determinar el tipo de material que se debe emplear en la elaboración del eje desgasificador.

4.1.1 Prueba del tiempo de desgasificado

El tiempo de desgasificado manejado actualmente en la empresa es de once (11) minutos, valor establecido por el departamento de calidad, iniciándose desde que el impulsor rotatorio comienza a inyectar argón una vez sumergido en el baño de fundición. Siguiendo los pasos necesarios para la obtención de los datos correspondientes, se presentan las condiciones registradas:

Tabla 4.1. Condiciones registradas en las pruebas de desgasificado.

Día	T. Atmosférica (°C)	T. Horno Retención (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión de Argón (kPa)	Flujo de Argón (m³/h)
20/07/09	27	702	70	276	1,7
26/08/09	24	696	89	276	1,7
31/08/09	26	729	79	276	1,7
02/09/09	28	708	66	276	1,7
02/09/09	29	699	52	276	1,7

Seguido de esto se presentan los resultados obtenidos:

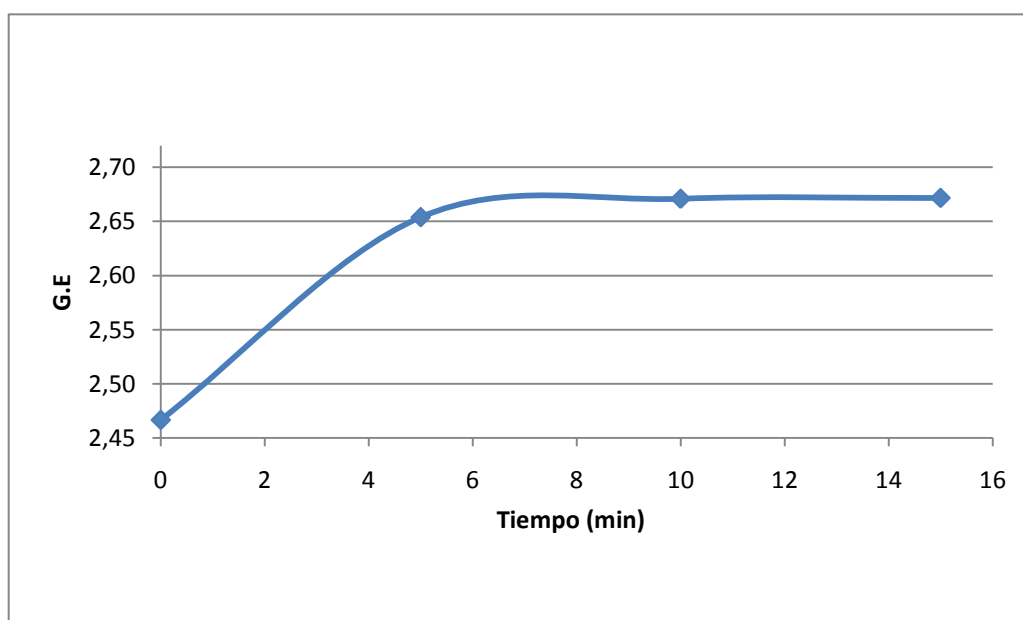


Figura 4.1. Gravedad específica versus tiempo (20-07-09)

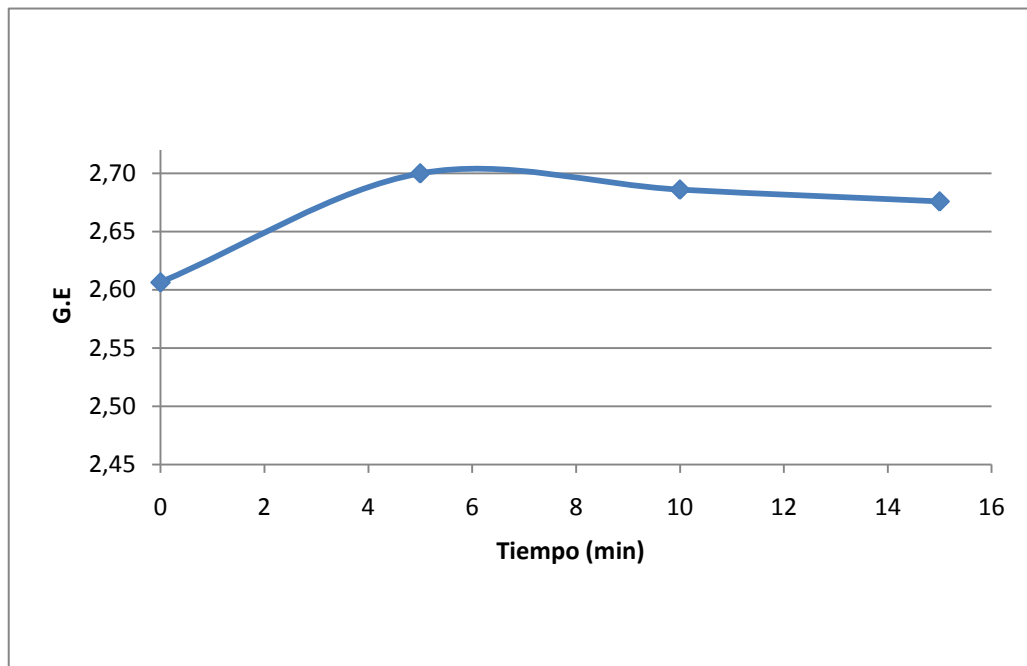


Figura 4.2. Gravedad específica versus tiempo (26-08-09).

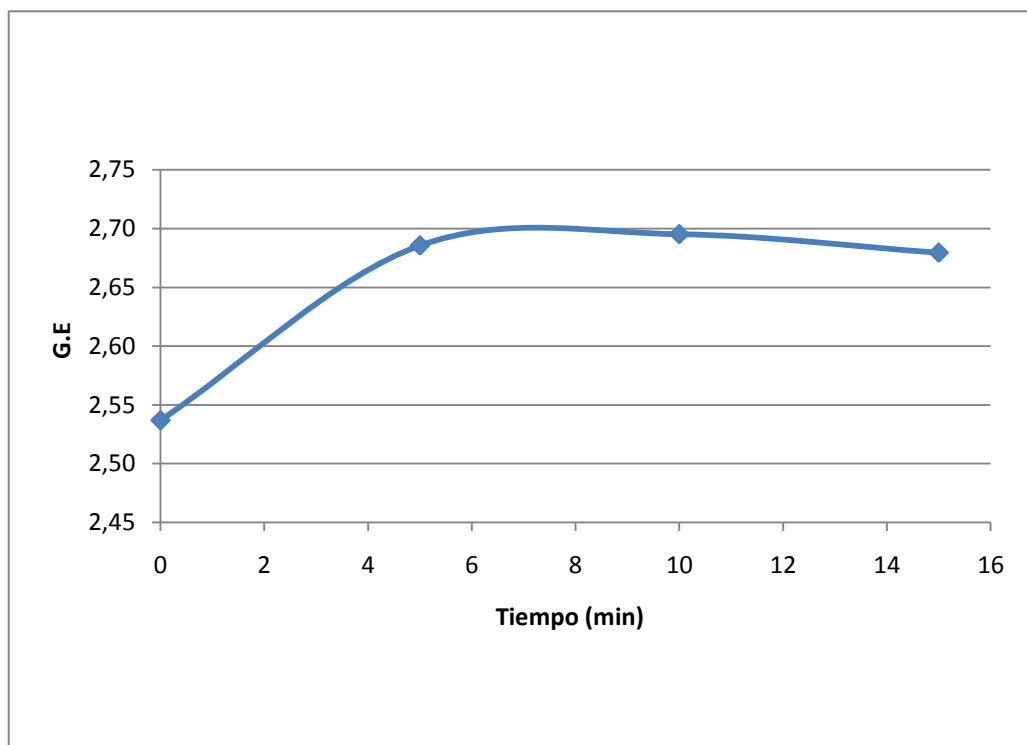


Figura 4.3. Gravedad específica versus tiempo (31-08-09).

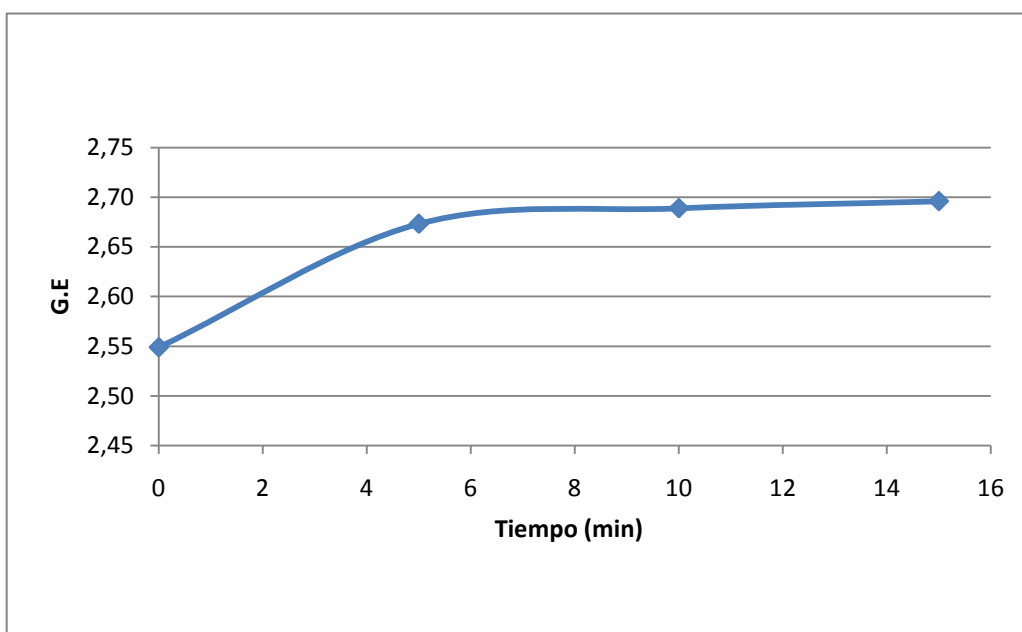


Figura 4.4. Gravedad específica versus tiempo (02-09-09).

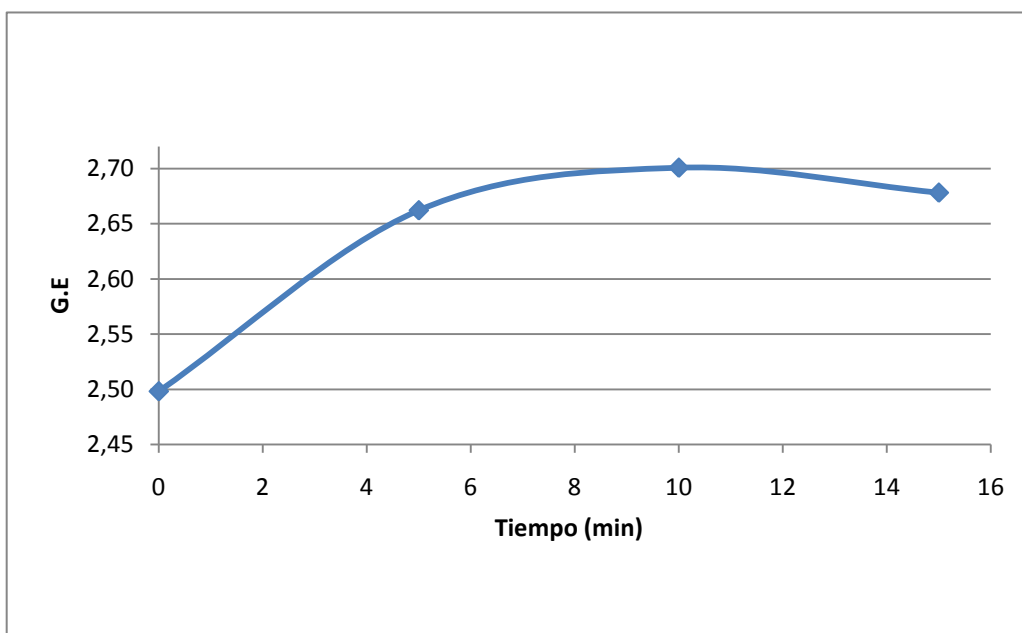


Figura 4.5. Gravedad específica versus tiempo (03-09-09)

Las gráficas de gravedad específica expuestas anteriormente, poseen un comportamiento similar en relación a cada una, observándose un ascenso

al inicio, y luego de siete (7) minutos aproximadamente, la curva tiende a nivelarse.

En cada gráfica se observa, que entre los seis (6) y ocho (8) minutos se alcanza un valor apto para las condiciones operativas exigidas por la empresa. Por lo cual se procedió a realizar pruebas del desgasificado utilizando un tiempo de 8 minutos

Una vez seleccionado el nuevo tiempo de desgasificado, se realizaron diez (10) pruebas en cinco días diferentes, dos por cada día, con la finalidad de afianzar los resultados obtenidos. A continuación se presenta una gráfica que ilustra los resultados obtenidos en cada ensayo realizado:

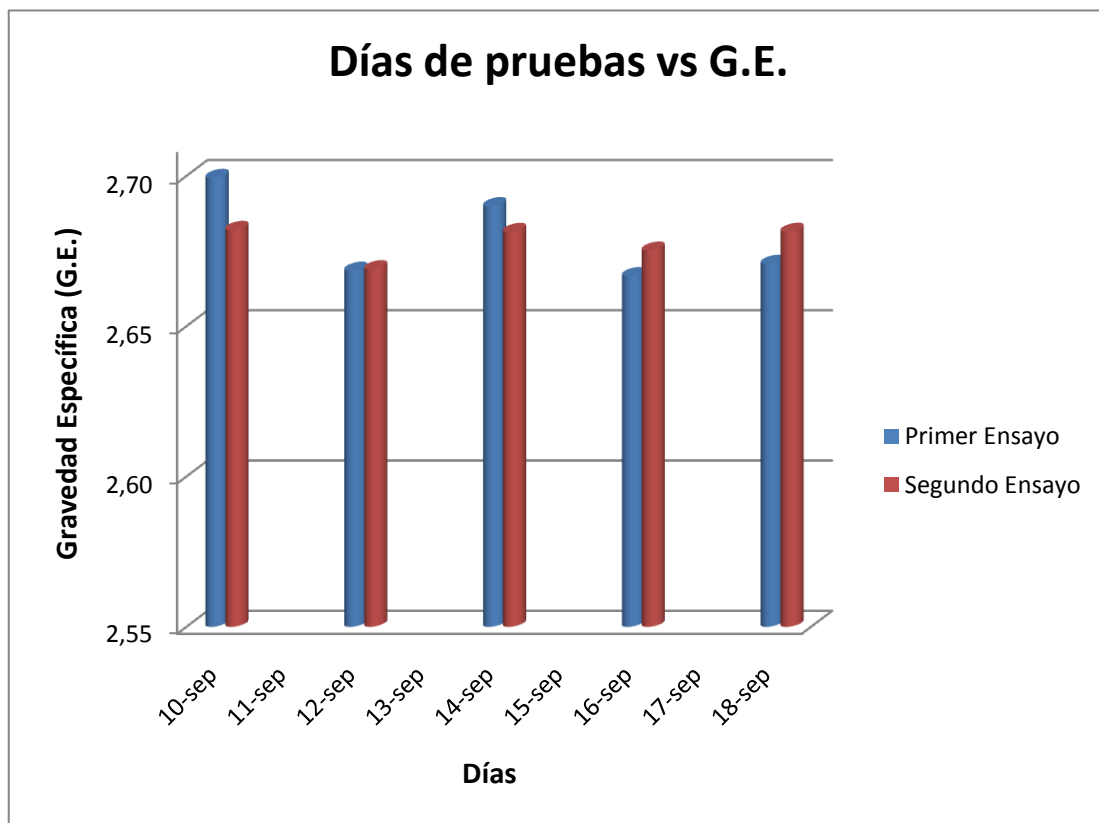


Figura 4.6. Gravedad específica al cabo de 8 minutos.

En la figura 4.6 se observa que para un tiempo de ocho (8) minutos, los valores de gravedad específica se encuentran dentro del intervalo de

aceptación. Además, siendo la gravedad específica una medida indirecta del nivel de porosidad presente, se puede deducir que dicho nivel fue mínimo en las probetas obtenidas durante la realización de de la prueba, presentando la misma apariencia superficial al ser seccionadas transversalmente.

A continuación se presenta la imagen de una de las probetas desgasificadas a los 8 minutos, comparada con otra a los 5 minutos:

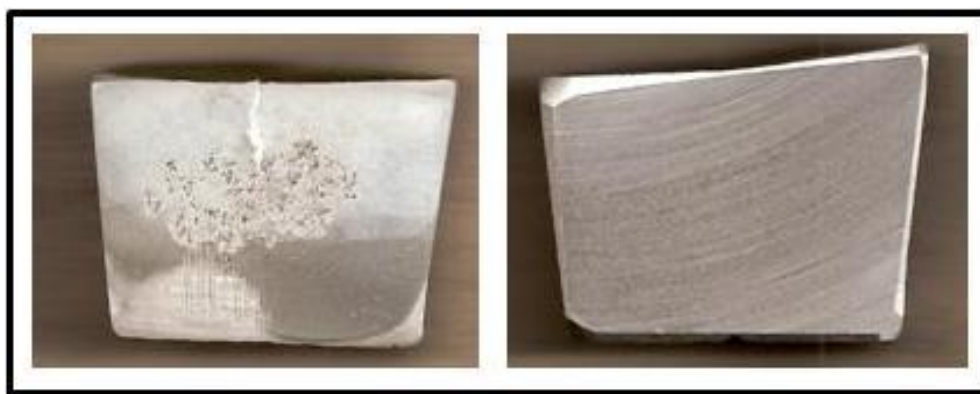


Figura 4.7. Probeta desgasificada a los 5 minutos (izquierda), Probetas desgasificadas a 8 minutos (derecha).

