

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DETERMINACION DE LA METODOLOGIA PARA LA
OBTENCION DE ALEACIONES DE ALUMINIO DE FUNDICION
MAQUINABLES SIN POROSIDADES”.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

ALDO RENATO GARRIDO MENESES
renatoepn@yahoo.es

VÍCTOR HUGO SÁNCHEZ TACO
Victorh_sanchez@hotmail.com

DIRECTOR: ING. FAUSTO OVIEDO
Fauto.oviedo@yahoo.com
Quito, Julio 2011

DECLARACIÓN

Nosotros, Aldo Renato Garrido Meneses y Víctor Hugo Sánchez Taco, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

.....

RENATO GARRIDO

.....

VÍCTOR SÁNCHEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Aldo Renato Garrido Meneses y Víctor Hugo Sánchez Taco.

.....
ING. FAUSTO OVIEDO
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco

A mis padres y mis hermanos por haberme apoyado durante toda mi vida Estudiantil y apoyarme en los momentos difíciles.

A mi compañeros de la universidad que mas que compañeros amigos, siempre me han apoyado en esta etapa de la vida.

A mis grandes amigos del laboratorio de fundición , son como mi otra familia en esta última etapa en la universidad.

Renato

DEDICATORIA

A mi madre Elisa que siempre me ha apoyado en los momentos mas difíciles de mi vida , ha sido un triunfo para ambos finalizar esta carrera.

A mi padre Nelson por su apoyo incondicional en todo momento.

A mis hermanos los cuales son el pilar de apoyo para todo proyecto que hemos realizado.

Renato

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que colaboraron en la presente tesis y a lo largo de mi carrera estudiantil.

Víctor.

DEDICATORIA

A mi familia

Víctor.

INDICE

CAPITULO I.....	1
ALEACIONES DE ALUMINIO.....	1
1.1 ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN.....	1
1.1.1 DESIGNACIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO ¹	1
1.1.1.1 DESIGNACION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO PARA MOLDEO	1
1.1.1.2 DESIGNACION SEGÚN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA	2
1.1.1.3 DESIGNACION PARA ALEACIÓN DE ALUMINIO TRATADAS TÉRMICAMENTE Y DESIGNACIÓN SEGÚN LA CAPACIDAD DE ENDURECIMIENTO.....	3
1.1.1.4 DESIGNACION POR ORDEN NUMÉRICO DIN 1700	4
1.1.2 ALEACIONES DE ALUMINIO-SILICIO.	6
1.1.2.1 APLICACIONES DE LA ALEACIÓN AL Si.....	7
1.1.3.1 APLICACIONES DE LA ALEACIÓN AL Cu.....	8
1.1.4 ALEACIONES DE ALUMINIO-ZINC.....	9
1.1.4.1 APLICACIONES DE LA ALEACIÓN AL Zn.....	9
1.1.5 ALEACIONES DE ALUMINIO -MAGNESIO.....	10
1.1.5.1 APLICACIONES DE LA ALEACIÓN AL Mg Si	11
1.1.6 ALEACIONES DE ALUMINIO-MANGANESO.....	11
1.2 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES MATERIALES Y EN EL PROCESO DE COLADO.....	12
1.2.1 PROCESO DE FUNDICIÓN	12
1.2.2 DESARROLLO DE LA SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO	13
1.2.3 FLUIDEZ DEL ALUMINIO	13
1.2.4 TÉCNICAS DE FUSIÓN	14
1.2.5 CONTROL DE COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	15
1.2.6 TIPOS DE HORNOS ¹	15
1.2.6.1 HORNOS DE COMBUSTIBLE.....	15
1.2.6.1.1 HORNOS DE GAS.....	16
1.2.6.1.2 HORNOS DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO	16
1.2.6.1.3 HORNO DE REVERBERO	16
1.2.6.2 HORNOS ELÉCTRICOS.....	16
1.2.6.2.1 HORNOS DE INDUCCION.....	17

1.2.7. ENERGÍA NECESARIA EN EL PROCESO DE FUSIÓN	18
1.2.8 PÉRDIDAS METÁLICAS	18
1.3 MÉTODOS DE COLADO DE ALEACIONES DE ALUMINIO.....	19
1.3.1 COLADO EN ARENA EN VERDE.....	19
1.3.2 COLADO EN COQUILLA	20
1.3.2.1 COLADO POR GRAVEDAD	20
1.3.2.2 COLADO A PRESIÓN O INYECTADA.....	20
 CAPITULO II.....	 22
2. ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DE LA POROSIDAD EN LAS PIEZAS COLADAS	 22
2.1 POROSIDAD Y TIPOS DE POROSIDAD	22
2.1.1 POROSIDAD.	22
2.1.2 TIPOS DE POROSIDAD	23
2.2 ANÁLISIS DE LA POROSIDAD CAUSADA POR EFECTOS DE LA CONTRACCION Y PARTÍCULAS NO METÁLICAS.	 24
2.2.1 POROSIDAD DE CONTRACCIÓN	24
2.2.2 CONTRACCIÓN.	26
2.2.2.1 RECHUPE INTERNO.	28
2.2.2.2 JUNTA FRIA	29
2.2.2.3 GRIETAS EN CALIENTE	29
2.2.3 INTERACCIÓN DE LA GEOMETRÍA, MATERIAL Y PROCESOS	30
2.2.3.1 COMPORTAMIENTO EN LA ALIMENTACIÓN	30
2.2.3.2 TENDENCIA A LA FORMACIÓN DE RECHUPES	30
2.2.3.2.1 MACRORECHUPE	31
2.2.3.2.2 MICRORECHUPE.....	31
2.2.3.3 INFLUENCIA DE LA COLADA.....	32
2.2.3.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA COLADA.....	32
2.2.3.4 DESARROLLO DE LA SOLIDIFICACIÓN.....	33
2.2.3.4.1 SOLIDIFICACIÓN DENDRÍTICA (DENDRITAS).....	34
2.2.3.5 FLUIDEZ.....	36
2.2.3.5.1 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA FLUIDEZ	37
2.2.3.5.2 FORMACIÓN DE ESCORIA	38
2.2.3.5.3 OXIDACIÓN DE LA COLADA	39
2.2.3.6 TECNOLOGÍA DE LA FUSIÓN.....	40
2.2.3.7 LIMPIEZA DE LA COLADA.....	40

2.2.3.7.1 TRATAMIENTO CON FUNDENTES	40
2.2.3.7.1.1 SALES DE COBERTURA	41
2.2.3.7.1.2 SALES DE LIMPIEZA	41
2.2.3.7.1.3 TRATAMIENTO CON COMPUESTOS QUE PROVOCAN DESPRENDIMIENTO DE CLORO	42
2.2.3.7.2 TRATAMIENTO CON GASES	42
2.2.3.7.3 FILTRADO DE LA COLADA	44
2.2.4 INCLUSIONES NO METÁLICAS	44
2.2.4.1 DEFECTOS METALÚRGICOS	44
2.2.4.1.1 PELÍCULAS DE OXIDO	45
2.2.4.1.2 INTERMETÁLICOS.....	45
2.2.4.2 INCLUSIONES EN EL ALUMINIO FUNDIDO	48
2.2.4.3 MÉTODO PARA ELIMINAR INCLUSIONES DE METAL FUNDIDO	50
2.2.4.3.1 FLOTACIÓN	50
2.2.4.3.2 FLOTACIÓN POR INSUFLADO CON GAS INERTE	53
2.3 ANÁLISIS DE LA POROSIDAD CAUSADA POR LA PRESENCIA DE GAS.....	55
2.3.1 SOPLADURA.....	55
2.3.2 PICADURAS	56
2.3.2 POROSIDAD CAUSADA POR LA PRESENCIA DEL HIDROGENO.....	56
2.3.2.1 SOLUBILIDAD DEL HIDROGENO EN EL ALUMINIO	57
2.3.2.2 REMOCIÓN DE HIDROGENO DISUELTO EN ALUMINIO FUNDIDO	60
2.3.2.2.1 LA FUENTE DE HIDROGENO DISUELTO EN ALUMINIO FUNDIDO	60
2.3.2.3 EL PRINCIPIO DE REMOVER HIDROGENO DESDE ALUMINIO FUNDIDO	64
2.3.2.4 PROCESAMIENTO DEL METAL FUNDIDO PARA ELIMINAR HIDROGENO	65
2.3.2.5 DESGASIFICADO.....	67
2.3.2.5.1 MÉTODO CONVENCIONAL.....	69
2.3.2.5.2 TAMAÑO DE LA BURBUJA.....	70
2.3.2.6 MÉTODO EMPLEADO	71
2.4 ESTRUCTURA DE GRANO	71
2.4.1 REFINAMIENTO DE GRANO	73
2.4.2 MICROSEGREGACIÓN	75
2.4.3 HOMOGENIZACIÓN.....	75

CAPITULO III.....	78
3 OBTENCION DE LA ALEACION	78
3.1 CLASIFICACION DE LA CHATARRA DE ALUMINIO.....	78
3.1.2 DEMANDA DE LA INDUSTRIA PARA EL ALUMINIO.....	79
3.1.3 CONDICIONES FÍSICAS DE LA CHATARRA DE ALUMINIO NACIONAL	80
3.2 PREPARACION DE LIGA PRIMARIA.....	81
3.2.1 PREPARACION DEL HORNO.....	81
3.2.1.1 CORRECCION DE LAS TOLBERAS DE COMBUSTIÓN.....	81
3.2.1.2 REPARACION DE LA LLAMA PILOTO.....	82
3.2.1.3 NUEVA TOLVA PARA EL VENTEROL.....	82
3.2.2 PREPACION DE LA HERRAMIENTA.....	82
3.2.2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ESCORIADOR DE ACERO INOXIDABLE	83
3.2.2.2 PREPARACIÓN DEL CRISOL DE HIERRO FUNDIDO	83
3.2.2.2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CRISOL DE HIERRO FUNDIDO.....	84
3.2.2.3 CONSTRUCCIÓN DE LANZA DE INSUFLAR ARGÓN	85
3.2.2.3.1 PRIMER DISEÑO	86
3.2.2.3.2 SEGUNDO DISEÑO	87
3.2.3 PREPARACIÓN DE LA PINTURA REFRACTARIA	88
3.3 FUNDICION DE LA LIGA PRIMARIA.....	89
3.3.1 FUNDICIÓN EN CRISOL DE ARCILLA GRAFITO.....	90
3.3.1.1ANALISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN EL CRISOL DE ARCILLA GRAFITO.....	90
3.3.2 FUNDICIÓN EN CRISOL DE HIERRO FUNDIDO	92
3.3.2.1 ANALISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN EL CRISOL DE HIERRO FUNDIDO	93
3.3.3 ANALISIS QUIMICO DEL FÚNDETE ALU FUNDEX EXTRA.....	93
3.4 DESGASIFICACIÓN.....	94
3.4.1 APLICACIÓN DEL DESGASIFICANTE APARTAGAS.....	94
3.4.2 ANALISIS QUIMICO DEL FÚNDETE APARTAGAS	94
3.4.3 INSUFLADO CON LANZA DE ARGON	95
3.4.4 PRUEBAS DE DESGASIFICADO.....	95
3.4.4.1ANALISIS DE LAS PRUEBAS DE DESGASIFICADO	95

3.5 PRUEBAS DE CANTIDAD DE POROSIDAD.....	98
3.5.1 PRUEBAS DE CANTIDAD DE POROSIDAD MEDIANTE ANALISIS DE DENSIDAD RELATIVA	98
3.5.2 PRUEBAS DE CANTIDAD DE POROSIDAD MEDIANTE ANÁLISIS FOTOGRÁFICO	100
3.6 TECNOLOGÍA DEL PROCESO.....	103
3.6.1 PROCEDIMIENTO.....	104
3.6.2 PRUEBA DE COLABILIDAD DE LA ALEACION.....	107
3.7 COMPROBACIÓN DE LA ALEACIÓN FINAL	108
3.7.1 ANÁLISIS POR ESPIRAL DE FLUIDEZ.....	109
3.7.2 ANÁLISIS QUÍMICO	109
3.8 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA ALEACION.....	110
3.9 RECOMENDACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DEL METODO	112
 CAPITULO IV.....	 113
4 ANÁLISIS DE LAS ALEACIONES	113
4.1 VACIADO DE ALUMINIO.....	113
4.2 PARTE EXPERIMENTAL	114
4.2.1 REFERENCIAS SOBRE LAS PRÁCTICAS	116
4.3 ENSAYOS MECANICOS DE LA FUNDICION DE ALUMINIO	117
4.3.1 ANALISIS QUIMICO	117
4.3.2 ANALISIS RADIOGRÁFICO	118
4.3.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS	119
4.3.4 ENSAYO DE TRACCION	120
4.3.4.1 ANALISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	122
4.3.5 ENSAYO DE DUREZA	124
4.3.5.1 ANALISIS DE DUREZA	124
4.3.6 ANALISIS DE FLUIDEZ	125
4.3.6.1 PROCEDIMIENTO APLICADO.....	126
4.3.7 ANÁLISIS METALOGRÁFICO CUANTITATIVO	127
 CAPITULO V.....	 134
5 ANALISIS FINAL DEL PROCEDIMIENTO APLICADO	134
CONCLUSIONES	138
RECOMENDACIONES	139

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1.- Equivalencias de la designación de aleaciones de aluminio según la norma DIN 1725, DIN 1700, SAE.....	5
Tabla 2.1.- Datos físicos y técnicos, en cuanto a la colada, de aleaciones de aluminio para moldeo.....	27
Tabla 2.2.- Fases intermetálicas en aleaciones de aluminio silicio	47
Tabla 2.3.- Inclusiones en el aluminio.....	49
Tabla 2.4.- Valores calculados del coeficiente de actividad de hidrogeno (fH) en aleaciones de aluminio fundido.....	65
Tabla 3.1.- Productos complementarios de las diferentes aleaciones del aluminio	78
Tabla 3.2.- Clasificación del aluminio reciclado en Quito para el 2010.....	79
Tabla 3.3.- Nuevo criterio de clasificación de la chatarra.....	80
Tabla 3.4.- Pruebas de pinturas refractarias.....	89
Tabla 3.5.- Pruebas de fundición en crisol de arcilla grafito.....	90
Tabla 3.6.- Pruebas de fundición en crisol de hierro fundido.....	92
Tabla 3.7.- Resultados de los análisis del fundente ALU FUNDEX EXTRA....	93
Tabla 3.8.- Resultados de los análisis del fundente APARTAGAS.....	94
Tabla 3.9.- Pruebas de desgasificación de aluminio.....	95
Tabla 3.10.- Calculo de la densidad relativa para las probetas de aluminio...	100
Tabla 3.11.- Determinación de la porosidad por medio de análisis digital....	101
Tabla 3.12.- Determinación del error relativo.....	103
Tabla 3.13.- Recomendación del uso de fundentes.....	106
Tabla 3.14.- Colabilidad de las pruebas conjuntas entre fundentes desgasificantes e índice de porosidad.....	108
Tabla 3.15.- Comparación con los gráficos de fluidez para las aleaciones	

de aluminio a 750°C.....	109
Tabla 3.16.- Resultados de composición químico	109
Tabla 4.1.- Bitácora del proceso de fusión en crisol de hierro fundido.....	114
Tabla 4.2.- Bitácora del proceso de fusión en crisol de arcilla grafito.....	115
Tabla 4.3.- comparación de los dos procedimientos.....	116
Tabla 4.4.- Resultados de análisis por espectrometría de chispa probetas de aluminio.....	117
Tabla 4.5.- Tratamiento térmico de envejecimiento.....	120
Tabla 4.6.- Designación de probetas para los ensayos a tracción en las probetas planas.....	122
Tabla 4.7.- Valores obtenidos de los ensayos a tracción en las probetas planas	122
Tabla 4.8.- Valores obtenidos de los ensayos a tracción en las probetas cilíndricas.....	123
Tabla 4.9.- Dureza de las probetas a temperatura ambiente y con envejecimiento a diferentes temperaturas.....	124
Tabla 4.10.- Tabla comparativa de dureza con aleaciones comerciales.....	125
Tabla 4.11.- Ensayo de fluidez.....	125
Tabla 4.12.- Designación de probetas para tratamiento térmico de envejecimiento.....	127
Tabla 5.1.- Propiedades químicas y físicas de la aleación 31932.....	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de equilibrio aleación AlSi	6
Figura 1.2 Diagrama de equilibrio aleación AlCu	8
Figura 1.3 Diagrama de equilibrio aleación AlZn	9
Figura 1.4 Diagrama de equilibrio aleación AlMg	10
Figura 1.5 Diagrama de equilibrio aleación AlMn	11
Figura 2. 1 Solubilidad del hidrogeno en el aluminio a una atmosfera	23
Figura 2.2 Esquema de los diferentes tipos de porosidad debido a la contracción a) formación de poros, b) porosidad difusa c) porosidad axial, d) porosidad local	24
Figura 2.3 contracción debido a diferentes fenómenos de solidificación	25
Figura 2.4. Formación de cavidades de contracción debido a un mal diseño del sistema de alimentación.....	25
Figura 2.5 Alimentación con una solidificación: a) de paredes lisas, b) de paredes rugosas a paredes esponjosas y c) de aspecto pastoso, en dos instantes consecutivos (según Paterson y Engler)	30
Figura 2.6 Probeta de forma rectangular para la determinación del déficit de volumen; la distribución de rechupes es específica para las condiciones de solidificación de cada molde probeta. 1 hueco del molde (V_{molde}); 2 contracción cubica (V_{ks}); 3 volumen del Macrorechupe (V^M); 4 volumen de la zona de incidencia (V_E); 5 déficit interno (V_t).	31
Figura 2.7 Distribuciones del déficit de volumen térmico en la fundición de AlSi según el contenido de silicio en arena y coquilla; los fundidos finos están a trazos y caracterizados por “v” (según Patterson y Engler)	32
Figura 2.8 Representación esquemática de los principales tipos de solidificación (a) columnar y b) equiaxial	33
Figura 2.9 modelo de campo de fase 3D de solidificación dendrítica.	34
Figura 2.10 Estructuras dendríticas. a) aleaciones A240-F fusión en molde permanente. La microestructura contiene huecos	

largos de contracción (negro) y redes interdendríticas de AlCuMg (Jaspeado). b) fundición continua, enfriamiento rápido produce finos espaciamientos de brazos interdendríticos aleación 3003. c) aleación A332.T551, fundición en arena y envejecimiento artificial. Las partículas de NiAl ₃ son masivas (partículas oscuras)	34
Figura 2.11 micrografías de dendritas obtenidas desde muestras solidificadas en tazas (a) baja y (b) alta	35
Figura 2.12 Efecto del contenido de soluto (cobre) en el espaciamiento de brazos dendríticos secundarios en ocho aleaciones de aluminio, son trazados para cinco diferentes tazas de enfriamiento.	36
Figura 2.13 forma espiral de cascara para medir la fluidez de aleaciones para colada (según Schneider).	37
Figura 2.14 fluidez de aleaciones de aluminio para moldeo a 750°C (según Schneider).	37
Figura 2.15 fluidez de distintas aleaciones en función de la temperatura para 1 AlSi ₁₂ ; 2 AlSi ₆ Cu ₃ (0.1%Mg); 3 AlSi ₆ Cu ₃ (0.3%Mg)	38
Figura 2.16 Influencia de un tratamiento con flujo de fusión sobre la capacidad de fluencia de una aleación AlMg a temperatura constante en coquillas (según Irmann)	42
Figura 2.17 Representación esquemática de la forma de actuar de diversos métodos de desgasificación, x condición atmosférica, t temperatura del metal, z composición del metal (según Hornung)	43
Figura 2.18 Influencia de la clase de calentamiento de los hornos de prefusión y de fundición así como del tipo de aleación sobre el contenido de hidrogeno de la colada, grupo 1: fundido dispuesto para ser sangrado en hornos de prefundición antes del tratamiento de la colada, grupo 2: coladas desgasificadas y afinados de grano durante la elaboración en hornos para fundición en coquilla (según Nitsche).	44
Figura 2.19 intermetálicos β -Al ₅ FeSi.	46
Figura 2.20 intermetalicos α -Al ₁₅ (Fe, Mn) ₃ Si ₂	46
Figura 2.21 Inclusiones observadas en AA N° 6063. Aleaciones antes del proceso de refinamiento del metal fundido filtrado, las inclusiones filtradas fueron analizadas por XMA. (a) Pequeñas	

partículas grises; compuesto de Ti-B, partículas finas negras; Al_4C_3 , películas negras; Al_2O_3 , (b) racimos de partículas finas; MgO incluye Al_2MgO_4 , partículas negras; Al_4C_3	50
Figura 2.22 Impactación inercial de partículas en burbujas de gas	51
Figura 2.23 Intercepción periférica de partículas por burbujas de gas	52
Figura 2.24 Flotación de partículas en un gas con una proporción de esparcimiento de $7.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{Kg}$ calculados desde la ecuación 2.3	53
Figura 2.25 Distribución de tamaño (por numero) de óxidos sedimentados en muestras de colada y de colada refinado por el método SNIF.El análisis fue realizado por el método de centrifugación y el diámetro d , es el máximo diámetro de la película de oxido.	54
Figura 2.26 Inspección de las Inclusiones en filtro metálico limpio (500 μm de dia. y 200 μm de dia) después de sumergirse y moverse en metal fundido. (a) La fusión original 5056; (b) después de 6 min de tratamiento de GBF	55
Figura 2.27 Aleación 6063, muestra porosidad interdendritica gruesa (izquierda); la misma aleación 6063 atacado con acido sulfúrico y una ampliación 100 X, porosidad angular en la localización interdendritica (derecha)	56
Figura 2.28 Poros esferoidales pequeños, aleación 1100 con enfriamiento directo semicontinuo	57
Figura 2.29 Solubilidad del hidrogeno en aluminio solido	58
Figura 2.30 Solubilidad de hidrogeno en aleación fundida con 1 atmosfera de presión sobre la fusión.	58
Figura 2.31 Solubilidad del hidrogeno a 1 atm. En 99.9985% de aluminio puro	60
Figura 2.32 Los mecanismos de disolución de hidrogeno en el aluminio fundido desde la humedad en la atmosfera	62
Figura 2.33 Cambio en la concentración de hidrogeno en una fundición de 99.99% de Al bajo atmosfera de aire seco de $P_{H_2O} = 1.7 \times 10^{-4} \text{ atm}$	63
Figura 2.34 Dependencia del tiempo en la concentración de hidrogeno en una fusión estimada de 99.99% de Al bajo atmosfera de aire conteniendo varias cantidades de vapor de agua	64
Figure 2.35 Curvas calculadas para la remoción de hidrógeno	

con. (a) Superficie completamente expuesta al aire; (b) una tapa; (c) insuflando gas inerte en la superficie (combinado con una tapa).	67
Figura 2.36 Remoción de hidrogeno como función del tamaño de las burbujas en dos flujos de purgado.	69
Figura 2.37 insuflado de argón con gas método convencional	70
Figura 2.38 Típica variación de los granos observados en las fundiciones (superior)[1], y el rompimiento de los brazos dendríticos en las primeras etapas de solidificación (inferior) (VERRAN,G, 2006).....	72
Figure 2.39 Visualización tridimensional de un modelo que simula estructura de grano y crecimiento del poro. Los granos son las estructuras sombreadas con aleación Al-7Si totalmente fundido al derecho de ellos; los poros se dan como esferas.	73
Figura 2.40 Micrografías de una estructura sin afinado de grano (izquierda) de una aleación Al6Mg con solidificación dendrítica columnar; y la dramática reducción del tamaño de grano con la incorporación de un afinador de grano (derecha) en la cual se observa una estructura dendrítica equiaxial (VERRAN,G, 2006)	74
Figure 2.41 La comparación de microestructuras en lingotes fabricados de AlSi, con y sin afinamiento de grano	74
Figura 2.42 a) aleación 2011 redes de CuAl ₂ en los limites de grano del aluminio, b) igual que en a) pero homogenizado a 525°C por 2 horas, c) igual que en las micrografías a) y b) pero homogenizados a 525°C por 12 horas, el CuAl ₂ en el limite de grano esta casi completamente disuelto y hay mucha precipitación fina de CuAl ₂ dentro de los granos de aluminio	76
Figure 2.43 Desarrollo de porosidad de gas de hidrógeno en 99. 99% Al, por tratamiento térmico de homogenización. (a) antes de calentar; (b) 600°C, 1 h.; (c) 600°C, 4 h., (d) 600°C, 12 h.	77
Figura 3. 1 Escoriador de acero inoxidable	83
Figura 3. 2 Crisol de Hierro fundido.....	84
Figura 3. 3 Lanza de insuflado de Argón.....	85
Figura 3.4 Pruebas del tamaño de burbujas del primer diseño de la lanza de argón.....	86
Figura 3.5 Pruebas del tamaño de burbujas del segundo diseño de la	

lanza de argón.....	87
Figura 3.6 Pruebas para encontrar la densidad relativa	98
Figura 3.7 Modelo normalizado (espiral de fluidez).....	107
Figura 3.8 Espirales de fluidez colados en las pruebas preliminares.....	107
Figura 3.9 Fluidez de distintas aleaciones de aluminio para moldeo en función de la temperatura de la colada (según Schneider) 1 G- AlSi12 , sin afinar ; 2 AlSi6Cu3 (0,1 % Mg) ; 3 G- AlSi6Cu3 (0,3% Mg).....	108
Figura 3.10 Fluidez de aleaciones de aluminio para moldeo a 750 C (Según Schneider)	108
Figura 4.1 Moldeo de placa en arena verde.....	113
Figura 4.2 Placa colada para la obtención de probetas rectangulares.....	117
Figura 4.3a) Imagen de rayos X a 50 aumentos de la placa (200 x 200 x 15 mm), periferia	118
Figura 4.3 Imagen de rayos X a 50 aumentos de la placa de (200 x 200 x 15mm), centro	119
Figura 4.4 Dimensiones de las probetas planas en las zonas tres zonas de la placa norma ASTM E 8.....	121
Figura 4.5.- Dimensiones de las probetas cilíndricas norma ASTM E 8.....	122
Figura 4.6a.- Colado de los espirales de fluidez	126
Figura 4.6 Análisis de fluidez.....	126
Figura 4.7 a Micrografías de probetas estándar (sin tratamiento térmico). ...	128
Figura 4.7 Micrografías de la probeta 0, estándar (sin tratamiento térmico).	128
Figura 4.8 Micrografías de la probeta 1, tratadas a 220°C 8h enfriado al aire	129
Figura 4.9 Micrografías de la probetas 2, tratadas a 550°C por 5h, enfriado en agua	130
Figura 4.10a Micrografías de la probeta 3, tratadas a 220°C por 5h enfriado al aire	131
Figura 4.10 Micrografías de la probeta 3, tratadas a 220°C por 5h enfriado al aire	132
Figura 4.11 Micrografías de la probeta 4, tratadas a 300°C tiempo int, enfriado al aire.....	133

RESUMEN

El propósito principal de este proyecto es establecer un procedimiento para la obtención de una aleación de aluminio maquinable, libre de poros y su metodología para ser aplicada en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional y después ser transferidos los conocimientos a la industria nacional sobre esta y futuras investigaciones en esta rama de la siderúrgica.

Con la implementación de este tipo de metodología para el control de porosidades se ha realizado basado en la experiencia y años de estudios realizados en el laboratorio de Fundición de la E.P.N. Resultando en el control de las impurezas y defectos en la fusión de aluminio siempre partiendo del trabajo con material considerado como chatarra y refundido como fundición secundaria.

Una de las causas importantes para que se lleve a cabo este proyecto es la proliferación de fundidoras en el país sin ningún control técnico en el proceso de fusión lo que implica que los productos obtenidos sean de mala calidad. Por ello era vital el estudio del uso de fundentes y desgasificantes que se encuentran en el mercado nacional y es poco difundido su aplicación a la fusión de metales.

La metodología aplicada en el presente proyecto se la realizó con materiales y útiles fabricados con material que se encuentra en el medio lo cual implica que su aplicación industrial es de relativo bajo costo, y con excelentes resultados.

INTRODUCCIÓN.

Siendo necesario un estudio sobre la calidad de la fundición de aluminio en el país y los defectos que se generan, es importante determinar cómo controlar estos defectos que se ven reflejados en la calidad final de fundición de aluminio.

El capítulo I , contiene generalidades sobre el aluminio y sus propiedades para las aleaciones de aluminio más comúnmente aplicadas en la industria , también describiendo los parámetros fundamentales para el control de la fusión del mismo , describiendo en forma general los hornos utilizados en la industria de la fundición de aluminio.

El capítulo II describe de una manera detallada el análisis de las causas de la porosidad en las piezas coladas según los criterios de la contracción y las partículas no metálicas , con el criterio del control de defectos por la presencia de gases , y el control del grano y su refinamiento.

El capítulo III se refiere a la obtención de la aleación por medio de la reducción de los factores que implican defectos en la fusión, control en el horno y el uso de pintura refractaria, además de un estudio de los fundentes y desgasificantes de uso en la industria nacional y la implementación del insuflado de argón.

El capítulo IV detalla los análisis y ensayos físicos, químicos , mecánicos de la aleación obtenida, basándose en pruebas y análisis radiográficos, metalográficos de los defectos en la fundición de aluminio y determinando las condiciones ideales de la aleación obtenida y sus ventajas industriales.

El capítulo V detalla las experiencias en conclusiones y recomendaciones del presente proyecto.

Por último se detalla los anexos los ensayos y pruebas realizadas en los laboratorios de la E.P.N. que colaboraron en la investigación.

CAPITULO I

ALEACIONES DE ALUMINIO

1.1 ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN

El aluminio es generalmente aleado con otros elementos químicos para mejorar sus propiedades mecánicas. Por lo que sus características varían según sea su empleo en la industria pero , siempre tomando con patrón de salida que es un material netamente fundido y partiendo de ello es uno de los metales más aplicados a la industria moderna del diseño de elementos mecánicos . Su estudio ha sido muy minucioso por lo que los defectos que se presentan en la fusión y colado del aluminio son claramente detectables como microrechupes , porosidades , inclusiones de metales y no metales , juntas frías , macrorechupes .Todos estos defectos pueden ser controlados sean en la fusión o en el vertido del metal en el molde .

1.1.1 DESIGNACIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO ⁽¹⁾

1.1.1.1 Designación de las aleaciones de aluminio para moldeo

Las aleaciones que se obtienen piezas por fundición, se suministran en su mayoría en forma de lingotes de una aleación específica pero difieren en el método de obtención para lo cual la norma DIN 1725 las ha designado con el prefijo:

G = Lingotes y fundición en arena

GK = fundición en coquilla

GZ = Fundición centrifugada

Ejemplos: G- Al Si 12, GK- Al Si 6 Cu 4

Otro elemento de importancia para las aleaciones de aluminio es el cobre (Cu) que siempre que influya en las propiedades mecánicas se la agregara a la designación entre paréntesis. Ejemplo G – Al Si 12 (Cu)

Para las aleaciones madre se designa con el prefijo:

V- = Aleación madre

VR - = Aleación madre con alta pureza

Para este último se clarifica con un ejemplo común VR – Al Si 20

1.1.1.2 Designación según la composición química

Para los sistemas de abreviatura de símbolos de metales no ferrosos, utiliza la norma DIN 1700. Se basa en la descripción de la composición química mínima de una aleación dada utilizando las abreviaturas químicas tradicionales y de los elementos químicos de relevancia para dicha aleación por ejemplo:

Ag = Plata

Al = Aluminio

B = Boro

Be = Berilio

Cr = Cromo

Mg = Magnesio

Pb = Plomo

Como las más relevantes

Partiendo siempre de Al como elemento principal y los elementos de aleación seguidos de este , para aleaciones más específicas se agrega también un numero el cual significa el porcentaje del elemento aleante por ejemplo : Al Mg 4,5 Mn .

El cual aclara que tiene un porcentaje de 4,5 % en peso de Mg.

Para los casos de aluminio puros o con un grado de pureza más elaborado se designan:

Al 99,5 = Aluminio de alta pureza (99,5 puro metalúrgico)

Al 99,5 R = Aluminio purísimo en lingote de fundición para semielaborados con 99,5 % puro

Para aleación mucho mas específicas se utiliza:

Al 99,99 Mg 1 = Al 99,99 Mg 1 = aluminio 99,99 % puro y el porcentaje restante de Magnesio inferior al 1 %.

1.1.1.3 Designación para aleación de aluminio tratadas térmicamente y designación según la capacidad de endurecimiento.

Según la norma DIN 1725 segunda parte la aleación de aluminio de fundición y moldeo se designan con las letras minúsculas colocadas a continuación de la notación DIN:

g = Recocido y enfriado

ho = Homogeneizado

ka = Endurecido en frio

wa = Endurecido térmicamente

ta = Endurecido parcialmente

Para el caso del endurecimiento se subdividen en:

Materiales no endurecibles

Son los materiales a los cuales no se pueden aumentar la resistencia mecánica por tratamiento térmico sino únicamente por deformación plástica, en esta clasificaciones están el Al 99,99 y las aleaciones específicas AlMg , AlMn , AlMgMn , AlFeSi.

Materiales endurecibles

Son aquellos en los cuales se puede lograr un aumento en la resistencia mecánica, pero también se las puede conformar mecánicamente en frío.

Las aleaciones que corresponden a esta clasificación son los tipo AlCuMg , AlMgSi , AlZnMg , AlSiMg , AlCuTi , AlCuTiMg.

En el cual se debe realizar una conformación en caliente. Para después realizar un recocido de disolución y de enfriado y un envejecimiento.

1.1.1.4 Designación por orden numérico DIN 1700

Para este tipo de designación se tienen un orden numérico de 3 a 5 cifras:

Primera cifra: Numero del grupo principal (Al) 3

Segunda cifra: Los números 0 hasta 5 caracterizan al elemento aleante que se encuentra en mayor cantidad según:

1= Cu

2 = Si

3 = Mg

4 = Zn

0 = otros o ninguno

Tercera cifra: Esta por lo general significa la adición de un elemento aleante en mayor cantidad los más utilizados son:

5 = Mn

6 = Pb, Bi, Ca, Cd, Sb, Sn

7 = Ni

8 = Ti

9 = Fe

0 = otros elementos

Cuarta cifra: Los números en cifras refieren a valores porcentuales puntuales de cada elemento importante en ese tipo de aleación específica.

0-2 Indican un contenido bajo

3-6 Indican valores medios

7-9 Indican valores altos

Quinta cifra: la designación va desde el 0 hasta 3 para aleación de moldeo y con 2 para aleaciones de fundición inyectado.

En la tabla 1.1 se determinan las equivalencias entre la norma DIN 1725, DIN 1700 y la SAE, para algunas de las aleaciones de aluminio.

Tabla 1.1.- Equivalencias de la designación de aleaciones de aluminio según la norma DIN 1725, DIN 1700, SAE.

DIN 1725	DIN 1700	SAE
Al-Si10Cu2Fe	3219	383
Al-Si5Cu3	321	328
Al-Mg5Si1	332	320
Al-Cu10Si2Mg	3123	34X
Al-Si12Cu	321	321
G-AlSi6Cu4	322	326
Al-Si9Cu3Mg	3213	332

1.1.2 ALEACIONES DE ALUMINIO-SILICIO.

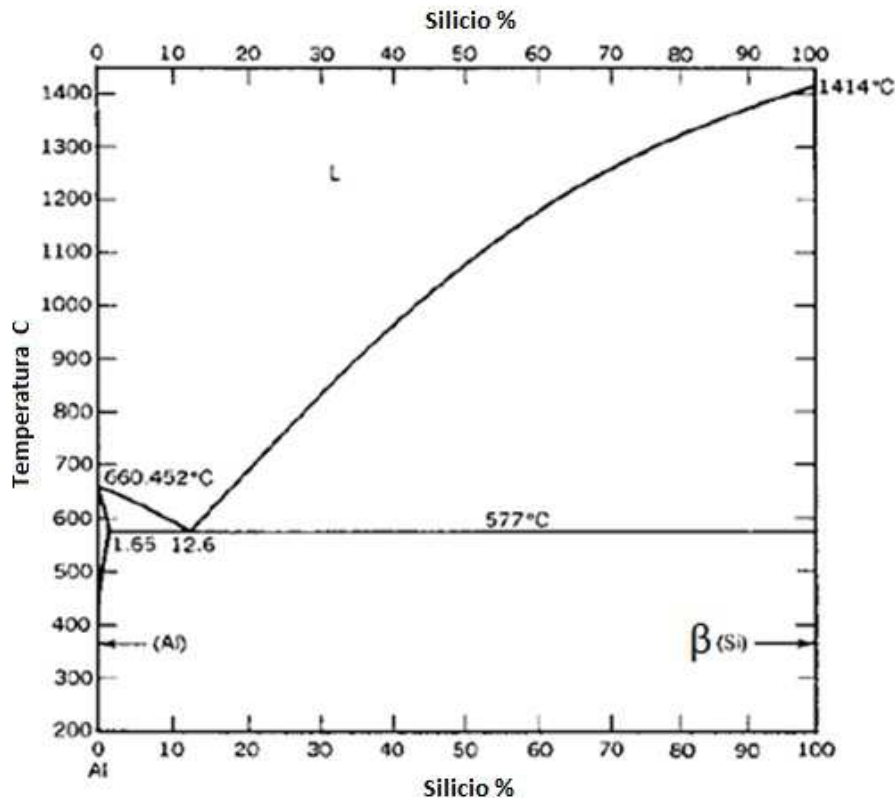


Figura 1.1.- Diagrama de equilibrio aleación Al-Si [Totten²]

En la figura anterior se ha representado el diagrama de fases α Al-Si, que es muy sencillo, pues no forma más que una solución sólida β de silicio en aluminio y una solución sólida de aluminio en silicio, aunque algunos autores consideran la fase β como silicio elemental.