Disminuyendo el tiempo de desgasificado actual a 8 minutos, genera una reducción de 1/3 del consumo mensual.

Un banco de ensayo de argón tiene una duración de 4 días aproximadamente, cada banco tiene un valor de 5.335,2 bolívares, de ser una reducción de 1/3 de consumo se obtiene entonces un ahorro de 1.778,4 bolívares por cada banco de ensayo adquirido.

4.1.2 Prueba del eje de acero para el desgasificado

Actualmente en la empresa se utiliza un eje hecho de grafito para la realización del desgasificado. Planteando la posibilidad de utilizar otro material que proporcione valores de gravedad específica dentro de los límites de aceptación, y teniendo en cuenta la disponibilidad del material en el

departamento de matricería para la elaboración de un nuevo eje, se utilizó el acero para llevar a cabo el ensayo.

El eje de acero fue elaborado en el departamento de matricería, con un diámetro externo de 3 cm, con un espesor de 3 mm, y en su parte inferior se le adaptó una cruz, realizada de tubos del mismo material, a través de los cuales circulaba hacia el exterior el argón.

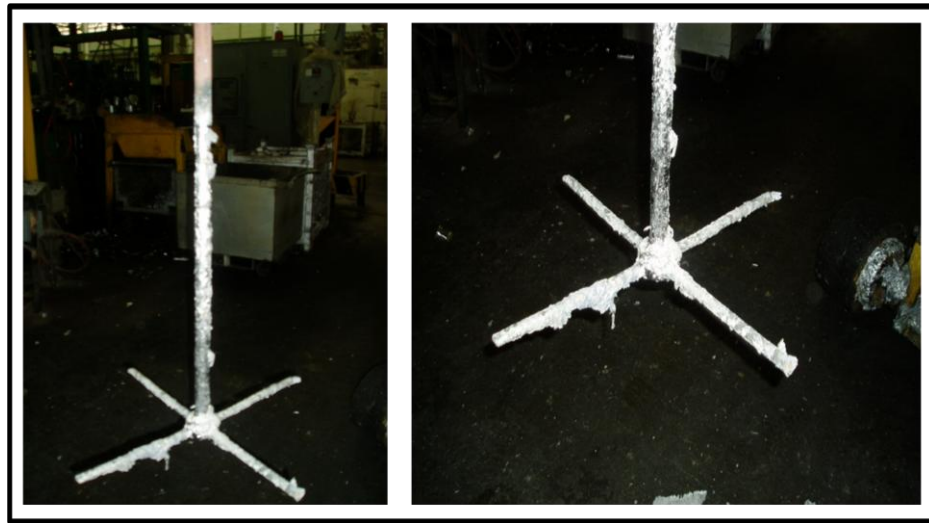


Figura 4.8. Eje de prueba de acero.

Se realizaron tres (3) pruebas con el eje de acero, cada una en un horno de retención diferente; en la primera prueba el eje se colocó rotativo durante un tiempo de 12 min; en la segunda prueba, el eje estuvo estático y se le aplicó argón durante un tiempo de 12 min; y, en la última prueba, se mantuvo estático el eje de acero, pero se aumentó el tiempo de desgasificado hasta 20 min en total.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos de la prueba realizada con el eje de acero, donde se puede observar que en los tres ensayos se varió la cantidad de argón administrado al baño de fundición. Para determinar cuál de los tres ensayos resultaba más efectivo, se empleó como parámetro comparativo el valor de la gravedad específica de muestras de la aleación líquida tomadas luego de cada desgasificado

Tabla 4.2. Resultados obtenidos de la prueba del eje de acero.

Prueba	Horno Retención	Pman (kPa)	Flujo de Argón (m ³ /h)	Observaciones	G.E
1	6	414	1,42	Rotativo 12 min	2,703
2	2	414	1,56	Estático 12 min	2,653
3	1	69	0,34	Estático 20 min	2,570

Luego de haber realizado los ensayos, se inició la evaluación del estado físico en el cual se encontraba el eje de acero; se realizó la medición del diámetro externo final del eje, donde se determinó que el eje presentó un desgaste de 1,5 mm aproximadamente en su espesor (véase figura 4.9.).



Figura 4.9. Prueba de eje de acero nuevo (izquierda), eje de acero después de tres pruebas (derecha).

Observando los resultados desfavorables que se obtuvieron, se decidió mantener el uso del grafito como el material adecuado para las condiciones del proceso.

Finalmente se llegó a la conclusión de que la condición más satisfactoria es cuando el eje de acero está rotativo; aunque, deben ser tomadas acciones

preventivas para evitar el desgaste excesivo prematuro que presenta un eje de este tipo.

Es necesario llevar un control diario sobre el desgasificado en los hornos de retención, con la finalidad de evitar los imprevistos que pueden surgir durante el proceso que pueden alterar los valores aceptados, siendo estos, la ausencia de argón en el proceso, una presión de inyección y un flujo de argón inadecuados, así como las condiciones de operación deficientes de la unidad desgasificadora.

4.2 Refinamiento del grano

Para la realización de pistones, es fundamental la utilización de refinadores de granos, para disminuir el tamaño del mismo y mejorar así sus propiedades mecánicas. Para lograr este efecto, se agregan barras de 200 gramos cada una, con concentraciones de 94 % de aluminio, 5 % de titanio y 1 % de boro aproximadamente.

Actualmente se le añaden a los hornos de retención dos (2) barras de 1 metro de longitud y 9,46 mm de diámetro, con esto se procede a calcular el peso correspondiente a una barra.

$$P = \rho \cdot V \quad (4.1)$$

Siendo:

P: Peso de la barra (gramos)

ρ : Densidad (g/cm^3)

V: Volumen (cm^3)

Por tratarse de una barra de aluminio con pequeñas concentraciones de titanio y boro, la densidad de esta se puede aproximar a la del aluminio, la cual es de $2,7 \text{ } g/cm^3$, entonces:

$$P_{tib} = 2,7 \frac{g}{cm^3} \cdot \pi \cdot \frac{0,94^2}{4} = 195,43 \text{ g} \cong 200 \text{ g}$$

Tabla 4.3. Cantidades de cada elemento presentes en cada barra añadida.

Elemento	Porcentaje presente en las barras (%)	Cantidad (g)
Aluminio	94	188
Titanio	5	10
Boro	1	2

Tomando en cuenta que toda materia prima al llegar a la empresa se verifica que la composición química cumpla con las especificaciones de la norma, se procede a calcular los aumentos de porcentajes correspondientes de titanio-boro agregado.

4.2.1 Cálculo de los incrementos de los aleantes

Los hornos de retención son cargados utilizando un crisol de transferencia de entre 320 y 340 kg aproximadamente de aleación líquida. Tomando como referencia los porcentajes de titanio-boro en la materia prima aprobada por el departamento de calidad de la empresa, se realizó un promedio de los mismos, con la finalidad de conocer las cantidades presentes en la aleación, se obtiene que un 0,082 % corresponde al titanio y un 0,001 % al boro, siendo estos los porcentajes iniciales antes de agregar el refinador de grano.

Para obtener la cantidad correspondiente a cada aleante, se utiliza la ecuación 4.2, para cargas de 320 kg y 340 kg, por ser estas las posibles cargas efectuadas por los crisoles de transferencia, obteniendo igualmente las cantidades de titanio y de boro presentes en las barras.

$$C.A_x = 320 \text{ kg} \frac{\%A}{100} \quad (4.2)$$

Siendo:

C.A: Cantidad de aleante “X” presente en el crisol y en las barras (Kg)

X: Aleante: Titanio, boro.

%A: Porcentaje de cada aleante

A continuación se presenta el cálculo para el titanio y una transferencia de 320 kg, siguiendo el mismo procedimiento para la determinación de las otras cantidades correspondientes:

$$C.A_{Ti/crisol} = 320 \text{ kg} \frac{0,082}{100} = 0,2624 \text{ kg}$$

$$C.A_{Ti/barra} = 400 \text{ g} \frac{5}{100} = 20 \text{ g} = 0,02 \text{ kg}$$

Tabla 4.4. Cantidades presentes en el horno de retención y por cada barra compuesta de titanio-boro.

Aleante	Para una transferencia de 320 kg		Para una transferencia de 340 kg	
	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente en dos barras (Kg)	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente en dos barras (Kg)
Titanio	0,2624	0,0200	0,2788	0,0200
Boro	0,0032	0,0040	0,0034	0,0040

Sumando ambas valores presentes en la tabla 4.2, correspondiente a cada aleante, se obtienen las cantidades totales, luego de haber agregado las barras de titanio-boro:

$$C.A_{total/x} = X_{H.R} + X_{barra} \quad (4.3)$$

Siendo:

$C.A_{total/x}$: Cantidad total de “X” (Kg)

$X_{H.R}$: Cantidad de “X” presente en el horno de retención (Kg)

X_{barra} : Cantidad de “X” presente en la barra agregada (Kg)

Aplicando la ecuación 4.3, y aplicándolo para los demás aleantes y transferencias, se obtiene:

$$C.A_{total} / Ti = 0,2624 + 0,02 = 0,2824 \text{ Kg}$$

Tabla 4.5. Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de titanio-boro, para una transferencia de 320 Kg.

Aleante	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente en dos barras (Kg)	Cantidad total (Kg)
Titanio	0,2426	0,0200	0,2824
Boro	0,0032	0,0040	0,0072

Tabla 4.6. Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de titanio-boro, para una transferencia de 340 Kg.

Aleante	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente en dos barras (Kg)	Cantidad total (Kg)
Titanio	0,2788	0,0200	0,2988
Boro	0,0034	0,0040	0,0074

Despejando el porcentaje de aleantes de la ecuación 4.2 y sustituyendo los valores de cantidades totales presentes en la tabla 4.5 y 4.6, se obtiene:

Para una transferencia de 320 Kg:

$$\%Ti_{finales} = 0,2824 \frac{100}{320,6} = 0,088 \%$$

Aplicando el mismo procedimiento para los demás aleantes y una transferencia de 340 Kg, se obtiene:

Tabla 4.7. Porcentajes de cada aleante luego de agregado el titanio-boro (final) para ambas transferencias.

Aleante	Para una transferencia de 320 Kg.	Para una transferencia de 340 Kg.
	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
Titanio	0,088	0,093
Boro	0,00226	0,00231

El incremento teórico se define como la diferencia del porcentaje final con el inicial de los aleantes:

$$Incremento_x = \%X_{final} - \%X_{inicial} \quad (4.4)$$

Siendo:

$Incremento_x$: El incremento del aleante "X" (%)

$\%X_{final}$: Porcentaje luego de agregado el titanio-boro (%)

$\%X_{inicial}$: Porcentaje antes de agregado el titanio-boro (%)

Entonces:

$$Incremento_{Ti} = 0,088 - 0,082 = 0,00608 \%$$

$$Incremento_B = 0,002245 - 0,001 = 0,00124 \%$$

Aplicando dicho procedimiento para las demás cantidades se obtienen los incrementos correspondientes para cada aleante:

Tabla 4.8. Incrementos teóricos y recomendados al agregar las barras compuestas de titanio-boro.

	Para una transferencia de 320 Kg	Para una transferencia de 340 Kg
Aleante	Incremento (%)	Incremento (%)
Titanio	0,00608	0,0057
Boro	0,00124	0,00117
Recomendado	Titanio 0,0100 – 0,080 y boro 0,003 – 0,008	

Es necesario realizar pruebas con la finalidad de verificar y llevar un control, para comprobar que el tamaño de grano es el indicado, y evitar entonces pérdidas en el proceso. Dicha prueba no es llevada actualmente en la empresa; por esta razón se llevo a cabo la realización de la misma, y así observar cómo se encuentra el tamaño de grano en la aleación de aluminio, verificando el mismo.

Según Adrian M. en 1992, se debe añadir entre 0,01 y 0,08 % de titanio y 0,003 % de boro aproximadamente. Para aleaciones empleadas para fabricar pistones la adición de boro puede estar comprendida entre 0,003 y 0,008 %.

Realizando la comparación entre los valores obtenidos de la tabla 4.8 generados por la adición actual de titanio-boro con los valores de incremento recomendados, se tiene que estos se encuentran por debajo.

Con la finalidad de relacionar las cantidades agregadas de titanio-boro en función del refinamiento del grano que este ejerce, es necesario realizar las pruebas del tamaño actual que este presenta.

4.2.2 Determinación del tamaño del grano

Para esta prueba se tomaron un número de 12 probetas en los hornos de retención en reposo, distribuidas de la siguiente manera: 4 probetas cuando el horno de retención se encuentra en el nivel mínimo, 4 probetas antes de agregar los inoculantes, y por ultimo 4 probetas justo antes de utilizar el horno de retención (con los inoculantes agregados).

A estas probetas se les obtuvieron los valores de gravedad específica igualmente para llevar un registro de las mismas, seguido de esto fueron cortadas transversalmente con la finalidad de proporcionar unas probetas más fáciles de manipular para la realización del desbastado.

Luego de tener las probetas ya divididas se fueron desbastando y aplicando el proceso de pulido adecuado. A continuación se presenta el grano revelado para un ensayo, comportándose los demás de la misma manera (ver apéndice C):

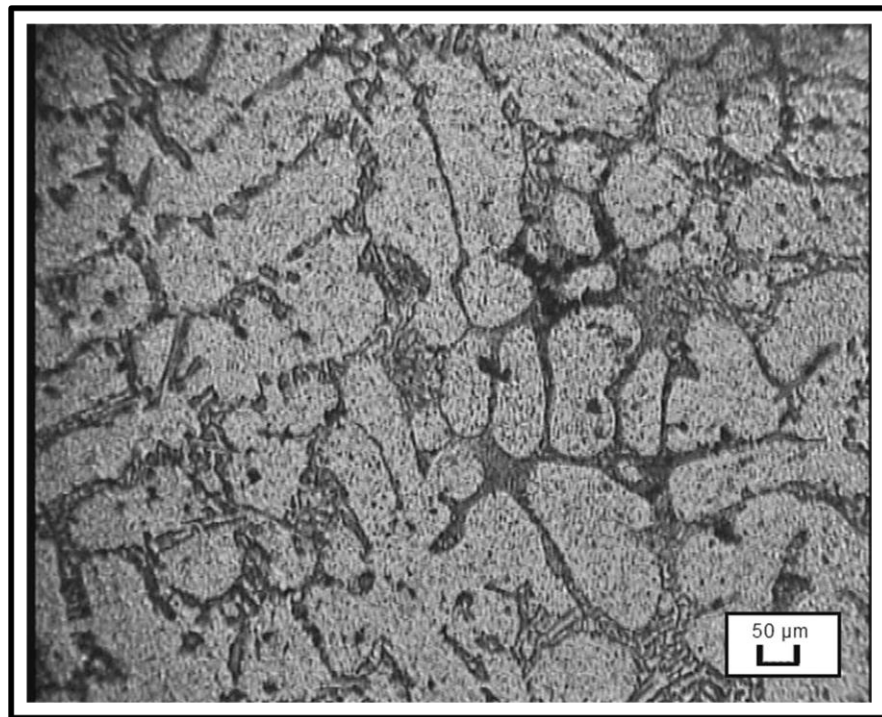


Figura 4.10. Grano revelado antes de agregado el titanio-boro.

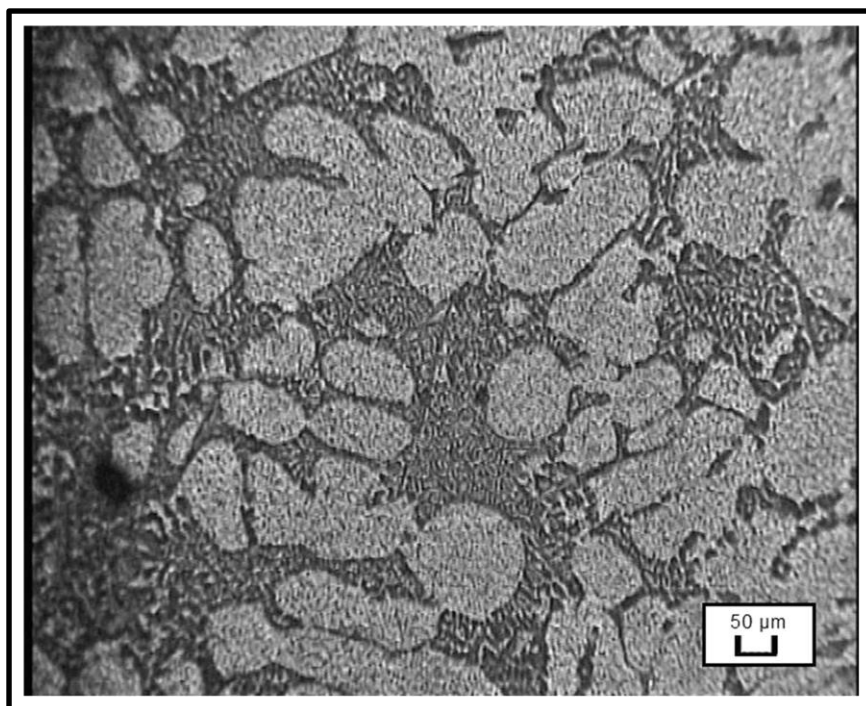


Figura 4.11. Grano revelado después de agregado el titanio-boro.