No hay más que un punto eutéctico que corresponde a la proporción de 12,5% de Si y cuya temperatura es 577°C.

El silicio endurece al aluminio y, sobre todo, aumenta su fluidez en la colada y su resistencia a la corrosión. Las aleaciones Al-Si son muy dúctiles y resistentes al choque mecánico; tienen un bajo coeficiente de dilatación y una elevada conductividad calorífica y eléctrica, pero son difíciles de mecanizar por la naturaleza abrasiva del silicio. Su peso específico es alrededor del 2,7 g/cc³.

Las propiedades mecánicas de aleaciones aluminio-silicio pueden mejorarse añadiendo a la cuchara de colada de estas aleaciones cloruro sódico o una mezcla de fluoruro y cloruro sódico. Esta operación incorpora una pequeña cantidad de sodio, inferior al 0,01% a la aleación pero suficiente para variar la concentración eutéctica del 11,6% al 13% y bajar la temperatura eutéctica de 577°C a 570°C.

Pero sobre todo las aleaciones Al-Si modificadas con esta adición resultan con un grano extremadamente fino en lugar de las agujas o láminas en que cristaliza el silicio en las aleaciones sin modificar.

Esta mejora en la estructura micrográfica se traduce en una notable mejora de las propiedades mecánicas de aleaciones modificadas, y concretamente, de su ductilidad, resistencia al choque, resistencia mecánica e incluso de su resistencia a la corrosión ⁽⁴⁾.

1.1.2.1 Aplicaciones de la aleación Al – Si

La principal aplicación de las aleaciones aluminio-silicio son la fundición de piezas difíciles, pero buenas cualidades de moldeo, y la fabricación de piezas para usos marítimos, por su resistencia a la corrosión. Pero no se emplean para piezas ornamentales porque se ennegrecen con el tiempo.

1.1.3 ALEACIONES DE ALUMINIO- COBRE.

En la figura 1.2 se muestra el diagrama de fases Al-Cu hasta un 55% de Cu, que es muy superior al porcentaje máximo empleado en estas aleaciones, que en general no superan al 15%, pues a partir de esta concentración se forman compuestos intermetálicos que hacen frágil la aleación.

En este diagrama está presente la fase β que es una solución sólida de cobre en aluminio que cristaliza en la red cúbica centrada en las caras. La eutéctica está formada por cristales duros de aluminuro de cobre (Al_2Cu) incrustados en la matriz de cristales de aluminio. La temperatura eutéctica es 548°C, que corresponde a una concentración del 33% de Cu.

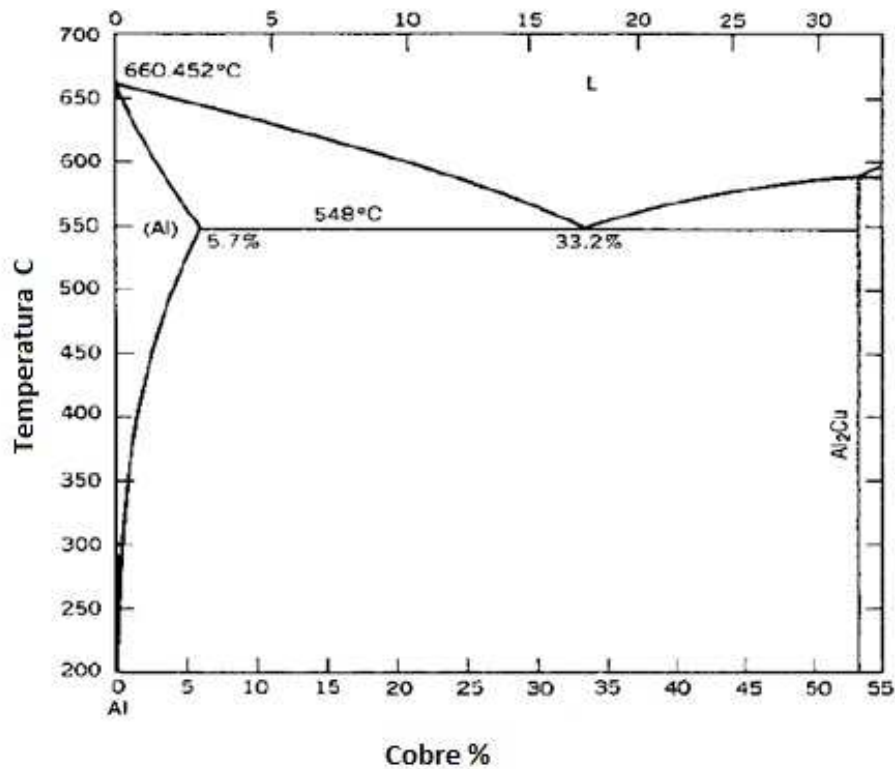


Figura 1.2.- Diagrama de equilibrio aleación Al - Cu [Totten²]

La solubilidad del cobre en el aluminio varía del 0,45% a 300°C, hasta 5,7% a 548°C, lo que se utiliza para el temple de precipitación a que puede ser sometidas estas aleaciones. El cobre endurece mucho el aluminio, por lo que estas aleaciones poseen propiedades mecánicas excepcionales, y mantienen la buena maquinabilidad y baja densidad que posee el aluminio. (8)

1.1.3.1 Aplicaciones de la aleación Al - Cu

Estas aleaciones, se caracterizan por una buena resistencia al calor y una menor resistencia a los agentes atmosféricos que las aleaciones sin cobre. Estas aleaciones no pueden ser soldadas.

1.1.4 ALEACIONES DE ALUMINIO-ZINC.

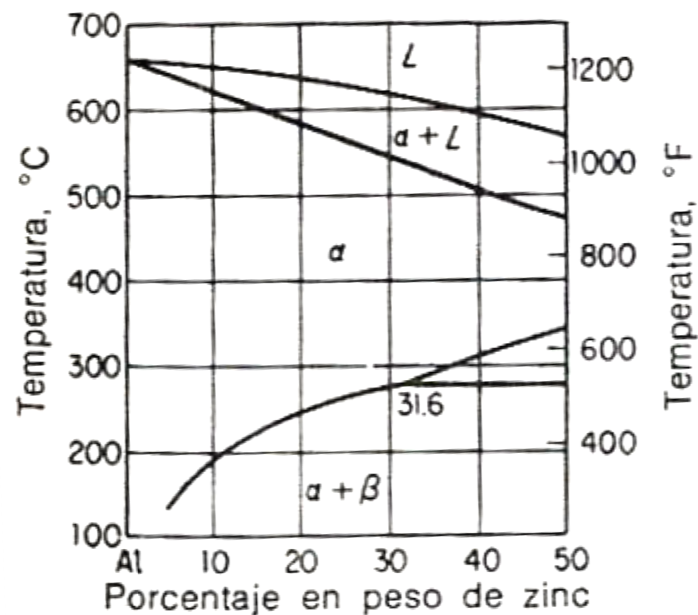


Figura1.3.- Diagrama de equilibrio aleación Al - Zn fuente (propia)

En estas aleaciones el zinc contiene un porcentaje máximo del 20%.

En la figura 1.3 queda representado el diagrama Al-Zn, en el que están presentes la solución sólida β de zinc en aluminio, la solución sólida α de aluminio en zinc, que algunos autores identifican con zinc elemental, y la solución sólida intermedia ⁽⁴⁾.

1.1.4.1 Aplicaciones de la aleación Al - Zn

Como no se forman compuestos químicos no puede aplicarse a estas aleaciones el temple de precipitación. Las aleaciones de zinc son más baratas que las de cobre pero de igual características mecánicas, pero menos resistentes a la corrosión y más pesadas.

1.1.5 ALEACIONES DE ALUMINIO-MAGNESIO.

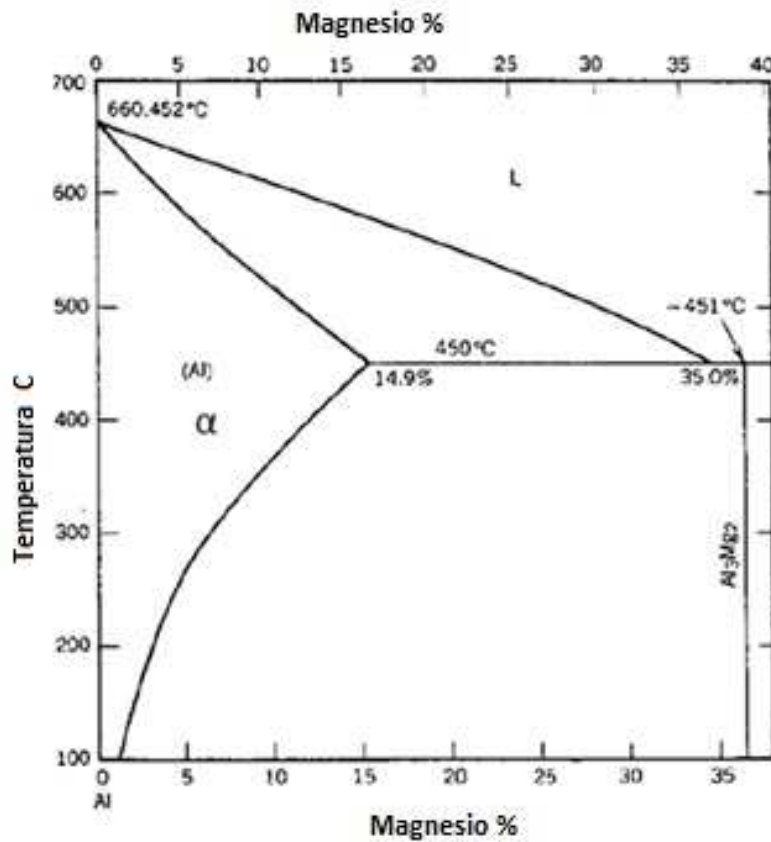


Figura1.4.- Diagrama de equilibrio aleación Al-Mg [Totten²]

En la figura 1.4 se ha representado el diagrama aluminio-magnesio en que están presentes las fases Al + α que es una solución sólida de magnesio en aluminio, y la fase α, que es aluminuro de magnesio (Al₈Mg₅).

La proporción eutéctica es de 34% de Mg y la temperatura eutéctica 450°C.

La solubilidad sólida del magnesio en aluminio varía del 4,4% a 250°C hasta 17,4% a 450°C. Por esto, las aleaciones Al-Mg admiten el temple de precipitación.

Las aleaciones Al-Mg son más ligeras que el propio aluminio, pues su peso específico es alrededor de 2,6 g/ cc³. Poseen buenas propiedades mecánicas, se mecanizan con facilidad y tienen una buena resistencia a la corrosión.

Estas aleaciones contienen magnesio en proporciones inferiores al 10% de Mg. En general, el magnesio va asociado a otros elementos como el cobre, silicio, cinc, otros, es decir, formando aleaciones ternarias, en las que el magnesio figura con proporciones del 0,1 al 1% ⁽⁴⁾.

1.1.5.1 Aplicaciones de la aleación Al Mg Si

La aleación AlMgSi. Los elementos de adición de esta familia son el Magnesio y el Silicio. Las aleaciones de este tipo pueden ser fundidas para espesores que van desde los 4 mm hasta los 12 mm ideal para elementos estructuras sujetos a vibraciones como los bloques de cilindros de los motores de combustión interna, también aptos para la fabricación de aros para neumáticos automotrices con espesores de 3,5 mm en su parte más crítica, es una de las aleaciones que más se está utilizando en la industria automotriz desde la década del cincuenta ⁽⁴⁾.

1.1.6 ALEACIONES DE ALUMINIO-MANGANESO.

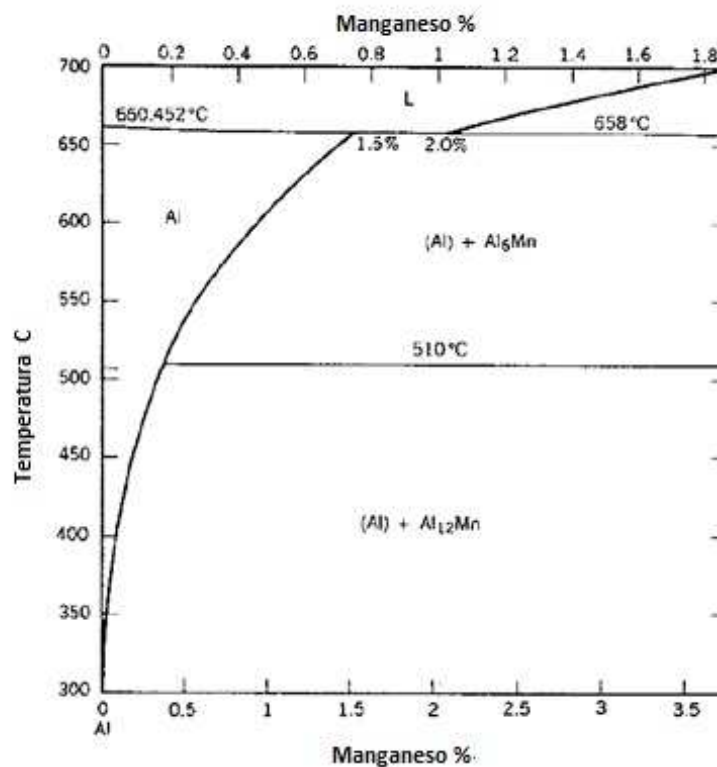


Figura1.5.- Diagrama de equilibrio aleación AlMn [Totten²]

El manganeso se encuentra en la mayor parte de las aleaciones de aluminio ternarias y cuaternarias. Como se muestra en la figura 1.5 su solubilidad en el aluminio pasa del 0,35% a 500°C a la temperatura eutéctica, que es 658°C, como se puede observar en el diagrama de fases de Al-Mn de la figura anterior.

La concentración eutéctica es de 1,95% de Mn. A la temperatura ambiente, y hasta un 25% de Mn la aleación está formada por Al+Al₆ Mn. El manganeso aumenta la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio ⁽⁸⁾.

1.2 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE LOS MATERIALES EN EL PROCESO DE COLADO

1.2.1 PROCESO DE FUNDICIÓN

Las características físicas y químicas del aluminio fundido son:

- Se combina fácilmente con oxígeno, vapor de agua (humedad del ambiente, hogar del horno, humedad de molde) y materiales oxidantes formando escoria.
- Absorbe hidrógeno fácilmente (igualmente por la presencia de agua en el moldeo en arena), que se forma durante la solidificación formando porosidades.
- Baja densidad que combinado con la contracción requiere de un buen sistema de alimentación.
- Formación de una capa continua de óxidos de aluminio.
- Disuelve elementos tales como el acero al carbono, el hierro fundido y no metales en su gran mayoría.

La formación de escoria se incrementa debido a chatarras sucias, y también la presencia de magnesio en la aleación, la turbulencia, un agitado desmedido de la colada y la temperatura de los gases en contacto con la superficie sobre todo en ambientes oxidantes. Las escorias se pueden reducir fundiendo metal libre de suciedades (cargas limpias), evitando la turbulencia y con buenas prácticas de colado, también con un precalentamiento de las cargas.

Para la fusión se utilizan diferentes tipos de fundentes que se dividen en: Los que disminuyen la absorción de gases (cobertura), los que purifican el aluminio y los que eliminan los gases disueltos.

Los fundentes están basados en mezclas de sales del tipo cloruro de sodio - criolita, cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de zinc, etc. y se emplean cuando se tiene el metal en estado fundido. Compuestos como el hexacloroetano eliminan los gases disueltos. Otra técnica asociada para eliminar gases es el uso de gases inertes como el cloro y el nitrógeno y el argón o mezclas entre nitrógeno y argón sobre todo para aleaciones con contenido de magnesio.

Cuando en la fusión se requiera adicionar elementos de alto punto de fusión como el cobre, el níquel, el manganeso, silicio, titanio y cobalto, se hace normalmente con prealeaciones y los de más bajo punto de fusión se agregan directamente como el zinc y el magnesio.

Para efectos de fabricar una aleación de aluminio se debe realizar un balance de carga teniendo en cuenta las recuperaciones y eficiencias de cada uno de los elementos que entran en la carga ⁽²⁾.

1.2.2 DESARROLLO DE LA SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO

La morfología de la solidificación dice sobre la manera en que se originan y forman los cristales que crecen a partir del aluminio fundido, existe la solidificación dirigida desde afuera hacia adentro (exógeno) en donde comienza la formación de cristales desde la superficie del molde al interior del mismo y el caso donde la solidificación se forman desde el interior del molde hacia las paredes del mismo se llama endógena, el tipo de solidificación influye con prioridad en las características del fundido ⁽⁴⁾.

1.2.3 FLUIDEZ DEL ALUMINIO

La fluidez da la capacidad al aluminio fundido de correr por los canales de alimentación y llenar los moldes huecos hasta que se enfríe este flujo a causa de la solidificación, la influencia sobre la fluidez esta en relación con el grado de solidificación de la aleación y su contenido calórico (mayor temperatura

mayor fluidez), el contenido de óxidos (escorias) disminuye la fluidez, esta se puede determinar a través de un espiral en el cual se mide el recorrido que alcanza el metal ⁽⁴⁾.

1.2.4 TÉCNICAS DE FUSIÓN

Las técnicas de fusión se asocian con los métodos bajo los cuales se obtiene el metal líquido listo para la operación de vaciado. En este sentido es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Tipos de horno
- Fluidez del material
- Material del molde
- Sistema de colado y alimentación
- Propiedades mecánicas, físicas y químicas

Además es necesario considerar el control químico que esta regido por el tipo de aleación que se utiliza, según algunos parámetros:

- Materiales comercialmente puros (AlSi R por ejemplo)
- Chatarras
- Lingotes de fusión secundaria
- Retornos (piezas desechadas de fundiciones anteriores)
- Adiciones últimas (desgasificadores y refinadores)

Entre los aspectos importantes a tener en cuenta están las llamadas pérdidas por fusión, que están asociadas a:

- Formación de escoria que se produce por reacción del metal con la atmósfera y el material refractario, la formación de escoria puede ser también producto de la reacción con el vapor de agua presente en la atmósfera, para evitar la formación de escoria la fusión debe hacerse a la temperatura más baja posible (siempre teniendo en cuenta el diagrama de equilibrio) , con los menores tiempos de fusión, con el revestimiento adecuado y con coberturas que eviten la explosión del metal a la atmósfera.

- También es necesario mencionar las pérdidas de vapor (metales de bajo punto de fusión), como en el caso de las aleaciones Al-Zn en los cuales el zinc se pierde por tener una presión de vapor mayor que la de los gases atmosféricos.

1.2.5 CONTROL DE COMPOSICIÓN QUÍMICA

Para el control de la composición química existen diferentes tipos de ensayos como:

Ensayo de absorción atómica y espectroscopia de emisión atómica, este es el mas utilizado, Consiste en someter una probeta a una chispa de alta temperatura que se encarga de gasificar los elementos presentes, el espectro producido por estos gases es medido y comparado con una curva patrón permitiendo la estimación precisa de la composición del material ⁽¹⁾.

1.2.6 TIPOS DE HORNOS ⁽¹⁾

Los hornos de fundición pueden dividirse en dos grandes categorías, dependiendo de la fuente de energía.

- Hornos de combustible
- Hornos Eléctricos

Estos a su vez se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño, método de carga, ratas de fusión, etc.

1.2.6.1 Hornos de combustible

La clasificación más general de este tipo de hornos se hace de acuerdo al tipo de combustible que utilizan:

- Hornos de gas.
- Hornos de combustible líquido
- Hornos de reverbero

Estos hornos pueden ser a su vez de contacto directo, cuando los productos gaseosos de la combustión pasan directamente sobre la carga metálica o de contacto indirecto cuando esto no ocurre.

1.2.6.1.1 Hornos de gas

Este tipo de hornos son utilizados para fundir metal que no sobrepase los 50 kg de metal , tiene un crisol generalmente de arcilla grafito o en algunos casos de hierro fundido , puede ser también del tipo fijo o basculante , el combustible que usan depende del lugar donde esté instalado por lo general es el gas licuado de petróleo o también en algunos casos propano con combinación de butano , debido a esto , este tipo de horno no sobrepasa las temperaturas de fusión de 1200 °C sin precalentamiento de aire y con precalentamiento pueden llegar a los 1450 ° C punto de inflamación del gas y máximo en este tipo de hornos.

1.2.6.1.2 Hornos de combustible líquido

Son los hornos de este tipo los más usadas para cargas de metal entre los rangos de 50kg a 200 kg por lo que son empleados para la fusión de metal para producciones medias, debido a esto en la gran mayoría son del tipo basculante. Por este último punto el crisol que utiliza es el de carburo de silicio o en menor medida el de arcilla grafito, tiene tiempos de fusión inferiores a los de combustible gaseoso, uno de los defectos es que tienen una atmosfera oxidante en el hogar del horno lo cual contamina el metal en fusión.

Las temperaturas a las que puede llegar son altas varían entre los 1200°C sin aire precalentado hasta los 1550 °C con precalentamiento.

1.2.6.1.3 Horno de reverbero

Usan combustibles líquidos y gaseosos (algunos modelos combinan la posibilidad de cualquiera de estos dos combustibles con un sistema eléctrico). Se compone principalmente de una cámara de carga en donde se ubica un quemador que calienta el metal por convección y radiación y una cámara de almacenamiento (o mantenimiento), que hace las veces de crisol en donde se aloja el metal fundido. Los índices de oxidación (perdidas metálicas) son elevados, debiéndose tener cuidado en el tipo de atmósfera al interior del horno que debe ser preferiblemente neutra o reductora para evitar la producción elevada de escoria. Este tipo de unidades se utilizan para producciones elevadas y continuas. El funcionamiento es el siguiente. A través de la puerta se introduce la carga metálica que es fundida por la acción del quemador, el metal fundido pasa por un canal que comunica ambas cámaras y se deposita

en el crisol de donde se retira con la ayuda de cucharas de vaciado o mediante un drenaje colocado en la parte inferior del horno.

1.2.6.2 Hornos eléctricos

Aunque existen varios tipos de hornos eléctricos, los más utilizados en la fundición de metales no ferrosos son los Hornos de inducción, los hornos de arco eléctrico se utilizan más en la industria de fabricación de aleaciones ferrosas, mientras los hornos de resistencia ya no son utilizados en su mayoría. Cuando se selecciona una unidad de fusión debe tenerse en cuenta en primera instancia la cantidad de metal que se debe producir y el costo por tonelada de metal producido. Se debe tener en cuenta también el costo de instalación y el costo de mantenimiento de la planta, así como la disponibilidad de espacio y el tamaño de las piezas individuales que se desean producir.

1.2.6.2.1 Hornos de inducción

El principio de funcionamiento de este tipo de unidades es una corriente eléctrica que pasa a través de una bobina situada en el interior del refractario del horno, creando un campo electromagnético que se induce a la carga metálica que actúa como bobina secundaria generando calor que finalmente funde el metal. La cantidad de energía absorbida por la carga depende de la intensidad del campo magnético, la resistividad eléctrica de la carga y la frecuencia de operación. El campo magnético secundario que se crea en la carga posee siempre un sentido opuesto al de la bobina lo que crea una fuerza mecánica que pone en movimiento la masa fundida. Los hornos de inducción pueden ser de baja, media o de alta frecuencia y el rango de volúmenes de producción que se puede obtener con este tipo de unidades es muy amplio. El control metalúrgico de la aleación es muy preciso debido a que no hay producción de gases de combustión y las oxidaciones de los elementos pueden conocerse muy fácilmente, además la contaminación es mínima lo que hace el control ambiental relativamente fácil.

En la operación se requiere un control riguroso de la carga metálica debido a que en el horno no se presentan reacciones químicas que afecten fuertemente la composición química del material; es decir la metalurgia en este tipo de

unidades se hace externa al horno. En cuanto al proceso de fusión debido a la agitación permanente del metal fundido e generan áreas mayores de contacto de metal con la atmósfera lo que produce en algunas aleaciones mayores oxidaciones. Sin embargo para algunos materiales este efecto es benéfico ya que hace posible la eliminación de gases nocivos que se encuentren en el interior del material. El control de la temperatura se realiza mediante el aumento o disminución en la potencia de entrada al equipo.

1.2.7. ENERGÍA NECESARIA EN EL PROCESO DE FUSIÓN

La energía necesaria para llevar al metal a la temperatura de vertido es la suma de tres cantidades: La necesaria para elevar la temperatura del metal, desde la ambiente (que suele ser el 55% del total); el calor de fusión de la aleación o la energía necesaria para convertirla de sólido en líquido (30% del total) y la que se requiere para sobrecalentar el metal hasta la temperatura de vertido (15% del total). Si la operación de fusión se lleva a cabo en un horno aparte (generalmente), y la aleación se transfiere a un depósito en una línea de colado, se debe agregar una cantidad adicional de energía para compensar las pérdidas de temperaturas debidas a la transferencia ⁽⁸⁾.

1.2.8 PÉRDIDAS METÁLICAS

Las pérdidas normalmente asociadas a la fusión de aleaciones de aluminio se relacionan en forma directa con la masa y el área superficial de la carga y también considerando el estado del metal base (preselección de las cargas). Los materiales de las cargas metálica de espesores delgados tienen una superficie muy grande con lo cual la mayor parte se convierte en óxidos y escoria, aun hayan sido precalentados, por lo cual es recomendable que el material este lo más compacto posible. Además, la presencia de películas de humedad (agua) o no metales (plásticos, pinturas, aceites) todos estos se convierten en óxidos y carburos de aluminio (escoria). Las aleaciones de aluminio son susceptibles a la oxidación a todas las temperaturas, pero las pérdidas pueden ser exageradas si el metal se calienta a más de las temperaturas mínimas necesarias para el proceso. Por ejemplo, si a una temperatura base de 670 °C representa una pérdida normal por oxidación, al aumentar la temperatura de reposo a 760 °C las pérdidas aumentarán 20%, y

el aumento será logarítmico y rápido, sobrepasando esta temperatura. Con el mismo criterio, la pérdida a 815°C representa más del 200% de la pérdida a 670°C. Un sobrecalentamiento continuo a más de 815°C producirá la combustión de los elementos aleantes del aluminio y el aluminio mismo ⁽⁴⁾.

1.3 MÉTODOS DE COLADO DE ALEACIONES DE ALUMINIO

Para la fabricación de piezas fundidas de aluminio se deben tener en cuenta formas, dimensiones, masa de la pieza, exactitud son los puntos más importantes.

Por otro lado viene el diseño y las solicitaciones mecánicas del cual van a ser objeto el elemento y por último el costo que por lo general es lo primero a tener en cuenta para el diseño del modelo y la selección del proceso de colado.

Para esto se han clasificado los procedimientos de colado en moldeo en arena verde, colado en coquilla, y colado para fundición inyectada ⁽⁴⁾.

1.3.1 COLADO EN ARENA EN VERDE

La fundición en arena, en términos generales implica la fabricación de un molde de arena a partir de un modelo de la pieza a fundir. La calidad en molde de arena depende principalmente de la técnica y habilidad del fundidor y es difícil de normalizar. La fundición de formas complejas y con diferentes espesores de pared es posible solo si se utilizan las técnicas adecuadas. Para piezas de peso mayor de 25 kilogramos es muy empleado este proceso de fundición; para piezas entre 5 y 25 kilogramos, con grandes volúmenes de producción, se emplea el método de fundición en coquilla. La fundición en molde de arena se alimenta por gravedad y su solidificación es más lenta que en molde permanente; el enfriamiento se dificulta por la menor conductividad térmica de la arena. Las propiedades mecánicas de las piezas por fundición en molde permanente o de arena son menores que las de la fundición a presión, debido también al crecimiento dendrítico que ocurre al requerirse de mayor tiempo de enfriamiento en el molde permanente. Para mejorar las propiedades mecánicas en ocasiones es necesario realizar tratamientos térmicos posteriores ⁽⁸⁾.

1.3.2 COLADO EN COQUILLA

El colado en coquilla se aplica para producciones en serie o para piezas de tamaño reducido, la matriz se la fabrica en acero o fundición gris dependiendo del lote de producción o la demanda de las piezas.

El estudio para el diseño de la matriz implica un costo elevado que no se ve compensado por el nivel de producción a corto plazo, siendo la exactitud dimensional el factor de importancia de este método de colado.

Las características mecánicas y la solidificación son homogéneas en toda la estructura de la pieza colada.

Se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Colado por gravedad
- Colado a presión o inyectada

1.3.2.1 Colado por gravedad

El proceso implica una alimentación por gravedad en los bebederos que se encuentran en la propia matriz esto ayuda a una alimentación bien distribuida y también a maximizar el uso de la colada en el diseño.

Una variante para este proceso de colado se tiene la fundición en molde permanente por centrifugado que en principio es el mismo que el de la coquilla pero con una fuerza adicional a la gravedad para su llenado que se da por la rotación de la coquilla.

Para un mejor llenado del molde, se lo utiliza para piezas cilíndricas de paredes delgadas sobre todo o de cilindros de grandes longitudes ⁽¹⁾.

1.3.2.2 Colado a presión o inyectada

La fundición inyectada es especialmente adecuada para la producción de alta calidad y grandes cantidades de piezas relativamente pequeñas, de hasta un máximo de 5 kilogramos cada una; sin embargo piezas de hasta 50 kilogramos

pueden producirse si se justifica el costo de las matriz y equipo. En la fundición inyectada, dado que la velocidad de enfriamiento es muy alta casi instantánea no se original los microrechupes.

La calidad de las piezas obtenidas por este método son las mejores que se pueden obtener por fundición, son prácticamente piezas de producción finales sin mecanización posterior es decir que la pieza sale a servicio una vez fuera de la matriz ⁽¹⁾.

CAPITULO II

ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DE LA POROSIDAD EN LAS PIEZAS COLADAS

2.1 POROSIDAD Y TIPOS DE POROSIDAD

2.1.1 POROSIDAD.

La porosidad es un defecto típico que aparece como una red de pequeñas cavidades vacías distribuidas o repartidas en toda la región de la fundición. Si la porosidad puede verse a simple vista durante la inspección visual se dice que se trata de una macroporosidad pero si es necesario una ampliación para poder ser vista se habla de una microporosidad ⁽²⁾.

La porosidad en las aleaciones de aluminio son asociadas a burbujas de gas que quedan atrapadas en la solidificación de la aleación (porosidad gaseosa) y por vacíos que se forman entre las dendritas debido a los efectos de la contracción durante la solidificación (porosidad de contracción), las burbujas de gas son causadas principalmente por la presencia de hidrogeno (atrapado mientras el liquido se solidifica, debido a que baja la solubilidad) figura 2.1 y por aire atrapado debido a una alta velocidad de flujo del metal fundido durante el colado en el molde ⁽²⁾.

La porosidad en la fundición de aluminio es irregular debido a la combinación de los dos métodos mencionados anteriormente, porosidad gaseosa y porosidad de contracción, sin embargo es posible determinar el origen de ciertos poros, basados en su distribución y en aspectos de su morfología así como su localización en la pieza. Los poros gaseosos usualmente tienen forma esférica mientras que los poros de contracción tienen normalmente forma más irregular y elongada.

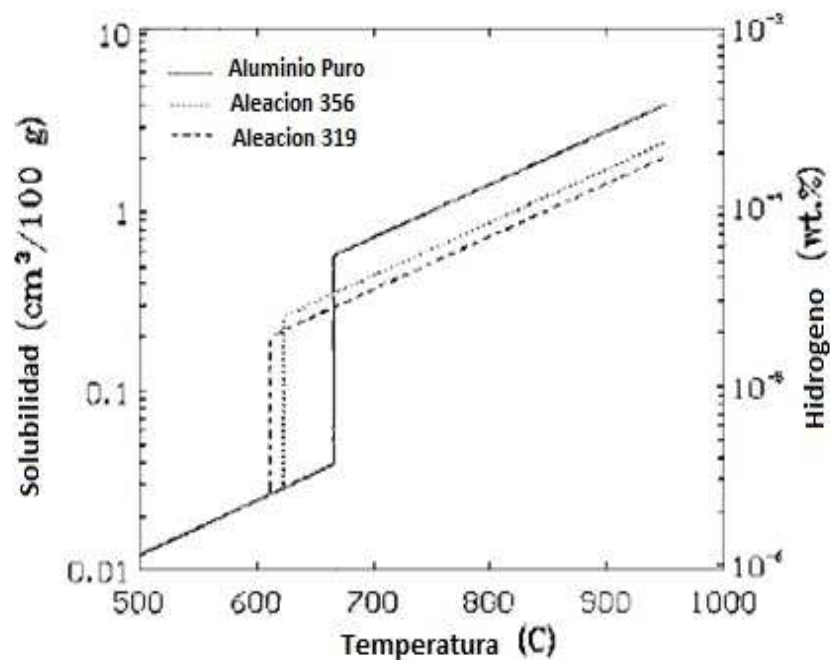


Figura 2.1.- Solubilidad del hidrogeno en el aluminio a una atmosfera [Totten²]

La macroscopía con cavidades de encogimiento grandes (rechupes) son normalmente asumidos que se deben a la contracción y son asociados con un defectuoso sistema de alimentación y la incapacidad del metal liquido de la aleación a fluir alrededor de regiones solidificadas ⁽²⁾.

2.1.2 TIPOS DE POROSIDAD

La porosidad es un defecto intrínseco a las piezas coladas de aluminio y es la presencia de cavidades pequeñas o grandes, que tienen su origen en el proceso de fusión (colado, solidificación); la influencia de los materiales (arena de molde, mezcla de moldeo del noyo, materiales de carga); o según el fenómeno que produce la formación (solubilidad gaseosa, contracción) perjudicando así la ductilidad y su acabado superficial (más permeable) ⁽²⁾.

El estudio de la porosidad se basa atendiendo a estas causas:

- Porosidad causada por efectos de la contracción.
- Porosidad causada por la presencia de gases.

La porosidad causada por contracción puede reducirse con el uso de enfriadores metálicos internos o externos, aumentando el gradiente de

temperaturas. En el caso de gases, estos pueden ser sacados del metal fundido mediante lavados con un gas inerte o fundiendo y vaciando en vacío.

2.2 ANÁLISIS DE LA POROSIDAD CAUSADA POR EFECTOS DE LA CONTRACCION Y PARTÍCULAS NO METÁLICAS.

2.2.1 POROSIDAD DE CONTRACCIÓN

Es la acumulación de pequeños poros de forma irregular, los cuales se forman en la pieza fundida como resultado de la contracción volumétrica al no haber afluencia del metal líquido. La porosidad de contracción es característica para las aleaciones de amplio rango de solidificación (el punto en el cual la aleación, la misma que no solidifica a temperatura constante sino en un intervalo de temperatura comprendido entre $T_{líq.}$ y $T_{sol.}$, cristaliza), tiene forma esférica alargada e irregular. Se presenta en grupos donde se distribuye en forma difusa, axial y local figura 2.2 ⁽²⁾.

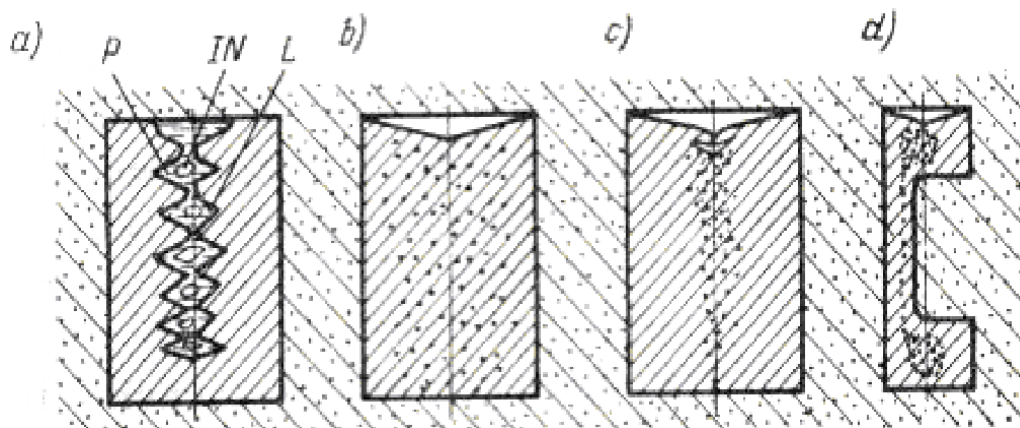


Figura 2.2.- Esquema de los diferentes tipos de porosidad debido a la contracción a) formación de poros, b) porosidad difusa c) porosidad axial, d) porosidad local [Totten²].

Una aleación fundida exhibe tres diferentes fases de contracción, en función de su temperatura y volumen figura 2.3.