Se deben obtener los diámetros promedios correspondientes, haciendo uso de las ecuaciones del método planimétrico 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6. A continuación se presenta un ejemplo del cálculo para el diámetro promedio de un ensayo, aplicando el mismo para las pruebas subsiguientes.

1° Ensayo:

Iniciando por el grano obtenido antes de agregado el titanio-boro se realiza el círculo correspondiente de 79,8 mm de diámetro, para realizar el conteo de granos internos e intersectados.

Se obtuvieron las cantidades de 8 granos completamente contenidos en su interior, y 6 granos intersectados por el mismo, entonces:

$$n_{100} = 8 + \frac{6}{2} = 11 \text{ granos}$$

$$m = 2 \cdot 11 = 22 \text{ granos/mm}^2$$

$$\bar{a} = \frac{1}{22} = 0,045 \text{ mm}^2$$

$$\bar{d} = 0,045^{1/2} = 0,2132 \text{ mm}$$

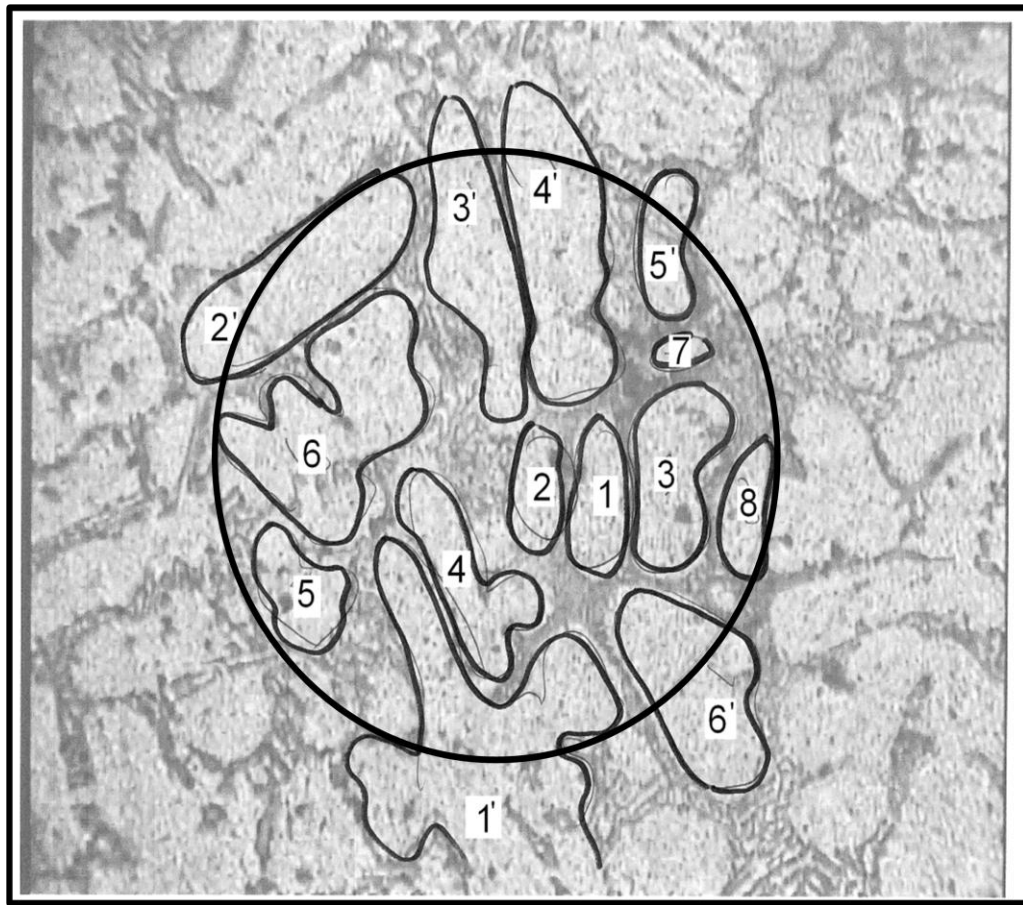


Figura 4.12. Conteo de granos antes de agregado el titanio boro, según el método planimétrico.

Continuando con el grano revelado luego de agregado el titanio-boro, y aplicando el procedimiento anterior, se obtuvieron 8 granos en el interior del círculo y 7 intersectados, entonces:

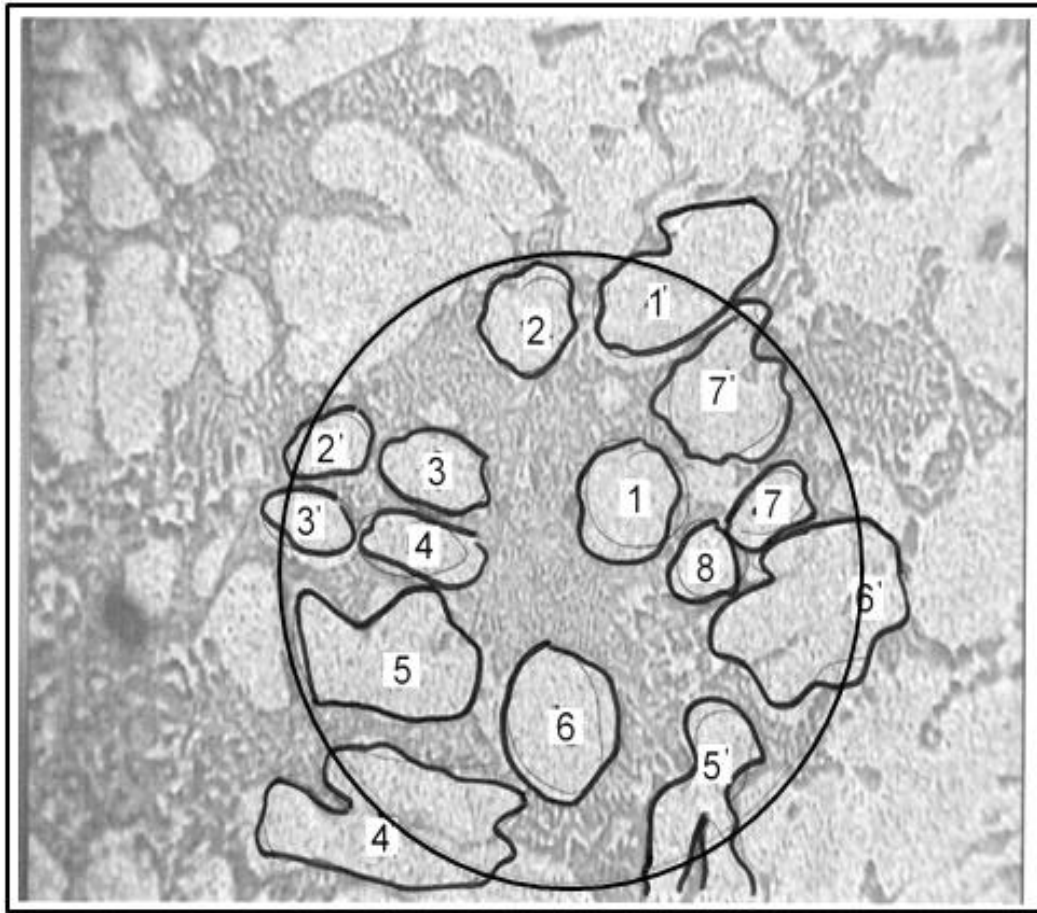


Figura 4.13. Conteo de granos después de agregado el titanio boro, según el método planimétrico

$$n_{100} = 11,5 \text{ granos}$$

$$m = 23 \text{ granos/mm}^2$$

$$\bar{a} = 0,043 \text{ mm}^2$$

$$\bar{d} = 0,2085 \text{ mm}$$

Para el resto de los ensayos se aplico el mismo método de obtención de diámetros promedios, obteniendo lo siguiente:

Tabla 4.9. Variables obtenidas para el cálculo del diámetro promedio.

Ensayo	Variable	Antes de agregado el	Luego de agregado el
		TiB	TiB
1	$n_{100}(\text{gramos})$	11	11,5
	$m(\text{gramos}/\text{mm}^2)$	22	23
	$\bar{a}(\text{mm}^2)$	0,045	0,043
	$\bar{d}(\text{mm})$	0,2132	0,2085
2	$n_{100}(\text{gramos})$	9,5	15
	$m(\text{gramos}/\text{mm}^2)$	19	30
	$\bar{a}(\text{mm}^2)$	0,053	0,033
	$\bar{d}(\text{mm})$	0,2294	0,1826
3	$n_{100}(\text{gramos})$	6	14,5
	$m(\text{gramos}/\text{mm}^2)$	12	29
	$\bar{a}(\text{mm}^2)$	0,083	0,034
	$\bar{d}(\text{mm})$	0,2886	0,1857
4	$n_{100}(\text{gramos})$	9	14
	$m(\text{gramos}/\text{mm}^2)$	18	28
	$\bar{a}(\text{mm}^2)$	0,0556	0,0357
	$\bar{d}(\text{mm})$	0,2357	0,1889

Haciendo uso del número total de granos por milímetro cuadrado (m), se obtiene los índices G(ASTM) respectivos (ver figura A.7):

Tabla 4.10. Índices G (ASTM) correspondientes a cada ensayo.

Ensayo	G (ASTM) antes de agregar el TiB	G (ASTM) luego de agregar el TiB
1	1	2
2	1	2
3	0	2
4	1	2

Los índices ASTM (G) obtenidos, según la norma ISO 643:2003, corresponden a un tamaño de grano grueso, y el tamaño de grano final debe corresponder según el departamento de calidad a un nivel de medio a fino, es decir, un índice G (ASTM) entre 5 y 6, (Adrian, 1992).

Tomando en cuenta los porcentajes de incremento en la tabla 4.8 y los índices G (ASTM) de la tabla 4.10, se puede señalar que el tamaño de grano no corresponde a los especificados, y el refinamiento del mismo no se vio afectado por las cantidades de titanio-boro presentes antes de agregar los inoculantes, sino por los porcentajes agregados durante el proceso de fundición.

4.3 Microestructura

Así como se utilizan refinadores de granos, es fundamental la implementación de modificadores de microestructuras, con la finalidad modificar el silicio que se encuentra distribuido en forma de agujas y a veces rectangulares llevándolas a formas globulares y nodulares, para mejorar las propiedades mecánicas y la estructura sea más dúctil.

Actualmente se le añaden a los hornos de retención en conjunto del titanio-boro una barra de aluminio con 10% de estroncio, de un metro de largo

y 9,6 mm de diámetro, por tener las mismas dimensiones que las barras de titanio-boro el peso correspondiente es de 200 gramos aproximadamente.

Tomando como referencia los porcentajes de estroncio en la materia prima aprobada por el departamento de calidad de la empresa, se realizó un promedio con la finalidad de conocer la cantidad presente en la aleación, siendo este un 0,003 %.

Haciendo uso de la ecuación 4.2, 4.3 y 4.4, y las especificaciones antes mencionadas se obtiene lo siguiente:

Para una transferencia de 320 Kg:

$$C.A_{Sr/crisol} = 320 \text{ kg} \frac{0,003}{100} = 0,0096 \text{ kg}$$

$$C.A_{Sr/barra} = 200 \text{ g} \frac{10}{100} = 20 \text{ g} = 0,02 \text{ kg}$$

Aplicando el procedimiento para una transferencia de 320 Kg, se obtiene los valores correspondientes a 340 Kg:

Tabla 4.11. Cantidades presentes en el horno de retención y por cada barra, de estroncio.

Aleante	Para una transferencia de 320 kg		Para una transferencia de 340 kg	
	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente por cada barra (Kg)	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente por cada barra (Kg)
Estroncio	0,0096	0,0200	0,0102	0,0200

Tabla 4.12. Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de estroncio, para una transferencia de 320 Kg.

Aleante	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente en las barras (Kg)	Cantidad total (Kg)
Estroncio	0,0096	0,0200	0,0296

Tabla 4.13. Cantidades totales de cada aleante luego de agregado las barras compuestas de estroncio, para una transferencia de 340 Kg.

Aleante	Presente en el horno de retención (Kg)	Presente en las barras (Kg)	Cantidad total (Kg)
Estroncio	0,0102	0,0200	0,0302

Para una transferencia de 320 Kg:

$$\%B_{finales} = 0,0296 \frac{100}{320,6} = 0,0092 \%$$

Aplicando el mismo procedimiento para una transferencia de 340 Kg, se obtiene:

Tabla 4.14. Porcentajes de cada aleante luego de agregado el titanio-boro (final) para ambas transferencias.

	Para una transferencia de 320 Kg.	Para una transferencia de 340 Kg.
Aleante	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
Estroncio	0,0092	0,0087

$$\text{Incremento}_{Sr} = 0,0092 - 0,003 = 0,0062 \%$$

Entonces para una transferencia de 340 Kg se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.15. Incrementos teóricos al agregar las barras compuestas de estroncio.

	Para una transferencia de 320 Kg	Para una transferencia de 340 Kg
Aleante	Incremento (%)	Incremento (%)
Estroncio	0,0062	0,0059
Recomendado	0,02	

Según Adrian M. en 1992, se debe añadir 0,02 % de estroncio aproximadamente.

Así como se realizan pruebas para comprobar que el tamaño de grano es el indicado, es necesario verificar mediante los ensayos correspondientes, que la microestructura generada por la modificación del estroncio es la adecuada.

4.3.1 Pruebas para la microestructura

Para esta prueba se tomaron un número de 9 probetas en los hornos de retención en reposo, distribuidas de la siguiente manera: 3 probetas cuando el horno de retención se encuentra en el nivel mínimo, 3 probetas antes de agregar el inoculante, y por ultimo 3 probetas justo antes de utilizar el horno de retención (con el inoculante agregado).

Las probetas fueron cortadas transversalmente con la finalidad de poderlas manipular para la realización del desbastado, siguiendo el procedimiento correspondiente, los resultados obtenidos se presentan a continuación: En las figuras 4.14 y 4.15 se observa la microestructura revelada antes de agregado el estroncio con aumentos de 100X y 200X.

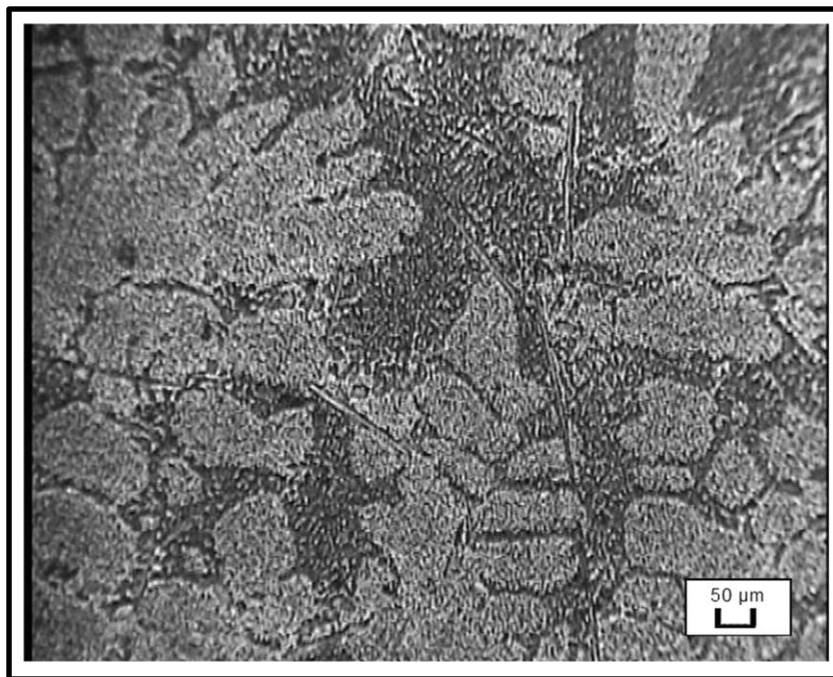


Figura 4.14. Microestructura revelada antes de agregado el estroncio a 100X.

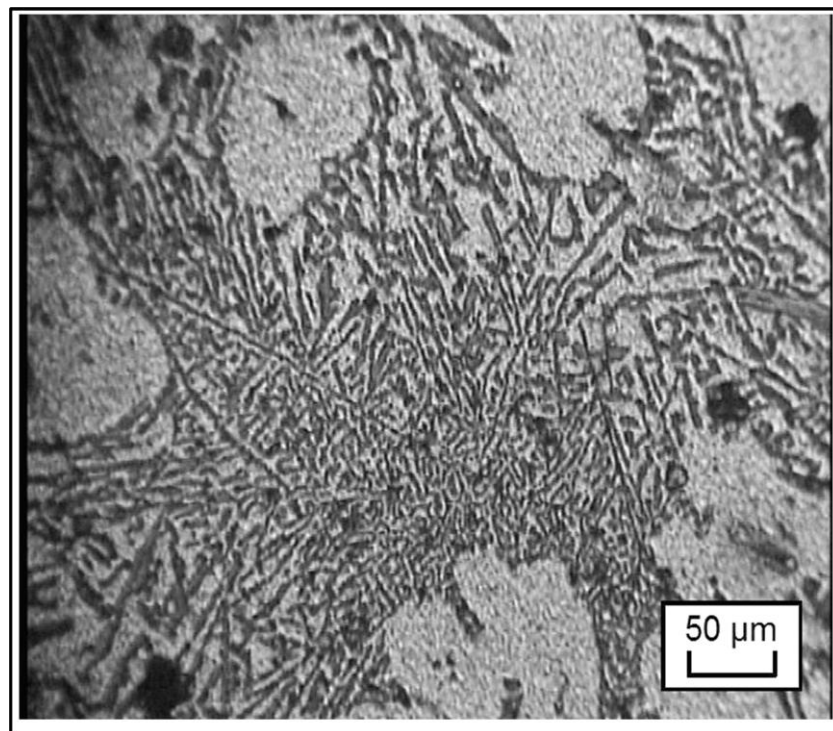


Figura 4.15. Microestructura revelada antes de agregado el estroncio a 200X.