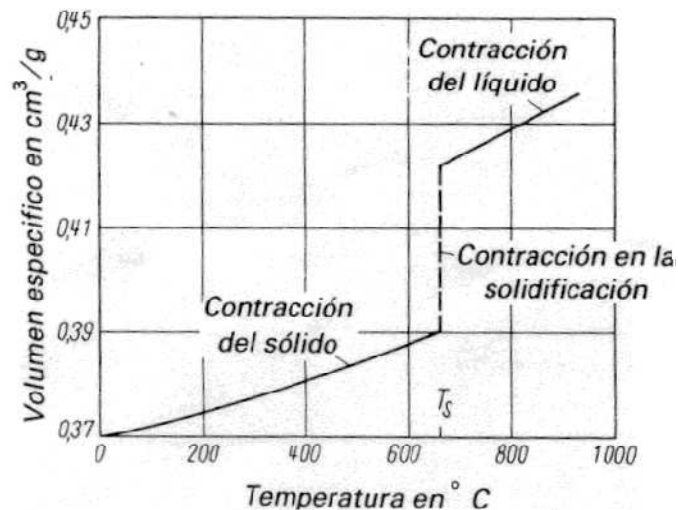


Figura 2.3.- Contracción debido a diferentes fenómenos de solidificación [Hufnagel¹].

La primera fase (contracción líquida) no tiene efecto importante en la fundición, y se lo nota solo como una reducción en el peso de el líquido existente en el sistema de alimentación; la contracción durante la solidificación (segunda fase) es la causa de la mayoría de los problemas y es debido al cambio de una estructura que se encuentra al azar desde una zona líquida, hasta una estructura sólida mas compacta. Las dos primeras contracciones, la líquida y la de solidificación, pueden ser compensadas por una alimentación líquida desde el montante o mazarota, la contracción durante la solidificación puede producir porosidades en las ultimas partes en solidificar; por otro lado la contracción solida (tercera fase) produce una ligera disminución de las dimensiones de la pieza. La Figura 2.4 muestra como las cavidades de contracción pueden ser formadas cuando se tiene el diseño de un sistema de alimentación defectuoso.

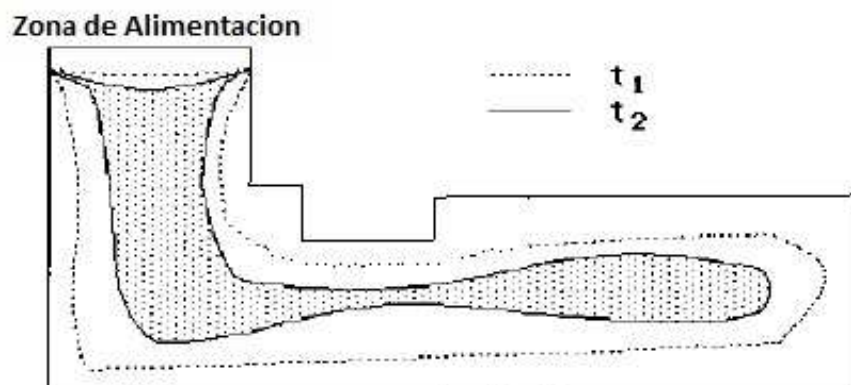


Figura 2.4.- Formación de cavidades de contracción debido a un mal diseño del sistema de alimentación [Totten²].

En esta figura se asume que la movilidad de la interface sólido-liquido es la misma en todas las direcciones (t_1), pero con el paso del tiempo (t_2), un diseño defectuoso permitirá un contacto entre las interfaces en movimiento lo cual resultaría en metal líquido aislado desde el alimentador; este líquido solidifica primero, y dejara atrás una serie de cavidades ⁽²⁾.

Los poros por contracción se desarrollan cuando el flujo de metal fundido está bloqueado en la zona interdendrítica. El tamaño de la porosidad de contracción a menudo depende de la tasa de solidificación, las dendritas son más grandes con solidificación lenta. La forma de los poros de contracción puede también ser alargados por la presencia de gas atrapado ⁽²⁾.

La porosidad macroscópica degrada las propiedades mecánicas debido a que disminuye el área de la sección transversal y se incrementan los efectos de los esfuerzos internos y son sitios de inicio de fracturas. La macroporosidad puede disminuir la funcionalidad y la apariencia si ocurre en una superficie crítica o si la pieza es posteriormente maquinada.

2.2.2 CONTRACCIÓN.

Se entiende por contracción la que se produce de forma lineal en las piezas coladas una vez que se ha terminado la solidificación. Se da en función de la diferencia de dimensiones entre la pieza fundida y el molde, expresada en tanto por ciento. En las aleaciones de aluminio la contracción se halla entre el 1,25% y el 1,40%; en el aluminio puro 1,75%. Con frecuencia en la pieza fundida la contracción suele ser considerablemente menor, debido a los obstáculos que aparecen como consecuencia de los cambios bruscos de forma y sobre todo a causa de los machos ⁽¹⁾.

La contracción depende de la composición de la aleación, de las condiciones de solidificación y del procedimiento de colado. Las dimensiones debidas a la contracción, que aparecen en la práctica y que deben ser tenidas en cuenta al fabricar el molde y el modelo están contenidas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Datos físicos y técnicos, en cuanto a la colada, de aleaciones de aluminio para moldeo.

Símbolo	Densidad ¹⁾ Kg/dm ³	Intervalo de solidificación	Temperatura de colada ²⁾ °C	Contracción de la fundición %			Colabilidad ⁴⁾ relativa
				en arena	en coquilla	inyectada ³⁾	
Aleaciones para uso general							
G- AlSi12	2.65	575-585	680-750	1.1			1
G-AlSi12(Cu)	2.65	570-585	680-750	1.1			1
G-AlSi10Mg	2.65	575-620	700-750	1.1-1.2	0.5-0.8	0.5-0.8	1
G- AlSi10Mg(Cu)	2.65	570-620	680-750	1.1-1.2	0.5-0.8	0.5-0.8	1
G-AlSi8Cu3	2.75	510-610	690-740	1-1.1			1
G-AlSi6Cu4	2.75	510-620	690-741	1-1.1			2
Aleaciones para usos especiales							
G- AlSi5Mg	2.7	560-630	680-720	1.1-1.5	0.8-1	0.5-0.8	3
G- AlMg3	2.7	580-650	700-740				4
G- AlMg3Si	2.7	580-650					3
G- AlMg3Cu	2.7	580-650	680-730				4
G- AlMg5	2.6	560-630	680-740				4
G- AlMg5Si	2.6	560-630					3
GD- AlMg9	2.6	510-620	600-650				3
G- AlMg10ho	2.6	510-610	700-750				4
Aleaciones con alta resistencia							
G- AlSi9Mg	2.65	550-610	680-750	1	1	0.8	1
G- AlSi7Mg	2.7	550-625		2	1	0.8	2
G- AlCu4Ti	2.75	550-640		4	1.4	1	4
G- AlCu4TiMg	2.75	540-640		4	1.4	1	4

1) La densidad depende de la composición de la aleación dentro de las tolerancias, la conductividad calorífica depende además

de la estructura, la cual, a su vez está influenciada por el método de colado, el espesor de paredes y el tratamiento térmico

2) Los datos son para fundición en arena; por término medio para fundición en coquilla, las temperaturas mínimas se elevan

unos 20°C. Se tiende en general a tener una temperatura de colada lo más baja posible compatible con una elevada nucleación.

3) Los datos valen para máquinas de inyección a presión, de cámara fría

4) 1 Excelente, 2 muy bueno, 3 bueno, 4 suficiente

Si la contracción encuentra fuerte obstáculo hasta el punto de que las fuerzas que surgen sobrepasen a los valores de resistencia y elasticidad del material

fundido, aparecen grietas por contracción. Un buen sistema de alimentación puede contrarrestar estos defectos. La contracción se la puede evaluar ya sea como contracción lineal o como contracción volumétrica, es función de la temperatura del metal al momento de ser colado y de su coeficiente de contracción.

$$\varepsilon L = \frac{L_m - L_p}{L_p} = \alpha(T_c - T_a) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$\varepsilon V = \frac{V_m - V_p}{V_p} = \beta(T_c - T_a) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

L_m = dimensión lineal del molde de fundición

L_p = dimensión lineal de la pieza colada a temperatura ambiente.

V_m = volumen del molde

V_p = volumen de la pieza colada a temperatura ambiente

α = Coeficiente de dilatación lineal

β = coeficiente de dilatación volumétrica

εL = contracción lineal

εV = contracción volumétrica

T_c = temperatura de colado en el molde

T_a = temperatura ambiente

2.2.2.1 Rechupe interno.

El rechupe interno es regularmente un vacío grande formado durante la solidificación de la fundición. Este efecto ocurre cuando el suministro de metal fundido alimenta una región del molde que se está llenando y es incapaz de fluir lo suficiente como para compensar la contracción de solidificación de la aleación. Tal efecto ocurre por zonas calientes en la pieza fundida que se

enfrian más lentamente y por consiguiente cortan el suministro de metal fundido ⁽²⁾.

2.2.2.2 Junta fría

Como el metal fundido llena la cavidad del molde, el flujo del líquido a menudo se divide en dos o más corrientes que fluyen alrededor del centro y otros obstáculos. La junta fría ocurre cuando una porción del flujo de metal se junta pero no se funde completamente. La falta de fusión es causada por un enfriamiento prematuro. La oxidación de las superficies del flujo puede también generar una fusión incompleta ⁽²⁾.

2.2.2.3 Grietas en caliente

Las grietas en caliente es una separación de metal que aparece como una rasgadura o raja. Ocurre cuando se da en el molde la contracción natural durante la solidificación y enfriamiento de la fundición en piezas de grandes espesores. Las paredes de los moldes inflexibles disminuyen la contracción de la fundición y producen esfuerzos de tensión (superficial) en la fundición ⁽²⁾.

Las rasgaduras o agrietamientos ocurren donde los esfuerzos de tensión supera la fuerza de solidificación. Evitar este efecto es complicado por el hecho de que la solidificación de la aleación es más fuerte en el enfriamiento. Especialmente sensibles son las aleaciones de AlMg, AlMgZn y AlCu. El peligro de las grietas térmicas se puede disminuir con un cuidadoso tratamiento de la colada así como con la finura del grano. También por un diseño favorable de la pieza colada, evitando cambios bruscos de secciones delgadas a gruesas, así como acumulaciones de material. Además pueden ser muy útiles las medidas que se adopten sobre los alimentadores y que lleven a una solidificación dirigida, así como a un control de la temperatura durante la solidificación (enfriadores, refrigeración, calefacción, aislamiento, etc.) o mediante moldes y machos poco apisonados ⁽¹⁾.

2.2.3 INTERACCIÓN DE LA GEOMETRÍA, MATERIAL Y PROCESOS

2.2.3.1 Comportamiento en la alimentación

Se entiende por alimentación el transporte del metal líquido o pastoso hacia el interior de la pieza de fundición que se va a solidificar, de modo que se asegure una solidificación dirigida y continua de la colada hasta formar una pieza homogénea. El comportamiento en la alimentación está influenciado principalmente por la morfología de la solidificación. Un buen comportamiento en la alimentación significa pequeña porosidad de contracción, la capacidad de alimentación se puede medir mediante ensayos de fluidez en un molde especial (figura 2.5) ⁽¹⁾.

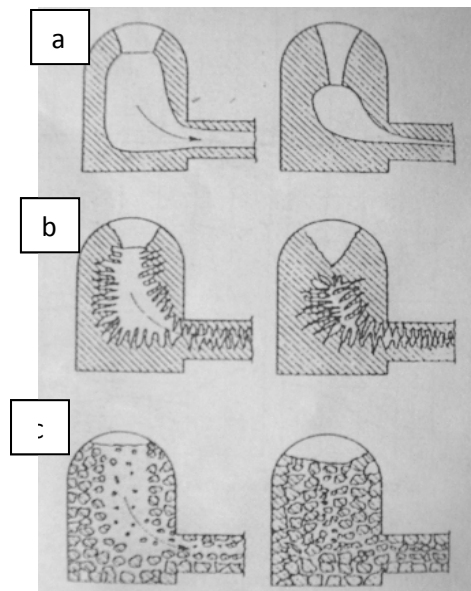


Figura 2.5.- Alimentación con una solidificación: a) de paredes lisas, b) de paredes rugosas a paredes esponjosas y c) de aspecto pastoso, en dos instantes consecutivos (según Paterson y Engler) [Hufnagel¹].

2.2.3.2 Tendencia a la formación de rechupes

El volumen específico del aluminio es, igual que en todos los metales de fundición, mayor en estado líquido que en sólido (figura 2.6). Al solidificarse y luego enfriarse tiene lugar un déficit de volumen; la figura 2.6 muestra este aspecto. Hay que distinguir entre macrorechupes o rechupes gruesos (como rechupes internos o externos), microrechupes o rechupes finos y zonas hundidas ⁽¹⁾.

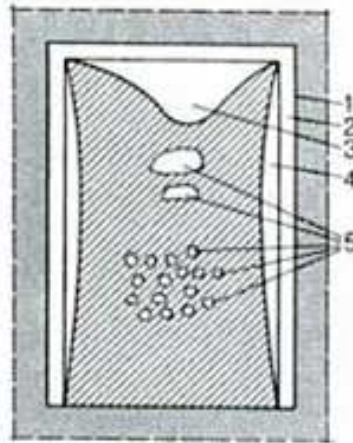


Figura 2.6.- Probeta de forma rectangular para la determinación del déficit de volumen; la distribución de rechupes es específica para las condiciones de solidificación de cada molde probeta. 1 hueco del molde (V_{molde}); 2 contracción cubica (V_{ks}); 3 volumen del Macrorechupe (V^M); 4 volumen de la zona de incidencia (V_E); 5 déficit interno (V_t). [Hufnagel¹].

2.2.3.2.1 Macrorechupe

Es un tipo de rechupe interno, de gran tamaño, mayor que 2 mm de diámetro, se presenta en las partes superiores de las zonas de mayor volumen de la pieza colada o junto al noyo, no tiene comunicación con el exterior.

2.2.3.2.2 Microrechupe

Es una cavidad pequeña, varía con el tamaño de la sección, parece estar separando los granos del metal, puede ocupar en área de 2 mm de diámetro. Tiene forma esférica alargada e irregular. Se presenta en grupos donde se distribuye en forma difusa, axial y local.

En el aluminio puro y aleaciones con composición eutéctica, por ejemplo AlSi12, estas aleaciones con bajo intervalo de solidificación, en forma claramente pastosa, tienen fuerte tendencia a formar microrechupes (figura 2.7) ⁽¹⁾; por otro lado metales y aleaciones con muy pequeño intervalo de solidificación pueden presentar una estructura dendrítica columnar con tendencia a la formación de rechupes (CAMPBELL, J, 1991 e RAVI, K.R. et al, 2007)

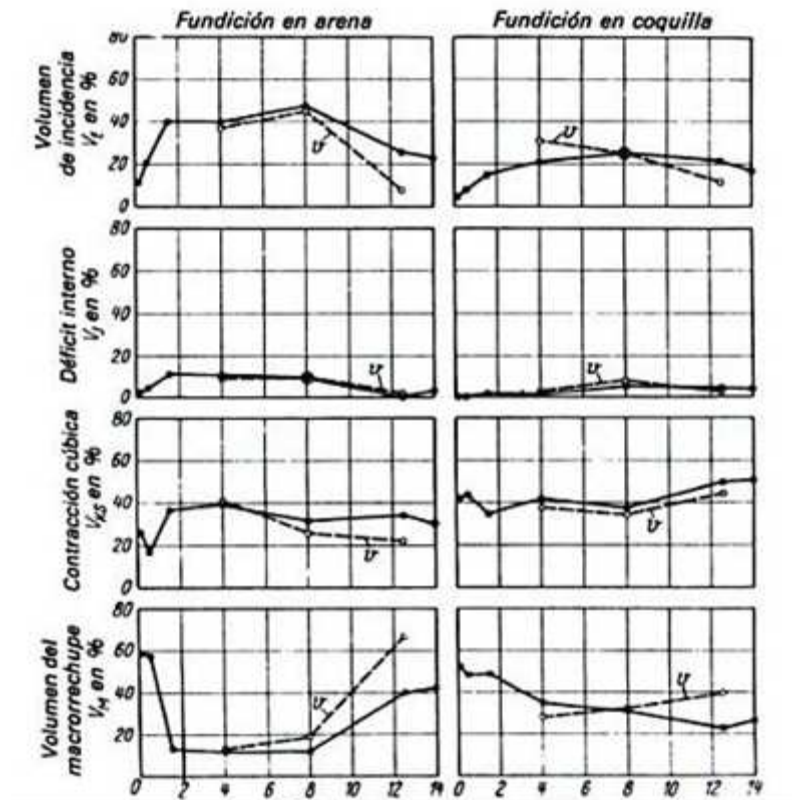


Figura 2.7.- Distribuciones del déficit de volumen térmico en la fundición de AL-Si según el contenido de silicio en arena y coquilla; los fundidos finos están a trazos y caracterizados por "v" (según Patterson y Engler)

Los esfuerzos técnicos tienen por objetivo trasladar la mayor parte de las deficiencias internas de volumen a la cavidad de vertido (o mazarota) de la pieza colada. Para ello es fundamental conseguir una solidificación dirigida, fuera de la pieza colada, o sea, en el bebedero o cavidad de vertido. Esta es la condición esencial para obtener una estructura de colada densa, de grano fino y valioso ⁽²⁾.

2.2.3.3 INFLUENCIA DE LA COLADA

2.2.3.3.1 Características de la colada

Las características de la colada sirven para conocer el comportamiento de un material durante todo el curso de llenado del molde y de la solidificación, es decir, el paso del estado líquido al sólido. Para la calidad de la pieza fundida son fundamentales, junto a la elección del material adecuado, el proceso de colado y el molde, las características de la colada y los procesos que tiene lugar durante la solidificación. Una dirección conveniente del proceso de colado y un tratamiento adecuado de la colada así como el mantenimiento de

determinadas condiciones que establecen la técnica de la fundición, permite evitar ampliamente todo tipo de defectos ⁽¹⁾.

En la tabla 2.1 están recopilados muchos datos importantes desde el punto de vista de la técnica de la colada.

2.2.3.4 Desarrollo de la solidificación

La morfología de la solidificación informa sobre la manera en que se originan y forman los cristales que crecen a partir de la colada. En la solidificación exógena (dirigida desde fuera) comienza el crecimiento de los cristales en la superficie límite del metal hacia el molde, si se forman los cristales en el interior del caldo, se dice en este caso que es una solidificación endógena. Los tipos posibles de solidificación de las aleaciones de aluminio influyen con prioridad en las características del fundido. Alternando las condiciones de enfriamiento en el molde se puede influir sobre el curso de la solidificación de tal manera que, por ejemplo, en un enfriamiento rápido (fundición en coquilla), puede tener lugar un desplazamiento del tipo de solidificación, de aspecto esponjoso al rugoso. Las aleaciones que se solidifican en forma pastosa tienen tendencia, cuando el enfriamiento es rápido, a la formación de un tipo endógeno de aspecto de caparazón (figura 2.8) ⁽¹⁾.

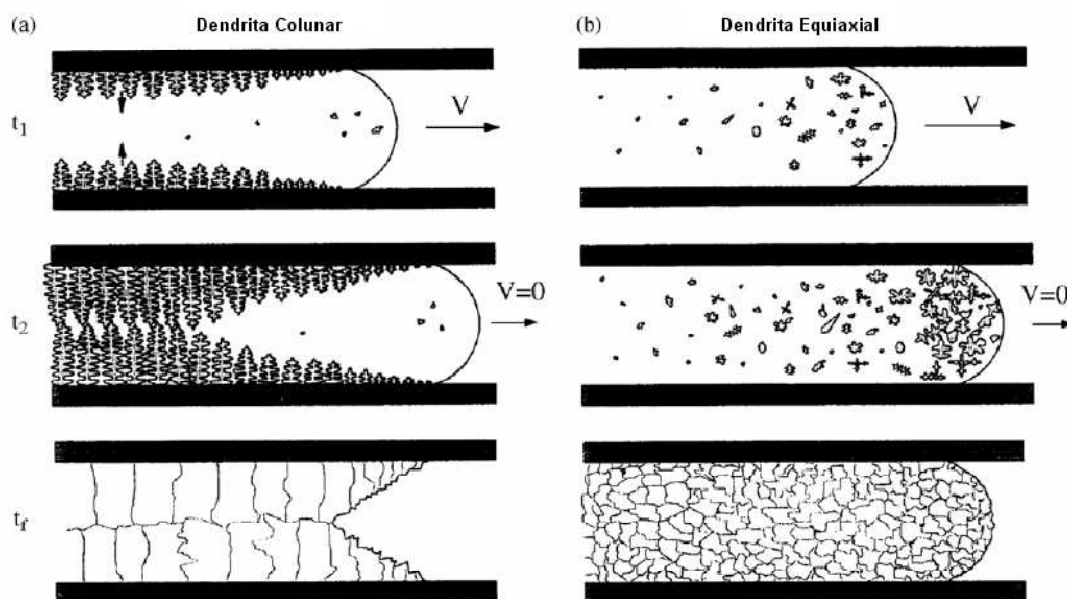


Figura 2.8.- Representación esquemática de los principales tipos de solidificación (a) columnar y b) equiaxial (DI SABATINO M.; ARNBERG L., 2005).

2.2.3.4.1 Solidificación dendrítica (DENDRITAS)

La estructura dendrítica es característica de todas las fundiciones de aleaciones de aluminio. La figura 2.9 ilustra el crecimiento de dendritas desde un estado de fundición puro con un componente, estos resultados fueron obtenidos para condiciones de bajo enfriamiento ⁽³⁾.

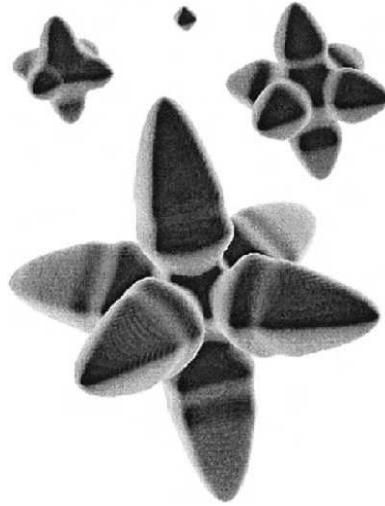


Figura 2.9.- modelo de campo de fase 3D de solidificación dendrítica. [Warmuzek³].

Las Micrografías de la figura 2.10 muestran una variedad de tales estructuras en arena, moldes permanentes, y fundición perdida ⁽¹⁰⁾.

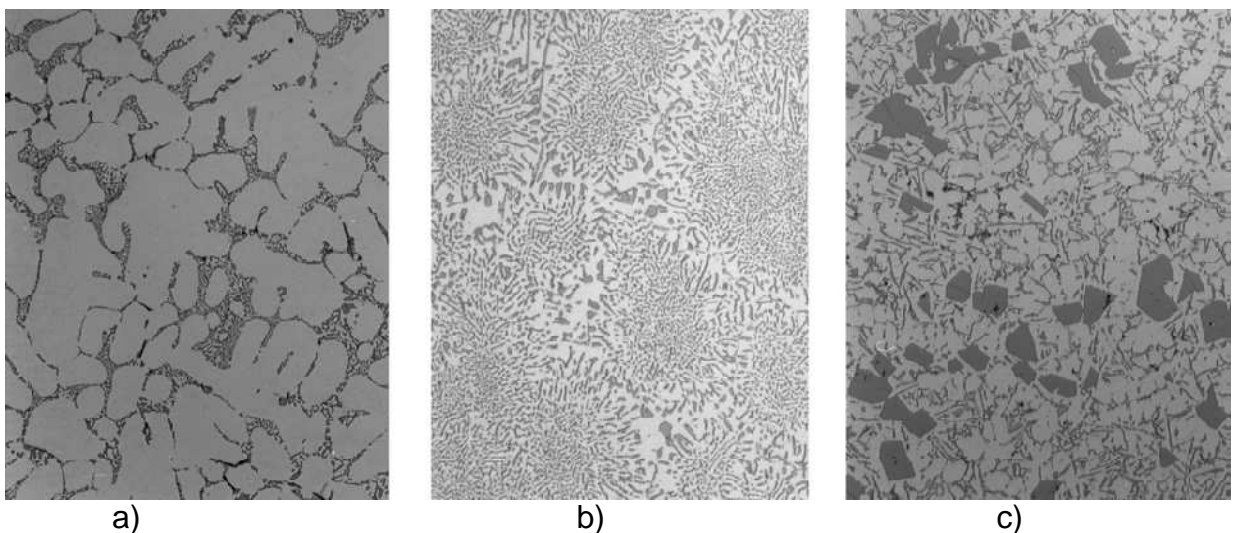


Figura 2.10.- Estructuras dendríticas. a) aleaciones A240-F fusión en molde permanente. La microestructura contiene huecos largos de contracción (negro) y redes interdendríticas de AlCuMg (Jaspeado). b) fundición continua, enfriamiento rápido produce finos espaciamientos de brazos interdendríticos aleación 3003. c)

aleación A332.T551, fundición en arena y envejecimiento artificial. Las partículas de NiAl_3 son mas masivas (partículas oscuras) [Metals Handbook V.7¹⁰].

Se han establecido en diferentes estudios que el espaciamiento entre brazos dendríticos adyacentes decrece con el incremento de la tasa de enfriamiento (decrece el tiempo de solidificación), figura 2.11; con enfriamiento lento cada dendrita desarrolla una composición uniforme, mientras que a velocidades mayores se forman dendritas nucleadas (superficie con concentración mas alta de elementos de aleación que el núcleo de la dendrita, por microsegregación) ⁽¹⁰⁾.

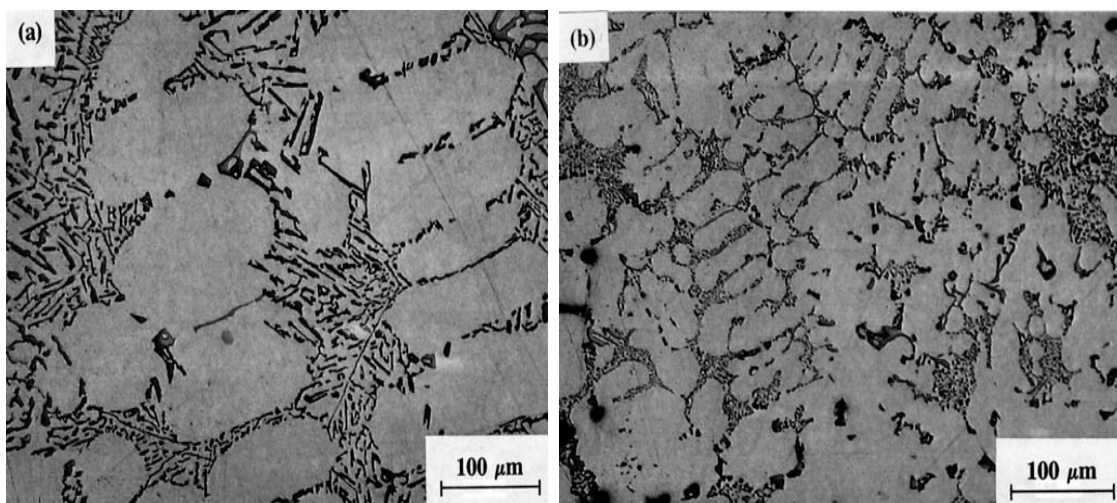


Figura 2.11.- Micrografías de dendritas obtenidas desde muestras solidificadas en tazas (a) baja y (b) alta [Metals Handbook V.7¹⁰].

La influencia del contenido de soluto (silicio, cobre, manganeso) no es bien definida sin embargo en general arriba de la composición eutéctica, el efecto de incrementar el soluto para una tasa de solidificación constante, es el decremento de los brazos dendríticos espaciados, como se muestra en la figura 2.12 ⁽¹⁰⁾.

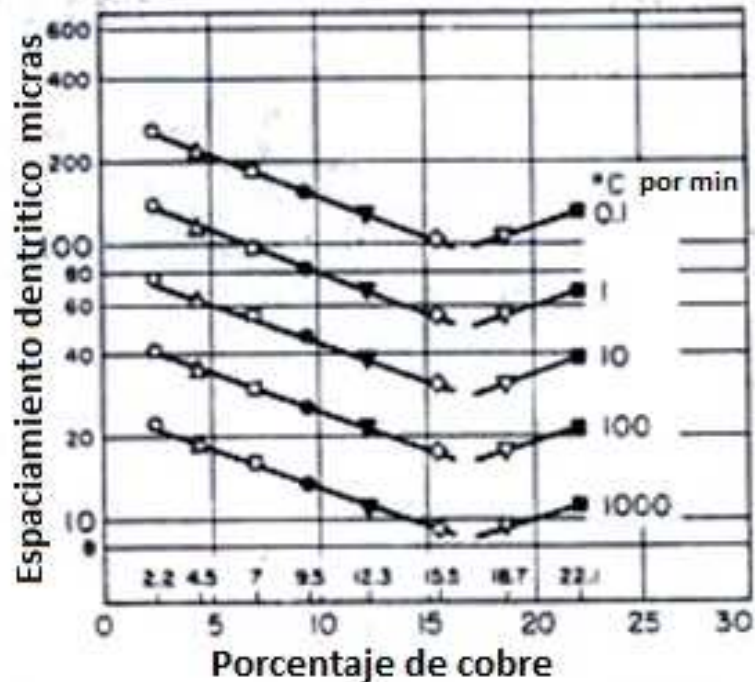


Figura 2.12.- Efecto del contenido de soluto (cobre) en el espaciamiento de brazos dendríticos secundarios en ocho aleaciones de aluminio, trazados para cinco diferentes tasas de enfriamiento [Metals Handbook V.7¹⁰].

2.2.3.5 Fluidez

Para minimizar considerablemente los efectos del flujo del fluido, la fundición debe ser vertido lentamente, desafortunadamente esto da tiempo al metal fundido para oxidarse e incrementar el tiempo del ciclo del proceso. Las interacciones indeseables del flujo de la colada se reducen o eliminan por un diseño adecuado de la geometría de la pieza y el sistema de alimentación. La fluidez da la capacidad de un caldo metálico de fluir por un molde hueco hasta que se detiene el flujo metálico a causa de la solidificación progresiva. La influencia principal sobre la fluidez la dan el tipo de solidificación de la aleación y el contenido calorífico del caldo, los valores de fluidez dan también una idea sobre la pureza del caldo, así por ejemplo, el contenido de óxido influye negativamente en la fluidez. Una elevada fluidez permite obtener piezas compactas y evitar la formación de rechupes y otros defectos en las piezas coladas. Para cuantificar la fluidez se mide la longitud (cm) que recorre un flujo metálico en un molde patrón. Con frecuencia se utiliza, aun hoy, la forma tradicional en espiral (figura 2.13). La figura 2.14 presenta la distinta fluidez de aleaciones de aluminio corriente ⁽¹⁾.

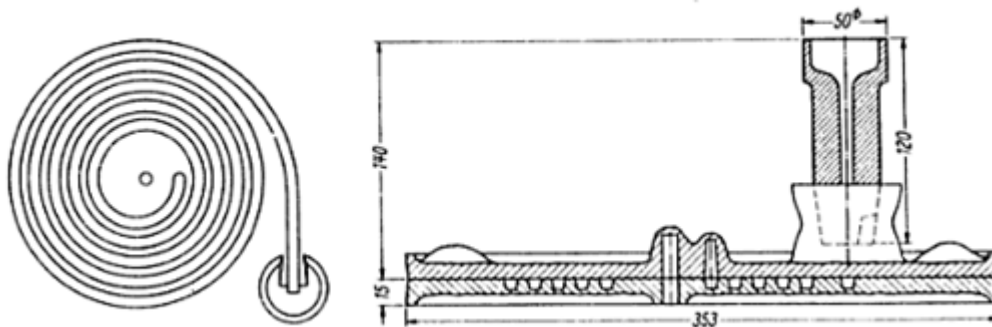


Figura 2.13.- Forma espiral de cascara para medir la fluidez de aleaciones para colada (según Schneider) [Hufnagel¹].

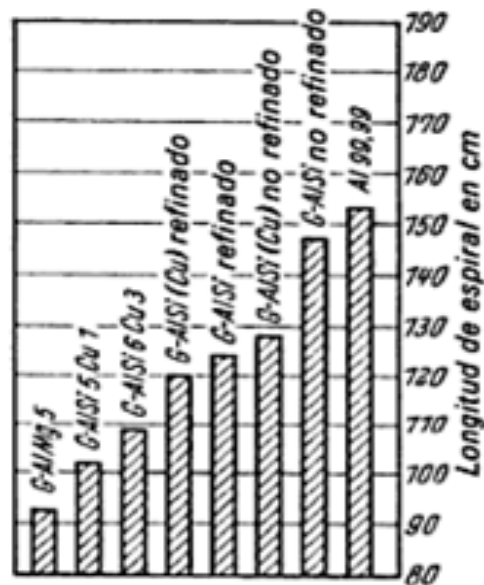


Figura 2.14.- Fluidez de aleaciones de aluminio para moldeo a 750°C (según Schneider) [Hufnagel¹].

2.2.3.5.1 Influencia de la temperatura en la fluidez

La pérdida de calor que se produce en el molde disminuye la temperatura del metal líquido, y si esta no es lo suficientemente elevada, en los canales se puede obstruir el flujo de metal cuando el frente de solidificación avanza más rápidamente. Por tanto, la pérdida de calor en un metal líquido disminuye la fluidez, esto es más drástico para temperaturas más bajas del punto de fusión, pues si el flujo de metal se obstruye no se puede compensar la contracción en

estado líquido que se inicia en el mismo momento que se comienza a colar y con ello las condiciones para la formación de rechupes será más favorable ⁽¹⁾.

Una elevada temperatura de sobrecalentamiento favorece la oxidación y la formación de películas superficiales alrededor del metal fundido, especialmente en el aluminio que se oxida fácilmente al ponerse en contacto con la atmosfera

La figura 2.15 presenta la dependencia de la fluidez de la temperatura de la colada para 3 aleaciones diferentes de AISi ⁽¹⁾.

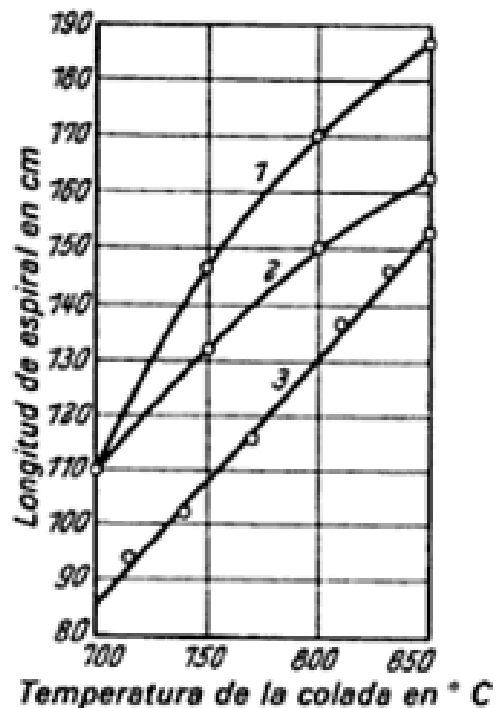


Figura 2.15.- Fluidez de distintas aleaciones en función de la temperatura para 1 AISi12; 2 AISi6Cu3 (0.1%Mg); 3 AISi6Cu3 (0.3%Mg) [Hufnagel¹].

2.2.3.5.2 Formación de escoria

La escoria comúnmente está formada de compuestos no metálicos líquidos (usualmente fundidos de refractarios), productos de aleaciones, y productos de óxidos. La escoria propiamente dicha se refiere a compuestos no metálicos producidos primeramente por la reacción del metal fundido con el oxígeno. Las aleaciones de aluminio son altamente sensibles a la formación de óxidos ⁽²⁾.

2.2.3.5.3 Oxidación de la colada

El aluminio y sus aleaciones se recubren ya a la temperatura ambiente con una delgada capa de óxido, debido a su gran afinidad con el oxígeno, haciéndose la capa cada vez más gruesa con el aumento de la temperatura. Sobre la superficie de la colada se forma una superficie cerrada de óxido de aluminio, que protege al metal fundido de oxidación posterior. Teniendo en cuenta que entre el óxido y el metal existe solo una diferencia de densidades muy pequeña, quedan partículas (cascarillas, hilos) en suspensión en el caldo que no emergen ⁽¹⁾.

El grado de oxidación durante el proceso de fusión depende de la composición de la aleación, de la temperatura y tiempo de fusión, del tipo de horno y de su calentamiento, tamaño de la superficie en contacto con el aire. La oxidación durante el proceso de fusión y por lo tanto, la pérdida de metal que se produce, se designa como residuos calcinados incluyéndose en ella solamente la merma por impurezas adheridas a los componentes de la aleación así como los residuos calcinados por volatilización de los mismos. Según los tipos de material que se adicionan, el tipo de horno y la forma de trabajo, se tienen los siguientes valores orientativos para los residuos calcinados:

Lingotes	0,3 hasta 2,0%
Material de recuperación, grueso	0,5 hasta 2,0%
Material de recuperación fino	1,0 hasta 5,0%

Durante el trasvase del metal en hornos de conservación de calor y de fundición, así como al verterlos en el molde, aumenta el contenido de óxidos de la colada por su mayor contacto intenso con el aire. Los óxidos contenidos en la colada listo para verter influyen de modo sensible en las características del vertido, disminuyen la capacidad de llenado del molde y la fluidez y pueden perturbar, especialmente cuando se producen acumulaciones, el deseado curso de la solidificación y el efecto beneficioso de la mazarota. Las aleaciones de aluminio que contienen Zinc y magnesio, así como las que contienen sodio, son especialmente sensibles a la oxidación ⁽¹⁾.

2.2.3.6 Tecnología de la fusión.

El material de partida debe precalentarse o al menos debe estar seco. No es aconsejable la extracción del metal, para fundir y reponer lo extraído en el mismo horno, debido a la incorporación de impurezas no metálicas, así como por las oscilaciones de temperatura que se producen. Para evitar una elevada absorción de hidrógeno y óxidos deberá cuidarse de todo sobrecalentamiento innecesario durante la fusión. Es necesario un control permanente de la temperatura, lo cual ayuda a obtener una calidad uniforme del fundido.

Se deben evitar las variaciones en la composición de la aleación. Cuando se desee cambiar el tipo de aleación, como por ejemplo, en el cambio a aleaciones de alta resistencia, libres de cobre o de silicio, se debe lavar el crisol previamente fundiendo material puro, aunque mejor sería utilizar un crisol nuevo. Para evitar una absorción de hierro indeseada se deben alisar los aparatos utilizados y eliminar el empleo de alambres de núcleos y clavijas de moldes, etc. que tengan hierro adherido ⁽¹⁾.

2.2.3.7 Limpieza de la colada

Es enormemente importante un tratamiento cuidadoso del fundido, ya que de este tratamiento depende de modo decisivo la fluidez, la capacidad de llenado del molde, la densidad y la estructura de la pieza.

La limpieza de la colada se ha de realizar inmediatamente antes del vertido. Puesto que un tratamiento de limpieza en el curso del proceso, realizado demasiado pronto, puede ser ineficaz debido a que durante el transporte, o en el trasvase de la colada vuelva a ensuciarse esta. El efecto de limpieza se basa en la acción de procesos físicos o químicos, o incluso, combinación de ambos. Un procedimiento que resulta eficaz es el tratamiento con gases del cual se hablara en el capítulo pertinente a la desgasificación ⁽¹⁾.

2.2.3.7.1 Tratamiento con fundentes

Los fundentes (sales) se usan tanto mas cuanto mas sucio o mas desmenuzado se encuentra el material de partida. Hacen además de "reguladores de secado" que emplean la espuma que cubre la superficie del baño y separan las gotitas de aluminio del material oxidado, aligerando así el

flujo conjunto. Un fundente eficaz debe poseer las siguientes características: baja viscosidad, insolubilidad en el aluminio, menor densidad que el aluminio, tensión de vapor lo mas baja posible a la temperatura de trabajo, ataque mínimo a las paredes del horno, al material del crisol y acción escorificante sobre las impurezas no metálicas. Los fundentes contienen con frecuencia componentes higroscópicos, debiendo conservarse en lugares secos ⁽¹⁾.

Según la forma de actuar y la composición, se pueden distinguir dos grupos de fundentes:

- Sales de cobertura
- Sales de limpieza

2.2.3.7.1.1 Sales de cobertura

Las sales de cobertura deben disminuir las pérdidas metálicas y sirven para evitar la oxidación y absorción de gases en caldos de bajo punto de fusión. Además, tienen la propiedad de retener el óxido de aluminio que flota en la superficie y separarlo ampliamente del metal que se le adhiere. Las sales de cobertura están formadas por cloruros y fluoruros de metales alcalinos mezclados con criolita. Especial importancia tienen el tratamiento con sales las aleaciones AlMg que contiene más del 3 al 4% de Mg. Estas aleaciones deben ser protegidas, además del oxígeno y el hidrógeno, también del nitrógeno del aire y de la atmósfera del horno, ya que el nitrógeno reacciona con el magnesio y forma nitruros. Para este fin se han desarrollado sales especiales que impide la inflamación de magnesio ⁽¹⁾.

2.2.3.7.1.2 Sales de limpieza

Las sales de limpieza o lavado sirven para la eliminación de las impurezas no metálicas existentes en el colado. Su acción debe atribuirse en la mayor parte a un efecto de flotación y también a reacciones químicas. Las mezclas constan, fundamentalmente, de cloruros de sodio y potasio junto con fluoruro sódico y potásico. Por su acción purificadora del caldo poco antes del vertido, mejoran esencialmente la fluencia en la operación de la colada. Estos fundentes son agregados en una proporción de 1 a 2% del peso del metal se los debe adicionar la mitad al comienzo de la fusión y el resto al final de misma.

La figura 2.16 representa la acción de un fundente sobre la capacidad de fluencia de una aleación AlMg ⁽¹⁾.

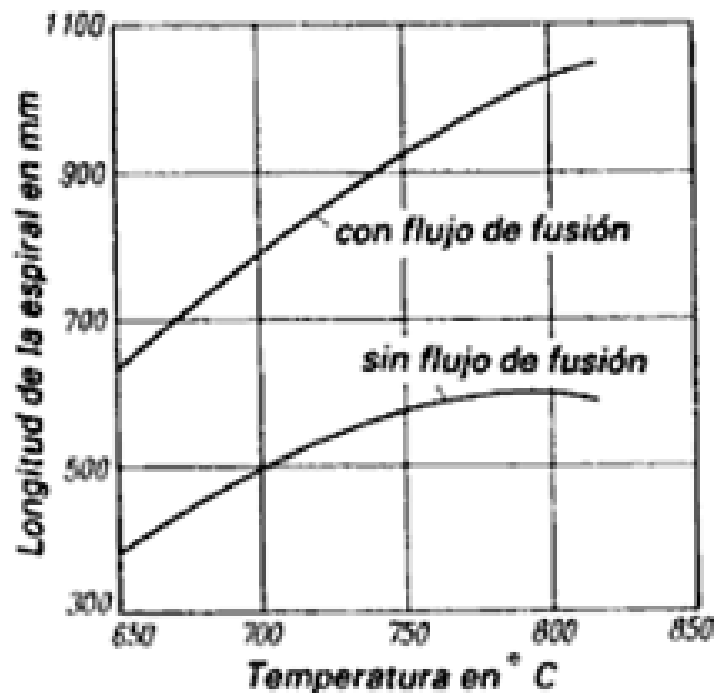


Figura 2.16.- Influencia de un tratamiento con flujo de fusión sobre la capacidad de fluencia de una aleación AlMg a temperatura constante en coquillas (según Irmann) [Hufnagel¹].

2.2.3.7.1.3 Tratamiento con compuestos que provocan desprendimiento de cloro

Los fundentes desgasificantes remueven el hidrógeno disuelto. Es común utilizar compuestos de cloro para la limpieza. Estos se reducen o descomponen por el aluminio formándose cloruro de aluminio, el cual se volatiliza o descompone, respectivamente. Se utiliza con mucha frecuencia el hexacloroetano (C_2Cl_6). Estas sustancias se encuentran en el mercado en forma de tabletas o cartuchos. Se debe tener cuidado que se encuentren siempre secos ⁽¹⁾.

2.2.3.7.2 Tratamiento con gases

El hacer pasar gas a través del metal líquido ha demostrado ser particularmente eficaz, debiendo distinguirse entre los gases con acción física de lavado (gases inertes) y aquellos en los que se produce una reacción química durante el tratamiento. Entre los primeros se encuentra el nitrógeno.

Al disminuir la presión parcial del hidrógeno durante su paso a través del metal líquido se elimina el hidrógeno del fundido. Simultáneamente se lavan los óxidos y otras impurezas no metálicas elevándolas a la superficie. El nitrógeno no es adecuado para las aleaciones de AlMg debido a la posible formación de nitruros, siendo mejor usar argón. Se utiliza también cloro como gas químicamente activo, el cual es mucho más activo que el nitrógeno, sin embargo por razones económicas, sanitarias (el cloro es venenoso) y también de tipo ecológico, se utilizan actualmente más bien mezclas de cloro y nitrógeno con aproximadamente 80-90% de nitrógeno ⁽¹⁾.

La figura 2.17 representa la manera de actuar de los gases lavadores, así como un esquema del tratamiento de eliminación. Un contenido final alcanzado de 0,1 a 0,15 cm³H /100g de metal, posibilita, en general, la consecución de piezas fundidas técnicamente libre de poros y cualitativamente buenas. La duración del tratamiento alcanza de 5 a 10 minutos para 300 Kg de fundido. El consumo del gas de desgasificación, según el contenido de hidrógeno del fundido no tratado y el estado final deseado, se halla aproximadamente entre el 0,2 y 0,5% en masa del fundido ⁽¹⁾.

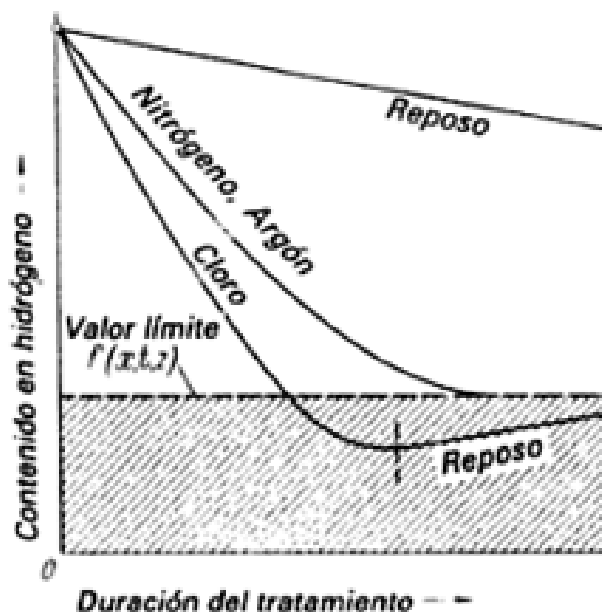


Figura 2.17.- Representación esquemática de la forma de actuar de diversos métodos de desgasificación, x condición atmosférica, t temperatura del metal, z composición del metal (según Hornung) [Hufnagel¹].

El valor del contenido de hidrogeno después de la fusión y la desgasificación depende, en primer lugar, de la aleación, también fuertemente del modo de calentar el agregado que se funde (figura 2.18) y de los procesos ulteriores de tratamiento del fundido (afino, reducción del tamaño de grano).

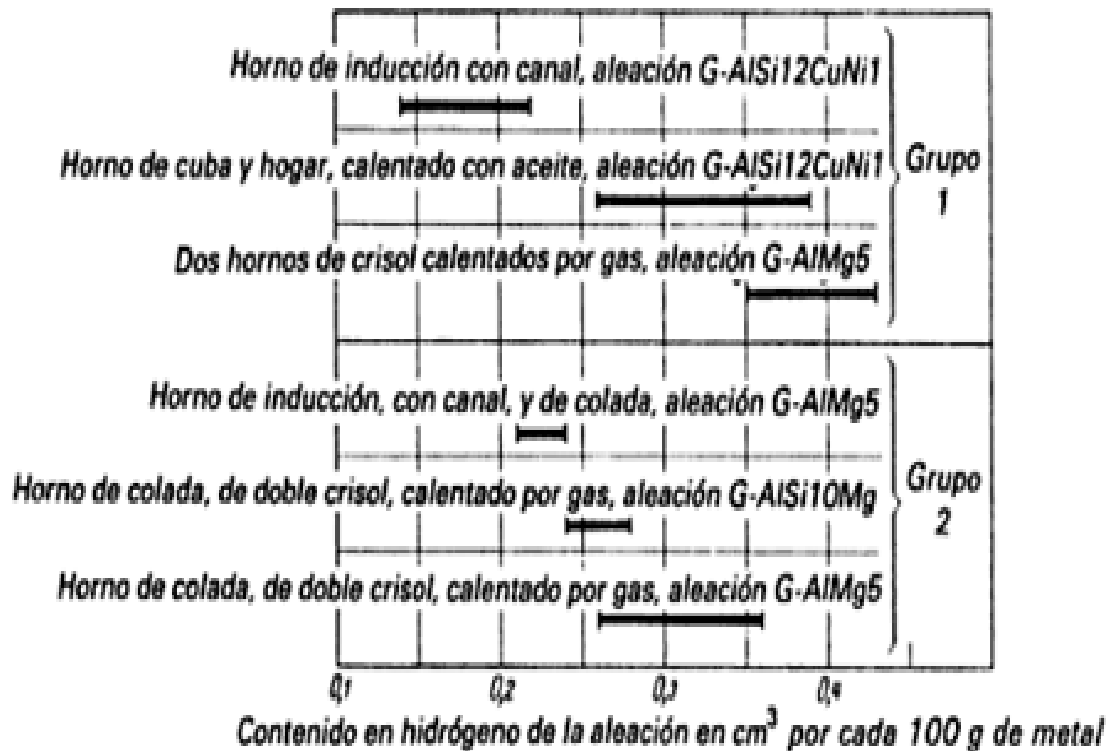


Figura 2.18.- Influencia de la clase de calentamiento de los hornos de prefusión y de fundición así como del tipo de aleación sobre el contenido de hidrogeno de la colada, grupo 1: fundido dispuesto para ser sangrado en hornos de prefundición antes del tratamiento de la colada, grupo 2: coladas desgasificadas y afinados de grano durante la elaboración en hornos para fundición en coquilla (según Nitsche) [Hufnagel¹].

2.2.3.7.3 Filtrado de la colada

Los óxidos y otras impurezas solidas se pueden separa del metal fundido por otra técnica conocida como filtración la cual no se analizara en el presente trabajo ⁽¹⁾.

2.2.4 INCLUSIONES NO METÁLICAS

2.2.4.1 Defectos metalúrgicos

Los defectos metalúrgicos incluyen inclusiones de partículas no metálicas, películas de oxido, y fases secundarias originadas durante la solidificación. Las inclusiones son agregados no metálicos insolubles que están suspendidos en

el aluminio líquido. Ellos podrían formarse durante la solidificación o antes de que empiece la solidificación, también en algunos procesos de moldeo perdido ellos podrían proceder de las paredes del molde y/o ser introducidos en otras formas durante el proceso de fundición. Las inclusiones actúan como puntos concentradores de esfuerzo y reducen las propiedades mecánicas. Pueden ser perjudiciales durante el maquinado pues desgastan las herramientas de maquinado y son defectos superficiales inaceptados ⁽²⁾.

2.2.4.1.1 Películas de oxido

Las películas de oxido, los cuales se forman en la superficie del metal fundido como en los flujos del sistema de alimentación y el llenado de la cavidad del molde, son similares a las inclusiones y son de particular interés en las fundiciones de aluminio. Si las películas se doblan sobre ellas mismas como un resultado de un flujo turbulento o “cascada” entonces los efectos pueden ser particularmente dañinos. La turbulencia ocurre cuando el metal fundido cae hasta un nivel más bajo durante el llenado del molde ⁽²⁾.

2.2.4.1.2 Intermetálicos

Las mas comunes fases intermetálicas encontradas en la fundición de aluminio están relacionadas con hierro el cual tiene solubilidad liquida limitada en el aluminio liquido ⁽²⁾.

De estas fases intermetálicas, la fase β -Al₅FeSi, es la mas perjudicial para las propiedades mecánicas, debido a que esta tiene una microestructura en forma de aguja, figura 2.19 y estas tienen una baja coherencia con la matriz de aluminio.

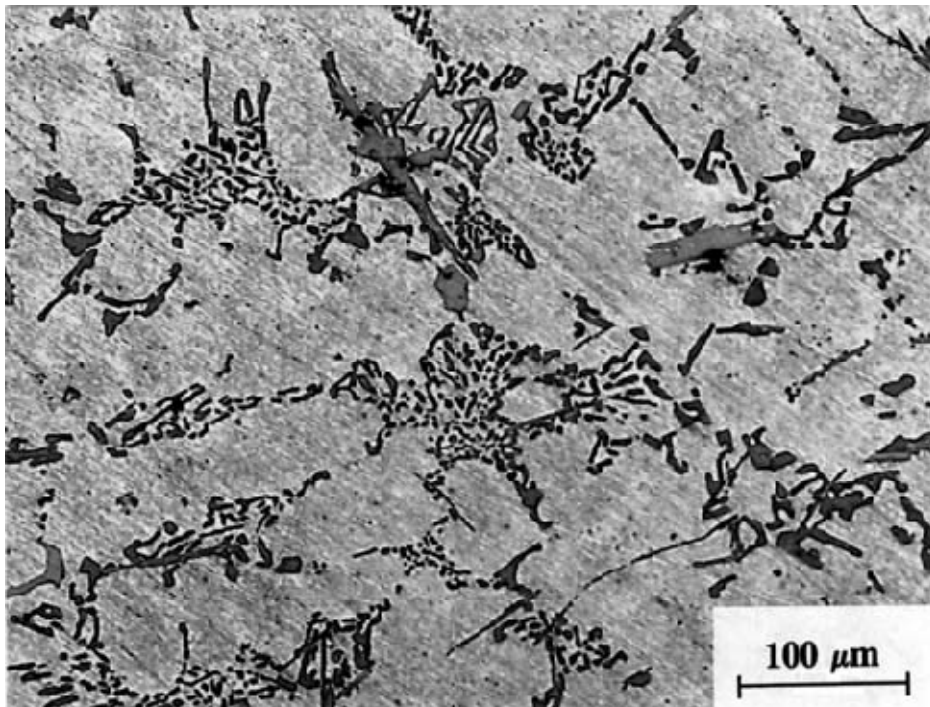


Figura 2.19.- Intermetálicos β -Al₅FeSi [Totten²].

La adición de magnesio transforma estos intermetálicos en una fase menos nociva α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂, este aspecto es comúnmente llamado como escritura china, figura 2.20.

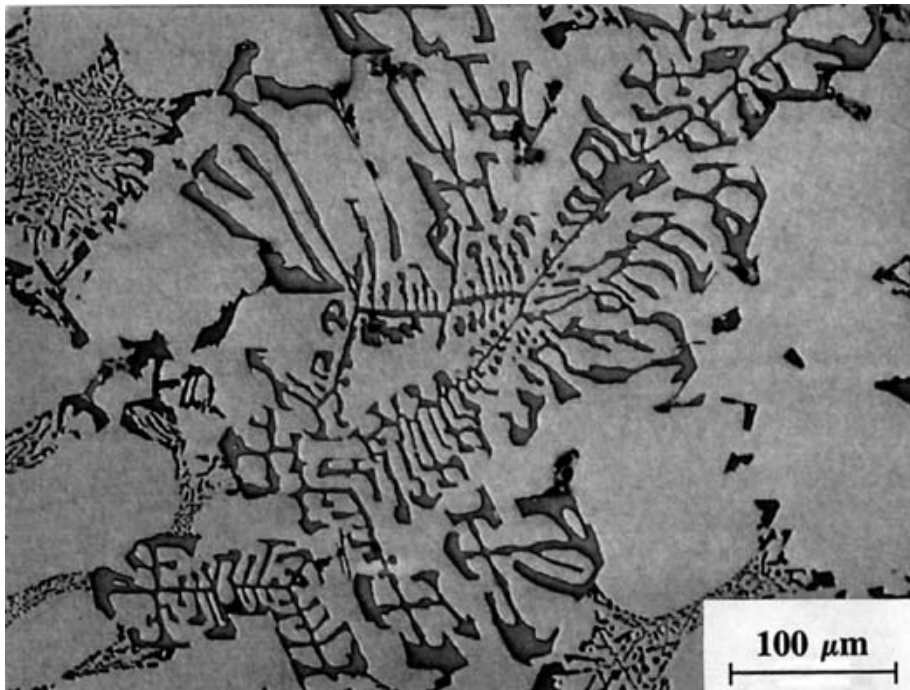


Figura 2.20.- Intermetalicos α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ [Totten²].

El inconveniente de la adición de manganeso es el incremento de la dureza y la cantidad de partículas intermetálicas para una cantidad de hierro dada; de

manera semejante el efecto positivo del manganeso en la modificación de la morfología intermetálica sirve para aumentar la resistencia a la propagación de grietas, es desplazado por el carácter quebradizo y el volumen de las partículas α ⁽²⁾.

Las fases intermetálicas pueden ser formadas en la fundición de aluminio en altas temperaturas, antes de la formación de las dendritas del aluminio, coincidiendo con la solidificación de la aleación, o a su vez estos pueden formar fases eutécticas complejas cuando la temperatura de solidificación es tan baja como 480°C. Un resumen corto de las fases interdendríticas encontradas en las aleaciones Al-Si se presenta en la tabla 2.2

Tabla 2.2.- Fases intermetálicas en aleaciones de aluminio silicio

Reacción	Fase
pre-dendrítica	$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$
post-dendrítica	$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_3-Al_5FeSi$
eutéctica	$Al_5FeSi-Mg_2Si$
post-eutéctica	$Al_5Mg_8Cu_2Si-CuAl_2$

La fase secundaria puede formarse como la fase de la aleación primaria, empieza el enfriamiento causando la permanencia del líquido hasta progresivamente concéntrese en varios solutos. Como las inclusiones y las películas de óxido las segundas-fases puede actuar como aumentadores de esfuerzo y pueden ser centros de grietas si tienen la forma y medida apropiada. Dos factores son conocidos para el control de la morfología y la naturaleza de los intermetálicos encontrados en las fundiciones de aluminio, ellos son la tasa de solidificación y la composición química, la tasa de solidificación ejerce un impacto directo en la cinética y la cantidad de fases ricas en hierro presente en una microestructura. Tazas bajas de enfriamiento favorecen la formación de agujas β , el cual está formado en planos cristalográficos bien definidos; considerando que tazas más altas tienden a favorecer las llamadas escrituras

chinas, resultados experimentales muestran que la transición entre fases α y β toman lugar con tasas bajas y cuando la cantidad de hierro es reducida. Los estudios realizados han demostrado que el control al paso de fases α y β es la cantidad de Fe, Mn, Cr, estos elementos aumentan la formación de la fase β , mientras Mn, and Cr contribuyen a las estabilización de las partículas α ⁽²⁾.

Una serie de guías pueden ser mencionadas para reducir los efectos perjudiciales de hierros intermetálicos ⁽²⁾:

- Mantener bajos niveles de hierro
- Mantener un ratio de Mn/Fe mas alto que 0,5
- Incrementar la tasa de solidificación y
- Reducir el grado de modificación eutéctica.

2.2.4.2 Inclusiones en el aluminio fundido

Las inclusiones típicas en el aluminio se muestran la tabla 2.3. Las principales inclusiones de partículas sólidas son compuestos no metálicos como óxido, carburo, sal y compuestos intermetálicos de alto punto de fusión como TiB_2 . La concentración de inclusiones en el aluminio usualmente está por debajo de 1ppm excepto Al_4C_3 en el proceso Hall-heroult cell, y TiB_2 cuando se los usa como afinador de grano. El efecto perjudicial de las inclusiones en las propiedades del aluminio aparece generalmente en tamaños más allá de 30 microns ⁽²⁾.

Las inclusiones de óxido más típicas de las aleaciones de aluminio se forman por Al_2O_3 , MgO o una mezcla de ambos. Los óxidos que se forman en el crisol durante el proceso de fusión, se llaman óxidos viejos y los que se forman durante el proceso de vaciado se llama, óxidos nuevos. Los óxidos viejos son más gruesos que los nuevos, y puede ser fácilmente distinguido por el análisis de microscopia o rayos X. Estos óxidos tienen densidad ligeramente superior a la del aluminio y su temperatura de fusión es más alta. (LESSITER, M, J, 1993 e MOREIRA, F.M.; FUOCO, R

Tabla 2.3.- Inclusiones en el aluminio [Totten²].

Tipo de partícula	Fase y fuente de las partículas	Forma de la partícula	Tamaño rango(microns) (día.)
Óxidos	Al ₂ O ₃ desde la oxidación de la superficie fundida	Películas o grupos de películas	10-100
	Al ₂ O ₃ desde aluminio no disuelto	Partículas poligonales	0,1-5
	MgO desde la oxidación en la superficie o adición de aleantes	Partículas poligonales o películas conteniendo partículas	1-100 0,2-1
	Al ₂ MgO ₄ desde la oxidación de la superficie fundida	Partículas piramidales truncadas películas espesas o trozos	0.1-5
	Ladrillo refractario (Al,Si:O)	Trozos o partícula	10-500
Carburos	Al ₄ C ₃ desde hall heroult cell	Discos rectangulares o hexagonales	0,5-25
Boruros	TiB ₂ desde hall heroult cell	Discos rectangulares o hexagonales	1-3 1 -50
	TiB ₂ desde el refinamiento de grano	Discos o racimos	1,0-50
Sales	criolita (Na ₃ AlF ₆) desde hall heroult cell	Esferas	10,0 -20
	cloruros Mg/Al desde CL ₂ gaseoso o escoria fundida		
	cloruros Na/K desde escoria fundida		

La figura 2.21 muestra fotografías microscópicas de típicas inclusiones encontradas en fundición de aleaciones de aluminio

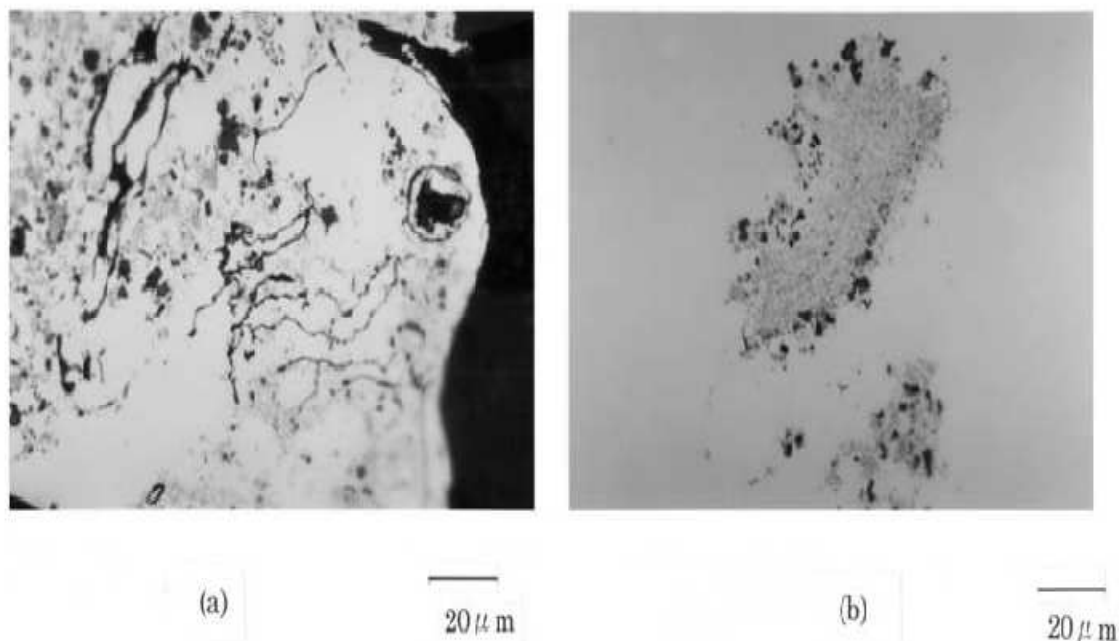


Figura 2.21.- Inclusiones observadas en AA N° 6063. Aleaciones antes del proceso de refinamiento del metal fundido filtrado, las inclusiones filtradas fueron analizadas por XMA. (a) Pequeñas partículas grises; compuesto de Ti-B, partículas finas negras; AL4C3, películas negras; Al2O3, (b) racimos de partículas finas; MgO incluye Al2MgO4, partículas negras; Al4C3 [Totten²].

2.2.4.3 Método para eliminar inclusiones de metal fundido

Existen una serie de métodos para eliminar inclusiones, entre otras están la flotación, settling, filtración, pero el que se analizara en la presente tesis es la flotación con insuflado de gas inerte, es también importante el tratamiento de la colada con fundentes pues se consigue así también eliminar ciertas inclusiones para esto se emplean sales de limpieza o lavado capítulo 2 (sección 2.2.3.7.1).

2.2.4.3.1 Flotación

La flotación de partículas solidas desde el aluminio fundido por dispersión de burbujas de gas por el proceso de SNIF (boquilla rotatoria U.S.Pat. 3743263, 1973) fue investigado en la teoría de fluidos dinámicos por A.G. Szekely. Dos mecanismos de flotación, impacto inercial e intercepción periférica fueron propuestos. El impacto inercial en burbujas de gas es mostrado en la figura 2.22 ⁽²⁾.

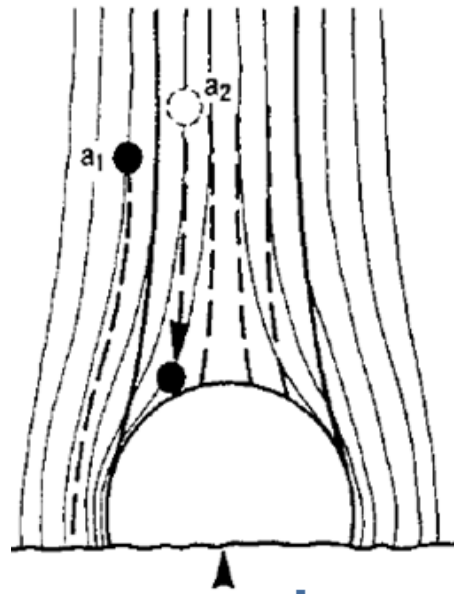


Figura 2.22.- Impactación inercial de partículas en burbujas de gas [Totten²].

Las líneas de corriente de el fluido son desviados por una esfera independientemente si el cuerpo esta estancado y el fluido fluye o si el fluido esta estancado y el cuerpo esta moviéndose. Las curvas de perfiles aerodinámicos (mostrados por líneas delgadas en la figura) previenen la colisión frontal de partículas pequeñas con la esfera. Las partículas largas pueden sin embargo establecer sus propios caminos por inercia los cuales son distintos a las líneas del fluido y son mostradas en la figura por las líneas entrecortadas. La intercepción de los caminos de partículas largas por la esfera no es todavía garantizada, pero solo estas partículas las cuales están presentes originalmente en el límite del fluido por las líneas fuertes tienen oportunidad de tocar el cuerpo esferoidal (donde la masa y la velocidad de las partículas a1 y a2 podrían ser por ejemplo iguales). El tamaño de las partículas mas pequeñas que pueden ser recogidas por impacto inercial en burbujas de gas fueron calculados para partículas de oxido suspendido en aluminio fundido basados en la teoría de la dinámica de fluidos. La conclusión es que todas las partículas, tan largas como $80 \mu m$ pueden ser recogidas desde el aluminio fundido por impacto inercial en burbujas de gas si el tamaño de las burbujas esta en el rango de 1-10mm⁽²⁾.

Las pequeñas partículas que están completamente cubiertos por las líneas de corriente del fluido debió a su pequeña masa tienen poca oportunidad de chocar con las burbujas de gas que están subiendo. Sin embargo estas

partículas pueden establecer contacto con las burbujas que son traídas dentro de una distancia conveniente a la burbuja alrededor de su "línea" media por las líneas de perfiles aerodinámicos de él líquido (figura 2.23), la intercepción periférica es el segundo mecanismo para la flotación. La eficiencia de contacto entre una burbuja de gas y una partícula sólida fue calculada aproximadamente por el argumento de la geometría simple, considerando una columna de burbuja hipotética de base $r^2 \pi$ conteniendo un número de partículas n_0 distribuidas uniformemente. Solo las partículas de radio a los cuales están llevados dentro del aro ecuatorial (circunferencia media) de radio $2a$, pueden rodear la burbuja. La disminución de la concentración de las partículas es, $\Delta n_0 = n_0 - n_0/x$, esta disminución de concentración de las partículas debido a la intercepción en la periferia por burbujas de gas es expresado por la ecuación (2.3) para una tasa de esparcimiento de gas G m^3/Kg ⁽²⁾.

$$X = \exp(54 \times 10^4 G x a / r^2) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

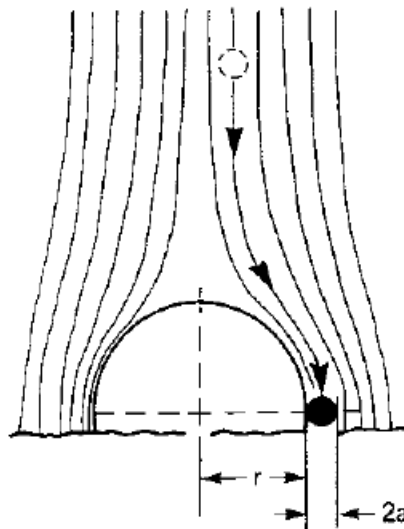


Figura 2.23.- Intercepción periférica de partículas por burbujas de gas [Totten²].

O para una tasa de esparcimiento de gas típico ($7.8 \times 10^{-4} m^3/Kg$) en el proceso SNIF:

$$X = \exp(12 \times a / r^2) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La solución de esta ecuación para burbujas de gas de 1-10mm es mostrada en la figura 2.24. De esta figura queda claro que es importante producir burbujas

de gas lo más pequeñas posible para asegurar una remoción eficiente de las partículas ⁽²⁾.

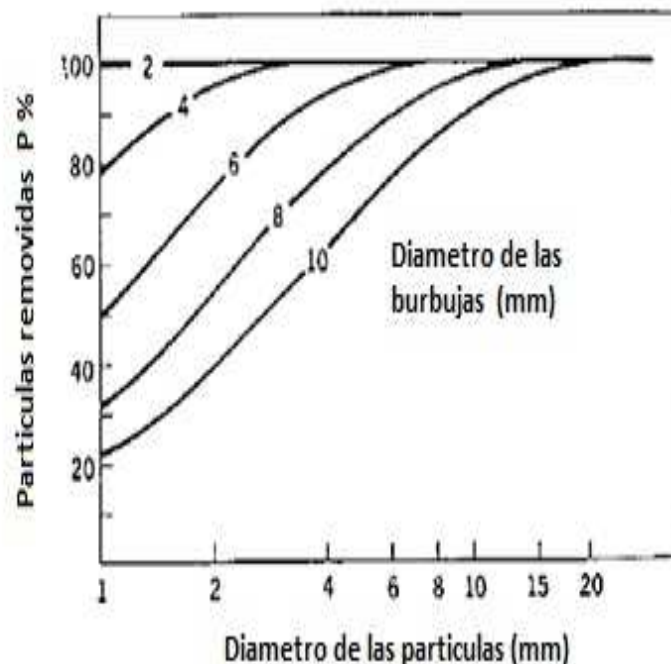


Figura 2.24.- Flotación de partículas en un gas con una proporción de esparcimiento de $7.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{Kg}$ calculados desde la ecuación 2.3 [Totten²].

2.2.4.3.2 Flotación por insuflado con gas inerte

La remoción de óxidos fue investigado refinando la fusión con altos contenidos de inclusiones. El tamaño de la distribución de inclusión de óxidos observados por microscopio revelaron que inclusiones largas ($50 \mu\text{m}$) en la sección transversal fueron removidos de la colada, como se ve en la figura 2.25 ⁽²⁾.

El removimiento de boruros también fue medido y el resultado reveló que ninguno o muy pocos boruros eran removidos por el proceso SNIF. TiB_2 en aleaciones de aluminio son utilizados para afinar el grano de la colada y actúan como nucleantes. Así que TiB_2 resulta difícil de ser separado del aluminio fundido por purgado de gas.

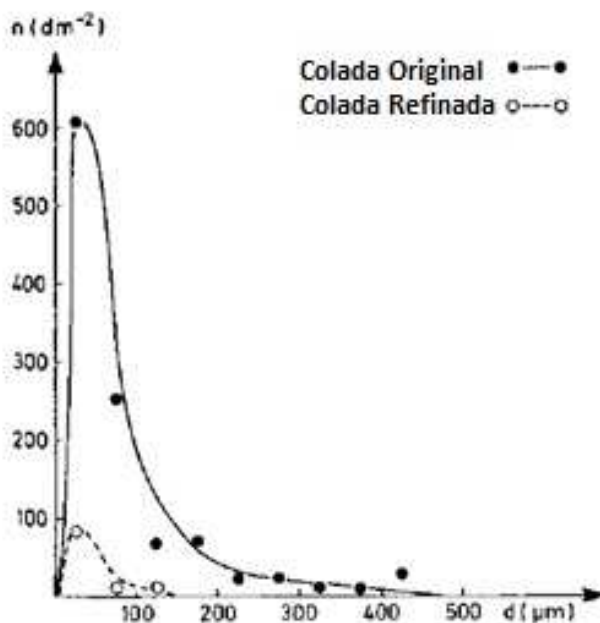


Figura 2.25.- Distribución de tamaño (por numero) de óxidos sedimentados en muestras de colada y de colada refinado por el método SNIF. El análisis fue realizado por el método de centrifugación y el diámetro d , es el máximo diámetro de la película de oxido de gas lo mas pequeñas posible para asegurar una remoción eficiente de las partículas [Totten²].

La evaluación de una unidad de SNIF para la remoción de la inclusión en líneas de producción revelo que la eficiencia en la remoción de inclusiones depende de la concentración de las inclusiones y el purgado de la mezcla de Cl_2 . Se ha observado que la purga de gas Cl_2 o de las mezclas gas inerte/ Cl_2 por boquilla rotatoria forma menos cantidad de escoria en la superficie de la colada, que en el caso de purgar gas inerte. Además, la escoria está seca. Eso es diferente de la escoria húmeda en el caso de purgar gas inerte. Donde la escoria seca significa aglomeración de las inclusiones del metal fundido (principalmente óxidos), en contraste con la escoria húmeda. El mecanismo de dichos fenómenos no se conoce bien aunque el excesivo calor para la formación de AlCl_3 puede relacionarse a él. Por tal motivo es recomendable el uso combinado de purgado con gases inertes y sales de limpieza, como se describió en la sección sobre fundentes ⁽²⁾.