En las figuras 4.16 y 4.17 se visualizan las microestructuras reveladas luego de agregado el estroncio a los mismos aumentos mencionados anteriormente.

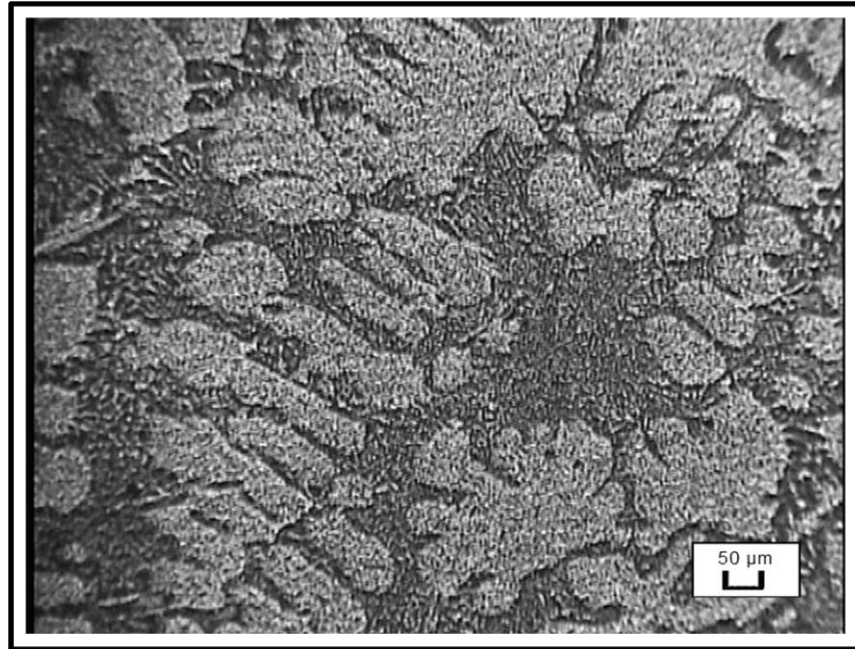


Figura 4.16. Microestructura revelada después de agregado el estroncio a 100X.

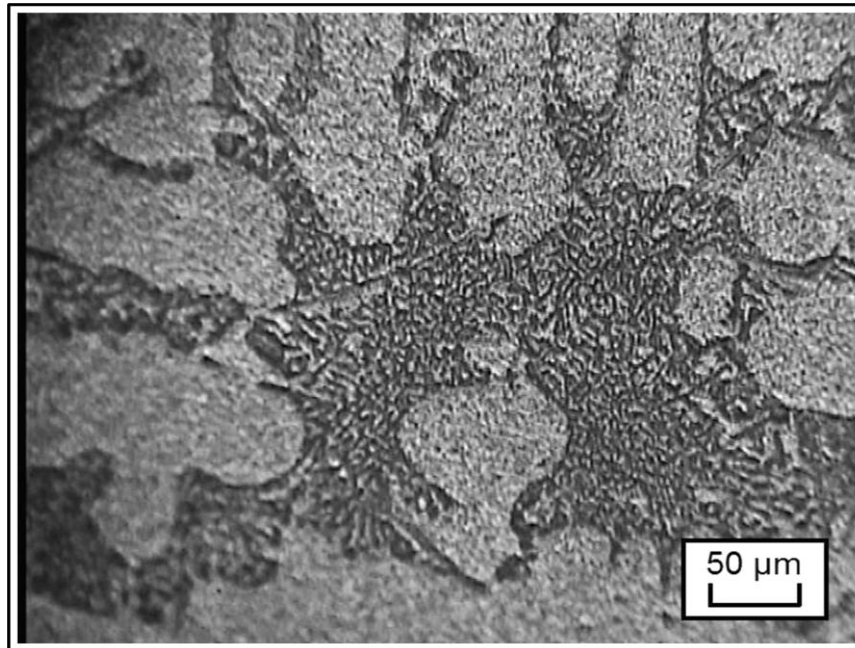


Figura 4.17. Microestructura revelada después de agregar el estroncio a 200X.

Se utilizaron las fotos con respecto a dos aumentos en el microscopio, antes y después de agregado el estroncio.

Fueron seleccionadas dichas fotos por ser las más representativas y en las cuales se puede apreciar mejor la modificación de la estructura.

Las figuras 4.14 y 4.16 muestran la estructura de las probetas con un aumento de 100X antes y después de haber agregado el estroncio, en las cuales por tener poco aumento no se puede apreciar de forma clara la estructura, en algunas observando detalladamente la figura antes de haber agregado el estroncio se aprecia silicio en forma de agujas, mas no se puede distinguir claramente.

Ahora bien tomando en cuenta las figuras 4.15 y 4.17 las cuales poseen un aumento mayor (200X), se visualiza la estructura del silicio, en donde se observa la diferencia antes y después de agregar el estroncio.

Antes de agregar el aleante (estroncio), la estructura del silicio se encuentra en forma de agujas, lo que se debe a que el inoculante no ha reaccionado para modificar esta; una vez que se agrega el estroncio a una temperatura entre de 700 y 800 °C, y transcurridos los 20 minutos correspondientes se completa la acción modificante.

A continuación se presentan los modelos de control de microestructura de aleaciones aluminio-silicio, mostrando la microestructura del silicio sin presentar modificación hasta encontrarse supermodificado, (American Foundrymen`s Society, Inc, 1990).

Observando la figura 4.17 se puede distinguir que en partes de la misma se consigue el silicio en forma de agujas, obteniendo los mismos resultados en los demás ensayos (ver apéndice D).

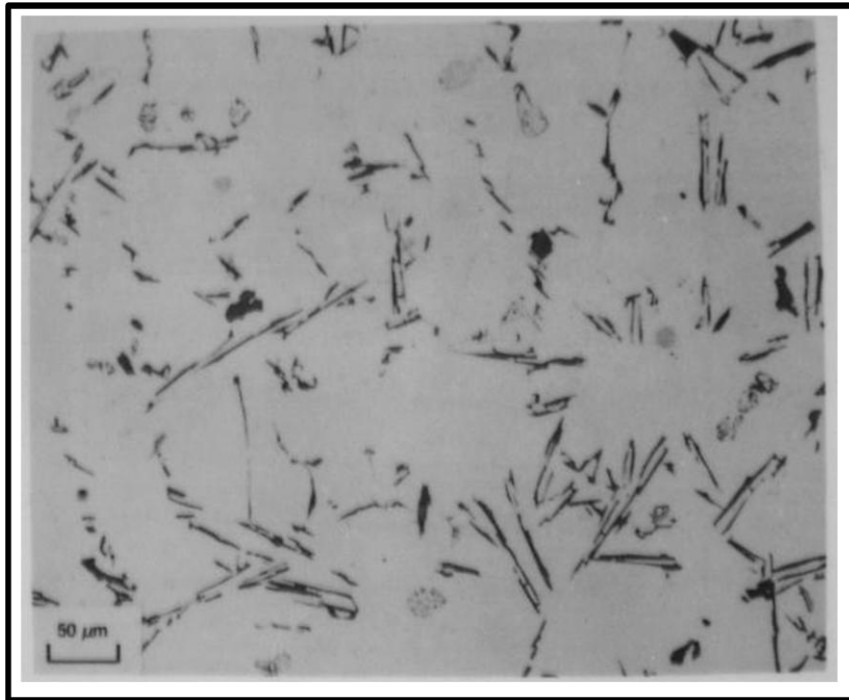


Figura 4.18. Microestructura del silicio sin modificar completamente (tipo 1), 200x.

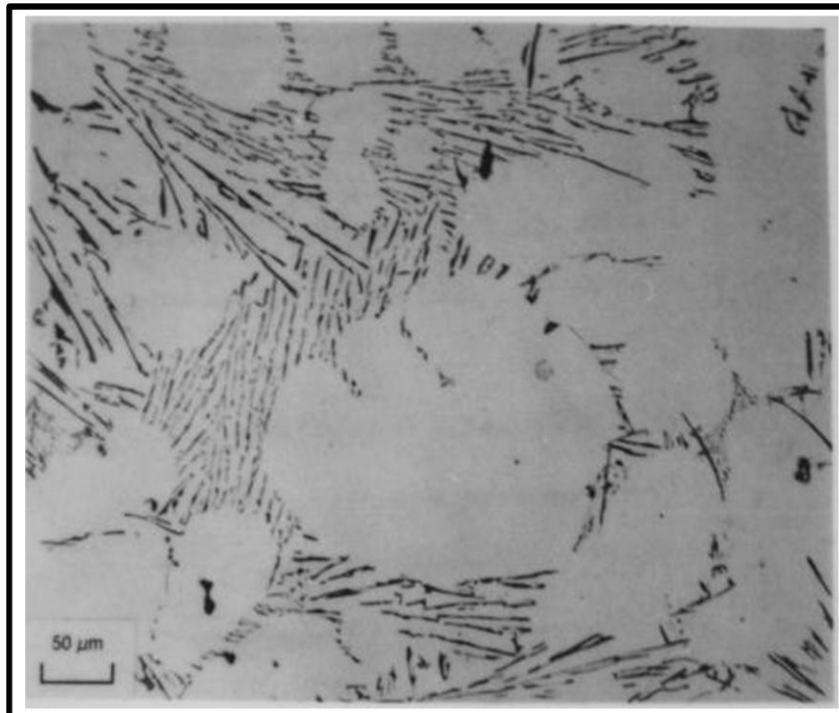


Figura 4.19. Microestructura del silicio laminar (tipo 2), 200X.

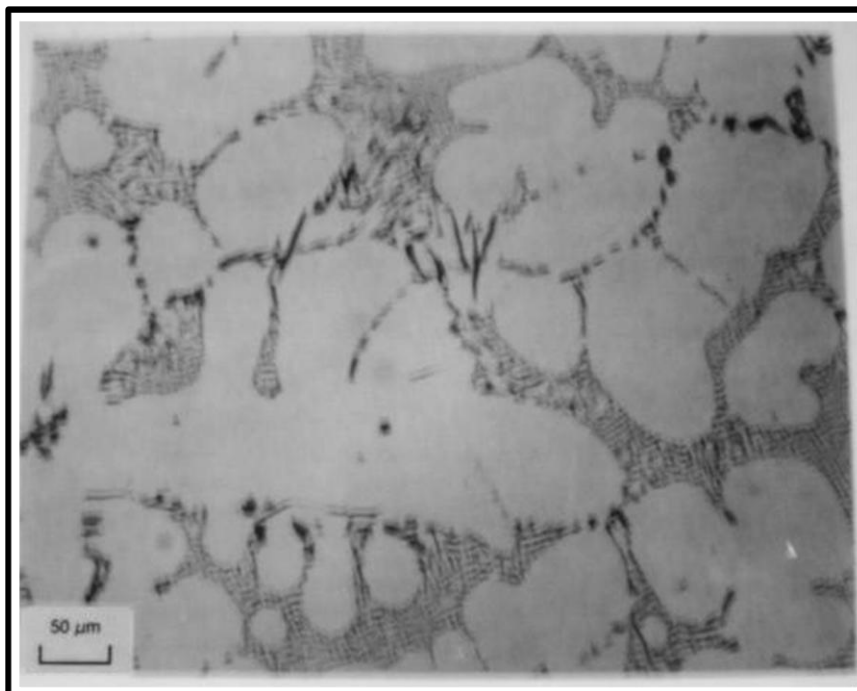


Figura 4.20. Microestructura del silicio modificada parcialmente (tipo 3), 200X.

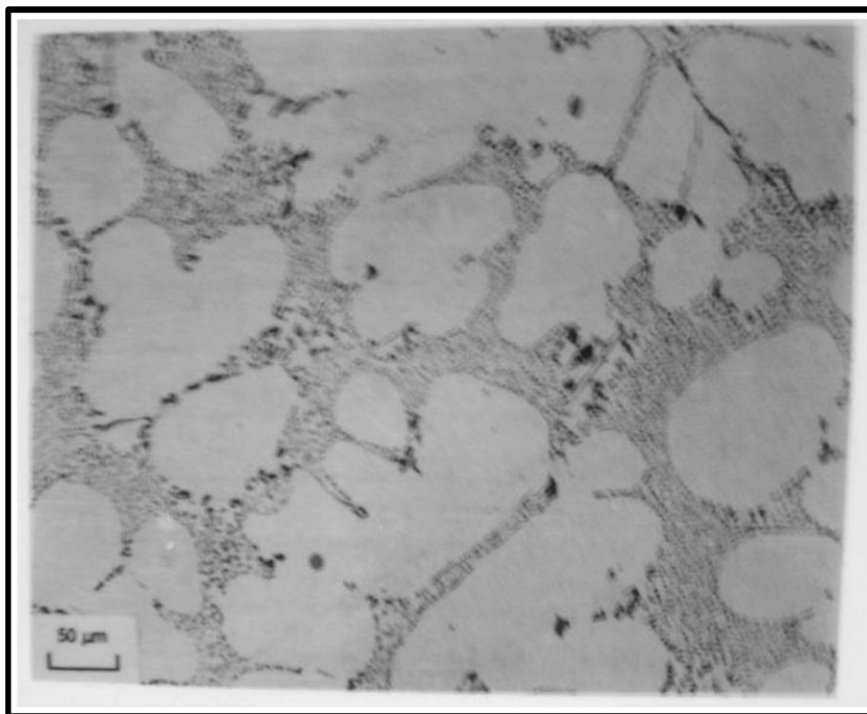


Figura 4.21. Microestructura del silicio no laminar (tipo 4), 200X.

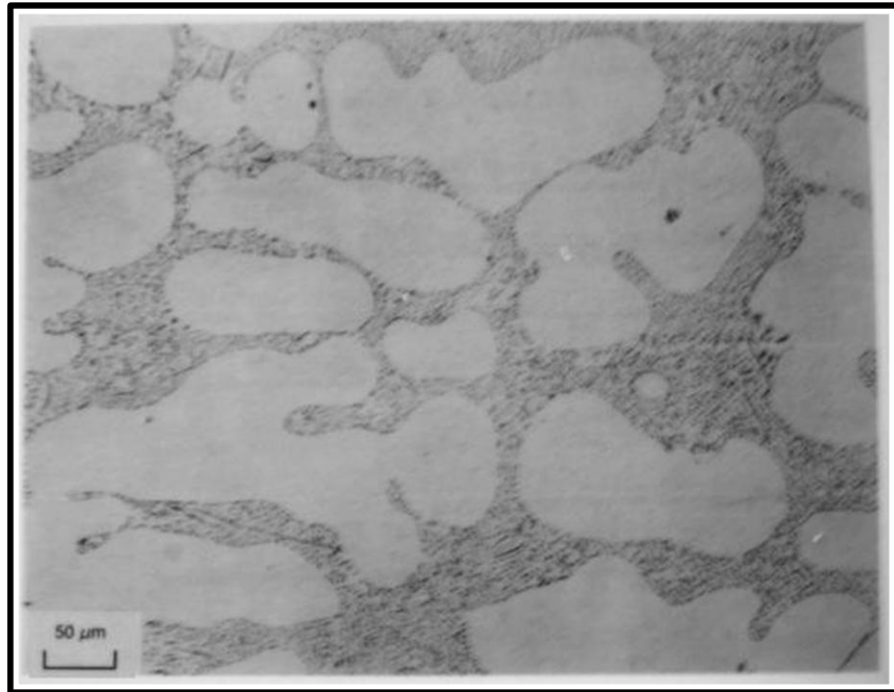


Figura 4.22. Microestructura del silicio modificada (tipo 5), 200X.

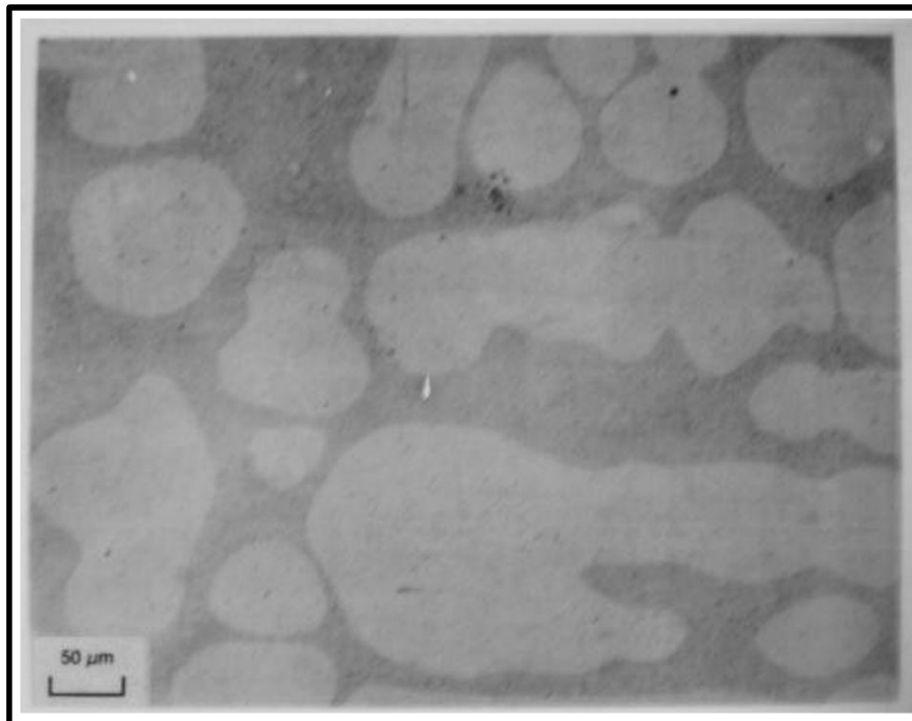


Figura 4.23. Microestructura del silicio supermodificado (tipo 6). 200X.