Se ha analizado varios resultados para la remoción de la inclusión por flotación por el método de GBF (boquilla rotatoria U.S. Patent 4611790, 1986). El

resultado más claro para la remoción de grandes inclusiones de una aleación 5056 a través de 3 min. Tratado por el método GBF fue analizado por la inspección de un filtro metálico limpio (poro 500 μm de día.) después de sumergirse y agitarse en el metal fundido. Fig. 2.26

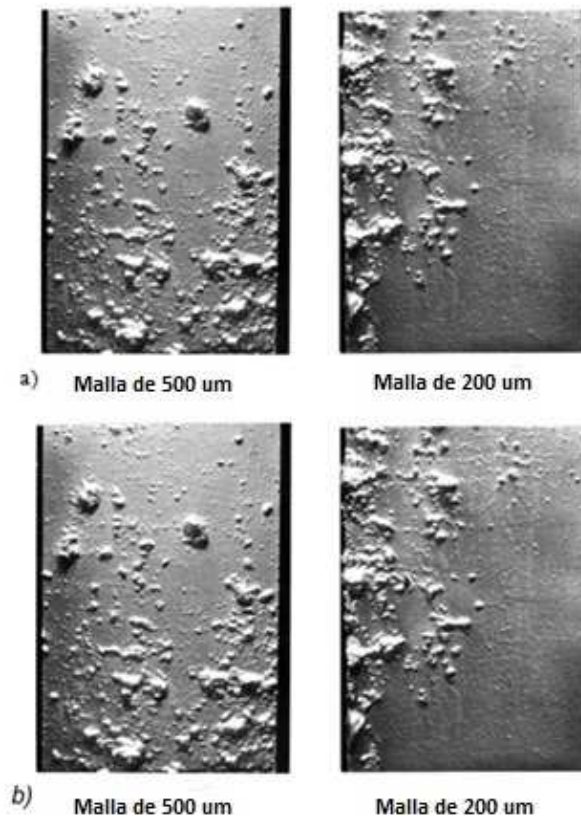


Figura 2.26.- Inspección de las Inclusiones en filtro metálico limpio (500 μm de día. y 200 μm de día) después de sumergirse y moverse en metal fundido. (a) La fusión original 5056; (b) después de 6 min. de tratamiento de GBF [Totten²].

2.3 ANÁLISIS DE LA POROSIDAD CAUSADA POR LA PRESENCIA DE GAS.

2.3.1 SOPLADURA

Es una cavidad semejante a una burbuja, redonda y ovalada. Generalmente la superficie es continua y brillante, varía desde el plata al gris en el aluminio, ligeramente oxidada. A veces se observa dentro de ella una fina capa de escoria. Se distribuye al azar en toda la región de la pieza, puede presentarse

aislada, cuando es grande. O en grupos, si es pequeña. El tamaño de la sopladura varía de 2 a 10 mm de diámetro ⁽⁵⁾.

2.3.2 PICADURAS

Es un poro pequeño, generalmente de paredes lisas y brillantes. Aparece en grupos de diferentes dimensiones y distribuida por cualquier zona de la pieza colada o entre los límites de grano. Puede alcanzar diámetros de hasta 2 mm. Si esta a nivel de la superficie (1 a 2 mm de ella) generalmente es de forma esférica, en cambio, si esta un poco más adentro (a unos 4 mm) tiene forma ovalada. En el aluminio tiene un color plateado brillante. Es similar a la porosidad de rechupe, se diferencia de ella porque se presenta en serie rodeada por el metal, es decir, no está interconectada ⁽⁵⁾.

2.3.2 POROSIDAD CAUSADA POR LA PRESENCIA DEL HIDROGENO

La porosidad en piezas de aleación de aluminio por la presencia de hidrogeno aparece en una de las dos formas siguientes. O como una cavidad interdendrítica, la fig. 2.27 muestra una macrografía de una aleación 6063 ⁽¹⁰⁾.

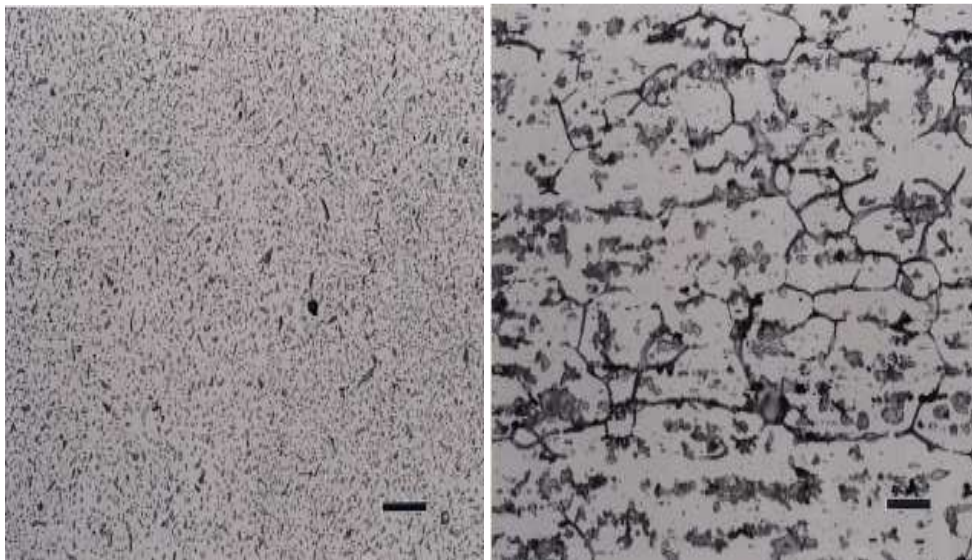


Figura 2.27.- Aleación 6063, muestra porosidad interdendrítica gruesa (izquierda); la misma aleación 6063 atacado con ácido sulfúrico y una ampliación 100 X, porosidad angular en la localización interdendrítica (derecha) [Metals Handbook V.7¹⁰].

O como un poro esferoidal pequeño del tipo mostrado en la micrografía de la figura 2.28 ⁽¹⁰⁾.

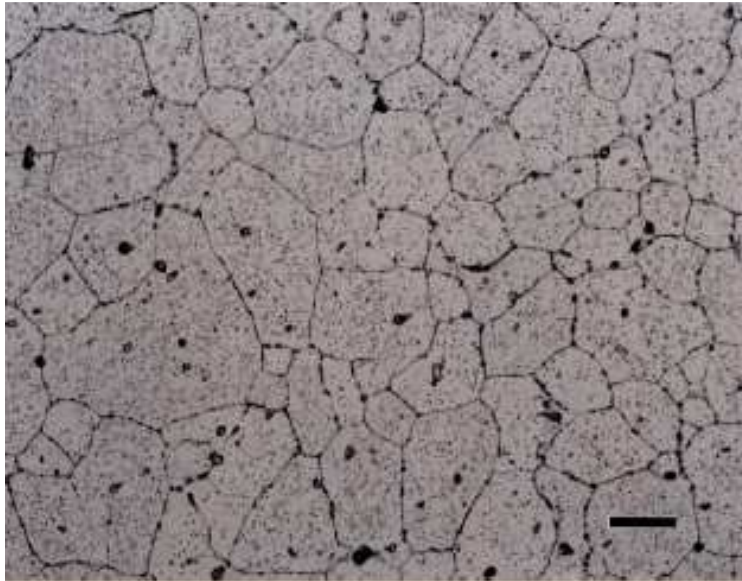


Figura 2.28.- Poros esferoidales pequeños, aleación 1100 con enfriamiento directo semicontinuo [Metals Handbook V.7¹⁰].

El tipo anterior de porosidad (cavidad interdendrítica), es asociado con volúmenes de gas más altos que el último, pero la división entre los dos tipos depende también de la rapidez de solidificación y el rango de subenfriamiento de la aleación; la macroscópica de la porosidad interdendrítica resulta del rechazo del hidrógeno desde el metal sólido al líquido hasta que la presión del hidrógeno en la solución excede una atmósfera. Pequeñas formas de poros esferoidales son consecuencia de la permanencia de hidrógeno en el metal sólido; durante una alta temperatura de tratamiento térmico, la porosidad interdendrítica podría redondearse y una porosidad esferoidal pequeña podría aparecer. En contraste la redistribución de gas causaría alargamiento de los poros esferoidales pequeños (fig.2.28) y causa una significativa baja en la densidad ⁽¹⁰⁾.

2.3.2.1 Solubilidad del hidrógeno en el aluminio

Las burbujas de gas son causadas por hidrógeno que precipita fuera debido a que el metal fundido solidifica generando un cambio dramático en la solubilidad del hidrógeno. Con el nitrógeno el aluminio forma nitratos de aluminio a 700°C. La reacción es muy intensa a 830°C pero en el aluminio el

efecto no es muy perjudicial tanto que es usado como protector del caldo. Por otro lado el hidrogeno es el único gas que es soluble en el estado solido y en el aluminio fundido. Ransley y Neufeld desarrollaron ecuaciones para determinar la solubilidad de hidrogeno en el aluminio fundido y la representaron en la figura 2.29. La tabla 2.4 compara los resultados de estos cálculos ⁽²⁾.

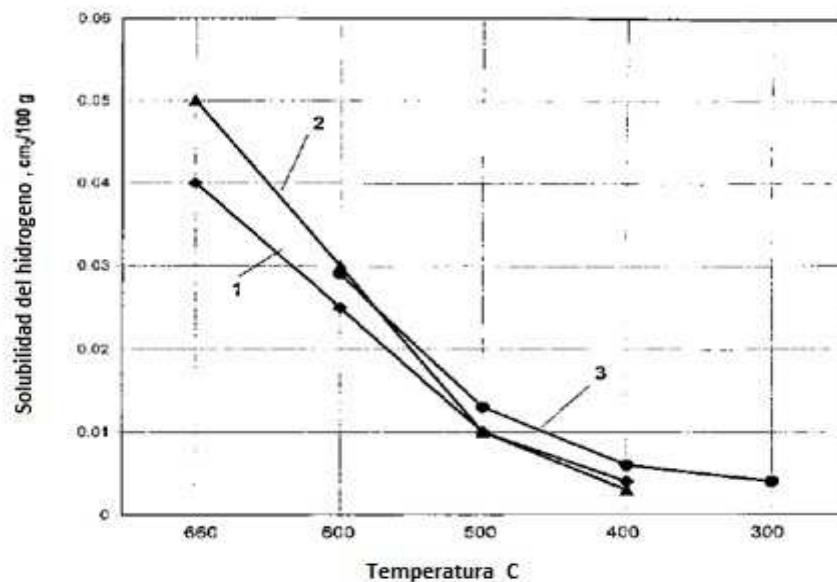


Figura 2.29.- Solubilidad del hidrogeno en aluminio solido [Totten²].

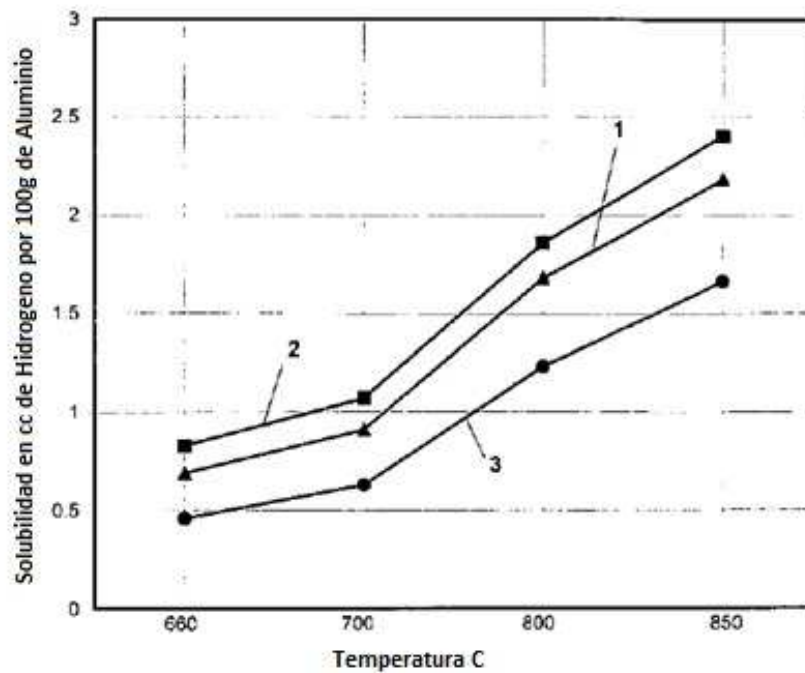


Figura 2.30.- Solubilidad de hidrogeno en aleación fundida con 1 atmosfera de presión sobre la fusión [Totten²].

La figura 2.30 muestra la solubilidad del hidrogeno en aluminio sólido. Durante la fusión, hidrogeno puede ser absorbido en la colada desde diferentes fuentes: humedad del material de partida, del revestimiento del horno, del material del crisol, de los moldes, del fundente, combustibles gaseosos y líquidos, así como la humedad atmosférica. Al descender la temperatura del metal disminuye la solubilidad del hidrogeno y al pasar al estado solido desde el estado liquido disminuye esta de forma brusca. En estos casos se separa el hidrogeno en forma de burbujitas (formación de poros).

Como fue mencionado el decremento en la solubilidad del hidrogeno se piensa es el responsable de la mayoría de poros gaseoso pequeños en la fundición de aluminio. Una serie de modelos han sido desarrollados para explicar la formación de estos poros basado en mecanismos de nucleación y crecimiento. Los modelos requieren diferentes consideraciones geométricas y el conocimiento de la dificultad de tomar medidas de parámetros como tensión superficial y presión de sobresaturación.

El aluminio es muy reactivo y las reacciones químicas entre el aluminio y el vapor de agua generan gas hidrogeno a altas temperaturas. Esto es porque el hidrogeno se disuelve en el aluminio, la solubilidad del hidrogeno en el aluminio es determinada por una relación de equilibrio entre la concentración de hidrogeno en el aluminio y la presión parcial de gas hidrogeno en la atmosfera. La solubilidad del hidrogeno en el aluminio solido es mas baja que en aluminio liquido. Por consiguiente, al disolver en exceso hidrogeno en el aluminio fundido, por sobre la solubilidad solida forma poros de gas hidrogeno durante la solidificación ⁽²⁾.

Muchas formas de remover el gas hidrogeno se han desarrollado, particularmente el desarrollo del proceso de dispersión de gas inerte en el aluminio fundido por la rotación de una boquilla innovo la forma corriente para remover gas e inclusiones en la fundición de aluminio, porque esta es de alta eficiencia, bajo costo buena performance y no produce daños al medio ambiente.

2.3.2.2 Remoción de hidrogeno disuelto en aluminio fundido

2.3.2.2.1 La fuente de hidrogeno disuelto en aluminio fundido

El hidrogeno es solo un elemento de los muchos componentes gaseosos disueltos en el aluminio fundido pero es el más importante, el hidrogeno en el aluminio fundido (H) tiene una relación de equilibrio con el gas hidrogeno en la atmosfera del ambiente, como muestra la ecuación:



La constante de equilibrio (KH) para la relación de equilibrio en la ecuación (2.5) es:

$$KH = \frac{P_{H_2}^{1/2}}{f_H [\%H]} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde f_H es el coeficiente de actividad de hidrogeno en el aluminio, $[\%H]$ es la concentración de hidrogeno en el aluminio y P_{H_2} es la presión parcial del gas hidrogeno en la atmosfera. La figura 2.31 muestra el equilibrio de la concentración de hidrogeno en aluminio puro con gas hidrogeno a 1 atm ⁽²⁾.

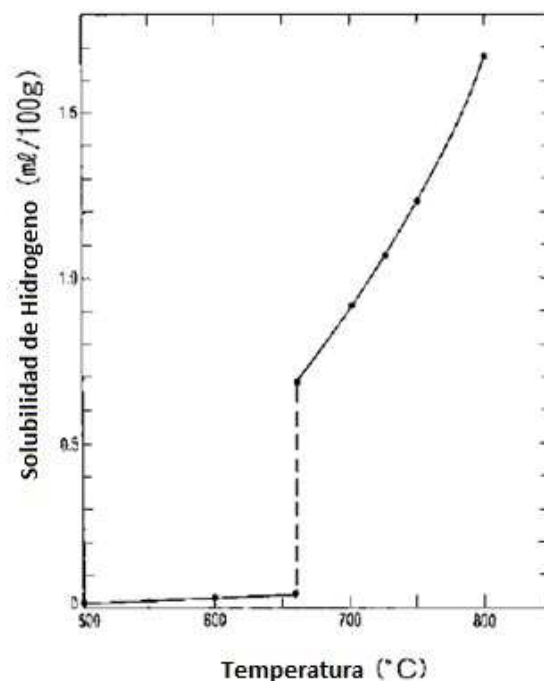
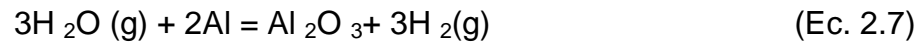


Figura 2.31.- Solubilidad del hidrogeno a 1 atm. En 99.9985% de aluminio puro [Totten²].

El aluminio reacciona con el vapor de agua en altas temperaturas y genera gas hidrogeno.



Este gas hidrogeno es la fuente de hidrogeno en el aluminio. En las fundidoras a menudo se tienen un ambiente con humedad caliente y la experiencia a demostrado que se crean mas problemas para disolver el hidrogeno en la fusión, esto se debe a la reacción química (ecuación (2.7)) entre el vapor de agua de presión parcial mas alta en un ambiente con humedad caliente y el aluminio fundido. En la figura 2.32 en la interface entre el aluminio fundido y la atmosfera (estudios realizados por TA Engh) se observó, los efectos del hidrogeno en la fundición. El vapor de agua se difunde a través de las capas limites para ser absorbido en la superficie del metal, las moléculas absorbidas reaccionan con el aluminio y estas moléculas de hidrogeno son devueltas desde la superficie ⁽²⁾.

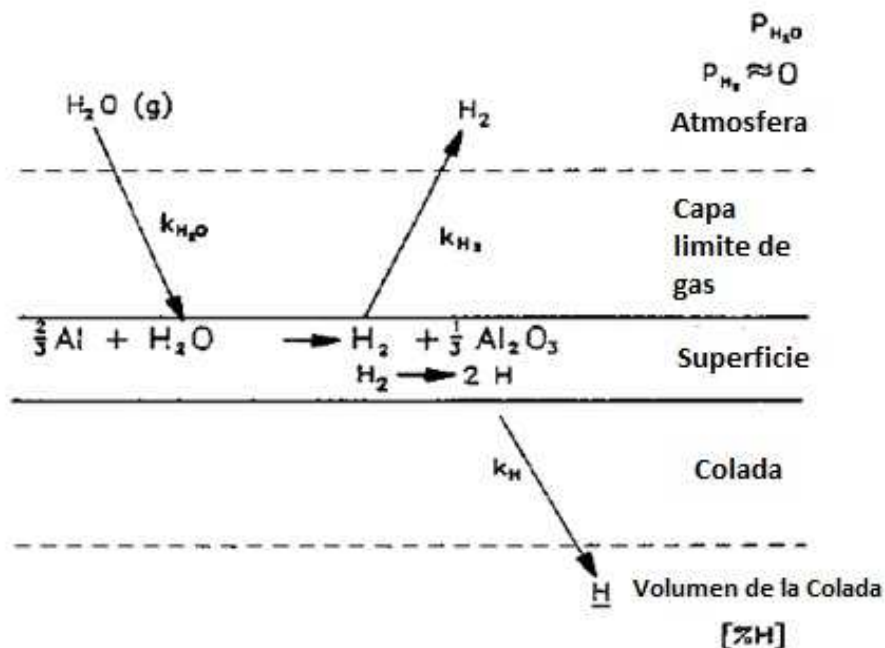


Figura 2.32.- Los mecanismos de disolución de hidrogeno en el aluminio fundido desde la humedad en la atmosfera [Totten²].

Las moléculas de hidrogeno se difunden atrás de las capas limites, además las moléculas de hidrogeno se disocian y forman hidrogeno atómico en la superficie, los átomos de hidrogeno se difunden a través de las capas limite

del metal. Por un análisis matemático de la disolución de hidrogeno usando el coeficiente de transferencia de masa k en la interface gas metal y la constante de equilibrio (para la ecuación 2.7) en la capa superficial, da la presión parcial del gas hidrogeno (P_{H_2}) en la interface, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{H_2} = \frac{K_{H_2O}}{k_{H_2}} P_{H_2O} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde k_{H_2O} , K_{H_2} son coeficientes de transferencia de masa para H_2O y H_2 en gas y P_{H_2O} es la presión parcial de H_2O en la atmosfera, por consiguiente, la concentración de hidrogeno en el aluminio fundido ($[\%H]$), el cual es mantenido en la atmosfera de P_{H_2O} por largo tiempo es calculado a partir de la ecuación 2.6 y se obtiene el porcentaje de hidrogeno como muestra la ecuación:

$$[\%H] / l = \frac{1}{f_{HkH}} \sqrt{\frac{K_{H_2O} P_{H_2O}}{k_{H_2O}}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

El coeficiente de transferencia de masa K_{H_2O} y k_{H_2} pueden demostrar que son proporcionales a la raíz cuadrada del coeficiente de difusión en el aire, D_{H_2O} y D_{H_2} por consiguiente se obtiene:

$$[\%H] / l = \frac{1}{f_{HkH}} \sqrt{P_{H_2O} \sqrt{\frac{D_{H_2O}}{D_{H_2}}}} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

El coeficiente de difusión en el aire es $D_{H_2O} = 0.239 \text{ cm}^2 / \text{seg.}$ a 8°C y $D_{H_2} = 0.634 \text{ cm}^2 / \text{seg.}$ a 0°C como una primera aproximación asumimos que el radio no cambia significativamente con la temperatura. Así podemos obtener la ecuación 2.11.

$$[\%H] / l = \frac{0.783}{kH} \sqrt{P_{H_2O}} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

La figura 2.33 muestra resultados experimentales del cambio en la concentración de hidrogeno en aluminio puro fundido el cual fue enfriado a 700°C en atmosfera con aire seco con $1.7 \times 10^{-4} \text{ atm}$ de P_{H_2O} ⁽²⁾.

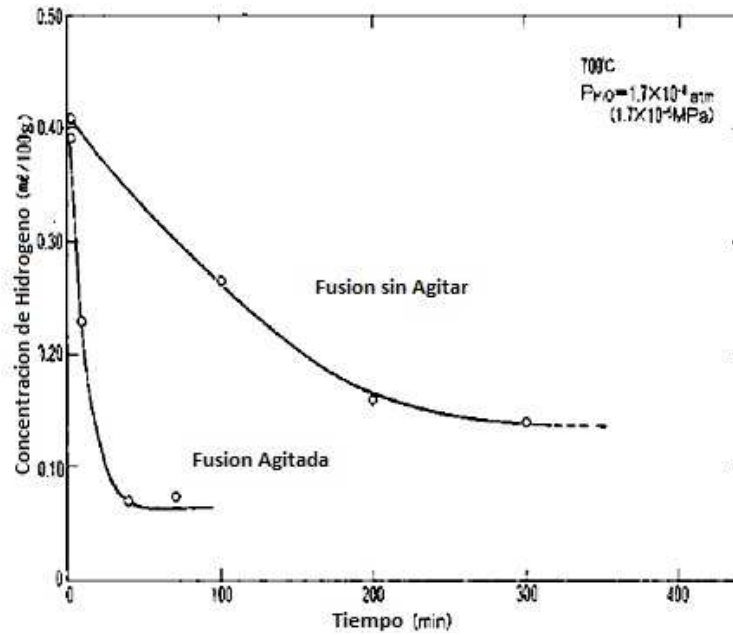


Figura 2.33.- Cambio en la concentración de hidrogeno en una fundición de 99.99% de Al bajo atmosfera de aire seco de $P_{H_2O} = 1.7 \times 10^{-4} \text{ atm}$ [Totten²].

La figura 2.34 muestra la dependencia del tiempo en la concentración de hidrogeno en aluminio fundido bajo atmosfera que contiene significativas cantidades de vapor de agua. La concentración de hidrogeno en el aluminio fundido logra el equilibrio dependiendo del valor de P_{H_2O} independientemente de si la concentración de hidrogeno inicial es baja o alta ⁽²⁾.

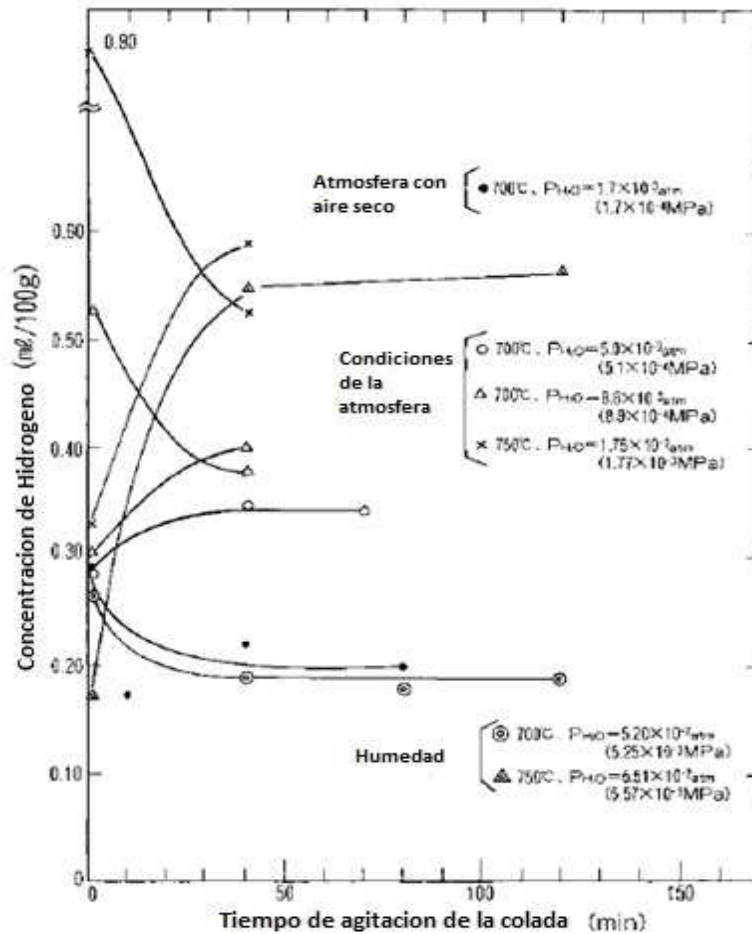


Figura 2.34.- Dependencia del tiempo en la concentración de hidrogeno en una fusión estimada de 99.99% de Al bajo atmosfera de aire conteniendo varias cantidades de vapor de agua [Totten²].

2.3.2.3 Principio de remoción de hidrogeno desde aluminio fundido

Esta basado en la relación de equilibrio entre el hidrogeno en el aluminio fundido y la presión parcial del hidrogeno en la atmosfera del ambiente como se ve en la ecuación 2.6. Esta es:

$$[\%H] = \frac{KH}{f_H} \sqrt{PH_2}$$

Esto quiere decir que cuando el aluminio fundido se mantiene bajo atmosfera de gas inerte, o fundiendose en vacio, en ambos casos $P_{H_2}=0$, o inyectando burbujas de gas inerte las cuales no contienen hidrogeno ($P_{H_2}=0$), el hidrógeno en el aluminio fundido se difunde en la superficie de la fusión y se transfiere a la atmosfera. El coeficiente de actividad del hidrogeno f_H ($f_H=1$ para

aluminio puro) podría cambiar con el incremento de aleantes como Si, Cu, Mg. La tabla 2.4 muestra los f_H calculados de varias aleaciones fundidas. Para poder eliminar el hidrogeno en el proceso de fundición del metal, la presión parcial en la atmosfera (vapor de agua), el gas purgado y el material de partida en el crisol debe ser lo mas pequeño posible ⁽²⁾.

Tabla 2.4.- Valores calculados del Coeficiente de Actividad de Hidrógeno (f_H) en Aleaciones de Aluminio Fundido [Totter²].

Aleaciones	f_H
Aluminio Puro	1.00
AA No. 6063 (Al-0.6% Mg-0.4% Si)	1.01
AA No. 3003 (Al-1.2% Mn-0.2% Si)	1.21
JIS AC7A (Al-5.0% Mg-0.4% Mn)	0.94
JIS AC8C (Al-11% Si-2.9% Cu-1.2% Mg)	2.03
AA No. 5052 (Al-2.5% Mg-0.2% Cr)	0.94
AA No. 6061 (Al-1.0% Mg-0.6% Si-0.2% Cu)	1.03
AA No. 1100 (Al-0.55% Fe-0.13% Si)	1.04
AA No. 2017 (Al-3.8% Cu-0.7% Mg-0.5% Si-0.7% Mn)	1.46

2.3.2.4 Procesamiento del metal fundido para eliminar hidrogeno

El método más corriente para remover o eliminar hidrogeno es mediante la inyección de gas inerte en el metal fundido por el método de boquilla rotatoria. En la historia de la industria del aluminio gases de Cl_2 y $Cl_2 + N_2$ se inyectaban por una lanza para remover el hidrogeno “El tamaño de las burbujas que se inyectan con el Cl es mas pequeño que cuando se inyectan con gas inerte”. Esto es claro desde el punto de vista del cálculo termodinámico pues cambia la energía de Gibbs en la reacción química entre el Cl_2 y H en la fusión y el gas Cl_2 no reacciona con H en el aluminio fundido para dar HCl (gas) pero reacciona con el metal fundido para dar $AlCl_3$ (a partir de 183°C), se puede pensar que el uso de Cl_2 es efectivo para eliminar hidrogeno debido a la formación de HCl, pero el mecanismo para eliminar hidrogeno es solo debido a la difusión de hidrogeno fuera de la aleación fundida en burbujas de gas de $AlCl_3$. De modo similar como en el caso de inyectar con gas inerte en aluminio fundido. Sin embargo, debería notarse que el tamaño de burbujas de gas en el aluminio fundido desde la lanza es más pequeño en el caso de inyectar gas Cl_2 en comparación con el gas inerte,

y ello puede ser debido a la reducción de tensión de superficie de gas-metal en el caso de gas AlCl_3 y el alto calor de formación de gas AlCl_3 ⁽²⁾.

La eficiencia de desgasificación depende del área interfacial entre el gas inerte y el metal, también del tiempo de contacto entre estos. El consumo mínimo de gas inerte para obtener un máximo rendimiento se obtiene si se aprovecha una gran área interfacial específica (proporción superficie/ volumen) y suficiente tiempo de contacto; además se debe tener en cuenta que es necesario tener una presión relativa positiva en la atmosfera de la cámara del horno para evitar la absorción de vapor de agua.

Sigworth y Engh presentaron un análisis matemático de la cinética para remover hidrogeno mediante la inyección de gas inerte. Engh presento un modelo para eliminar hidrogeno en el aluminio fundido por la inyección de gas en la que incluye la absorción de hidrogeno por la presencia de humedad (vapor de agua) sobre la colada. Esto es, La reducción de volumen de hidrógeno es igual al hidrógeno transferido a las burbujas mas el hidrogeno transferido a la atmosfera desde la superficie del baño. En la teoría, resultados calculados, fueron comparados con resultados experimentales sobre la eliminación de hidrogeno para una aleación Al7Si5Mg en un horno de 200Kg usando una lanza y boquilla rotatoria (Proceso SNIF). Dando como resultado que por el método de boquilla rotatoria se consigue eliminar aproximadamente el doble de hidrogeno en una misma cantidad de aluminio fundido

La figura 2.35 muestra las curvas calculadas para la eliminación del hidrogeno por boquilla rotatoria con diferentes formas de absorber hidrogeno en la superficie de la colada. Las curvas calculadas sugieren que por el método de SNIF se puede disminuir el contenido de hidrogeno en al aluminio fundido hasta estar por debajo de 0.01 ppm (0.011ml/g), sin embargo actualmente el contenido de hidrogeno no se puede disminuir por debajo de 0.05 ppm. Una de las razones de esto es debida a que es imposible sellar la cámara perfectamente de la atmosfera para no contaminarla con humedad y aire, y porque el crisol se contamina con inclusiones en forma físico- química⁽²⁾.

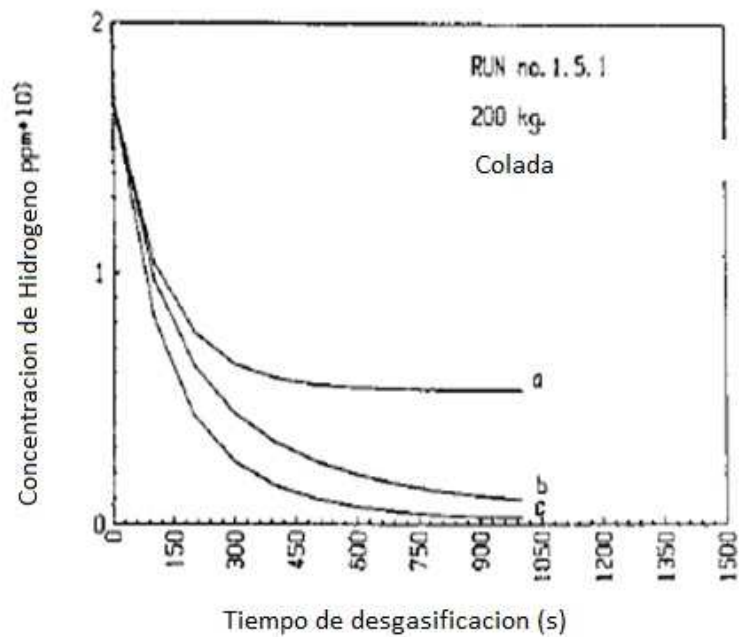


Figura 2.35.- Curvas calculadas para la remoción de hidrógeno con. (a) Superficie completamente expuesta al aire; (b) una tapa; (c) insuflando gas inerte en la superficie (combinado con una tapa) [Totten²].

Se conoce por la experiencia ⁽²⁾ que el contenido de hidrógeno con el cual no se produce grietas en caliente debe estar por debajo de 0.10ml/100 g de metal.

2.3.2.5 Desgasificado

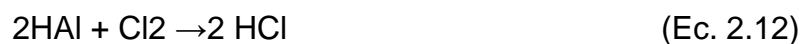
Básicamente se desgasifica por el efecto físico de burbujear gases insolubles como cloro, nitrógeno o argón, cuyas burbujas contienen muy baja presión parcial de hidrógeno y estimulan a este gas disuelto a emigrar junto con las burbujas que se escapan del aluminio líquido a la atmósfera. (BERG, S.L. distribuye productos FOSECO en Cataluña y Levante)

El aluminio y sus aleaciones son muy susceptibles a absorber hidrógeno en el estado fundido. La principal fuente de hidrógeno viene desde la humedad contenida en la atmósfera que entra en contacto con la colada.

El contenido de hidrogeno es removido por ⁽²⁾:

- Transporte de hidrogeno en la fusión por medio de burbujas de gas inerte por convección y difusión.
- Transporte por difusividad a través de límites de capas delgadas rodeadas de burbujas.
- Adsorción química y subsecuente desorción desde la superficie de la burbuja.
- Difusión de hidrogeno como gas dentro de la burbuja.
- Escape de hidrogeno desde la superficie de la fusión o en las paredes refractarias.

Consecuentemente, la remoción de hidrogeno depende del coeficiente de transferencia de masa. Se ha encontrado además que la eficiencia del purgado depende del tamaño de las burbujas, figura 2.36. El uso de tapones de poros ayuda a que mejore la proporción por proveer burbujas pequeñas, pero generalmente estas colapsan en la colada, reduciendo el efecto beneficio, esto puede ser contrarrestado con el uso de un impulsor. Se ha encontrado también que el uso de cloro y freón mejoran la proporción de las burbujas. La mejora en la proporción no se debe únicamente al incremento del coeficiente de transferencia de masa, también a la combinación de los halógenos con hidrogeno:



El cual es termodinámicamente favorable en algunos casos.

Cuando el hidrogeno en el aluminio fundido no puede ser completamente expelido desde la colada hasta el producto solidificado, se presentan problemas de porosidad. La porosidad puede ser muy fina, ampliamente dispersa, o localizada en ciertas áreas de la fundición que son las ultimas en solidificar si la concentración de gas atrapado es relativamente baja. La microporosidad por hidrogeno no es muy perjudicial. Por otro lado algunos

defectos de la porosidad gaseosa pueden ser más grandes y ellos pueden ocasionar grietas o sopladuras ⁽²⁾.

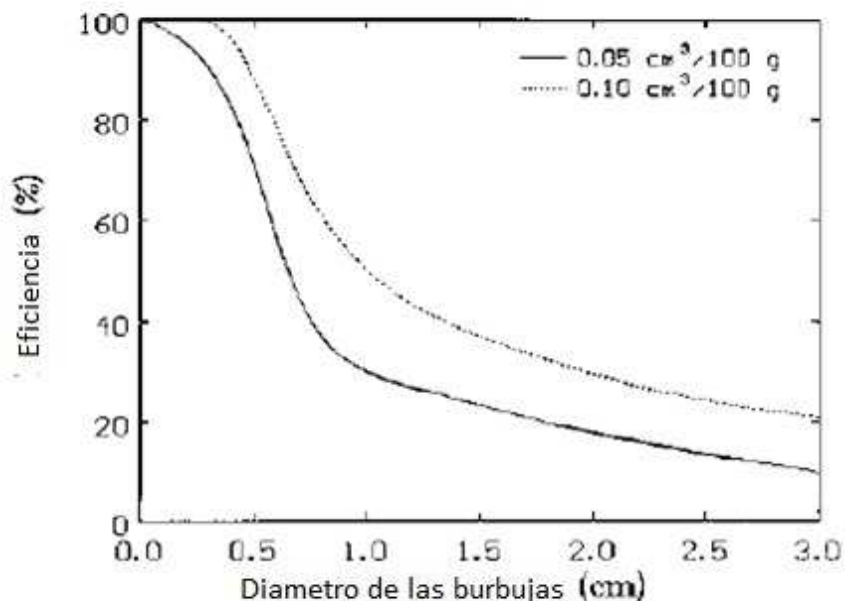


Figura 2.36.- Remoción de hidrogeno como función del tamaño de las burbujas en dos flujos de purgado [Totten²].

2.3.2.5.1 Método convencional

Es un proceso bastante sencillo se insufla gas inerte en el fondo de la cuchara mediante lanza protegida. Las burbujas de argón arrastran a la superficie los gases (hidrogeno) e inclusiones que nadan en el aluminio ⁽¹¹⁾.

Es el sistema más sencillo y barato con que se cuenta. Consiste, simplemente, en hacer pasar argón, u otro gas inerte, a través de la colada. Este gas se insufla mediante una lanza protegida con refractario (figura 2.37). La reacción entre los desoxidantes, una vez disueltos en el aluminio, y el oxígeno es muy rápida y se alcanza pronto el equilibrio. Los productos de la desoxidación (inclusiones) son flotados después hacia la superficie donde son atrapadas por la escoria.

Para garantizar homogeneización de la desgasificación por argón en el aluminio y forzar la eliminación de las inclusiones es fundamental el burbujeo de argón por medio de la lanza. Desde el punto de vista práctico es aconsejable mantener un caudal de insuflado relativamente alto al comienzo de

la desgasificación para garantizar homogeneización y un caudal bajo inmediatamente después para que floten las inclusiones formadas. A partir de ahí, si el caudal es excesivo, las inclusiones podrían volver a sumergirse en el baño; por otra parte, las salpicaduras podrían reoxidar el aluminio ⁽¹¹⁾.

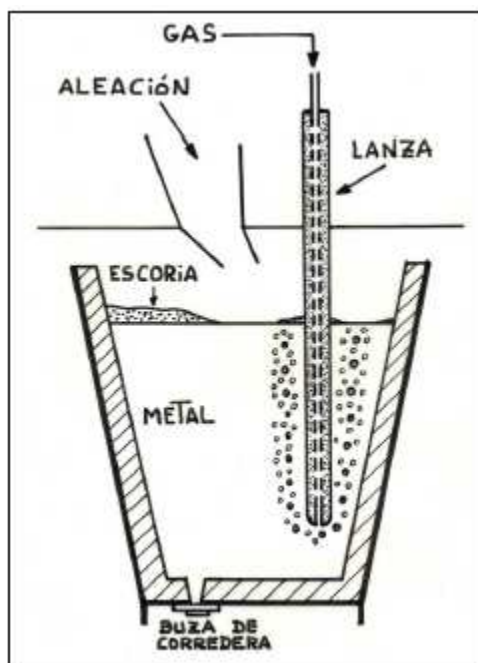


Figura 2.37.- Insuflado de argón con gas método convencional [Berciano¹¹].

2.3.2.5.2 Tamaño de la burbuja

Las burbujas deben estar bien distribuidas y ser lo más pequeñas posible para lograr el máximo contacto con el aluminio líquido. La efectividad de la desgasificación es proporcional al área total de todas las burbujas que se forman para una cantidad dada de gas.

En un volumen de 1 litro, hay 56.000 burbujitas de 3 mm. de diámetro; en cambio, sólo 876 en burbujas de 13 mm. El tamaño pequeño de burbujita no se alcanza con los medios habituales: tubo abierto para insuflar gas nitrógeno o en campanas perforadas empleando tabletas desgasificantes que desprenden nitrógeno. Resultan burbujas excesivamente grandes y de ascensión vertical y rápida. Para lograr la máxima eficacia de la acción desgasificante del nitrógeno, se precisa que sea lanzado dentro de la masa fundida en forma de millares de pequeñas burbujitas y en sentido horizontal hacia las paredes del crisol o cuchara, de modo que asciendan desde toda el área del recipiente. Logrando

insuflar nitrógeno en estas condiciones físicas, se alcanza una desgasificación similar a la del propio cloro. (BERG, S.L. distribuye productos FOSECO en Cataluña y Levante).

2.3.2.6 Método empleado

El método empleado en la presente tesis es el insuflado con gas argón por medio de una lanza de inyección de gas hecha de tubo de acero inoxidable. El uso de argón se lo hace porque este es un gas, incoloro, inodoro, no corrosivo y no flamable, no reacciona con ningún compuesto o elemento. Su eficiencia como desgasificante es muy alta y su emisión de contaminantes es nula además requiere bajos tiempos de desgasificación (entre 10 y 15 minutos), en comparación con el uso de nitrógeno. Para el empleo de la lanza durante el insuflado es importante moverla de modo que pueda abarcar todo el volumen de material. Como conclusión final se debería mencionar que la eficiencia por el método empleado es algo baja debido a que la lanza produce burbujas con tamaño considerable y poco uniformes, además se genera una turbulencia en la superficie con el riesgo de que se oxide nuevamente la colada. Por esta razón se recomienda incursionar en métodos especiales como el desgasificado con flecha rotor o boquilla rotatoria, para obtener mejores resultados como se explico más arriba (sección 2.3.2.4).

2.4 ESTRUCTURA DE GRANO

El tamaño de grano es rápidamente observado, buscado, y es un rasgo importante en las aleaciones de aluminio. Un tamaño de grano fino y uniforme es siempre deseado. Una estructura de grano columnar es característica de aleaciones con bajo soluto que han solidificado con un determinado gradiente de temperatura, poca turbulencia en la colada para conseguir el efecto de refinamiento de grano por separación de los brazos dendríticos. En el caso de turbulencia presentada directamente en el flujo del metal, la estructura de la aleación tendrá granos columnares y equiaxiados. Los brazos dendríticos no son particularmente fuertes y en las primeras etapas de la solidificación se pueden romper por agitación o por vibración mecánica dando lugar a un tamaño de grano mas fino, granos no dendríticos equiaxiales distribuidos mas uniformemente en toda la fundición Figura 2.38 ⁽¹⁰⁾.

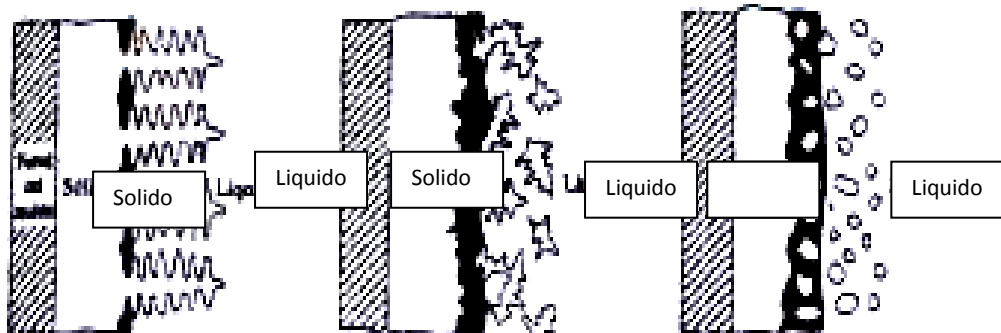
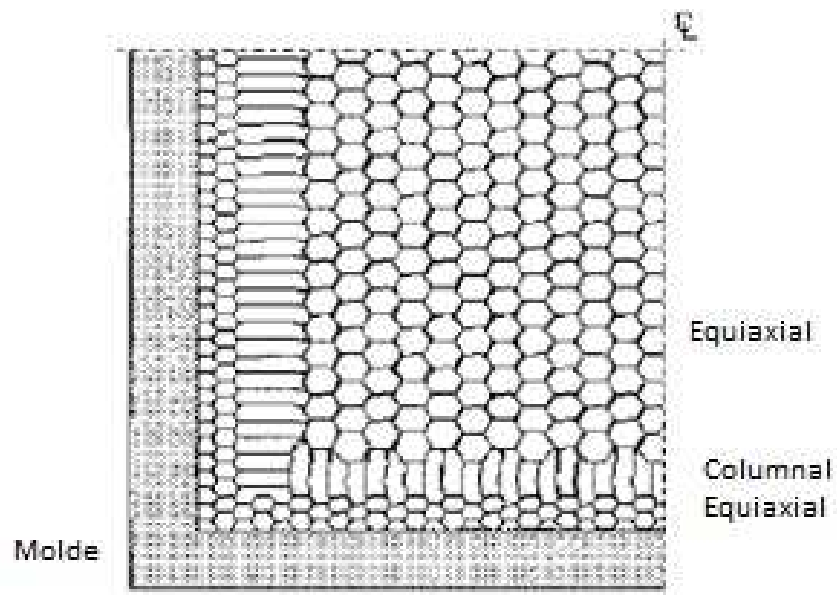


Figura 2.38.- Típica variación de los granos observados en las fundiciones (superior) [Totten²], y el rompimiento de los brazos dendríticos en las primeras etapas de solidificación (inferior) (VERRAN,G, 2006)

La figura 2.39 muestra el crecimiento de grano en aleaciones típicas de aluminio durante la solidificación

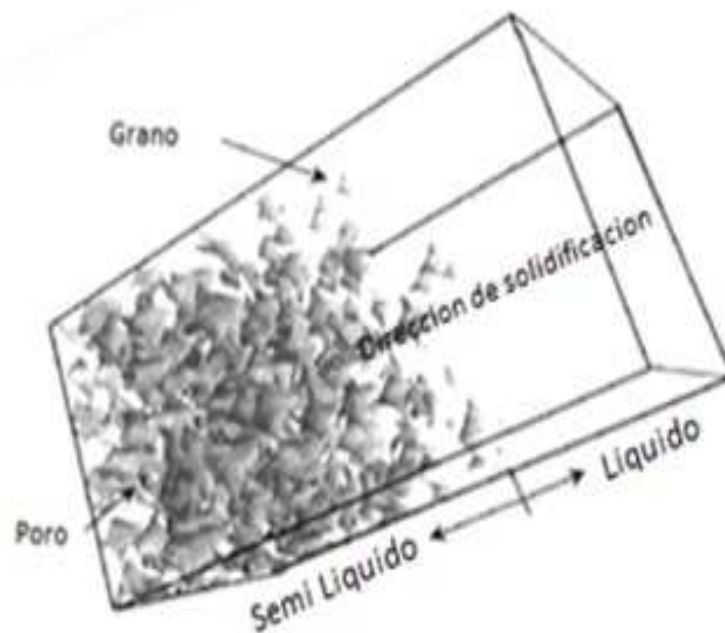


Figura 2.39.- Visualización tridimensional de un modelo que simula la estructura de grano y crecimiento del poro. Los granos son las estructuras sombreadas con aleación Al-7Si totalmente fundido; los poros se dan como esferas. (fuente: Solidification and Casting, Oxford-Kobe Materials Text, Edited by Brian Cantor and Keyna O'Reilly *Department of Materials, University of Oxford, UK*)

2.4.1 REFINAMIENTO DE GRANO

Según el tipo y curso de solidificación puede presentarse en algunas aleaciones de aluminio una estructura gruesa que tiene menor resistencia que la estructura de grano fino. Se puede obtener una estructura de grano fino con características mejores por adición de sustancias nucleantes en la colada, así como por métodos como vibración (figura 2.38), y control de la fusión (velocidad de solidificación). Los afinadores de grano que se añaden generalmente en forma salina, reaccionan con el caldo y actúan en forma de boruro de Al, boruro de Ti, carburo de Ti, carburo de Zr, como núcleos auxiliares ⁽¹⁾.

El afinamiento de grano es usado por dos razones para obtener una estructura de grano fino y uniforme y para evitar la formación de grietas, los efectos en la estructura con el afino de grano se observan en la figura 2.40 ⁽¹⁰⁾.

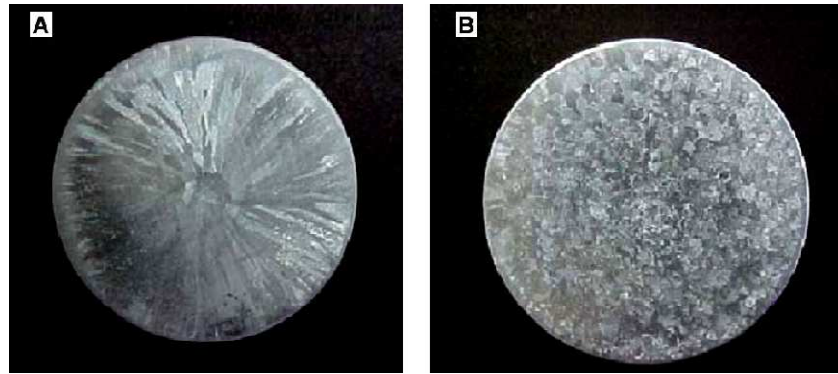


Figura 2.40.- Micrografías de una estructura sin afino de grano (izquierda) de una aleación Al6Mg con solidificación dendrítica columnar; y la dramática reducción del tamaño de grano con la incorporación de un afinador de grano (derecha) en la cual se observa una estructura dendrítica equiaxial (VERRAN,G, 2006)

En el afino con sodio y fósforo, particularmente efectivo para el afinamiento de aleaciones AlSi, eutécticas e hipereutécticas. El sodio modifica el silicio eutéctico y el fósforo refina el silicio primario figura 2.41, cantidades mínimas de sodio provocan un subenfriamiento y un desplazamiento de la concentración eutéctica hacia contenidos más altos de silicio. Debido a la obstaculización de la difusión de los átomos de Si en la colada y del crecimiento cristalino, se forman cristales muy finos y de aspecto más o menos redondeado ⁽¹⁾.



Figura 2.41.- Comparación de microestructuras en lingotes fabricados de AlSi, con y sin afinamiento de grano [Totten²].

La introducción de sodio debe hallarse en un porcentaje del orden de centésimas, se realiza mediante sodio metálico, sales y tabletas. Cuando se trata de fundición en arena la cantidad de afino utilizado depende de la temperatura de vertido y del espesor de pared de la pieza fundida. En las zonas con paredes débiles se consigue una estructura mas fina, debido a una solidificación más rápida. Lo mismo se puede decir para la fundición en coquilla, que no requiere ineludiblemente un refinado pero no obstante se disminuye la tendencia a la formación de rechupes, adicionando aproximadamente, el 50% de la cantidad prescrita para la fundición en arena .

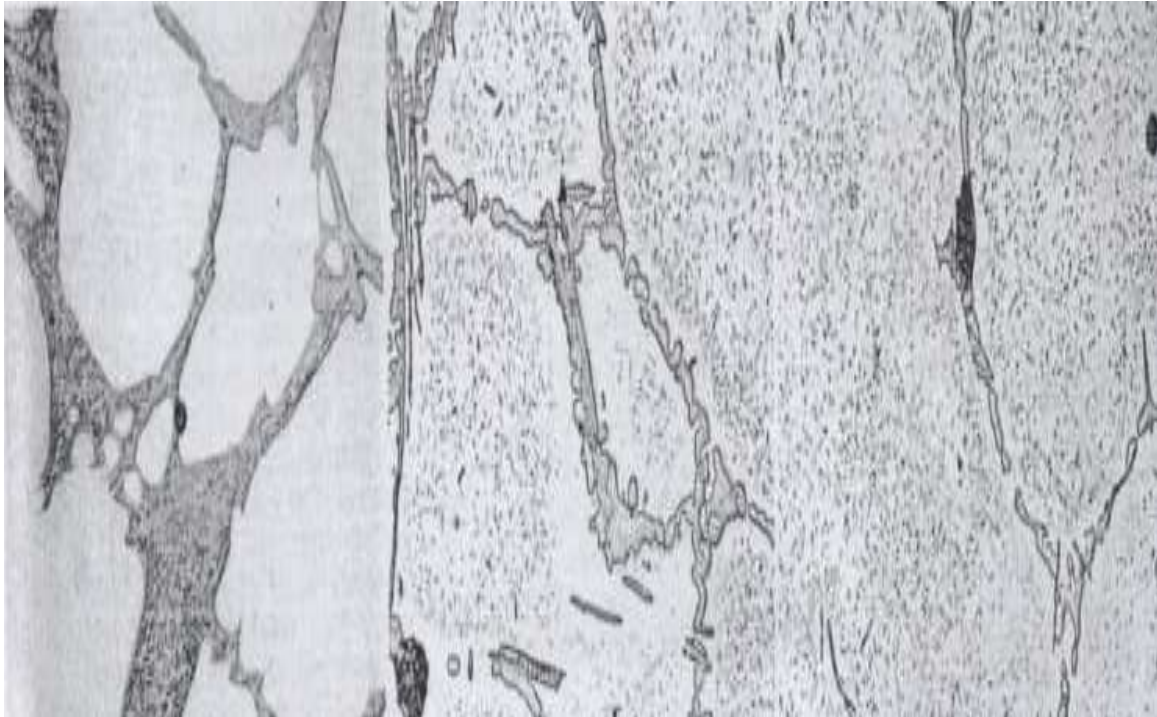
2.4.2 MICROSEGREGACIÓN

La segregación debe analizarse y debe predecirse para estar dentro de los límites de la especificación. La formación de canales de segregación debe evitarse si es posible. La mayoría de los adicionantes hechos para aluminio son menos solubles en la fase sólida que en la fase líquida es más, para la mayoría de solutos, el aluminio exhibe un término relativamente bajo de solubilidad sólida. Así los constituyentes de la segunda-fase (CuAl_2 , AlMgZn_2 , CrAl_7) están invariablemente presentes en estructuras de aluminio.

Por esta razón, las dendritas, las cuales son la primera porción de una estructura de fundición en solidificar, son bajos en contenido de soluto pero están rodeados por redes interdendríticas de uno o mas constituyentes de segunda- fase. El tamaño y distribución de los constituyentes depende de un sinnúmero de factores como la concentración de soluto, el espaciamiento de brazos dendrítico, y el tamaño de grano. Así las piezas de aleaciones de aluminio deberían ser calentadas por un largo tiempo a temperaturas cerca de la temperatura de solidus (577°C) para homogenizar la estructura ⁽¹⁰⁾.

2.4.3 HOMOGENIZACIÓN

El principal beneficio de la homogenización es la reducción de la microsegregación la cual mejora la respuesta de una pieza a subsecuentes tratamientos termomecánicos. Esta reducción es ilustrada en las micrografías de la figura 2.42, las cuales muestran la disolución, y precipitación en una forma mas fina, de constituyentes gruesos de CuAl_2 en una aleación 2011.



a)

b)

c)

Figura 2.42.- a) aleación 2011 redes de CuAl₂ en los límites de grano del aluminio, b) igual que en a) pero homogenizado a 525°C por 2 horas, c) igual que en las micrografías a) y b) pero homogenizados a 525°C por 12 horas, el CuAl₂ en el límite de grano esta casi completamente disuelto y hay mucha precipitación fina de CuAl₂ dentro de los granos de aluminio [Metals Handbook V.7¹⁰].

Otro beneficio derivado de la homogenización (tratamiento térmico) es la reducción de esfuerzos internos residuales los cuales resultan por la presencia de gradientes de temperatura durante la solidificación ⁽¹⁰⁾.

Sin embargo si estos esfuerzos internos están en o por encima del nivel crítico para el crecimiento de grano, granos largos podrían formarse durante un tratamiento térmico a alta temperatura como la homogenización, figura 2.43 ⁽²⁾.

Asumiendo que otras condiciones de fundición son satisfactorias, cavidades angulares interdendríticas son típicas de aleaciones de aluminio. La estructura de tales aleaciones no pueden ser mejorados por homogenización convencional el cual solo sirve para redondear cavidades largas y promueven el crecimiento de poros mas pequeños, estas aleaciones deben ser sometidas a tratamientos térmicos diferentes como recocido, envejecimiento etc... ⁽¹⁰⁾

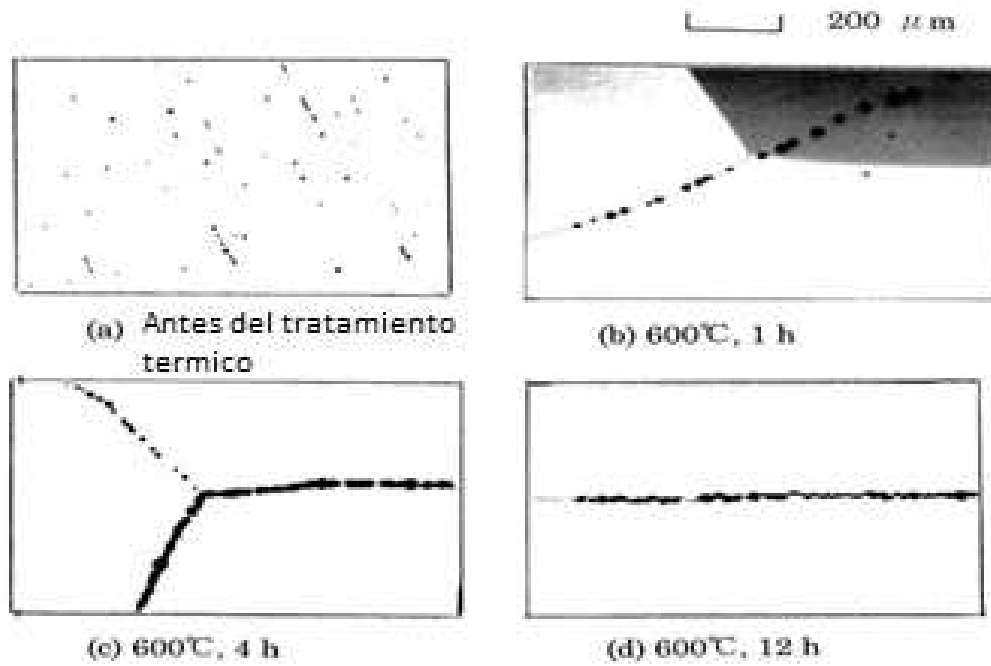


Figure 2.43.- Desarrollo de porosidad de gas de hidrógeno en 99.99% Al, por tratamiento térmico de homogenización. (a) antes de calentar; (b) 600°C, 1 h.; (c) 600°C, 4 h., (d) 600°C, 12 h. [Totten²].

CAPITULO III

OBTENCION DE LA ALEACION

3.1 CLASIFICACION DE LA CHATARRA DE ALUMINIO

Como se ha señalado, el aluminio tiene múltiples aplicaciones en diferentes sectores industriales. Para responder a las necesidades de cada sector el aluminio debe ser aleado con otros metales formando una aleación específica que contiene una diferente composición química con respecto a las otras y es por esto que los productos complementarios del aluminio varían de acuerdo al tipo de uso que se le requiera. En la tabla 3.1 se presentan las aleaciones más comerciales del aluminio, las principales aplicaciones que éstas tienen y los Aleantes complementarios de cada aleación.

Tabla 3.1.- Productos complementarios de las diferentes aleaciones del aluminio.

Presentación	Aleación (AISI DIN)	Principal aplicación	Producto complementario
Productos Laminados	1070	Puede utilizarse en forma de laminas o papel en la industria química principalmente	Silicio , Cobre , magnesio , Zinc , Hierro y Titanio
	5000 G-AISI8Cu3Fe	Se usan en la industria del transporte en carrocerías , tanques o escaleras : ; son ideales para cuerpos de embarcaciones marítimas	Silicio , Cobre , Magnesio , Zinc , Hierro y Titanio
	5052 G-AISI12Cu	Para la fabricación de envases para bebidas gaseosas , envases para aerosoles	Silicio , Cobre , magnesio , Zinc , Hierro y Titanio
Productos Extruidos	1050	Como tubería en la industria química y alimenticia	Silicio , Cobre , Magnesio ,Magnesio , Zinc , Hierro y Titanio
	6063	Es la aleación por excelencia para la fabricación de perfiles arquitectónicos , tubería y en general para aplicaciones industriales donde la resistencia mecánica requerida es moderada	Silicio , Cobre , magnesio , Zinc , Hierro , Titanio , Cromo y Plomo
	6061	En alambres para conductores eléctricos , perfiles para uso arquitectónico e industrial donde se requiere una resistencia mecánica superior a la de aleación 6063	Silicio , Cobre , Magnesio ,Magnesio , Zinc , Hierro , Titanio , Cromo , Plomo

	6001	En perfiles para uso estructural, barras para maquinado de piezas, elementos de carga en vehículos automotores.	Silicio , Cobre , Magnesio ,Magnesio , Zinc , Hierro , Titanio , Cromo , Plomo
Productos Fundidos	Aleaciones 100 300	Pistones, Válvulas, cabezas de cilindros, engranes, partes automotrices, reflectores.	Silicio, Cobre, Magnesio, Magnesio, Zinc, Hierro, Titanio, Cromo.

3.1.2 DEMANDA DE LA INDUSTRIA PARA EL ALUMINIO.

La demanda de la chatarra de aluminio se centra en nuestro país al reciclaje de aluminio secundario. Por lo que este estudio se centrara en el aluminio secundario (segundas o terceras fundiciones a partir de reprocesos).

El aluminio que se recicla en el país es el remanente de perfilería de aluminio, alambrón de aluminio, piezas automotrices, piezas de maquinas importadas y reprocesos nacionales de aluminio.

Siendo esta una clasificación en la cual se encuentran el mayor porcentaje de la masa total de aluminio reciclado en el país.

En la tabla3.2 se muestra un aproximado del reciclado para el 2010 de aluminio en Quito. (Fuente AFME).

Tabla3.2.- Clasificación del aluminio reciclado en Quito para el 2010.

Elementos	Porcentajes (%)
Perfilería de aluminio	44
Alambrón de aluminio	7
Piezas Automotrices	25
Piezas de maquinas importadas	8
Reproceso nacional de aluminio	12
Otros	4

En la tabla 3.2 se determina que los componente de mayor aplicación para la obtención de la aleación se base en perfilería de aluminio y piezas automotrices, las primeras con alto contenidos Fe, 0.30 % y con 0.10% Cu; las piezas automotrices con un porcentaje de 8 al 12 % de silicio como elemento aleante principal ⁽¹⁾.

Cabe aclarar que el reproceso nacional es casi total perfil de aluminio y las piezas de maquinas aleaciones G-ALSi8Cu3 (DIN 1700) y la 223.

El estudio de este trabajo se centra al control de las aleaciones del grupo 3xx, y G-ALSiCu⁽¹⁾.

3.1.3 CONDICIONES FÍSICAS DE LA CHATARRA DE ALUMINIO NACIONAL.

Como la mayor parte de la chatarra de aluminio formo parte de un elemento sea este mecánico o arquitectónico dado de baja del servicio que prestaba, se encuentra con presencia de oxido, otros metales y no metales, pintura, el anodizado de color en la perfilería, grasas y aceites sobre los elementos automotrices.

La clasificación de la chatarra para el uso se la realiza a mano y con el criterio de la tabla 3.2. La determinación de los porcentajes de elementos aleantes de cada uno es diferente, por lo que se ha optado por una clasificación en poco más fácil para la manipulación.

Tabla3.3.- Nuevo criterio de clasificación de la chatarra

Elementos	Nueva Clasificación
Piezas automotrices	Alto contenido de silicio ALSi
Piezas de maquinas	
Pistones	
Bloques de motor	
Reprocesos Nacionales	Reprocesos Nacionales
Elementos extruidos	Aleación de aluminio Al95Cu
Laminados	
Embases	
Perfilaría de aluminio	
Piezas industriales	
Aleaciones de Zamac	Aleación Al Zn4

Para el caso de los reprocesos nacionales tienen una variación en el contenido de perfilería entre el 60 % al 80% y de 40% al 20 % de piezas con un alto contenido de silicio. Por lo tanto se considera como un ítem importante en la nueva clasificación de la chatarra.

Con esta clasificación se continuara el presente trabajo puesto que es lo más utilizado en la industria nacional y esta tesis está enfocada de esta manera.

La fundición de elementos mecánicos se ha aumentado en los últimos años por la demanda de productos que no son fabricados en el país y tampoco son abastecidos por las importaciones ya sea por costo o calidad, cuando se importa este tipo de productos la gran mayoría son de la industria Colombiana.

3.2 PREPARACIÓN DE LIGA PRIMARIA

Liga primaria es la designación metalúrgica previa para la obtención de una aleación dada.

Para la preparación se ha llevado a cabo análisis del uso de desgasificantes, afinadores de grano, fundentes y desgasificado.

Para obtener las condiciones ideales de temperatura, colabilidad, cantidad de porosidad presente se han realizado las siguientes pruebas preliminares.

3.2.1 PREPARACION DEL HORNO

Para disminuir las variables que influyen en el proceso de fundición se ha realizado un mantenimiento correctivo para el horno de G.L.P. del laboratorio de fundición.

- Corrección de las toberas de combustión
- Reparación de la llama piloto
- Nueva tolva para el venterol

Que se consiguió con las operaciones de mantenimiento:

3.2.1.1 Corrección de las toberas de combustión

- Se consigue un aumento en el flujo de la mezcla aire combustible el cual aumenta la eficiencia del horno.
- Disminuye el tiempo de fundición de la colada y por ende el contacto de gases de combustión al material y la presencia de oxidación del mismo.
- Menor consumo de combustible.

3.2.1.2 Reparación de la llama piloto

- Esta operación ayuda al fácil encendido y operación del horno en los primeros minutos de encendido.
- Disminuye tiempos de calentamiento en vacío del horno

3.2.1.3 Nueva tolva para el venterol

Con esta operación que es la más importante se ha cambiado de un venterol de 2.8 m³ / min a otro de 4.5 m³ /min.

Además de un aumento en el flujo de aire que entra al horno en 60 %

Con lo cual el frente de llama puede alcanzar los 1400 °C como es teóricamente y la temperatura de operación del horno volvió a condiciones de origen de alrededor de 1100 °C

3.2.2 Preparación de la herramienta

Para continuar con la disminución de las variables en la formación de porosidades e inclusiones no metálicas en las piezas de aluminio se ha tomado en cuenta que debe existir herramienta especializada para su manipulación.

A continuación se presenta una descripción para la preparación de las herramientas que se van a utilizar.

- Diseño y construcción del escoriador de acero inoxidable.
- Diseño y construcción del crisol de hierro fundido.
- Diseño y construcción de la lanza de insuflado.

3.2.2.1 Diseño y construcción del escoriador de acero inoxidable



Figura 3.1.- Escoriador de acero inoxidable

Como en el comercio no existe un escoriador que cumpla con las normas (según Berg código 222083 o 2222088) para la fundición, se fabricó de acero inoxidable tipo 316. Para su fabricación se realizó un corte mediante plasma a una plancha de acero inoxidable tipo 316 con las dimensiones siguientes: Diámetro 140mm x 2 mm de espesor. Luego se realizaron agujeros de 2 mm en una serie de anillos concéntricos (figura 3.1), en total 15 agujeros; después dar deformación de 10 mm de foco en una prensa hidráulica.

Finalmente debe ser soldada a una barra de acero comercial de longitud 115 mm.

3.2.2.2 Preparación del crisol de hierro fundido

Las principales ventajas de los crisoles de hierro fundido son una mejor conductividad calorífica, no disminuye con el tiempo de uso, no es higroscópico ni permeable a los gases.

Sin embargo las desventajas de este tipo de crisoles es que el uso de las sales, para el control de defectos en la colada, son altamente corrosivas con el

hierro, por lo cual es primordial el uso de una pintura protectora refractaria, teniendo en cuenta los inconvenientes de uso de este tipo de pinturas, ya que en el momento de ingreso de piezas al interior del crisol recubierto con la pintura refractaria, puede destruirse la capa de pintura, por lo que requiere una manipulación más delicada que con el uso de crisoles de arcilla o grafito arcilla.

Otro punto en consideración es la formación de una cascarilla debido al uso y el impacto de los gases de combustión, el peso de la colada provoca además una deformación del crisol (abarrigamiento), llegando en casos extremos a la formación de grietas y la roturas en funcionamiento ya que su operación es a altas temperaturas, por lo tanto se debe realizar una inspección de las condiciones físicas del crisol antes de su uso.

3.2.2.2.1 Diseño y construcción del crisol de hierro fundido



Figura 3.2.- Crisol de Hierro fundido

Para el diseño se ha tomado en consideración el uso de una camisa de hierro fundido procedente de un motor de combustión el cual es una aleación (UNE 36-003-71 (4R)). Y de dimensiones de 150mm de diámetro y 260mm de longitud, con un espesor de 10 mm.

Se ha maquinado el cilindro para poder ingresar fácilmente en el horno de G.L.P. del laboratorio quedando de las siguientes dimensiones, 150 mm de diámetro y 190mm de longitud.

La tapa inferior se ha tomado de una plancha circular de acero A36 y de diámetro 160 mm y espesor de 3 mm.

Se realizó un chaflanado de 3 mm el cual ayudara a la soldadura con un tipo de junta tipo esquina a la plancha, con electrodo ENiCuG2 indura con una intensidad de 95Amp, para realizar un cordón continuo de 6 mm de espesor, libre de fugas para ello se utilizaron 6 electrodos de los antes mencionados.

3.2.2.3 Construcción de la lanza de insuflar argón



Figura 3.3.- Lanza de insuflado de Argón

Para el diseño se han tomado algunos criterios que caben mencionarlos

- Debe ser de un material el cual no influya con adición de partículas a la colada, ya sean de metal o no metal.
- Debe ser fácil de reparar y dar mantenimiento.
- Los elementos integrantes deben ser removibles para adecuarse a las condiciones de uso para los diferentes hornos del laboratorio.

- La construcción debe ser la más sencilla para que sea utilizado en forma industrial.

Para cumplir con las dos primeras condiciones se eligió al acero inoxidable tipo 316 el cual es fácilmente soldable y resiste las temperaturas de uso (750°C aproximadamente) y no desprende aleantes a estas temperaturas.

Se selecciono un tubo de diámetro 35 mm y espesor de pared de 2 mm y de longitud 1050 mm.

3.2.2.3.1 Primer diseño

Siguiendo las sugerencias de las referencias ^{(1),(5)} el primer diseño tiene las siguientes características:

- 8 agujeros de 1.8 mm en la base del tubo previamente cerrado.
- Un niple tipo 1/2 NPT con una junta rápida para su utilización.
- Una llave tipo globo de 1/4 para el control del caudal de argón.

Se realizaron pruebas en un embase de agua para determinar el tamaño de las burbujas de argón y el numero de burbujas por área cuadrada, figura 3.4.



Figura 3.4.- Pruebas del tamaño de burbujas del primer diseño de la lanza de Argón.

Las pruebas arrojaron los siguientes resultados:

- Distribución no uniforme de las burbujas.
- Tamaño grande de las burbujas.
- El flujo de las burbujas no era constante.
- Las burbujas no se esparcen por todo el recipiente, sino que ascienden a la superficie pegados a la lanza (lo ideal es que las burbujas se dispersen lo más lejos posible de la lanza para que cubran la mayor cantidad de superficie en el recipiente).

3.2.2.3.2 Segundo diseño

Para mejorar el desempeño de la lanza de insuflado de argón y una mejor distribución de la burbujas de la misma se realizó un segunda campana de acero inoxidable de 100 mm de diámetro y espesor de 3mm con una serie de 10 agujeros de 2 mm y una concavidad de 15 mm, soldado al primer diseño como muestra la figura 3.5.



Figura 3.5.- Pruebas del tamaño de burbujas del segundo diseño de la lanza de Argón.

Además por seguridad se añadió un escudo de protección de 160 mm de diámetro y de altura variable para que se adecue a los crisoles que tienen en el laboratorio (figura 3.3).

Resultado de las pruebas del segundo diseño.

- Aumento del número de burbujas de argón de 40% por cm^2 .
- Mejor distribución de las burbujas.
- Burbujas de menor área superficial, alrededor de 8 mm de diámetro.
- Menor turbulencia en la superficie.
- Mayor esparcimiento de las burbujas con respecto a la lanza.

Para las pruebas de la presente tesis se ha elegido el segundo diseño por las ventajas descritas.

3.2.3 PREPARACIÓN DE LA PINTURA REFRACTARIA

Siendo la pintura refractaria una de las condiciones con la cual se disminuye la presencia de impurezas en la colada de aluminio mediante el recubrimiento con una pequeña capa de pintura en las herramientas en contacto con el aluminio, se hace necesario su uso ya que el hierro, el Cromo y el Manganeso presentes en el acero inoxidable como aleantes principales, pueden generar la presencia de inclusiones en la colada lo cual afecta las propiedades mecánicas del aluminio.

Es primordial el recubrimiento de pinturas que cumplan con las siguientes condiciones ⁽¹²⁾:

- No se degraden con las altas temperaturas
- No disminuya las propiedades de transferencia de calor entre el caldo y el metal o viceversa.
- Evita la corrosión por altas temperaturas para las herramientas.

Cumpliendo con las características descritas anteriormente se realizó las siguientes pruebas para determinar el tipo de pintura refractaria más idónea para nuestras necesidades.

Tabla 3.4.- Pruebas de pinturas refractarias.