Realizando la comparación de las microestructuras reveladas luego de agregado el estroncio con los modelos antes mencionados, partiendo de un tipo 3 (modificado parcialmente) hasta un tipo 5 (modificación total), siendo este último el recomendado, (American Foundrymen`s Society, Inc, 1990). A continuación se presenta la comparación entre la microestructura de la figura 4.17 con los modelos, aplicando el mismo método para los demás ensayos:

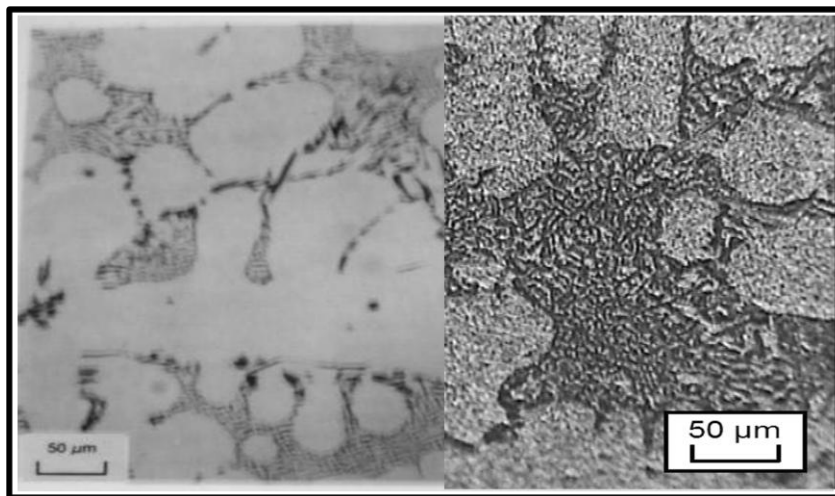


Figura 4.24. Comparación de la microestructura revelada con el silicio modificado parcialmente (tipo 3).

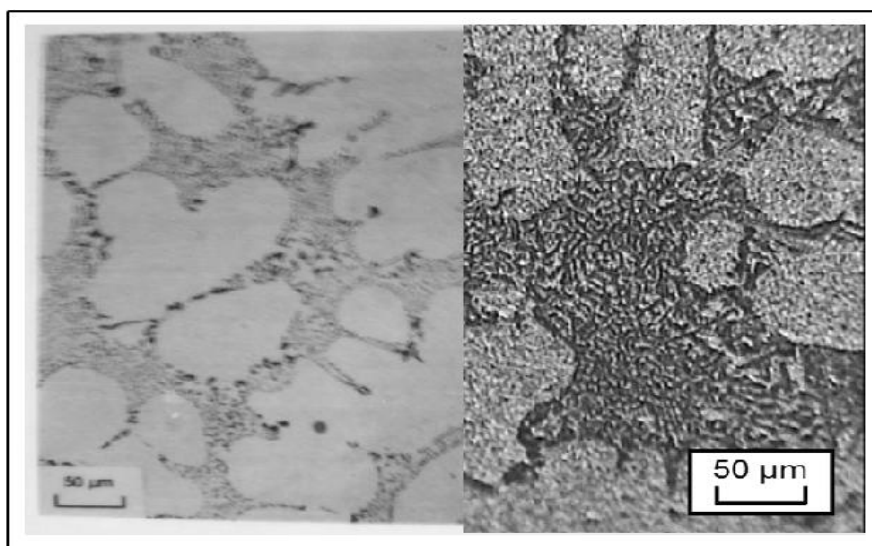


Figura 4.25. Comparación de la microestructura revelada con el silicio no laminar (tipo 4).

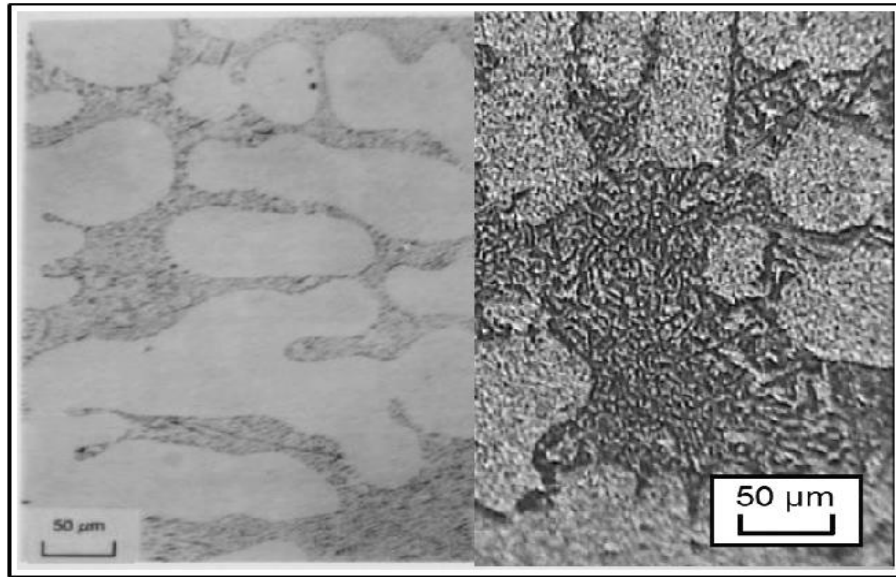


Figura 4.26. Comparación de la microestructura revelada con el silicio modificado (tipo 5).

Los factores que pueden alterar la modificación del silicio en la aleación de aluminio líquido fueron controlados, cuidando que se llevaran a cabo correctamente cada procedimiento; de igual manera, descartando la posibilidad de que los rastros de silicio laminar fueran ocasionados por el incumplimiento del tiempo de reacción (20 minutos).

Luego de realizar la comparación de todos los ensayos, la microestructura revelada contiene silicio modificado parcialmente (tipo 3) y el silicio no laminar (tipo 4), encontrándose por debajo de lo recomendado.

4.4 Composición química

Es importante la realización de dicho estudio para obtener los valores experimentales de los elementos presentes en la aleación, y determinar que estos se encuentren dentro de las especificaciones establecidas por la empresa (ver figura A.1).

4.4.1 Prueba de composición química

Dichas probetas fueron tomadas del proceso, en diferentes tiempos, los cuales se consideraron críticos, se tomaron 6 probetas en los hornos de retención, los cuales se encontraban con la aleación disponible para la colada.

Las probetas utilizadas en dichos ensayos fueron las mismas empleadas para los ensayos de tamaño de grano y microestructura.

De los ensayos realizados se obtuvieron los porcentajes presentes en la aleación de cada elemento que lo compone, siendo estos los siguientes:

Tabla 4.16. Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (29/07/09).

Aleante	En horno de retención antes de usar (%)	Especificado por la empresa (%)
Si	8,520	8,500 – 10,500
Fe	0,441	0,000 – 0,550
Cu	2,050	2,000 – 4,000
Mn	0,076	0,000 – 0,300
Mg	0,670	0,500 – 1,500
Ni	0,023	0,000 – 0,500
Zn	0,167	0,000 – 1,000
Ti	0,087	0,000 – 0,250
Ca	0,001	0,000 – 0,002
Otros	0,0658	0,000 – 0,450

Tabla 4.17. Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (30/07/09)

Aleante	En horno de retención antes de usar (%)	Especificado por la empresa (%)
Si	8,650	8,500 – 10,500
Fe	0,491	0,000 – 0,550
Cu	2,010	2,000 – 4,000
Mn	0,089	0,000 – 0,300
Mg	0,670	0,500 – 1,500
Ni	0,025	0,000 – 0,500
Zn	0,216	0,000 – 1,000
Ti	0,082	0,000 – 0,250
Ca	0,001	0,000 – 0,002
Otros	0,074	0,000 – 0,450

Tabla 4.18. Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (31/07/09)

Aleante	En horno de retención antes de usar (%)	Especificado por la empresa (%)
Si	8,620	8,500 – 10,500
Fe	0,441	0,000 – 0,550
Cu	2,050	2,000 – 4,000
Mn	0,076	0,000 – 0,300
Mg	0,670	0,500 – 1,500
Ni	0,023	0,000 – 0,500
Zn	0,177	0,000 – 1,000
Ti	0,087	0,000 – 0,250
Ca	0,001	0,000 – 0,002
Otros	0,066	0,000 – 0,450

Tabla 4.19. Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (04/08/09)

Aleante	En horno de retención antes de usar (%)	Especificado por la empresa (%)
Si	8,580	8,500 – 10,500
Fe	0,453	0,000 – 0,550
Cu	2,060	2,000 – 4,000
Mn	0,088	0,000 – 0,300
Mg	0,700	0,500 – 1,500
Ni	0,027	0,000 – 0,500
Zn	0,196	0,000 – 1,000
Ti	0,080	0,000 – 0,250
Ca	0,0010	0,0000 – 0,0020
Otros	0,077	0,000 – 0,450

Tabla 4.20. Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (05/08/09)

Aleante	En horno de retención antes de usar (%)	Especificado por la empresa (%)
Si	8,510	8,500 – 10,500
Fe	0,491	0,000 – 0,550
Cu	2,090	2,000 – 4,000
Mn	0,089	0,000 – 0,300
Mg	0,720	0,500 – 1,500
Ni	0,027	0,000 – 0,500
Zn	0,213	0,000 – 1,000
Ti	0,081	0,000 – 0,250
Ca	0,0010	0,0000 – 0,0020
Otros	0,077	0,000 – 0,450

Tabla 4.21. Porcentaje de los diferentes elementos presentes en la aleación (10/08/09)

Aleante	En horno de retención antes de usar (%)	Especificado por la empresa (%)
Si	8,680	8,500 – 10,500
Fe	0,520	0,000 – 0,550
Cu	2,020	2,000 – 4,000
Mn	0,094	0,000 – 0,300
Mg	0,700	0,500 – 1,500
Ni	0,027	0,000 – 0,500
Zn	0,233	0,000 – 1,000
Ti	0,081	0,000 – 0,250
Ca	0,0008	0,0000 – 0,0020
Otros	0,077	0,000 – 0,450

Realizando una comparación de los valores obtenidos en cada ensayo con los especificados por la empresa, de las tablas 4.16 a la 4.21, se observa que estos se encuentran dentro de los límites correspondientes, según Manufacturas de aluminio I, C.A, (2008). Por esta razón la materia prima recibida en la empresa cumple igualmente con los requerimientos de aceptación.

4.5 Escoria

A pesar de lo difícil de cuantificar el nivel de escoria presente en la aleación, se determinaron causas y posibles efectos que puede ejercer sobre la aleación líquida.

Las mayores emisiones de humo son producidas cuando se añade al horno Guinea el material de retorno representando el 40 % de la carga, integrado por las mazarotas y respiraderos de los moldes, pistones

rechazados en caliente, entre otros (véase figura 4.27); caso contrario ocurre al agregar aleación F-132 pura, siendo esta un 60% de la carga.

Esto ocurre ya que dicho material de retorno viene cargado con demasiadas impurezas, como los lubricantes de las máquinas de corte, basura, virutas del mecanizado, y otros residuos.

Las mazarotas poseen una ubicación específica en el molde, con el fin de ayudar al conformado del pistón en bruto durante el proceso de colada; además de permitir que gran parte de las impurezas presentes en la aleación, incluyendo el hierro, por ser elementos de mayor densidad entre todos los aleantes, reposen en estas.



Figura 4.27. Mazarotas como material de retorno.

A continuación se presentan análisis químicos de las mazarotas y los pistones, para observar las concentraciones de hierro que estos poseen:



Figura 4.28. Porcentajes de hierro en las mazarotas y pistones.

Los porcentajes de hierro obtenidos en la figura 4.28 correspondientes a las mazarotas superan los límites de las especificaciones de la empresa; caso contrario ocurre con los pistones, por presentar porcentajes de hierro, comprendidos entre 0,00 y 0,55 %, siendo estos los especificados por la empresa (Manufactura de Aluminio I, C.A, 2008),

Debido a las grandes cantidades de desechos, tales como pistones rechazados y virutas del mecanizado, mezclada con los refrigerantes, presentes en el interior de los carros transportadores del material de retorno, se genera la salida de partículas sólidas (escoria) a los alrededores de la empresa, permaneciendo un parte de esta dentro del horno de fundición.



Figura 4.29. Carros transportadores de material de retorno.

Ahora bien, otra causa se debe a las cargas que se realizan con material de tamaños reducidos, por ende la superficie expuesta al ambiente es mayor, formando la capa de oxido protectora, contribuyendo a la generación de escoria al momento de fundir. En función de poder entender la relación que existe entre la superficie de contacto del material de carga con el medio ambiente y el volumen del mismo, se toma como referencia la forma de un cubo de 1 m^3 como la carga que se realiza al horno, calculando el volumen y la superficie de contacto.

Luego se fue seccionando para obtener los diferentes valores de superficie de contacto, y los volúmenes correspondientes, obteniendo lo siguiente:

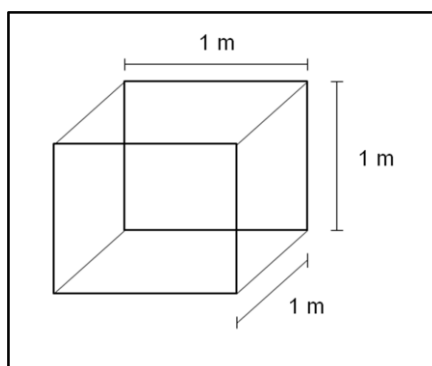


Figura 4.30. Dimensiones del cubo como materia prima.

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas:

$$Volumen = l \cdot a \cdot h \quad (4.5)$$

$$S_{contacto} = \sum l_i \cdot a_i + l_i \cdot h_i + a_i \cdot h_i \quad (4.6)$$

Siendo:

l: Longitud (m)

a: Ancho (m)

h: Altura (m)

S: Superficie de contacto (m^2)

Haciendo uso de las ecuaciones 4.5 y 4.6 para el cubo por completo, se obtiene que:

$$Volumen_{entero} = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1 \text{ m}^3$$

$$S_{contacto} = 6 \cdot (1 \cdot 1) = 6 \text{ m}^2$$

Aplicando el mismo procedimiento para el cubo seccionado en 8, 27, 64 y 125 partes iguales, con la finalidad de obtener un tamaño aproximado al correspondiente del material de retorno introducido al horno de fundición, se obtiene:

Tabla 4.22. Superficie de contacto con el ambiente.

Número de partes del cubo seccionado	Superficie (m ²)	Volumen por unidad (m ³)	Volumen total (m ³)
1	6	1,0000	1,0000
8	12	0,1250	1,0000
27	18	0,0370	1,0000
64	24	0,0156	1,0000
125	30	0,0080	1,0000

De la tabla 4.22 se obtiene el comportamiento de la superficie de contacto con respecto al volumen:

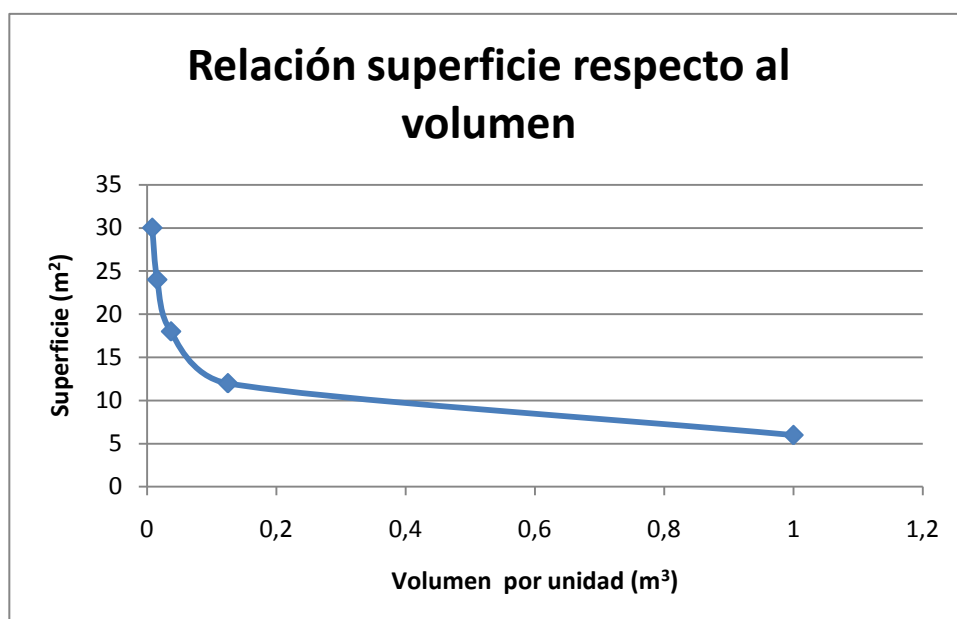
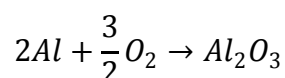


Figura 4.31. Relación superficie versus el volumen introducido en el horno de fundición.

Entonces se debe tener cuidado con la relación de superficie-volumen arrojada al horno Guinea, para evitar la excesiva oxidación, ya que al agregar materia prima, manteniendo un mismo volumen, en pequeñas dimensiones, mayor será la superficie de contacto con el aire (ver figura 4.31), generando más escoria por la formación de la capa protectora de óxido de aluminio (Al_2O_3). Haciendo uso de la ecuación (2.1) el óxido de aluminio se obtiene de la siguiente manera:



Como medidas para dicha problemática, se puede coleccionar todo el material de retorno, y mandar el mismo a una empresa encargada de tratarlo y dejarlo como una aleación F-132 pura, otra es clasificar el material de retorno e implementarle un lavado, para así disminuir el número de impurezas presentes.

A pesar de mantener dentro de los límites los porcentajes de hierro del material de carga al horno de fundición, y asegurar una relación superficie-volumen adecuada, es importante tener un control sobre la llama encargada de fundir la materia prima. Observando la figura 4.32, actualmente llama presenta un contacto directo con la carga a fundir.



Figura 4.32. Incidencia de la llama sobre la carga a fundir en el horno Guinea.

La condición adecuada para una llama larga es que no debe chocar directamente con la masa de la carga sólida y mucho menos al baño de fundición. Además la regulación de la relación aire/combustible debe asegurar una combustión no oxidante, (Quintero, 2001).

Es necesario mantener controlado el ángulo de incidencia de la llama, dirigiendo los quemadores de tal manera que no tengan contacto directo con la carga colocada en el horno Guinea, para evitar la pérdida de material, (Quintero, 2001).

4.5.1 Prueba de inclusiones

Se empleó un método por fracturas para detectar inclusiones, desarrollado por Kitaoka Sanjico en Nippon Ligth Metal Co., usando un molde permanente, conocido como molde “K”, el cual contiene cuatro incisiones que provocan remolinos para atrapar las inclusiones, mientras la aleación es

vertida dentro del molde. Una vez que las barras son fracturadas en distintas piezas, la superficie resultante de las rupturas es examinada para la búsqueda de las inclusiones, (Groteke D. y Fieber J, 1999)

Empleando la metodología adecuada para la obtención de probetas de inclusiones con el molde “K”, se tomaron 6 ensayos. A continuación se presentan dos de las muestras fracturadas:



Figura 4.33. Probetas obtenidas por el molde “K”.

Dicho método es apropiado para la detección de inclusiones de gran tamaño, y/o grandes cantidades de pequeñas inclusiones aglomeradas, (SECAT, 2002).

En las 6 probetas seccionadas, no se detectaron inclusiones de gran tamaño, y tampoco se presentaron grandes aglomeraciones de las mismas, por esta razón no se continuo con este tipo de ensayo, por ser inclusiones difíciles de cuantificar.

La escoria por ser un elemento no deseado en la aleación de aluminio y de difícil detección, es importante mantener tanto el horno de fundición y los hornos de retención en constante limpieza, para esto se implementan sales

fundentes, las cuales reducen el contenido del metal presente en la escoria, evitando así la acción adherente adquirida por esta, impidiendo de esta manera la reducción de la capacidad del horno.

Actualmente se le coloca al horno Guinea sales fundentes dos veces al día para desescoriarlo, una al inicio del primer turno y otra al inicio del segundo.

Es importante mantener la limpieza continua del horno, agregando las sales fundentes adecuadas y de esta forma garantizar una aleación con una buena calidad.

Para realizar una comparación de escoria proveniente de un horno en constante limpieza a partir de sales (horno de retención), con respecto a otro en el cual son agregadas sales dos veces al día (horno Guinea), se recolectaron muestras de escoria de ambos hornos (ver figura 4.34).

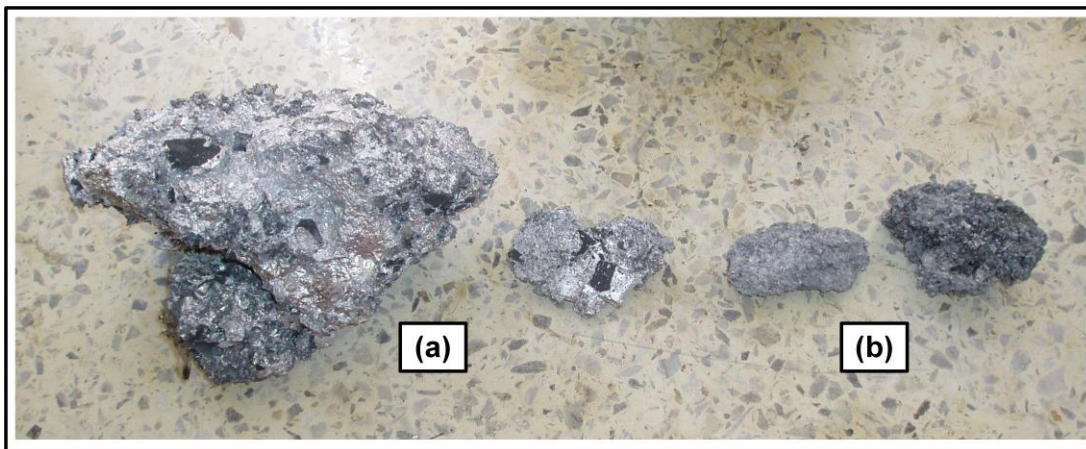


Figura 4.34. Escoria extraída del horno Guinea (a), escoria extraída del horno de retención (b).

La escoria retirada del horno Guinea, presentaba un aspecto brillante y pastoso, mientras que la escoria extraída de los hornos de retención era más opaca y polvorienta.

Para la extracción de escoria en el horno Guinea, con la finalidad de generar una escoria con bajos contenidos de metal, se deben emplear sales

fundentes destinadas para la protección, purificación y escorificado, para hornos basculantes, permitiendo la formación de una capa protectora que evita la oxidación y absorción de gases nocivos (ver figura A.3).

Mientras que para los hornos de retención, al igual que en el horno Guinea, con el objetivo de extraer una escoria polvorienta, se deben emplear sales fundentes que cumplan una función protectora, de limpieza y permitan recuperar aleación de aluminio, creando una escoria polvorienta con bajos contenidos de metal (ver figuras A.4 Y A.5)

Actualmente en la línea de inspección final se lleva a cabo un registro tanto del número de piezas que han sido rechazadas como las piezas aprobadas para su distribución en el mercado, en donde se debe señalar el motivo por el cual es rechazado el pistón (ver figuras B.1, B.2, B.3 y B.4).

Para el cálculo de porcentaje de rechazo se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{P.R}{P.P} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Siendo:

%R: Porcentaje de rechazo

P.R: Piezas rechazadas (piezas)

P.P: Piezas producidas (piezas)

Haciendo uso de la ecuación 4.7 y el reporte de producción del día 06/10/09, se obtiene:

$$\%R_{total} = \frac{294}{5133} \cdot 100 = 5,73 \%$$

$$\%R_{porosidades} = \frac{269}{5133} \cdot 100 = 5,24 \%$$

A continuación se presentan los índices de rechazos, con respecto a tres fechas diferentes de producción, utilizando el mismo procedimiento planteado anteriormente:

Tabla 4.23. Índices de rechazos durante el mes de octubre.

Día	Piezas producidas	Piezas rechazadas	Piezas rechazadas por porosidades	Porcentaje de rechazo por porosidad (%)	Porcentaje de rechazo total (%)
01/10/09	6.106	331	316	5,18	5,42
02/10/09	5.334	293	264	4,95	5,49
05/10/09	5.091	268	237	4,66	5,26
06/10/09	5.133	294	269	5,73	5,24
07/10/09	7.046	427	269	5,19	6,06
08/10/09	3.785	141	128	3,38	3,73
09/10/09	6.200	206	201	3,24	3,32
13/10/09	6.360	273	268	4,21	4,29
14/10/09	6.754	350	333	4,93	5,18
15/10/09	6.619	297	294	4,44	4,48

Observando la tabla 4.23, la mayor cantidad de rechazo es demarcado como porosidades, por ser un defecto superficial fácil de visualizar. Debido a que se realizaron ensayos de gravedad específica, donde los valores obtenidos estaban dentro de los especificados por la empresa, los mayores índices de rechazo deberían estar destinados a otros defectos, mas no a las porosidades.

Esto es debido a que se obviaron otra serie de defectos no tan superficiales y diminutos, como las inclusiones no reveladas durante el proceso de mecanizado, las cuales lograron evadir los procesos de desescoriado.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Para un tiempo de desgasificado de 8 minutos se logra obtener resultados de gravedad específica dentro de los límites establecidos en la empresa, siendo 2,64 el mínimo recomendado.
- Se demostró que el material más resistente para el eje empleado en el proceso de desgasificado es el de grafito.
- La temperatura ambiental y los porcentajes de humedad relativa, no tienen una influencia significativa en los valores de gravedad específica obtenidos.
- Las cantidades de titanio-boro y estroncio agregadas actualmente no son suficientes para obtener un refinamiento de grano y microestructura adecuada.
- La modificación de la estructura de silicio y el refinamiento del grano apropiado, van a depender de la cantidad de inoculantes agregados en el proceso de fundición y no de los porcentajes contenidos en la materia prima.

- Los niveles de escoria en las aleaciones de aluminio son difíciles de cuantificar.
- La composición química de la aleación se mantuvo dentro de los límites requeridos.
- La llama presente en el horno Guinea tiene un contacto directo con la carga a fundir, ocasionando pérdidas de material e incrementando la oxidación.

5.2 Recomendaciones

- Siendo los niveles de inclusiones difíciles de cuantificar se debe llevar un control de todos los factores que afecten la calidad de la aleación de aluminio F-132.
- Colocar un sistema de control con alarma en la máquina de desgasificado, el cual se activa al transcurrir el tiempo de desgasificado estipulado. Adicional a esto, entrenar más personal para el uso de la maquinaria.
- Por ser muy corto el tiempo de vida útil del eje de desgasificado es necesario buscar alternativas para conseguir un material más resistente y duradero.
- Realizar diariamente los ensayos de gravedad específica, los cuales nos permiten detectar durante el proceso cualquier anomalía de porosidad.
- Retomar los análisis metalográficos para observar el comportamiento del tamaño del grano y microestructura, y realizar un seguimiento del mismo para verificar que se encuentre dentro de las especificaciones. Igualmente se controla el silicio para observar si este se encuentra en su forma globular.
- El ensayo de análisis químico es necesario realizarse diariamente, para controlar que los porcentajes de los componentes del aluminio líquido se encuentren entre los valores establecidos por la empresa.
- Colocar en los hornos de retención y en el horno Guinea ayudas visuales encargadas de mostrar a los operarios la forma en cómo debe

efectuarse la colada en los moldes y el ángulo de incidencia de la llama que funde el aluminio líquido.

- Implementar un dispositivo tipo alarma en el banco de argón, el cual me indique cuando se encuentre en los niveles mínimos y así implementar el cambio de banco para evitar daños como obstrucción del eje de desgasificado.
- Es importante evitar la excesiva oxidación durante el tiempo de espera en los hornos de retención, colocando tapas en donde se disminuya el contacto con el medio ambiente, para reducir la oxidación y absorción de hidrógeno.
- Dar importancia a todos los parámetros de calidad posibles con la finalidad de reducir las cantidades de inclusiones presentes en la aleación, por ser estas un factor negativo difícil de detectar.
- Implementar el uso de sales fundentes periódicamente en el horno Guinea, para obtener los beneficios que esta conlleva, como la conservación de las paredes del horno, y la mayor extracción posible de la escoria presente, para así tener un aluminio F-132 más limpio y de mejor calidad.
- Realizar un estudio acerca de los métodos para la medición de inclusiones presentes en la aleación, con el objeto de mejorarle la calidad.

APÉNDICE A

Información adicional



MANUFACTURAS DE ALUMINIO I, C.A.

Valencia, 2008

REQUERIMIENTOS A PROVEDORES

Tema: Requerimientos para la entrega de Materia Prima

Proveedores: Todos.

El presente se emite con la finalidad de asentar los requerimientos mínimos por parte de Manufacturas de Aluminio I, C.A. para la recepción y compra de Aleación 332.1 ó F-132.

1. El peso del lingote debe estar comprendido entre 8 y 13 Kg.
2. El peso del bulto debe estar comprendido entre 350 y 480 Kg.
3. El bulto debe ser armado y flejados según Figura 1, para una manejo más rápido en la descarga y uso en planta.
4. Los bultos deben estar identificados con: el número de lote, el peso en kilogramos, numero de colada y aleación correspondiente.
5. El material debe ser desgasificado y filtrado con un filtro de 30 ppi como mínimo
6. Para el grado de limpieza se permite como maximo 12 poros o inclusiones por cm^2 .
7. Se debe hacer entrega del certificado de calidad del proveedor en cada entrega.
8. Bajo ninguna circunstancia el proveedor debe usar grafito como desmoldeante.
9. Como apariencia visual el lingote debe mostrar: aspecto limpio, libre de óxidos, libre de escorias, y no debe presentar rechupes.
10. **La composición química debe cumplir con los siguientes porcentajes:**
Si (8.5% - 10.5%), Fe (0.0 - 0.55%) - Cu (2.0% - 4.0%), Mn (0.0 - 0.3%), Mg(0.8% - 1.5%), Ni(0.0 - 0.5%), Zn(0.0 - 1.0%), Ti(0.0 - 0.25%), Ca (0.0 - 0.002%) y otros (0.0 -0.45%).
11. Los proveedores deben estar dispuestos a recibir visitas (auditorias a los sistemas de calidad).

Figura A.1. Requerimientos para la entrega de la materia prima

ASBURY FLUXMASTER

#770 General Purpose Flux

CHARACTERISTICS: ASBURY Flux #770 is a general purpose cleaning and drossing flux which is also used effectively as a cover flux. It promotes low metallic content in the dross and also helps keep furnace walls clean. It has good skimming properties for use in treating drosses. Flux #770 is designed for use in both crucible and reverberatory type furnaces when melt temperature is 1275-1350 °F.

COMPOSITION: This product is composed of blended industrial salts including simple chloride ionic salts, carbonates, and bi-metallic fluoride salts. The elemental composition of the flux is as follows:

Fluoride 7%	Chloride 50%	Potassium 16%	Sodium 19%
Oxygen 5%	Carbon 1%	Silicon 2%	

APPLICATIONS:

For use as a **charge cover flux**, spread about 1/4" evenly on the molten heel at the beginning of the heat. Charge metal through this cover until the melt is ready for the dross to be skimmed. Then apply a further quantity of flux over the dross. Stir or rabble the flux into the dross. Wait a few minutes and skim the dross from the furnace. Allow the skimmer to rest on the furnace sill, or remove it with a perforated spoon allowing a few seconds for the metal contained in the skim to flow back into the melt.

For use as a **drossing flux**, turn off the burners and observe the dross. Break any large lumps with the skimmer, rake the dross until even, then sprinkle about 1 lb. of flux/square yard of surface area depending on the oxide depth. Stir or rabble the flux into the dross as evenly as possible. If any large metal beads remain, additional flux is required. Add the flux, close the furnace door, turn on the burners for several minutes, and again observe for metal beads. The combination of additional flux and firing should finish the job. Dross should appear light, powdery and free of excessive metal.

PACKAGING: Fiber drums.....125-lb. and 500-lb

Figura A.2 Características de la sal fundente empleada en la empresa



COVERFLUX 5F

Fundente en polvo para la protección, purificación y escorificado del aluminio y sus aleaciones.

RECOMENDADO PARA :

La mayoría de las aleaciones de aluminio fundidas en hornos de reverbero, rotatorios, basculantes y hornos eléctricos de resistencia, a excepción de aquellas aleaciones que contengan alto magnesio.

QUE HACE :

La temperatura de fusión del COVERFLUX 5F es de 615 °C, permitiendo la formación de una capa protectora que evita la oxidación y la absorción de otros gases nocivos. Las partículas no metálicas se combinan con los óxidos y forman una escoria de fácil remoción.

APLICACIÓN DEL PRODUCTO :

Cómo Usarlo : Se recomienda la adición en dos etapas : la primera mitad tan pronto como la carga empiece a fundir y el resto cuando la carga total esté completamente fundida.

La capa formada debe permanecer intacta lo máximo posible, hasta que la colada esté lista para la desgasificación y refinación.

Cantidad a Usar : Se recomienda usar la cantidad suficiente para formar una capa protectora, usualmente de 0.5 a 1.0 kg. para 100 kilos de metal fundido.

VENTAJAS :

Provee una excelente protección y fácil remoción de óxidos y otras inclusiones no metálicas.

La escoria formada es baja en contenido metálico y puede ser fácilmente removida.

El uso regular de un fundente mantiene limpio el horno y evita la acumulación de escoria en las paredes, manteniendo su capacidad y consiguiendo mejores tiempos de colada.

Figura A.3 Sal fundente Coverflux 5F



**INSUMOS
METALURGICOS LTDA.**

COVERFLUX EXTRA

Fundente para todas las aleaciones de aluminio

Descripción General:

Fundente de cobertura de alta eficiencia para la protección, limpieza y recuperación del aluminio y sus ligas.