Prueba Pintura	Elementos (%)						Adherencia	Curado
	Yeso	Silicato de Na	Grafito	Carbón	Agua	Alcohol		
1	80	---	---	---	20	---	Buena	malo
2	50	30	---	---	20	---	Malo	Malo
3	40	30	---	---	20	10	Muy malo	Muy malo
4	---	---	70	---	---	30	Malo	Bueno
5	25	---	25	10	20	20	Buena	Muy bueno
6	60	---	30	10	---	---	Muy Bueno	Muy bueno

Todas las pruebas realizadas se curaron con flama mediante un soplete de GLP.

De la tabla anterior se destaca la prueba número 6 en la cual tanto la adherencia como el curado sobrepasaron a los anteriores ensayos ⁽¹²⁾. Las propiedades refractarias de los tres componentes básicos son muy buenas según la norma ASTM 15.01 C0071-08 y cumplen con dicha norma para su aplicación.

Los resultados de la prueba 6 son las siguientes:

- Resistencia a la inmersión en el metal fundido (750 °C)
- Adherencia a altas temperaturas
- Perdida de propiedades refractarias luego del tercer ciclo de operación
- Disminución de la corrosión por altas temperaturas de los útiles en los que fueron aplicados.

3.3 FUNDICION DE LA LIGA PRIMARIA

Para la fusión de la liga primaria se emplea los útiles y herramientas fabricados, la pintura refractaria obtenida (prueba 6).

La fusión se realizara en los siguientes crisoles:

- Crisol de Arcilla Grafito.
- Crisol de hierro fundido.

La designación de las pruebas de las probetas son las siguientes:

- Fundición en crisol de arcilla – grafito únicamente el numero de prueba (#).
- Fundición en crisol de Hierro fundido (fe)
- Para las pruebas finales en ambos crisoles y con los mismos parámetros (a)

3.3.1 FUNDICIÓN EN CRISOL DE ARCILLA GRAFITO

Para la fusión en el crisol de Arcilla Grafito se utilizo el horno de GLP del laboratorio. Se realizaron 5 pruebas distintas con variaciones de carga de metal, tipo y porcentaje de fundente:

Tabla 3.5.- Pruebas de fundición en crisol de arcilla grafito

Prueba	*Composición (%)			Tiempo de Pre calentamiento crisol (min)	Tiempo de fusión (horas)	Fundente	Cantidad de porosidad (%)	Observaciones
	Perfilaría	Fundición Alto Si	Reprocesos Nacionales					
1	30	30	40	0	1.20	Sin fundente	15,07	Fundición sin la presencia de ningún fundente
2	40	20	40	0	1.20	Con NaCl 3 %	12,33	El NaCl se utilizo para el afinamiento de grano
3	50	30	20	5	1.10	Con NaCl 1.5%	11,18	El NaCl se utilizo para el afinamiento de grano
4	60	30	10	10	1	Con fundente ALU FUNDEX al 0.15 %	10,54	El fundente se utilizo para la cobertura y protección según catalogo
5	60	30	10	15	1	Con ALUFUNDEX Fundente al 0.25 %	10,54	El fundente se utilizo para la cobertura y protección según catalogo

* Cantidad de chatarra a fundir 6Kg.

3.3.1.1 Análisis de las pruebas realizadas en el crisol de arcilla grafito

Análisis de la prueba 1

Esta prueba se realizo sin el uso de fundentes y se determino mediante el método de densidad relativa el contenido de porosidad, fue de 15,07 %, este es el punto de partida como referencia en el contenido de porosidad inicial en la presente tesis, ya que en el resto de pruebas se determinaran diferentes

parámetros hasta obtener la metodología mas conveniente para la reducción de la porosidad.

Análisis prueba 2

Para esta prueba se modifico la carga metálica, la perfilera se modifico en aproximadamente 10 % , además su utilizo NaCl Al 3 % precalentado a 150° C por 30 min para eliminar la humedad que podría estar presente en la NaCl, como lo recomienda la referencia (17). El resultado es un contenido de porosidad del 12,33%. Debido al uso de NaCl se tiene una disminución del tamaño de grano y como consecuencia una disminución en los espacios interdendriticos, sitios que forman poros por contracción, y puede ser por este motivo la disminución en la cantidad de porosidad.

Análisis prueba 3

En esta prueba se han modificado la cantidad de perfilera siendo un 50 % de la cantidad final a fundir, y una disminución de la cantidad de reprocesos nacionales de un 50 % respecto a la prueba anterior. Además se precalentó el crisol durante 5 minutos. Cabe destacar que el precalentamiento no afecto el tiempo de fusión final pero si los resultados , el fundente utilizado fue el NaCl está ves molido y reducido en un 50 % con respecto a la prueba anterior referencia (13). Obteniendo un contenido de la porosidad de 11.18% , los efectos del uso del NaCl son los mismo que los descritos en el apartado anterior.

Análisis prueba 4

En esta prueba se aumento la carga de la perfilera y se redujo los reprocesos nacionales en 50 % respecto a la prueba anterior. Se precalentó el crisol durante 10 minutos, se pudo observar una reducción del tiempo final de 10 minutos, comparado con el tiempo de fusión de la prueba 1 se observa una reducción de 20 minutos en el tiempo de fusión final lo que da un menor tiempo de contacto de la colada con la atmosfera dentro del horno y evita un sobrecalentamiento de los aleantes de bajo punto de fusión lo cual es siempre recomendado, referencia (1).

Se utilizo el fundente ALU FUNDEX EXTRA, como primera recomendación como lo indica el anexo 1. Se obtuvo un contenido de la porosidad del 10,54 % por los efectos del fundente ALU FUNDEX EXTRA (anexo 1).

Análisis prueba 5

En esta prueba no se vario la cantidad de los componentes de la carga, se vario el tiempo de precalentamiento pero no se vio afectado el tiempo de fusión final de la prueba 4, se empleo ALU FUNDEX EXTRA al 0,25 % obteniendo un contenido de porosidad del 10, 54 % observando que se mantuvo el contenido de porosidad respecto a la prueba anterior.

Conclusiones.

Para las siguientes pruebas en la presente tesis se aplicaran los procedimientos de las pruebas 4 y 5 por presentar una menor cantidad de porosidad.

En la tabla 3.6 los valores obtenidos de la cantidad de porosidad, se obtuvieron mediante el análisis de densidad relativa, el cual esta detallado en la sección 3.5 del presente capitulo.

3.3.2 FUNDICIÓN EN CRISOL DE HIERRO FUNDIDO

Para las pruebas en el crisol de hierro fundido se mantuvieron los mismos parámetros que en el ensayo con el crisol de arcilla grafito con los porcentajes de tipo de carga de metal y fundente de las pruebas 4 y 5, debido a que en estas pruebas (4 ,5) se obtuvo una menor cantidad de porosidad.

La tabla 3.6 muestra los resultados de la fusión en el crisol de hierro fundido.

Tabla 3.6.- Pruebas de fundición en crisol de hierro fundido

Prueba	Composición (%)			Tiempo de Precalentami ento crisol (min)	Tiempo de fusión (horas)	fundente	Porosidad	Observaciones
	Perfilaría	Fundición Alto Si	Reprocesos Nacionales					
4fe	60	30	10	10	35	Con fundente ALU FUNDEX al 0.15	8,82	El fundente se utilizo para la cobertura y protección según catalogo
5fe	60	30	10	15	30	Con ALUFUNDE X Fundente al 0.25	1,07	El fundente se utilizo para la cobertura y protección según catalogo

Del análisis de la prueba de la tabla 3.6 se denota que el tiempo de fusión es inferior al de crisol de Arcilla grafito y que los porcentajes de porosidad son menores.

3.3.2.1 Análisis de las pruebas realizadas en el crisol de hierro fundido.

Análisis de prueba 4fe

Se denota una disminución del tiempo de fusión de 45 minutos respecto a la prueba 1. Obteniendo un contenido de porosidad del 8,82%, lo cual indica la importancia del tiempo de contacto de la colada con la atmosfera del horno.

Análisis prueba 5fe

En la prueba 5fe se obtiene la menor cantidad de porosidad, el uso de ALUFUNDEX muestra ser más efectivo en este caso en comparación con la fundición en el crisol de arcilla grafito. Como conclusión se puede decir que el tiempo de fusión es primordial para el uso del fundente pues este muestra su beneficio para tiempos de fusión no muy prolongados.

3.3.3 ANALISIS QUIMICO DEL FÚNDETE ALU FUNDEX EXTRA.

Dado que el distribuidor del fundente no tiene la composición química del fundente, se realizo un análisis en el Difractometro D8 Advance y el programa Diffrac plus para cualificar las muestras.

Tabla 3.7.- Resultados de los análisis del fundente ALU FUNDEX EXTRA.

ALU FUNDEX EXTRA	
Mineral	Formula
Halita (Mayor cantidad)	NaCl
Thenardita	Na ₂ SO ₄
Villaumita	NaF
Milladrita	Na ₂ SiF ₆
Coesita	SiO ₂

De la tabla 3.7 se puede concluir que el ALUNFUNDEX EXTRA es únicamente un fundente de limpieza, tiene como elementos primordiales cloruros y fluoruros los cuales limpian la colada y reducen el tamaño de grano, con los beneficios que esto conlleva.

3.4 DESGASIFICACIÓN

Uno de los objetivos de la presente tesis es la reducción casi en su totalidad de la presencia de hidrogeno (principal causante de la porosidad gaseosa), impurezas, rechupes. Para esto se procede a desgasificar la colada.

El método de desgasificado se la hará con el uso de pastillas desgasificantes he insuflado de argón por el método de lanza.

Las pastillas desgasificantes son utilizadas en la presente tesis por que son las mas aplicadas en la industria nacional, y el método de insuflado de argón poco aplicado en nuestro medio .En la presente tesis se utilizara el equipo diseñado para el insuflado de argón y siguiendo las recomendaciones de los autores de las referencias (1), (2), (11).

3.4.1 APLICACION DEL DESGASIFICANTE APARTAGAS.

Para las pruebas realizadas para el desgasificado se tomo como referencia las recomendaciones de JUVAL para el APARTAGAS (siendo este el más utilizado en la industria nacional según AFME) como indica en el anexo1.

Para el caso del APARTAGAS el porcentaje varia de 0,15 % en peso de aluminio para piezas delgadas y de 0,25 % en peso de aluminio para lingotes.

3.4.2 ANALISIS QUÍMICO DEL FÚNDETE APARTAGAS

Dado que el distribuidor del fundente no tiene la composición química, se realizo un análisis en el Difractometro D8 Advance y el programa Diffrac plus para cualificar las muestras.

Tabla 3.8.- Resultados de los análisis del fundente APARTAGAS

APARTAGAS	
Mineral	Formula
Cuarzo (Mayor Cantidad)	SiO ₂
Fluorita	CaF ₂
Hexacloroetano	C ₂ Cl ₆
Coesita	SiO ₂
Arcantita	K ₂ SO ₄

El análisis de la tabla 3.8, nos muestra la presencia de hexafluoroetano el cual remueve el hidrogeno disuelto en la colada. También se observa la presencia de oxigeno el cual ayuda a la reducción y volatización de los cloruros de aluminio formados por la presencia del hexafluoroetano. El K₂SO₄ ayuda a la eliminación del óxido de magnesio muy perjudicial en el aluminio.

3.4.3 INSUFLADO CON LANZA DE ARGÓN.

Para el insuflado de argón mediante lanza se tomo como referencia lo descrito en (9) siendo este de 2 lt/ min para aleaciones tipo 356 y 319, y en la referencia (2) es de 0.3 lt/min a 0,4 lt / min de argón por Kg de aluminio.

3.4.4 PRUEBAS DE DESGASIFICADO.

Con base en las referencias anteriores se ha elaborado la tabla 3.9 en la cual se muestran los resultados , en contenido de porosidad para cuatro probetas , con el uso del método desgasificación mediante pastillas desgasificantes y el método de insuflado de Argón mediante lanza.

Tabla 3.9.- Pruebas de Desgasificación de aluminio

Prueba	APARTAGAS (%)	Argón		Cantidad de escoria(Kg)	Cantidad de impurezas (Kg)	Peso del metal (Kg)	Porosidad (%)
		(lt/min)	Tiempo (min)				
4 a	0.15	2	4	0.140	0.055	6	5,88
5 a	0.25	2	4	0,10	0.04	6	7,78
4 fea	0.15	3	3	0.010	0.04	6	4,94
5 fea	0.25	3	3	0.160	0.06	6	0,21

De la tabla 3.9 se denota que la probeta 5 fea es la que mejores resultados ha arrojado por lo que se tomara como referencia para la metodología de la aleación.

3.4.4.1 Análisis de las pruebas de desgasificado

Análisis prueba 4a

Con el uso del APARTAGAS y el insuflado de Argón se ha obtenido un contenido de la porosidad de 5,88 % , ya que el APARTAGAS es un tipo de fundente de desgasificación, y junto con el uso del Argón eliminan las impurezas presentes en la colada por una acción conbinada de formación de

cloruros de aluminio y ascenso a la superficie con ayuda de las burbujas de argón por el insuflado, el insuflado además remueve el hidrogeno presente en la colada principal fuente de poros gaseosos en la fundición de aluminio.
Sección 2.3.2.2

La cantidad de 8 litros de argón para 6 kilogramos de aluminio cumple con lo descrito en la referencia (9).

La cantidad utilizada de APARTAGAS es de 0,15 % como lo recomienda el fabricante del mismo. Teniendo una cantidad de escoria después del uso del desgasificante de 0,140 kg que equivale a 2,33 % de escoria.

Como observación se tiene que la escoria recogida fue únicamente polvo sin la presencia de aluminio.

Luego de la aplicación del Desgasificante se realizo la inmersión de la lanza de argón por 4 minutos con un caudal de 2 lt/min.

La escoria presente tiene un alto contenido de aluminio presente debido a que además de la extracción del hidrogeno de la colada también extrajo también impurezas metalicas y no metalicas de compuestos de aluminio, la cantidad de esta escoria es de 0,055kg. Que equivalen a 0,91 % de escoria.

El total de escoria que se extrajo de la colada fue de 3,25 %.

Análisis prueba 5 a

En esta prueba se han mantenido los mismos parámetros para el insuflado de Argón y se realizo una variación en la cantidad de desgasificante de 0,25 %.

La extracción de la escoria fue en forma de polvo libre de aluminio y en una cantidad de 0,10 Kg que equivale a 1,67 %.

La escoria que se obtuvo después del insuflado de Argón fue de 0,04 Kg lo que equivale a 0,67 % de escoria. Con presencia de aluminio, como lo descrito anteriormente debido a la extracción de impurezas y no metales.

La cantidad de porosidad fue de 7,78 %.

La cantidad de escoria total luego de la prueba fue de 2,34 %.

Análisis prueba 4 fea

Para esta prueba se han variado la cantidad de Argón y el tiempo de insuflado, con un total de Argón insuflado de 9 litros.

La cantidad de desgasificante fue la misma que en la prueba 4.

La cantidad de escoria después del uso del desgasificante en forma de polvo fue de 0,010 kg lo que equivale a 0,17 % de escoria.

La cantidad de escoria luego del insuflado de argón es de 0,04 kg, con presencia impurezas y no metales. La escoria equivale a 0,67 %.

La escoria total luego de la prueba fue de 0,84 %.

La cantidad de porosidad fue de 4,94 %.

Análisis prueba 5 fea

Para esta prueba se vario la cantidad de Desgasificante en 0,25 %, los parámetros para el insuflado de argón fueron los mismos que en la prueba anterior.

La cantidad de escoria después de la desgasificación fue de 0,160 Kg en forma de polvo libre de metal, teniendo un porcentaje de escoria de 2,67 %.

La cantidad de escoria después del insuflado de argón es de 0,06 kg lo que equivale a 1 %.

La cantidad total de escoria es de 3,67 %.

La porosidad encontrada en esta prueba fue de 0,21 %.

3.5 PRUEBAS DE CANTIDAD DE POROSIDAD.

3.5.1 PRUEBAS DE CANTIDAD DE POROSIDAD MEDIANTE ANALISIS DE DENSIDAD RELATIVA:

La densidad relativa de una sustancia es el cociente entre su densidad y la de otra sustancia diferente que se toma como referencia o patrón ⁽¹³⁾.

Para las pruebas que vamos a realizar tomamos como referencia la densidad del agua como 1g/cc^3 como patrón.

Las pruebas se realizaron en un vaso graduado que cumple con la norma DIN A en ml y una balanza OHAUS de un grado de precisión de $\pm 0,1$ g.

Como se muestra en la figura 3.6 el método para determinar el volumen en agua de la probeta.



Figura 3.6.- Pruebas para encontrar la densidad relativa

Ejemplo práctico para la obtención de la tabla 3.10. Si tenemos como referencia que la densidad del agua es de 1 g/cc^3 por lo tanto el volumen desplazado por la probeta al ser sumergida en agua es igual al volumen de la probeta pero en centímetros cúbicos de aluminio. Por el principio de Arquímedes.

Aplicando la siguiente ecuación:

$$\partial_r = \frac{W_p}{V_p} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Siendo :

∂_r : densidad relativa de aluminio (g/cc^3)

W_p : masa de la probeta (g)

V_p : Volumen de la probeta (cc^3)

De la formula anterior se determina la densidad relativa.

Ahora se debe comparar con la densidad de una aleación de aluminio para la cual se ha tomado como referencia la densidad de la aleación AlSiCu es de 2.71 g/cc^3 , libre de porosidades con la cual se obtiene la ecuación 3.2 para determinar la porosidad:

$$\text{Porosidad} = \left(\frac{\partial_r \times 100}{\partial_{Al}} \right) - 100 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Siendo :

∂_{Al} : Densidad del aluminio AlSiCu (2.72 g/cc^3)

Aplicando la ecuación 3.1 para nuestro caso:

$$\partial_r = \frac{23.1 \text{ g}}{10 \text{ cc}^3}$$

$$\partial_r = 2.31 \left(\frac{\text{g}}{\text{cc}^3} \right)$$

Tenemos una densidad relativa de 2.31 g/cc^3 , con este valor conocido se calcula la porosidad aplicando la ecuación 3.2:

$$\text{Porosidad} = \left(\frac{2.31 \text{ g/cc}^3 \times 100}{2.72 \text{ g/cc}^3} \right) - 100 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$\text{Porosidad} = 15.07 \%$$

Aplicando las ecuaciones 3.1 y 3.2 se determina la porosidad para las 12 siguientes probetas.

Tabla 3.10.- Cálculo de la densidad relativa para las probetas de aluminio

Probeta	Volumen en agua (cc ³)	Peso al aire (g)	Densidad Relativa (g/cc ³)	Porosidad (%)
1	10	23,1	2,31	15,07
2	13	31	2,38	12,33
3	12,5	30,2	2,42	11,18
4	6	14,6	2,43	10,54
5	6	14,6	2,43	10,54
4 fe	10	24,8	2,48	8,82
5 fe	5,5	14,8	2,69	1,07
4 a	12,5	32	2,56	5,88
5 a	12	30,1	2,51	7,78
4 fea	14	36,2	2,59	4,94
5 fea	14	38	2,71	0,21

3.5.2 PRUEBAS DE CANTIDAD DE POROSIDAD MEDIANTE ANÁLISIS FOTOGRÁFICO.

Para la realización de estas pruebas se tomaron como referencia los estudios realizados por CAMPBELL, J., 2006 ⁽¹⁸⁾, para lo cual se realiza una muestra metalografía, en la cual se realizó un corte transversal a una probeta colada en arena de dimensiones 40 mm de diámetro y longitud de 80 mm .

Este tipo de análisis es el más fácil para la producción de grandes lotes, antes de los aparatos de presión controlada o prueba de Straube- Pfeiffer ⁽¹⁾.

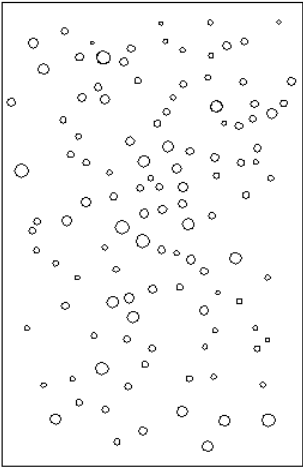

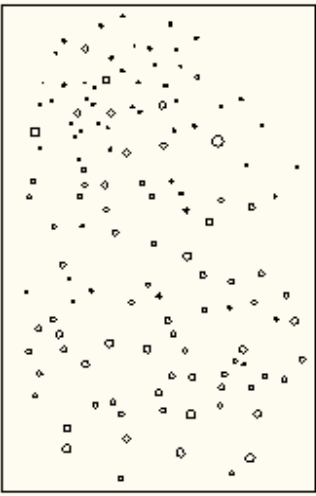

Después del corte realizado se pulen las probetas mediante abrasivos según la norma ASTM E3 – 01.

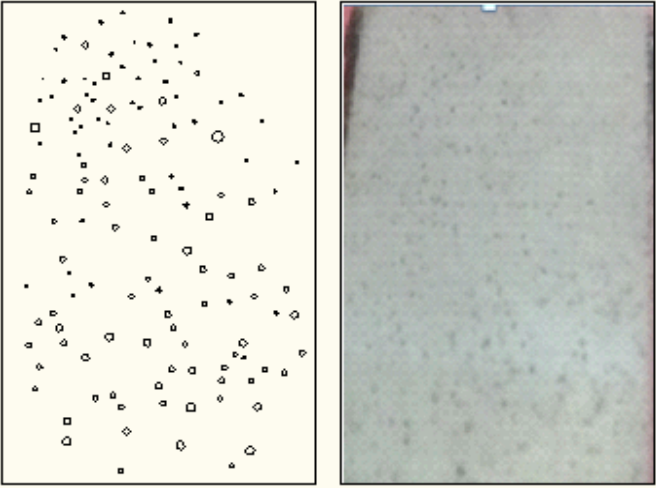
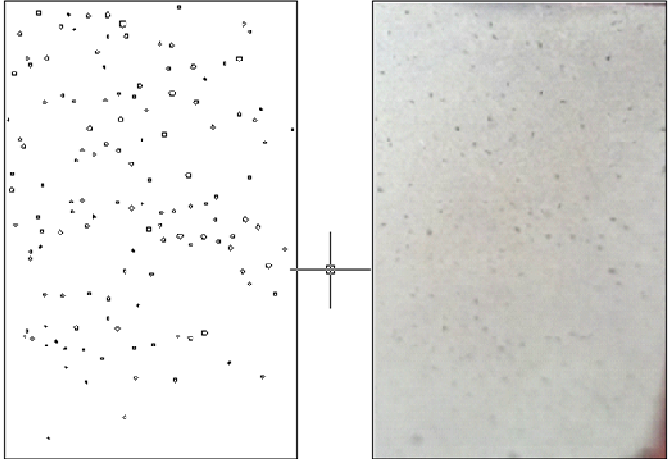
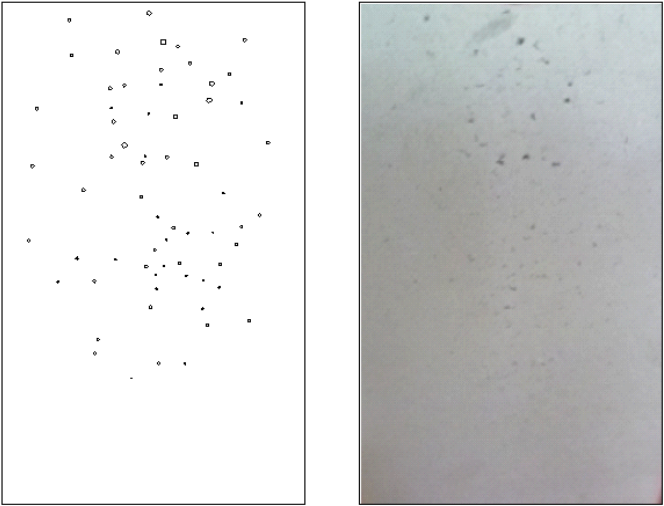
Para luego tomar fotografías de las probetas con una cámara digital, y ser analizadas por medio de un software como Autocad o por medio del Corel Draw, también aplicable por el método de DAS.

El análisis se realizó por medio de una cámara digital marca Panasonic de 7.2 Mega pixeles. Y el análisis digital se lo realizó en el Auto Cad con el método de áreas equivalentes.

Dando como resultados los siguientes datos tabulados en la tabla 3.11

Tabla 3.11.- Determinación de la porosidad por medio de análisis digital

Probeta	Diagrama Digital	Foto Digital Real	Porosidad (%)
1			16.2
3			11.8

5		11.6
4 fea		5.4
5 fea		0.5

De los datos obtenidos en la tabla 3.11 se puede determinar que la relación entre el análisis por medio de densidad relativa y por medio del análisis digital

tienen una variación con un error apreciable ya que el primero lo determina mediante toda la masa o cuerpo de la probeta y el segundo solo por medio de la sección transversal .

Un resumen de las tablas 3.10 y la tabla 3.11 determina el error relativo de los dos métodos anteriores, en la tabla 3.12. Se muestra el porcentaje de este error.

Tabla 3.12.- Determinación del error relativo.

Probeta	Análisis por densidad relativa	Análisis método digital	Error (%)
1	15.07	16.2	7.5
3	11.18	11.8	5.5
5	10.54	11.6	10.1
4fea	4.94	5.4	9.3
5fea	0.21	0.5	138.1

Para la prueba 5 fea el error es grande (por lo hablado en el capítulo 2), la porosidad se forma sobre la línea de solidificación y únicamente en esta zona, el error es mayor ya que en las demás zonas no existe tal cantidad de porosidad.

Del análisis anterior podemos tomar en cuenta que debido al trabajo que implica realizar el análisis de la porosidad por medio de análisis digital y el método de densidad relativa, el error relativo que se obtiene es del 8%. Para los cálculos del presente trabajo se los realizara por medio del análisis de densidad relativa.

3.6 TECNOLOGÍA DEL PROCESO

Para la fusión y colado de la aleación de aluminio que se está obteniendo se han disminuido las variables que incorporan defectos y porosidades.

Para ello se ha determinado dos pruebas:

- Fusión y colado en crisol de hierro fundido con los mismo parámetros (cantidad de fundente, desgasificante e insuflado de argón que en la prueba 5fea).
- Fusión y colado en crisol de arcilla grafito con los mismo parámetros (cantidad de fundente, desgasificante e insuflado de argón que en la prueba 5a).

La fusión y colado de la segunda prueba se ha modificado para obtener una mayor temperatura de colado en comparación con las pruebas 5a. Ya que al momento de insuflar Ar en el crisol de arcilla grafito por el efecto del argón ha descendido la temperatura (temperatura antes del insuflado 740 °C) ,a alrededor de 680 °C por lo cual no se tiene un rango muy amplio de Colabilidad y fluidez , para ello se ha realizado una variación en el procedimiento que consiste en la preparación de ALU FUNDEX EXTRA del 70 % y NaCl al 30 % como fundente de cobertura (17) sobre la capa de colado y el reencendido del horno por 5 minutos aproximadamente para tener un aumento de temperatura de alrededor de 750 °C.

Otro punto importante en la fusión para ambos casos es el calentamiento de las cargas de aluminio en la chimenea del propio horno para disminuir la humedad de las cargas y evitar un choque térmico al momento de ingreso al crisol , también se ha disminuido el picado de las cargas y removido de la chatarra al momento del ablandamiento en el interior del crisol para evitar la formación de capaz de oxido de aluminio innecesario , también el precalentamiento de las herramientas antes de cada picado de aluminio , todo esto para controlar la inclusión de óxidos e impurezas .

3.6.1 PROCEDIMIENTO

A continuación se describen los pasos que se siguieron en la presente tesis para la obtención de la aleación de aluminio, con la menor cantidad de defectos posibles en la colada.

- Se realiza 80 ml de pintura refractaria para pintar los útiles y el crisol de hierro fundido.
- Se curan los útiles y el crisol por medio del un mechero de gas.

- Se enciende el horno y se calienta alrededor de 5 min para eliminar la humedad de las paredes del horno y el hogar del mismo.
- Se calienta el crisol del horno por otros 5 min para eliminar la humedad del crisol y la pintura refractaria.
- Las cargas deben precalentarse en la chimenea del horno.
- Introducir las cargas metálicas dentro del crisol.
- En su debido tiempo utilizar los fundentes siguientes.
- Recomendaciones de uso de fundentes.
 - Fundente de limpieza ALU FUNDEX EXTRA (color rosado) y fundente de desgasificando APARTAGAS (color celeste).

Aplicación:

- Fundente de limpieza dividir en dos parte
- Primera división agregar al crisol a los 2/3 de la carga
- Verter la segunda división al final sin estar encendido el horno.

Para el uso del fundente de escoreo

- dividir en dos partes
- Primera división verter a la mitad de la carga
- Verter la segunda división sin estar encendido el horno.
- Se debe insuflar 1.5 litros de argón por cada kilogramo de aluminio fundido
- En el caso de la fundición en crisol de arcilla grafito se utiliza ALU FUNDEX EXTRA al 70% y NaCl 30 % como fundente de cobertura.

Después de aplicar los pasos anteriores se tiene la colada tratada y lista para ser vertida en los moldes.

Para la aplicación de los fundentes se ha realizado la siguiente tabla 3.13 para facilidad de uso.

Tabla 3.13.- Recomendación del uso de fundentes

Tabla de recomendación de uso fundente para aluminio						
Peso de AL (Kg)	ALU FUNDEX EXTRA(Kg)		APARTAGAS(Kg)		Fundente de cobertura	
	0.3 %	0.5 %	0.25 %	0.15 %	ALU FUNDEX EXTRA	NaCl
100%						
0,5	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,00
1	0,03	0,05	0,03	0,02	0,04	0,01
1,5	0,05	0,08	0,04	0,02	0,05	0,01
2	0,06	0,10	0,05	0,03	0,07	0,02
2,5	0,08	0,13	0,06	0,04	0,09	0,02
3	0,09	0,15	0,08	0,05	0,11	0,02
3,5	0,11	0,18	0,09	0,05	0,12	0,03
4	0,12	0,20	0,10	0,06	0,14	0,03
4,5	0,14	0,23	0,11	0,07	0,16	0,03
5	0,15	0,25	0,13	0,08	0,18	0,04
5,5	0,17	0,28	0,14	0,08	0,19	0,04
6	0,18	0,30	0,15	0,09	0,21	0,05
6,5	0,20	0,33	0,16	0,10	0,23	0,05
7	0,21	0,35	0,18	0,11	0,25	0,05
7,5	0,23	0,38	0,19	0,11	0,26	0,06
8	0,24	0,40	0,20	0,12	0,28	0,06
8,5	0,26	0,43	0,21	0,13	0,30	0,06
9	0,27	0,45	0,23	0,14	0,32	0,07
9,5	0,29	0,48	0,24	0,14	0,33	0,07
10	0,30	0,50	0,25	0,15	0,35	0,08
	Lingotes	Piezas	Lingotes	Piezas	Cobertura crisol	

3.6.2 PRUEBA DE COLABILIDAD DE LA ALEACION



Figura 3.7.- Modelo normalizado (espiral de fluidez).



Figura 3.8.- Espirales de fluidez colados en las pruebas preliminares.

El modelo del ensayo de colabilidad usado es el que se muestra en la figura 3.7 y los resultados de las pruebas se muestran en la figura 3.8

Para la colabilidad de las aleaciones se tomo en cuenta las propiedades obtenidas en las pruebas anteriores sobre todo para las probetas 4 a y 5 fea de mejores resultados.

Tabla 3.14.- Colabilidad de las pruebas conjuntas entre fundentes desgasificantes e índice de porosidad.

*Probetas	Fundente (%)	Desgasificante (%)	Argón		Porosidad	Longitud de la espiral	Carga		
			lt/min	Tiempo (min)			Perfilaría	Alto Si	Reprocesos
4ª	0,15	0,15	2	4	5,88	110	60	30	10
5ª	0,25	0,25	2	4	7,78	119			
4 fea	0,15	0,15	3	3	4,94	103			
5 fea	0,25	0,25	3	3	0,21	123			

*Todas las probetas fueron coladas a 750 °C

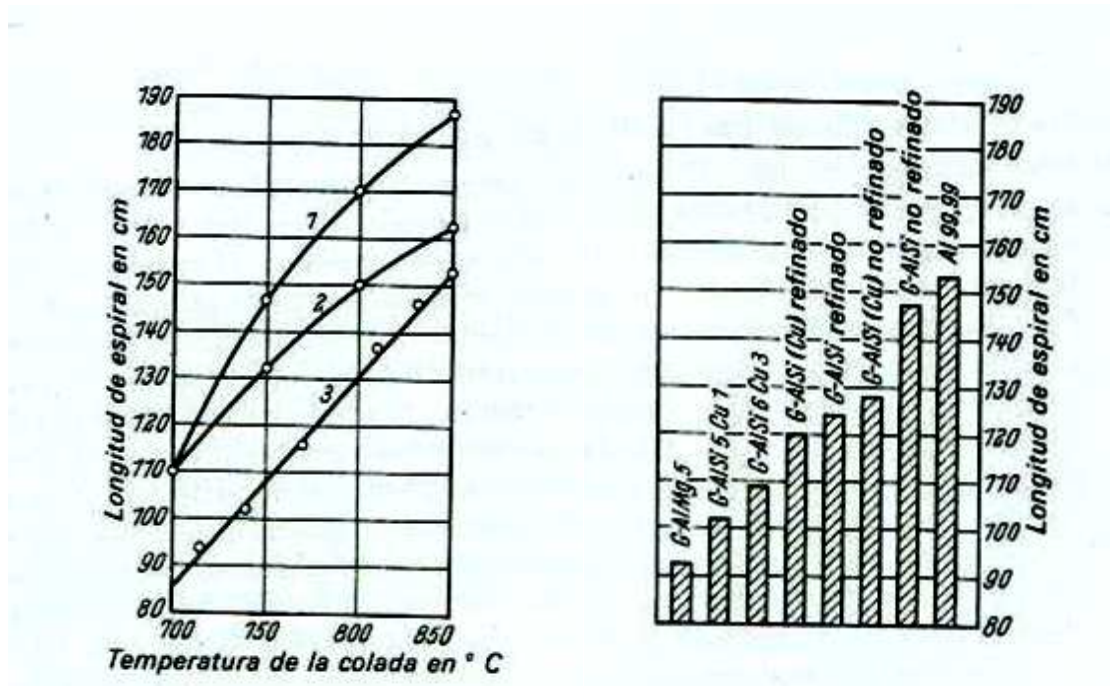


Figura 3.9.- Fluidez de distintas aleaciones de aluminio para moldeo en función de la temperatura de la colada (según Schneider) 1 G-AlSi12, sin afinar; 2 AlSi6Cu3 (0,1 % Mg); 3 G-AlSi6Cu3 (0,3% Mg).

Figura 3.10.- Fluidez de aleaciones de aluminio para moldeo a 750 C (Según Schneider).

3.7 COMPROBACIÓN DE LA ALEACIÓN FINAL

Una vez determinado el procedimiento para la obtención de la aleación, se realizan los siguientes ensayos para determinar el tipo de aleación que se está obteniendo.

- Análisis por espiral de fluidez

- Análisis químico

3.7.1 ANÁLISIS POR ESPIRAL DE FLUIDEZ

Para este método se ha comparado la longitud del espiral de las probetas de la tabla 3.14 con las figuras 3.9 y 3.10 lo cual dio los siguientes resultados:

Tabla 3.15.- Comparaciones con los gráficos de fluidez para aleaciones de aluminio a 750 C

Probetas	Longitud de la espiral	Aleación de aluminio	Longitud de la espiral
4 ^a	110	G-AISI6Cu3	109
5 ^a	119	G-AISI(Cu) refinado	120
4 fea	103	G-AISI5Cu7	102
5 fea	123	G-AISI refinado	125

Las figuras 3.9 y 3.10 son parte de la bibliografía de la referencia (1)

3.7.2 ANÁLISIS QUÍMICO

Este análisis se lo realizó en el laboratorio de Metalurgia extractiva de la EPN, en el equipo Espectrómetro de chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN.

Para este análisis hemos tomado las muestras 5 a y 5 fea ya que son las de mayor fluidez de las pruebas anteriores

Tabla 3.16.- Resultados de composición química

Metales	Probeta 4 a	Probeta 5 fea
Silicio	9,636	5,7874
Hierro	1,005	0,590
Cobre	3,688	1,722
Manganeso	0,206	0,155
Magnesio	0,048	0,211
Cromo	0,063	0,021
Níquel	0,088	0,038
Zinc	0,719	0,518
Titanio	0,030	0,025
Aluminio	84,02	90,60

Del análisis de la tabla 3.16 se puede determinar que la aleación que se obtiene por el presente procedimiento varía sobre todo en el contenido de Silicio entre 9.6% al 5,8% y de Cobre entre el 3.7% al 1.7%.

Según la designación DIN 1700 las aleaciones son G- AlSi9.6Cu3.7 y G- AlSi5.8Cu1.7 respectivamente.

Con lo cual el tipo de aleación que obtenemos tiene una variación en el contenido de Si y Cu principalmente, la cual se puede controlar con una mejor selección de las cargas y sobre todo de los reprocesos.

3.8 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA ALEACION.