Función:

Se emplea como fundente y escorificador en la fusión de aleaciones base aluminio llevada a cabo en hornos de reverbero o a crisol, creando una escoria seca y pulvurenta con bajos contenidos de metal.

Aplicación:

La cantidad a emplear es del 0.5 – 1%, dependiendo principalmente de las características de la escoria, tamaño del horno y temperatura del metal.

Propiedades:

Característica	Especificación
Apariencia	Granulado
Color	Rosado
Humedad	0.5% Max.
Densidad (g/cc)	1.3 ± 0.1

Presentación:

El COVERFLUX EXTRA viene empacado en bolsas plásticas dentro de saco de polipropileno con 50 kilos.

Almacenaje:

Almacenar bajo techo sobre tarima y mantener la bolsa bien cerrada. Evitar la humedad para prevenir la posible degradación y apelmazamiento del producto

Vida Útil:

Un año máximo siguiendo estrictamente las condiciones de almacenaje recomendadas.

Precauciones de uso:

Evitar su aspiración y el contacto con la piel y ojos. Usar mascarilla, guantes y lentes de seguridad.

Figura A.4. Sal fundente Coverflux EXTRA



**INSUMOS
METALURGICOS LTDA.**

COVERFLUX STD.

Fundente aleaciones base aluminio

Descripción General:

Fundente de cobertura económico para la protección, limpieza y recuperación del aluminio y sus ligas.

Función:

Se emplea como fundente y escorificador en la fusión de aleaciones base aluminio llevada a cabo en hornos de reverbero o a crisol, creando una escoria seca y pulvurenta con bajos contenidos de metal.

Aplicación:

La cantidad a emplear es del 0.5 – 1%, dependiendo principalmente de las características de la escoria, tamaño del horno y temperatura del metal.

Propiedades:

Característica	Especificación
Apariencia	Granulado
Color	Rosado
Humedad	0.5% Max.
Densidad (g/cc)	1.3 ± 0.1

Presentación:

El COVERFLUX STD. viene empacado en bolsas plásticas dentro de saco de polipropileno con 50 kilos.

Almacenaje:

Almacenar bajo techo sobre tarima y mantener la bolsa bien cerrada. Evitar la humedad para prevenir la posible degradación y apelmazamiento del producto

Vida Útil:

Un año máximo siguiendo estrictamente las condiciones de almacenaje recomendadas.

Precauciones de uso:

Evitar su aspiración y el contacto con la piel y ojos. Usar mascarilla, guantes y lentes de seguridad.

Figura A.5. Sal fundente Coverflux Std.

Evaluación del número de granos en función de diversos parámetros

Valor de los índices de tamaño de grano G	Número de granos por milímetro cuadrado m			Diámetro medio de grano $\bar{d}$ mm	Área media de grano $\bar{a}$ mm ²	Segmento intersectado medio l mm	Número medio de intersecciones sobre la línea de medida, por milímetro
	Valor nominal	Valores límite de (exclusive)	a (inclusive)				
-7	0,062 5	0,046	0,092	4	16	3,577	0,279
-6	0,125	0,092	0,185	2,828	8	2,529	0,395
-5	0,25	0,185	0,37	2	4	1,788	0,559
-4	0,50	0,37	0,75	1,414	2	1,265	0,790
-3	1	0,75	1,5	1	1	0,894	1,118
-2	2	1,5	3	0,707	0,5	0,632	1,582
-1 (00)	4	3	6	0,500	0,25	0,447	2,237
0	8	6	12	0,354	0,125	0,320	3,125
1	16	12	24	0,250	0,062 5	0,226	4,42
2	32	24	48	0,177	0,031 2	0,160	6,25
3	64	48	96	0,125	0,015 6	0,113	8,84
4	128	96	192	0,088 4	0,007 81	0,080	12,5
5	256	192	384	0,062 5	0,003 90	0,056 6	17,7
6	512	384	768	0,044 2	0,001 95	0,040 0	25,0
7	1 024	768	1 536	0,031 2	0,000 98	0,028 3	35,4
8	2 048	1 536	3 072	0,022 1	0,000 49	0,020 0	50,0
9	4 096	3 072	6 144	0,015 6	0,000 244	0,014 1	70,7
10	8 192	6 144	12 288	0,011 0	0,000 122	0,010 0	100
11	16 384	12 288	24 576	0,007 8	0,000 061	0,007 07	141
12	32 768	24 576	49 152	0,005 5	0,000 030	0,005 00	200
13	65 536	49 152	98 304	0,003 9	0,000 015	0,003 54	283
14	131 072	98 304	196 608	0,002 8	0,000 007 5	0,002 50	400
15	262 144	196 608	393 216	0,002 0	0,000 003 7	0,001 70	588
16	524 288	393 216	786 432	0,001 4	0,000 001 9	0,001 20	833
17	1 048 576	786 432	1 572 864	0,001 0	0,000 000 95	0,000 87	1 149

Figura A.6. Evaluación del número de grano en función de diverso parámetros (Norma ISO 643:2003).

APÉNDICE B

Análisis de rechazo de pistones



REPORTE DE PRODUCCION SELECCION Y ENSAMBLE

TURNO:

1	2	3
---	---	---

 Operador: afivel/valerio/vargas/rosc/raul/pi

FECHA: 06/10/09

[illegible]

OBSERVACIONES:

5/7/20

LEYENDA DE DEFECTOS:

- [illegible]

Figura B.1. Reporte de producción, índices de rechazo (06/10/09)



MANUFACTURAS DE ALUMINIO I, C.A.

REPORTE DE PRODUCCION
SELECCION Y ENSAMBLE

FECHA: 07/10/09 TURNO: 1 2 3 Operador: Alvarado/Barrios/Raul/508/fin

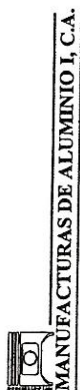
N° de Parte	Sobre Medida	Total piezas Sobranes	Total piezas Rechazo	Piezas Brutas (tarjeta)	Tipo de Material		TIPOS DE DEFECTOS / CANTIDAD RECHAZADA																					
					Pul.	Est.	1A	1B	1C	1D	1E	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2108	060	03	05	088	X	X	3																					
2109	060		08	168	X	X	3																					
3094	51D		33	294	X	X	3																					
1715	51D		24	360	X	X	10																					
2039	030		44	818			36																					
1715	51D		60	240			6																					
2108	060		20	288			6																					
1917	040		28	403			6																					
3032	050		28	876			6																					
1715	060		24	160			30																					
3033	075		22	202			23																					
1715	040		24	276			23																					
1850	030		03	112																								
1715	060		19	171	X	X	16																					
1715	040		10	160	X	X	10																					
2039	040		10	480	X	X	4																					
1715	030		24	290			30																					
1850	030		08	228			22																					
1917	030		08	340			29																					
1850	030		23	080	X	X	29																					
1715	030		23	080	X	X	22																					
2039	040	03	24	241	X	X	22																					
TOTAL				388																								

OBSERVACIONES:

LEYENDA DE DEFECTOS:

- | | | | | | |
|------------------------|------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 1A Poros en Falda Ext. | 2 Arañas | 3 Grietas Moldeo | 7 Inclusiones | 12 S/Brochar | 17 Golpes |
| 1B Poros en Falda Int. | 4 Huecos | 8 Pliegues | 8 Oxidos y Manchas | 13 S/Barrenar | 18 Oxidos y Manchas |
| 1C Poros en Cresta | 5 Burbujas | 9 Otros Moldeo | 14 Grietas Mecaniz | 15 Diam.H/P Peq.-Grande | 19 Pzas. Sobrantes. |
| 1D Poros en Cabeza | 6 Rebaba | 10 Sombra de Diamante | 15 Otros Mecanizado | | |
| 1E Poros en Ranura | | 11 Desplazamiento | | | |

Figura B.2. Reporte de producción, índices de rechazo (07/10/09)



REPORTE DE PRODUCCION
SELECCION Y ENSAMBLE

FECHA: 08/10/09 TURNO: 1 2 3 Operator: Arteve/Varela/Vargas/Raul/José

N° de Parte	Sobre Medida	Total piezas Sobranes	Total piezas Rechazo	Piezas Brutas (tarjeta)	Tipo de Material		TIPOS DE DEFECTOS / CANTIDAD RECHAZADA																					
					Pul.	Est.	1A	1B	1C	1D	1E	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1850	040		09	161	-	X																						
2039	040		11	401		X																						
1715	311		28	148		X																						
1817	311		06	250		X																						
1850	060		06	102		X																						
2039	311		04	322		X																						
1917	311		00	320		X																						
2039	311		02	240		X																						
1650	211		06	192		X																						
2007	020		11	293		X																						
2108	020		24	400		X																						
2007	040		18	330		X																						
2108	040		10	160		X																						
1650	311		10	208		X																						
2039	311		—	258		X																						
TOTAL							141	3785																				

OBSERVACIONES:

378

LEYENDA DE DEFECTOS:

- | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| 1A Poros en Falda Ext. | 2 Arañas | 7 Inclusiones | 12 S/Brochar | 17 Golpes |
| 1B Poros en Falda Int. | 3 Grietas Moldeo | 8 Pliegues | 13 S/Barrenar | 18 Oxidos y Manchas |
| 1C Poros en Cresta | 4 Huecos | 9 Otros Moldeo | 14 Grietas Mecaniz | 19 Pzas. Sobrantes. |
| 1D Poros en Cabeza | 5 Burbujas | 10 Sombra de Diamante | 15 Diam.H/p Peq.-Grande | |
| 1E Poros en Ranura | 6 Rebaba | 11 Desplazamiento | 16 Otros Mecanizado | |

Figura B.3. Reporte de producción, índices de rechazo (08/10/09)

APÉNDICE C

Tamaño de grano revelado

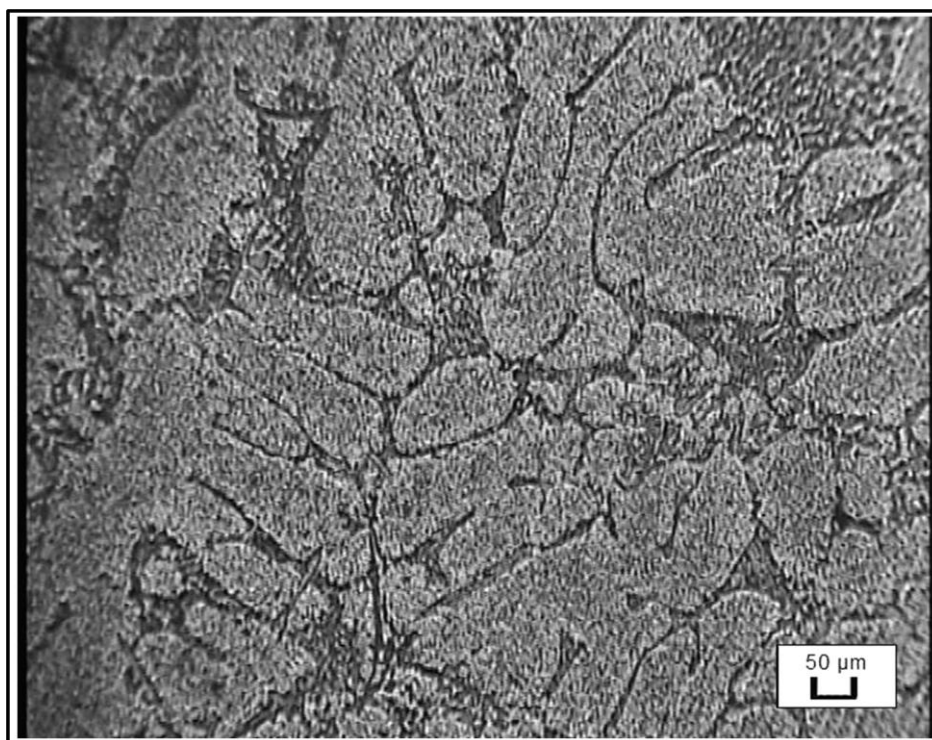


Figura C.1. Grano revelado antes de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el segundo ensayo.

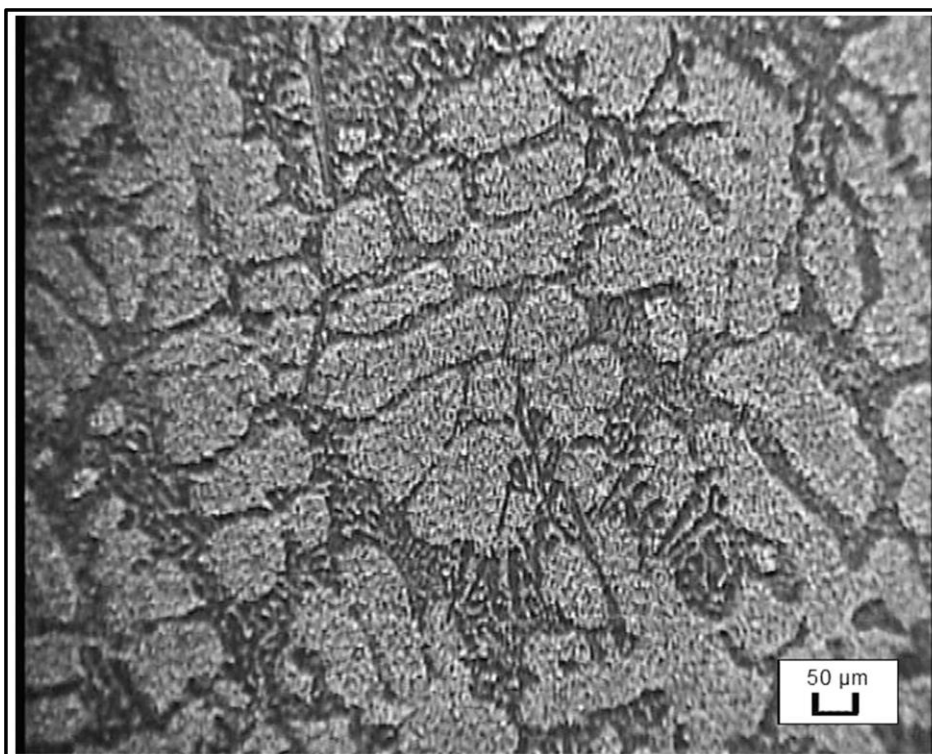


Figura C.2. Grano revelado luego de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el segundo ensayo.

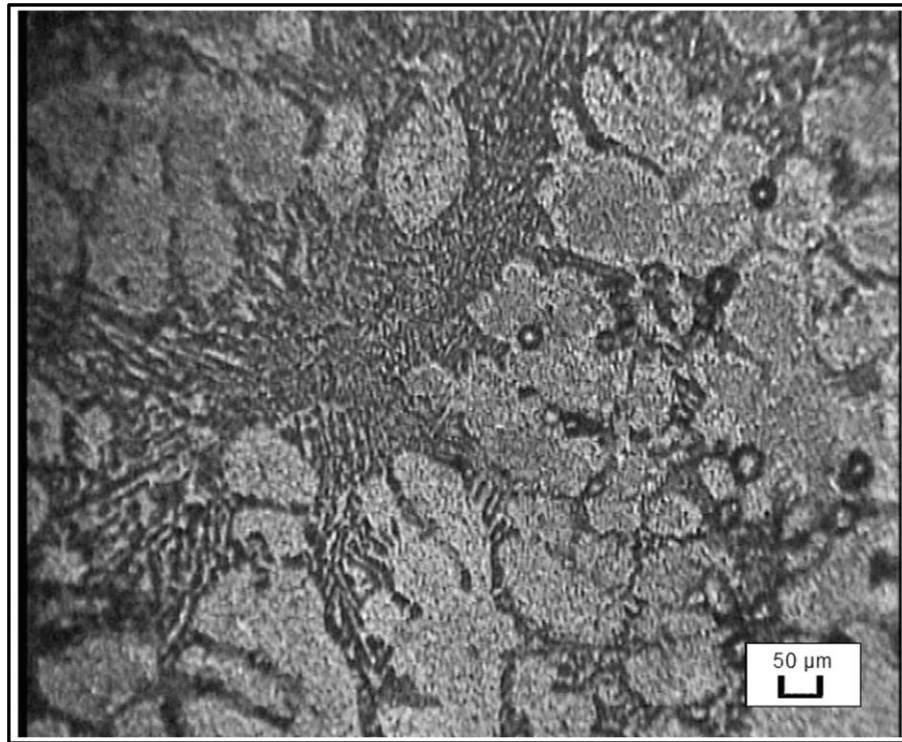


Figura C.3. Grano revelado antes de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el tercer ensayo.

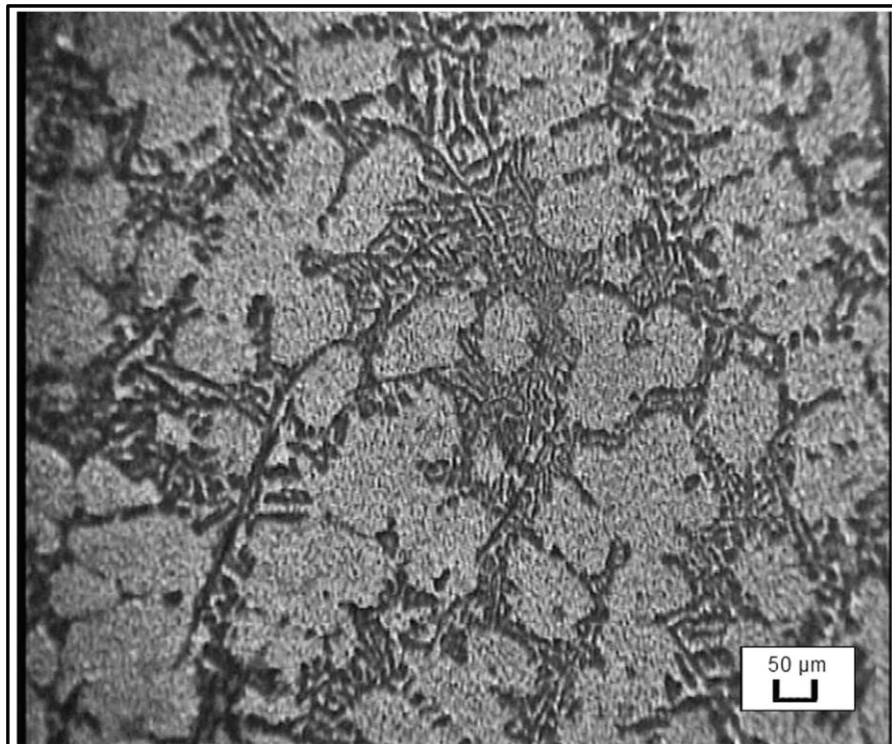


Figura C.4. Grano revelado luego de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el tercer ensayo.

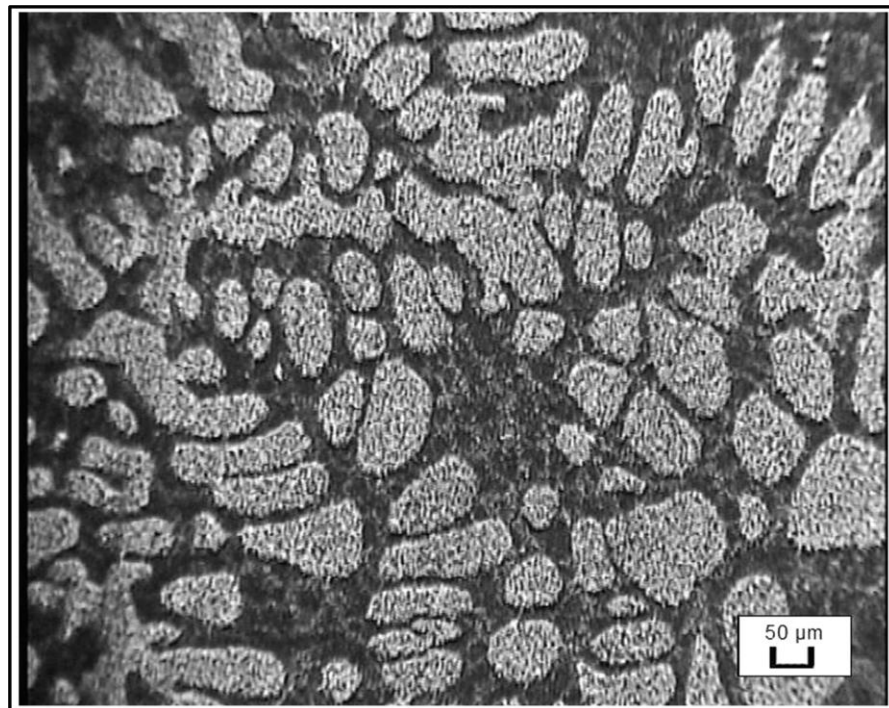


Figura C.5. Grano revelado antes de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el cuarto ensayo.

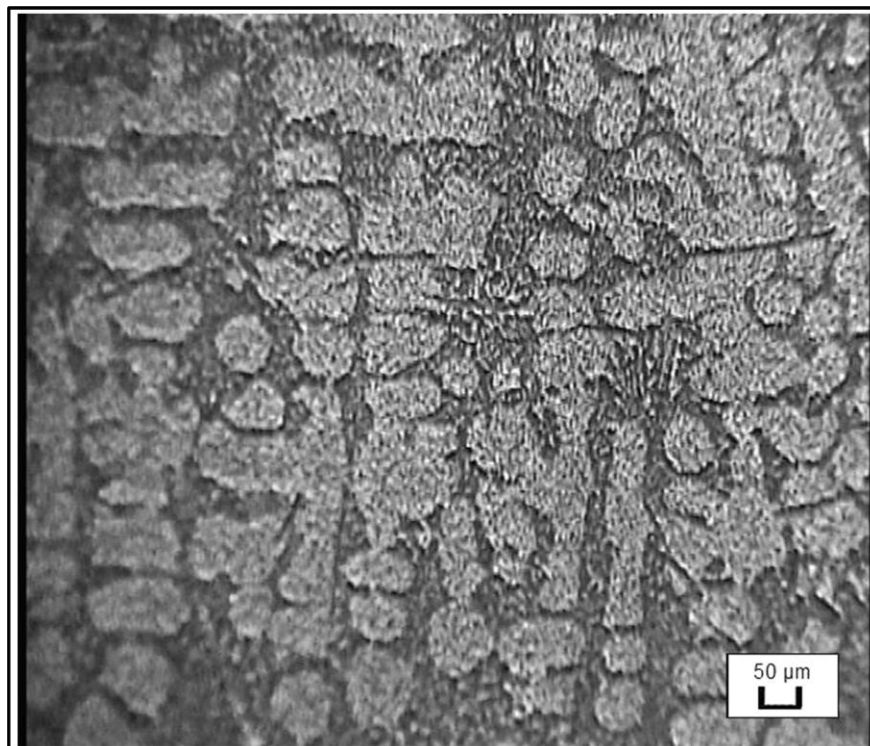


Figura C.6. Grano revelado luego de agregado el titanio-boro con aumento de 100X, para el cuarto ensayo.

APÉNDICE D

Microestructura revelada

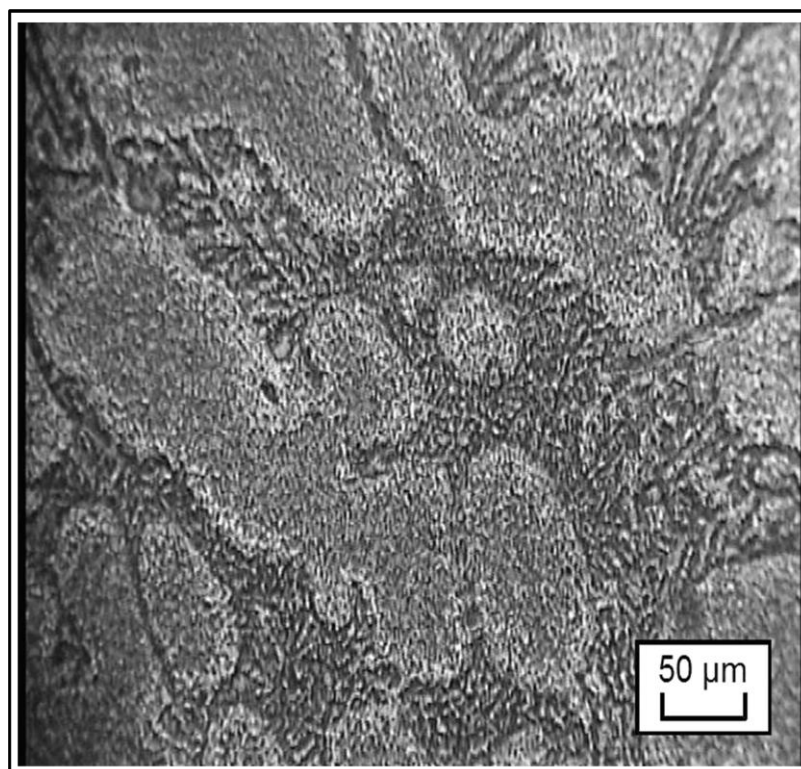


Figura D.1. Microestructura revelada antes de la adición de estroncio en el segundo ensayo (200x).

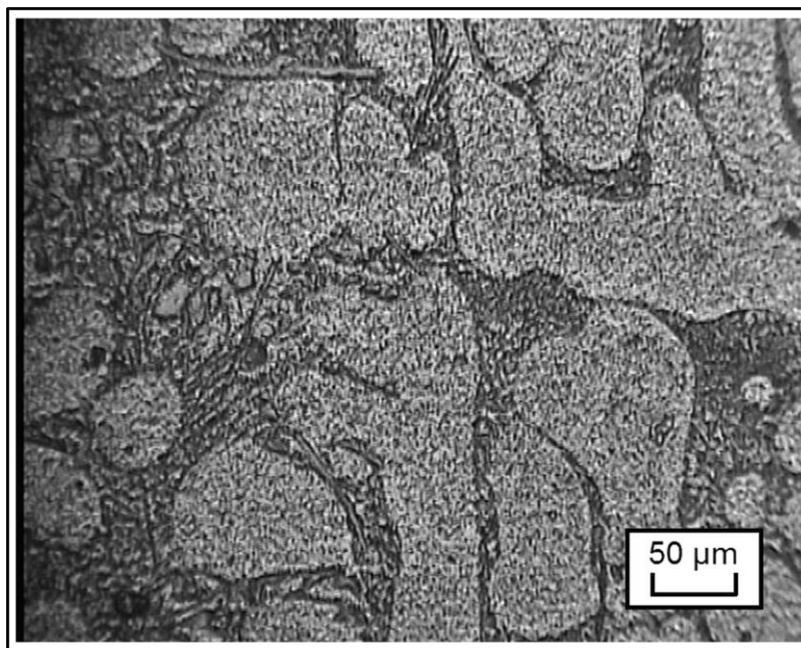


Figura D.2. Microestructura revelada después de la adición de estroncio en el segundo ensayo (200x).

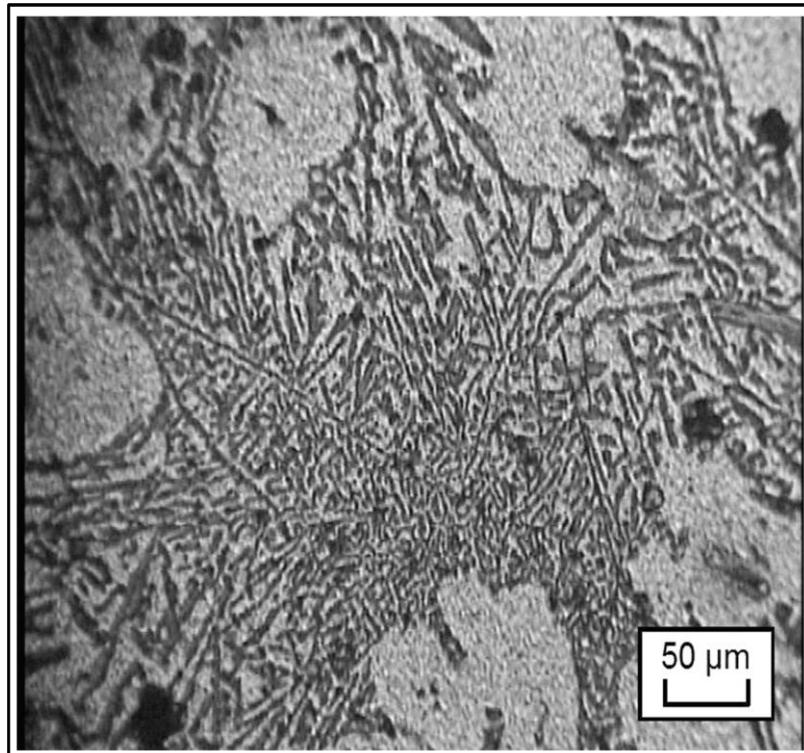


Figura D.3. Microestructura revelada antes de la adición de estroncio en el tercer ensayo (200x).

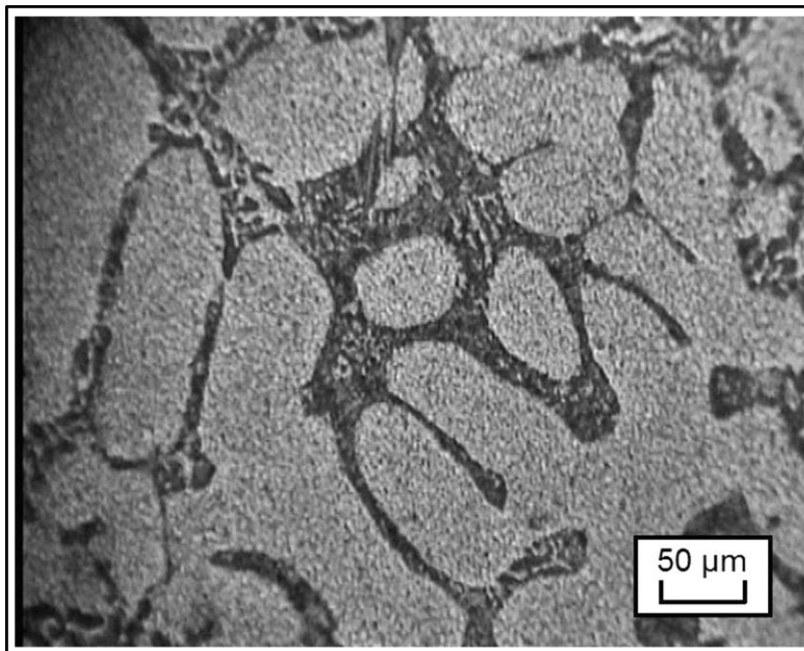


Figura D.2. Microestructura revelada después de la adición de estroncio en el tercer ensayo (200x).

Referencias Bibliográficas

1. Adrian M, (1992). *Guía teórica práctica sobre inoculantes de aleación de Al-Si*. Venezuela.
2. American Foundrymen`s Society, Inc. Thermal Analysis Committee, (1990). *Microestructure Control in Hypoeutectic Aluminum-Silicon Alloys*. U.S.A
3. Berg, S.L, (2008). *El periódico de Berg*, <http://bergsl.com/periodicos/berg5.pdf>. Barcelona, España.
4. Debandi C., (1998). *El aluminio y sus aleaciones, fusión y tratamiento del metal líquido. Curso básico y aplicado, destinado a profesionales y técnicos de la industria del aluminio*. Venezuela.
5. DeYoung D., McGinnis W., Richter R., Wiesner J., (2002). *Aluminum Alloys having improved cast surface quality*. Alcoa Inc. Pittsburg, U.S.A.

6. Díaz G., López J., (1994). *Fabricación de aleación de aluminio F-332, requerida para la elaboración de pistones partiendo del reciclaje de la viruta de aluminio*. Universidad Tecnológica del Centro, Guacara, Venezuela.
7. Groteke D. y Fieber J, (1999). *A melt performance comparison: Stack melter vs. reverbaratory furnace*. Wisconsin, U.S.A.
8. Grupo INFRA, (2008). *Desgasificado de aluminio*, http://www.infra.com.mx/sectores/sectores/metallurgica/desgasificado_aluminio.html, [consultado mayo 21 de 2009]. México D.F., México.
9. Gruzleski J. y Closset B, (1990). *The treatment of liquid Aluminum-Silicon Alloys*, The American Foundrymen's Society, Inc. Illinois, U.S.A.
10. Jiangxi Jintai Special Material Co, (2007). *Alumina Ceramic Foam Filter*, catálogo www.ceramic-honeycombs.com. China.
11. Jiménez B. L., (1992). *Sistemas para el manejo de materiales de chatarra compactada de aluminio para la fundición en un horno de inducción en la empresa ALCASA División Guacara*. Universidad Tecnológica del Centro, Guacara, Venezuela.
12. Juran J, y otros (2005). *Manual de control de calidad* (segunda edición). Barcelona, España: Editorial Reverté, C.A.
13. KB Alloys LLC, (2008). *Aluminum Grain Refiners*. Pennsylvania, U.S.A.
14. Kolek P., DeYoung D., Roha D., Stewart P., Easley M., Ramos J., (2007). *Control of oxide growth on molten aluminum during casting using a high moisture atmosphere*, Alcoa Inc. Pittsburg, US.
15. Manufacturas de aluminio I, C.A, (2008). *Requerimientos para la entrega de materia prima*. Valencia, Venezuela.

16. Matweb Material Property Data, (2006). *Aluminum 332.0-T5, permanent mold cast*, <http://www.matweb.com/search>. Virginia, U.S.A.
17. Méndez L., Delvasto P., Quintero S., (2007). *Diseño y fabricación de moldes para solidificación direccional en aleaciones de Aluminio*. Universidad Simón Bolívar, Caracas–Venezuela.
18. Noguera S., Barabaschi C., (1992). *Diseño de un sistema para extracción de escoria y mezcla de aleantes en hornos de fusión de Aluminio*. Universidad Tecnológica del Centro, Guacara, Venezuela.
19. Norma ANSI H35.1, (2004). *American National Standard Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum*. U.S.A.
20. Norma Covenin 2351-86, (1986). *Aluminio y sus aleaciones, lingotes para la fabricación de piezas fundidas*. Venezuela.
21. Norma DANA (1990). *Preparación y análisis metalográficos de probetas*. Corporación DANA. Venezuela.
22. Norma DANA, (1990). *Tratamiento metalúrgico de las aleaciones de aluminio*. Corporación DANA. Venezuela.
23. PC Pistones (2009). *Catálogo de aplicaciones de PC pistones*. Valencia, Venezuela.
24. Quintero O., (2001). *Aleaciones de aluminio*. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.
25. SECAT, (2002). *Measuring Inclusions in Aluminum Melts*. Lexington, U.S.A.
26. Shedden C, (2008). *El efecto de las aleaciones Ti-B como retardadores de grano en las aleaciones de aluminio*. Georgia, U.S.A.