- Disminución del 15,07 % al 0,21 % de porosidades e inclusiones metálicas por el método aplicado.
- Con el uso exclusivo de fundente ALU FUNDEX EXTRA la disminución de las inclusiones y porosidad fue 10,54%.
- Con el uso del fundente ALU FUNDEX EXTRA y desgasificante APARTAGAS la disminución de las inclusiones y porosidad fue 0,50%.
- Con el uso del método completo (fundente ALU FUNDEX EXTRA y desgasificante APARTAGAS y del insuflado de Argón por el método de lanza) se redujo al 0,21%.
- De las pruebas aplicadas la mayor eficiencia para el método de insuflado de Argón fueron con un caudal de 3 lt/min durante 3 minutos.
- Se realizó un control de los parámetros tecnológicos para la fusión en hornos de GLP en el proceso de fundición de aluminio.
- Para la presente tesis se aplicaron dos tipos de crisoles (crisol de arcilla grafito y Hierro fundido) que son los más utilizados en la industria nacional.
- La fabricación de útiles para la fusión y colado no existentes en el mercado nacional ayudaron a disminuir la inclusión de partículas metálicas en la colada.
- La obtención de un tipo de pintura refractaria ayudó mucho en la conservación de los útiles y del crisol de hierro fundido, además de

limitar la inclusión de Hierro y metales pesados (Cr, Ni) en la colada , este tipo de pintura es capaz de soportar 3 ciclos de operación continua a una temperatura de 800 C.

- Se estableció una tabla con las cantidades de fundente ALU FUNDEX EXTRA y desgasificante APARTAGAS muy útil para la fabricación de lingotes y piezas.
- Se modifico al fundente ALU FUNDEX EXTRA (fundente de limpieza) con un agregado de 30 % de NaCl para ser usado como fundente de cobertura.
- Se disminuyo la cantidad de escoria metálica (Aluminio) con la aplicación del presente método, obteniendo un porcentaje de escoria de 8%.
- Con el control y clasificación de las cargas metálicas se disminuyo la presencia de partículas no metálicas y porosidades en la colada.
- Para el diseño de la lanza de insuflado se ha tomado como referencia estudios y experiencias (1, 11).
- El colado fue realizado exclusivamente en moldes de arena verde (Mayor uso en la industria nacional) ya que es el proceso en donde se tienen un mayor número de defectos y porosidades presentes en las piezas coladas.
- Se obtuvo la disminución en el tiempo de fusión del aluminio en crisol de hierro fundido y en el crisol de arcilla grafito valores que van desde 60 minutos para el primero y 80 minutos para el segundo. Con esta disminución en el tiempo de fusión se disminuye también la absorción de hidrogeno en la colada.
- La aplicación del fundente de cobertura también evita la absorción de hidrogeno, sobre todo cuando se insufla Argón en el crisol de hierro fundido.
- El control de la presencia de humedad (Hidrogeno) se disminuye con la preparación de las cargas, precalentamiento de las mismas antes del ingreso al crisol, también con un precalentamiento de las paredes de horno, crisol, útiles, molde (antes del vertido).

3.9 RECOMENDACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DEL METODO

- Evitar el constante picado de la colada ya sea en el momento del ingreso de las cargas metálicas o en el momento del retiro de la escoria, para evitar la formación de escoria innecesaria.
- La aplicación del espiral de fluidez nos da a conocer de una manera simple y sencilla datos sobre el tipo de aleación que estamos obteniendo.
- De lo descrito anteriormente el uso de la pintura refractaria es uno de los parámetros más importantes para el control de inclusiones de hierro en el aluminio lo que disminuye las propiedades de maquinabilidad de la aleación.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE LA ALEACION

4.1 VACIADO DE ALUMINIO

El vaciado del aluminio se lo realizo por el procedimiento de arena en verde, con arena de índice AFS 48 y una humedad de 1,4%, realizados estos análisis en el laboratorio de arenas del Laboratorio de Fundición. El moldeo de los modelos se los realizo por el procedimiento de molde solido.

El colado fue realizado exclusivamente en moldes de arena verde (Mayor uso en la industria nacional) ya que es el proceso en donde se tienen un mayor número de defectos y porosidades presentes en las piezas coladas.

Se fundió en el crisol de hierro fundido, para obtener probetas cilíndricas de diámetro 30 mm y longitud 110 mm, usando el procedimiento descrito en el capítulo 3 (sección 3.6.1). También se fundió una placa de dimensiones 200mm x 200mm x 15mm de espesor, aplicando el mismo procedimiento pero en esta ocasión fundiendo en el crisol de grafito.



Figura 4.1.- Moldeo de placa en arena verde

4.2 PARTE EXPERIMENTAL

Para la realización de la parte experimental se ha realizado una bitácora para la fusión y colado de aluminio en crisol de hierro fundido y en el crisol de arcilla grafito. A continuación se presenta el procedimiento que se siguió y se registro en la siguiente bitácora.

Tabla 4.1.- Bitácora del proceso de fusión en crisol de hierro fundido.

Hora	Operación	Detalles de la operación
3:10	Encendido de horno de GLP	Pre calentamiento del horno sin crisol para eliminar la humedad
3:15	Pre calentamiento del crisol de hierro fundido	Se introduce el crisol de hierro fundido en el horno para eliminar humedad del crisol y de la pintura refractaria.
3:20	Primera carga de metal	Se introducen 0.685 kg de aluminio
3:25	Aplicación del fundente de limpieza	Vertido de 0.15 kg de fundente de limpieza
3:25	Segunda carga de metal	Se introducen 3.690 kg de aluminio
3:35	Aplicación de la primera carga de fundente de escoreo	Vertido de 0.15 kg de fundente y agitado enérgico
3:45	Tercera carga de metal	Se introducen 1.625 kg de aluminio
3:55	Aplicación de la segunda carga de fundente de limpieza	Se apaga el horno y se sumerge la campana con el fundente y se agita con el escoriador enérgicamente
3:57	Reencendido del horno	No se retira la capa de escoria del proceso anterior para que sirva de protección
4:00	Limpieza de la escoria	Se limpia toda la escoria y se almacena para luego pesarla
4:00	Aplicación de la segunda carga de fundente de escoreo	Se apaga el horno y se sumerge la campana con el fundente y se agita con el escoriador enérgicamente
4:02	Limpieza de la escoria	Se limpia toda la escoria y se almacena para luego pesarla
4:05	Aplicación de la insuflado	Se apaga el horno y se

	de Ar	sumerge la lanza por 2 lt/min por 3 min
4:08	Limpieza de la escoria	Se limpia toda la escoria y se almacena para luego pesarla
4:10	Colado	Vertido de material en las correspondientes cajas de moldeo.
1 hora	Tiempo total de operación	

Tabla 4.2.- Bitácora proceso de fusión en crisol de arcilla grafito.

Hora	Operación	Detalles de la operación
3:10	Encendido de horno de GLP	Pre calentamiento del horno sin crisol para eliminar la humedad
3:15	Pre calentamiento del crisol de arcilla grafito	Se introduce el crisol en el horno para eliminar humedad del crisol
3:25	Primera carga de metal	Se introducen 0.700 kg de aluminio
3:35	Aplicación del fundente de limpieza	Vertido de 0.15 kg de fundente de limpieza
3:45	Segunda carga de metal	Se introducen 3.500 kg de aluminio
3:50	Aplicación de la primera carga de fundente de escoreo	Vertido de 0.15 kg de fundente y agitado enérgico
4:10	Tercera carga de metal	Se introducen 1.800 kg de aluminio
4:15	Aplicación de la segunda carga de fundente de limpieza	Se apaga el horno y se sumerge la campana con el fundente y se agita con el escoriador enérgicamente
4:17	Reencendido del horno	No se retira la capa de escoria del proceso anterior para que sirva de protección
4:20	Limpieza de la escoria	Se limpia toda la escoria y se almacena para luego pesarla
4:21	Aplicación de la segunda carga de fundente de escoreo	Se apaga el horno y se sumerge la campana con el fundente y se agita con el escoriador enérgicamente
4:25	Limpieza de la escoria	Se limpia toda la escoria y se almacena para luego pesarla
4:27	Aplicación de la insuflado de Ar	Se apaga el horno y se sumerge la lanza por 2 lt/min por 3 min
4:30	Limpieza de la escoria	Se limpia toda la escoria y se almacena para luego pesarla
4:30	Reencendido del horno	

4:31	Aplicación del fundente de cobertura	Vertido de 0.15 kg de fundente y no se agita solo se mantiene en la superficie
4:36	Colado	Vertido de material en las correspondientes cajas de moldeo.
1 hora 26 min	Tiempo total de operación	

Tabla 4.3.- Comparación de los dos procedimientos.

Procedimiento	Tiempo (min)	Escoria después de la aplicación de fundentes (kg)	Escoria después de la insuflada con Ar (kg)	Total escoria (kg)	Observaciones
Crisol de Hierro fundido	60	0.120	0.185	0.305	Escoria con depósitos de metal sobre todo después de la aplicación del Argón
Crisol de Arcilla Grafito	86	0.140	0.055	0.195	Escoria con muy poco metal después de la insuflación de argón

4.2.1 REFERENCIAS SOBRE LAS PRÁCTICAS

Es muy importante durante el proceso de fundición el adecuado manejo de herramientas y útiles de limpieza para el metal, también es necesario el uso de mascarilla en el momento del vertido de los fundentes.

Para el vertido del metal en los moldes, fusión en crisol de hierro fundido, se realizó una primera prueba para el ensayo de colabilidad, probetas testigo para el análisis metalográfico, y probetas para ensayo de tracción circulares ASTM E-8. En el segundo procedimiento de fusión en crisol de arcilla grafito se realizó probeta testigo y colado de una placa de 200 x 200 x 15 mm de espesor como muestra la figura 4.2.

En la figura 4.2 se denota claramente que la erosión se da en la zona de alimentación, específicamente en el sifón de alimentación, no se encuentran juntas frías, lo que demuestra una buena alimentación para la masa y dimensiones de la placa fundida.



Figura 4.2.- Placa colada para la obtención de probetas rectangulares.

4.3 ENSAYOS MECANICOS DE LA FUNDICION DE ALUMINIO

4.3.1 ANALISIS QUÍMICO

Las probetas para este análisis se han obtenido; para la muestra 1 un testigo realizado en crisol de hierro fundido para la muestra 2 un testigo realizado en crisol de arcilla grafito.

La cuantificación de los elementos presentes en la muestra se realizó empleando el espectro de Chispa marca BRUKE modelo Q4TASMAN los resultados se muestran a continuación en la tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa probetas de Aluminio

METALES	Muestra # 1(%)	Muestra # 2 (%)
Silicio (Si)	3.401	3.224
Hierro (Fe)	0.797	0.718
Cobre (Cu)	0.734	0.669
Manganeso(Mn)	0.202	0.183
Magnesio (Mg)	0.225	0.247
Cromo (Cr)	0.017	0.015
Níquel (Ni)	0.129	0.121

Zinc (Zn)	0.409	0.372
Titanio (Ti)	0.029	0.022
Aluminio (Al)	93.68	94.14

Con los valores tabulados se ha encontrado, que las muestras corresponde a una aleación tipo 356 (1), no obstante se debe observar que las dos muestras tienen una composición similar de componentes y estos fueron obtenidos fundiendo chatarra del laboratorio de fundición lo que da una idea del tipo de aleación que se puede obtener en el laboratorio. El mayor contenido de silicio en la aleación nos muestra que contamos con gran cantidad de material reciclado de partes de automotores y componentes de materiales de construcción arquitectónica.

4.3.2 ANALISIS RADIOGRÁFICO



Figura 4.3a.- Imagen de rayos X a 50 aumentos de la placa (200 x 200 x 15 mm), periferia



Figura 4.3.- Imagen de rayos X a 50 aumentos de la placa de (200 x 200 x 15mm), centro

Las figuras 4.3 a y 4.3 son radiografías obtenidas de la placa de dimensiones 200 x 200 x15 mm, en las cuales se observa la formación dendrítica, característica de todo fundición de aluminio.

Se observa en la radiografía una homogeneidad de la estructura, no se aprecia poros, rechupes u otro defecto a simple vista.

Para poder observar el tipo de solidificación de la estructura así como los defectos que contenga (poros, rechupes e inclusiones), se hace necesaria la preparación de probetas tratadas térmicamente para disolver las dendritas de la estructura y observar así los defectos que esta contenga, que es lo que busca la presente tesis.

4.3.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Las probetas de aluminio se han sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento (probeta 1 y 4), el cual ayudara a mejorar las propiedades mecánicas de la aleación obtenida. Para observar la presencia de poros y

defectos mediante la disolución de las zonas interdendríticas en el seno de la matriz de aluminio (disolución sólida sobresaturada), en la fundición se han tratado térmicamente (temperatura sobre el punto eutéctico) las probetas 2 y 3. La tabla 5.2 muestra las diferentes temperaturas y tiempos utilizados en el tratamiento. Hay que notar que el tratamiento térmico en fundiciones de aluminio genera el apareamiento de defectos como grietas y rechupes ⁽²⁾.

Tabla 4.5.- Tratamiento térmico de envejecimiento

Probeta	Temperatura tratamiento(°C)	Tiempo (h)
1	220	8
2	300	7
3	550	2
4	220	5

4.3.4 ENSAYO DE TRACCION

La prueba de tensión es una de las pruebas más utilizadas para evaluar los materiales. En su forma más simple, el ensayo de tracción se realiza sujetando los extremos opuestos de un elemento de prueba, dentro del marco de carga de una máquina de prueba. Una fuerza de tracción se aplica por la máquina, dando como resultado el alargamiento gradual y eventual fractura del producto de ensayo. Cuando se realiza correctamente, el ensayo de tracción proporciona datos sobre la fuerza de extensión de la cual se puede cuantificar varios importantes propiedades mecánicas de un material. Estas propiedades mecánicas determinadas a partir de las pruebas de tensión incluyen, pero no se limitan a, lo siguiente:

- Propiedades de deformación elástica, como el módulo de elasticidad (módulo de Young) y coeficiente de Poisson.
- Rendimiento de la fuerza y la resistencia a la tracción.
- Propiedades de ductilidad, como el alargamiento y reducción del área.
- Características de endurecimiento por deformación (asm vol8).

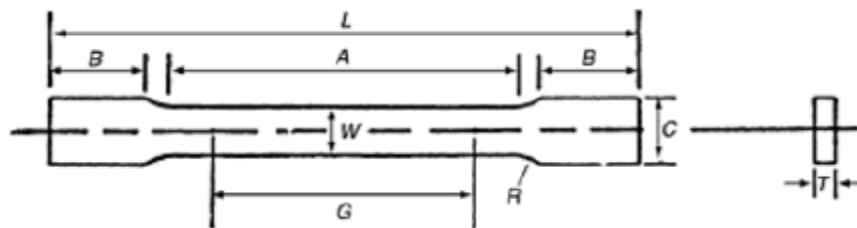
Las probetas fueron obtenidas de la placa fundida de dimensiones 200 x 200 x 15 mm de espesor. Fueron mecanizadas y rectificadas, para cumplir con el

ensayo de la tracción (según la norma ASTM E 8) de tres zonas diferentes, una en el centro de la placa y dos en la periferia. Las dos probetas cilíndricas se han hecho a partir del modelo existente en el laboratorio, de dimensiones 30 mm de diámetro y 110 mm de longitud las cuales luego del maquinado cumplen con la forma y la norma ASTM E 8. En las Figs. 4.4, y 4.5 se presentan las dimensiones de estas probetas.

El ensayo se realizó en la máquina universal de ensayos marca Tinius del laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica, bajo la norma ASTM E 8 (dimensiones de las probetas para ensayos de tracción).

Ensayo de tracción bajo norma ASTM E8

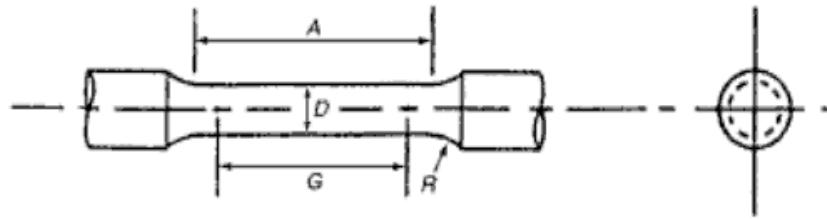
a) Sección rectangular:



Especimen estándar, in.	
G, longitud de calibre	2.00 +/- 0.005
w, ancho	0.500 +/- 0.010
T, espesor	$0.005 \leq T \leq 3/4$
R, radio de fillete, min.	1/2.
L, longitud total, min.	8
A, longitud de la sección reducida, min.	$2 \frac{1}{4}$
B, longitud de la sección de agarre, min.	2
C, ancho de la sección de agarre	3/4.

Figura 4.4.- Dimensiones de las probetas planas en las zonas tres zonas de la placa norma ASTM E 8

b) Sección circular:



Espécimen estándar, in., diámetro nominal $\frac{3}{4}$	
G, longitud de calibre	2.00 +/- 0.005
D, diámetro	0.500 +/- 0.010
A, longitud de la sección reducida, min.	2 1/4.
R, radio de fillete, min.	3/8.

Figura 4.5.- Dimensiones de las probetas cilíndricas norma ASTM E 8

4.3.4.1 Análisis del ensayo de tracción

Los valores de las propiedades mecánicas se obtuvieron del software de la máquina universal TINIUS de la facultad. Para probetas estándar (sin tratamiento térmico) y probetas con tratamiento térmico, se encuentran tabulados para las probetas planas y circulares en las tablas 5.3 y 5.4 respectivamente.

Tabla 4.6.- Designación de probetas para los ensayos a tracción en las probetas planas

Probeta	Tiempo de tratamiento (h)	Temperatura de tratamiento (°C)
T1	8	220
T2	Std.	Std.
T3	5	220

Tabla 4.7.- Valores obtenidos de los ensayos a tracción en las probetas planas

Identificación	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga a la rotura		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50mm
			(lbf)	(N)	(Ksi)	(MPa)	
T1p	12,41	14,58	3,800	16,903	13,5	93	1,40
T2p	12,68	15,51	3,340	14,857	10,9	76	1,30
T3p	12,83	14,4	4,080	18,149	14,2	98	1,34

Tabla 4.8.- Valores obtenidos de los ensayos a tracción en las probetas cilíndricas

Identificación	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Carga a la rotura		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50mm
			(lbf)	(N)	(Ksi)	(MPa)	
T2c	12,46	121,9	3,510	15,613	18,6	128	1,46
T3c	12,58	124,3	4,000	17,793	20,7	143	0,87

El análisis de las tablas 4.7 y 4.8 nos demuestran que la probeta T2p tiene una resistencia a la tracción de 10.9 Kpsi, 7.7 Kpsi menos en comparación con la probeta T2c la cual tienen una resistencia a la tracción de 18.6 Kpsi, esta variación puede deberse a que la primera fue fundida en crisol de arcilla grafito, teniendo presente que el molde (placa 200 x 200 x 15mm) tiene una mayor área superficial y presencia parcial de microrechupes en la zona de solidificación laminar, lo cual genera una disminución en su área y por ende una menor resistencia a la tracción. Para el caso de la probeta T2c se desbaste 12.5 mm el tocho inicial y no se encontró presencia ni de microrechupes en la superficie ni de porosidad dispersa en su superficie, por lo que se debe establecer que el procedimiento en crisol de hierro fundido es el más ideal ya que las características de la resistencia a la tracción son próximas a las de la aleación 356 ⁽¹⁾.

Se han realizado tratamientos térmicos a la aleación para determinar cuáles serían sus propiedades si así se requieren en la industria. Ya que la presente tesis está enfocada en la obtención de una aleación y debe comprender todas las características típicas de una aleación para su selección en un diseño posterior.

Con la aplicación del tratamiento térmico se consiguió un incremento de la resistencia mecánica en un 12.3% y una disminución en la elongación del 58,2%.

Puede observarse en la aleación una presencia alta de hierro alrededor de 0.75% lo que implica una formación de cristales secundarios de hierro no deseados en la microestructura y por ende una ligera disminución en su resistencia a la tracción, un punto a favor en la aleación obtenida es su alto

contenido de Cobre lo cual ayuda a que la aleación sea tratada térmicamente, debido también a su bajo contenido de Silicio.

4.3.5 ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a ser penetrada por un objeto duro. El ensayo de dureza para aluminio se realiza según el método Rockwell B. Los valores de dureza son adimensionales. La dureza Rockwell B se determina empotrando una esfera con un diámetro D determinado, bajo la acción de una fuerza de ensayo concreta y durante un tiempo fijo.

Los ensayos han sido realizados según norma ASTM E18 .El equipo utilizado para realizar estos ensayos es un durómetro universal marca Mitutoyo, propiedad de la facultad de ingeniería mecánica, modelo DT-10.

4.3.5.1 Análisis de dureza

La precarga utilizada ha sido en todos los casos de 100 Kg y el \varnothing del penetrador es de 2,5 mm, con un tiempo de aplicación de 10 segundos. Los datos obtenidos en el ensayo se encuentran tabulados en la tabla 4.9.

Tabla 4.9.- Dureza de las probetas, a temperatura ambiente y con envejecimiento a diferentes temperaturas.

Ensayo	Dureza de las probetas (escala Rockwell B)				
	Estándar	220°C 5h	220°C 8h	550°C 2h	300 inf.
1	15.5	69	66	61	41
2	31.5	60	70	64	32
3	21	73	63	53	46
4	12	51	90	52	46
5	11.5	61	74	48	52
6	11.5	65	69	56	40
7	17.5	65	67	39	36
Promedio	15.5	64	69	54	43
*dureza HB	62.5	100	120	90	82

*HB dureza brinell

Tabla 4.10.- Tabla comparativa de ensayo de dureza con aleaciones comerciales.

Aleación	Dureza HB				
	Estándar	220°C 5h	220°C 8h	550°C 5h	300 inf.
G-ALSi3.5FeCu	62.5	100	120	90	82
A-S4G	50	85	---	85	---
A-S2G	60	---	70	---	---

Los resultados de la tabla 4.10 nos indica la relación existente entre la aleación obtenida (G-ALSi3.5FeCu), y dos aleaciones semejantes encontradas comercialmente (1). Se observa la similitud de valores de dureza tanto para la fundida sin tratamiento térmico, y la tratada térmicamente. El control de la porosidad ha permitido tener valores considerables de dureza, pues estos valores tienden a decaer cuando existe presencia de poros y microrechupes.

4.3.6 ANALISIS DE FLUIDEZ

Para este análisis se considero las mismas condiciones que las realizadas en el capítulo III.

4.3.6.1 Procedimiento aplicado

Se realizo la fusión y colado como lo considerado para las pruebas tipo 5 fea (capitulo 3.4.4.1) con una masa de material de aluminio de 6 kg y la realización del moldeo del espiral de fluidez para colar a cinco temperaturas diferentes con una variación de 20° C cada una como muestra la tabla 4.11.y la figura 4.6a.

Tabla 4.11.- Ensayo de fluidez

Ensayo de fluidez	
Temperatura (C)	Longitud (cm)
670	53
690	80
710	98
730	103
750	120



Figura 4.6a.- Colado de los espirales de fluidez

Con la tabla 4.11 se ha realizado la fig 4.6 con el cual se ha determinado los parámetros para nuestra aleación.

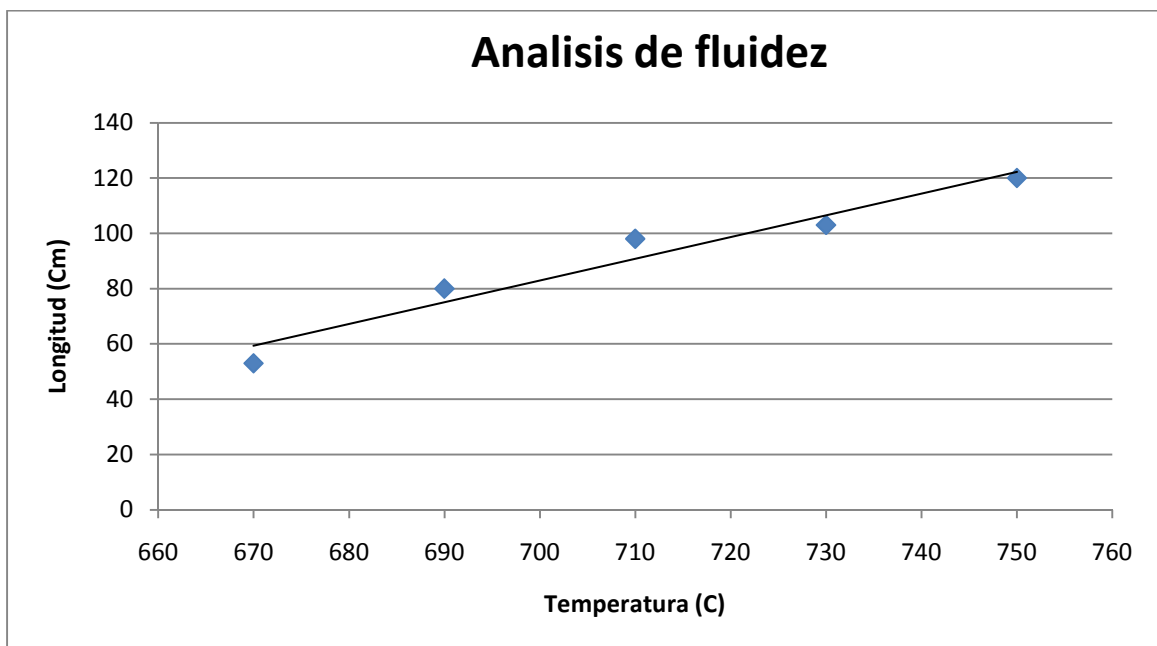


Figura 4.6.- Análisis de fluidez

Del gráfico anterior se observa que la aleación obtenida es similar a la G-ALSi (Cu) según (1). Comparando la máxima distancia alcanzada por la aleación con la figura 3.10, se observa que se alcanza el máximo de recorrido por la colada de la aleación G-ALSi (Cu), dándonos una idea de la gran pureza de la colada y la correcta solidificación en la espiral.

4.3.7 ANÁLISIS METALOGRAFICO CUANTITATIVO

El análisis metalográfico se lo realiza para poder observar la estructura de las aleaciones obtenidas, poder relacionarlas con sus respectivas composiciones y así poder establecer sus características. Para la preparación de las macrográficas se empleó la norma ASTM E3-62.

Se realiza el análisis de las imágenes captadas mediante un microscopio óptico. El análisis de imagen es la técnica de estudio metalográfico cuantitativo que permite determinar el porcentaje de una fase, el porcentaje de fracción sólida, el tamaño y forma de grano y la fracción en volumen de segundas fases. Ello puede proporcionar información de cómo afectan la composición, el procesado y la microestructura a las propiedades.

A continuación se presentan las micrográficas correspondientes a la estructura de cada aleación obtenida.

Tabla 4.12.- Designación de probetas para tratamiento térmico de envejecimiento

Probeta	Temperatura tratamiento(°C)	Tiempo (h)
0	Std	---
1	220	8
2	220	5
3	550	5
4	300	*int

*int, hace referencia a una probeta que ha sido tratado térmicamente en el horno y se ha dejado en el mismo para que se enfríen conjuntamente.

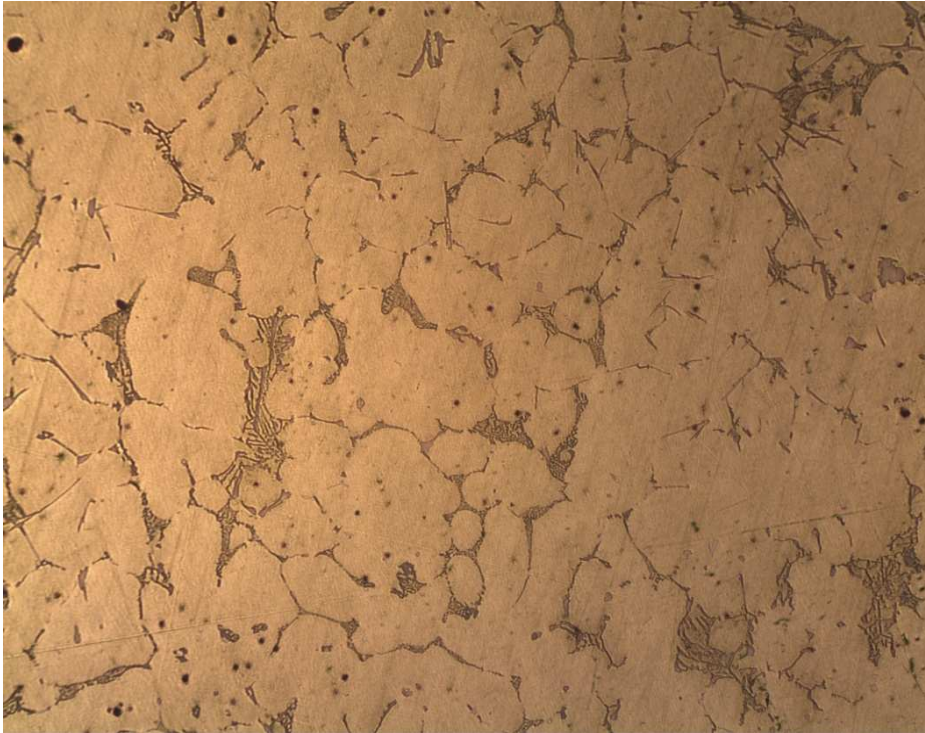


Figura 4.7a.- Micrografías de probetas estándar (sin tratamiento térmico).

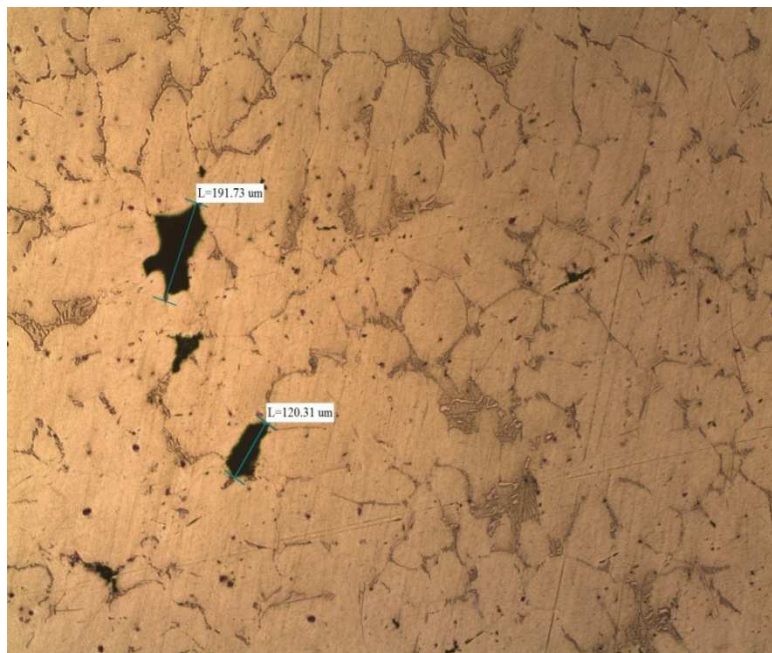


Figura 4.7.- Micrografías de la probeta 0, estándar (sin tratamiento térmico).

En la micrografía estándar figuras 4.7 a y 4.7 se aprecia una fase homogénea y la formación de dendritas, se puede observar también la presencia de poros (puntos negros) y de microrechupes de tamaño comprendido entre 120.3 y

191.73 μm en los límites de grano, además una películas de oxido y también la presencia de inclusiones de Cu.

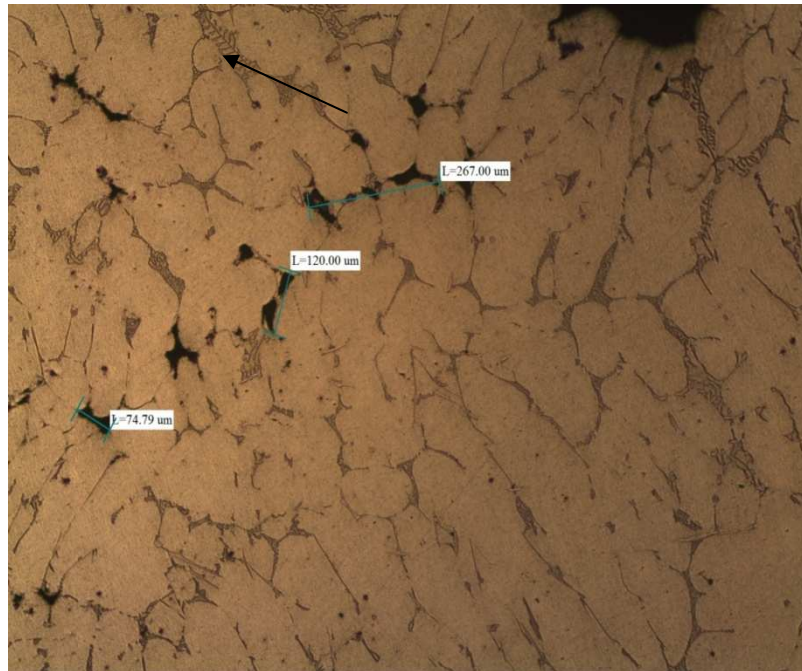


Figura 4.8.- Micrografías de la probeta 1, tratadas a 220°C 8h enfriado al aire. Al realizar un envejecimiento a la probeta 1, figura 4.8 se aprecia la redistribución de la morfología de la formación de dendritas y su disolución parcial, también se aprecia con mayor claridad los microrechupes que en este caso tienen una longitud de 74.79 μm seguido de la formación de una serie de rechupes, estos microrechupes pueden deberse a que esta probeta fue extraída de la placa en la sección que corresponde a los bebederos. En la micrografía se puede observar la disolución del silicio en la fase interdendrítica lo que genera que las dendritas tengan contornos suaves. La flecha muestra la presencia de intermetálicos del tipo $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$.

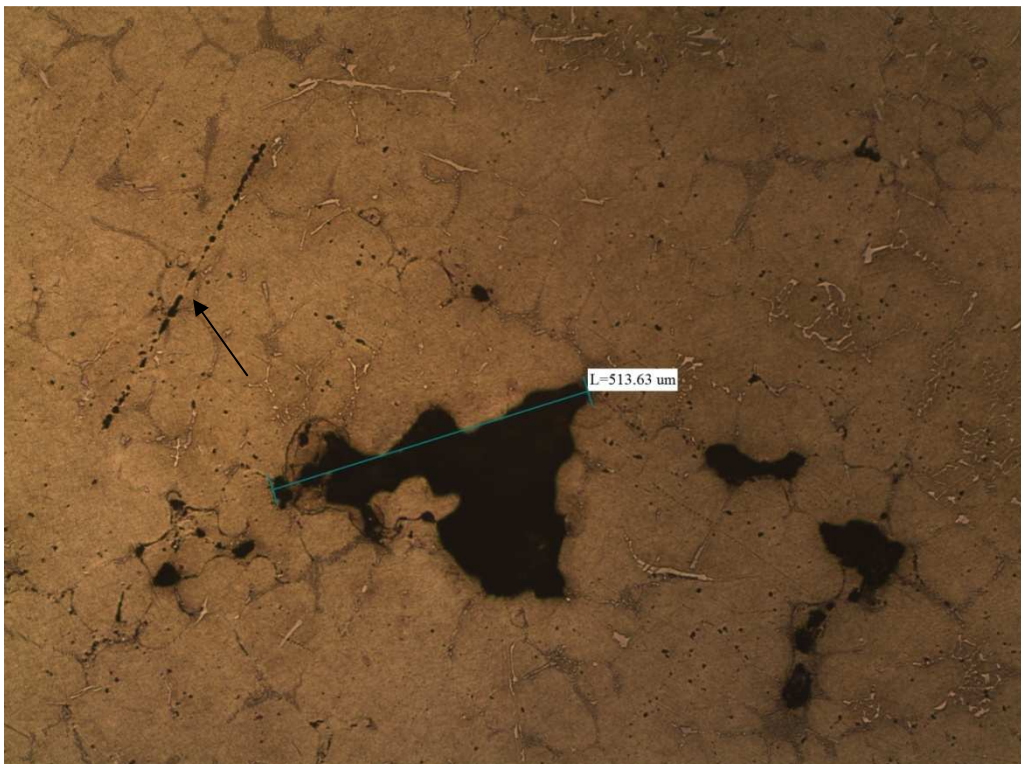


Figura 4.9.- Micrografías de la probetas 2, tratadas a 550°C por 5h, enfriado en agua

En la micrografía de la figura 4.9 se ha realizado un tratamiento de homogenización tipo oh el cual consiste en la elevación de la temperatura superior al punto eutéctico en nuestro caso 550°C y con un tiempo de 5 horas

para luego congelar la matriz enfriándola en agua, lo cual nos ha permitido determinar más claramente la presencia de defectos (poros y microrechupes) en la estructura, también a permitido observar la presencia de cristales de cobre, importante para esta aleación pues tiene el 0.73%, el cobre da beneficios a este tipo de aleaciones para ser tratada térmicamente, también se puede ver que la cantidad de silicio está presente en pequeñas proporciones siendo este un valor de 3.4%. Una cantidad mínima de poros (puntos negros), microrechupes de tamaño moderado son apreciables en la micrografía, además se nota la presencia del desarrollo de una línea de porosidades (flecha) producto del tratamiento térmico, como se menciona en la figura 2.18 del capítulo II. Se consiguió la eliminación casi total de las dendritas lo que genera una estructura homogénea por la disolución de la fase presente en las redes interdendríticas de silicio.

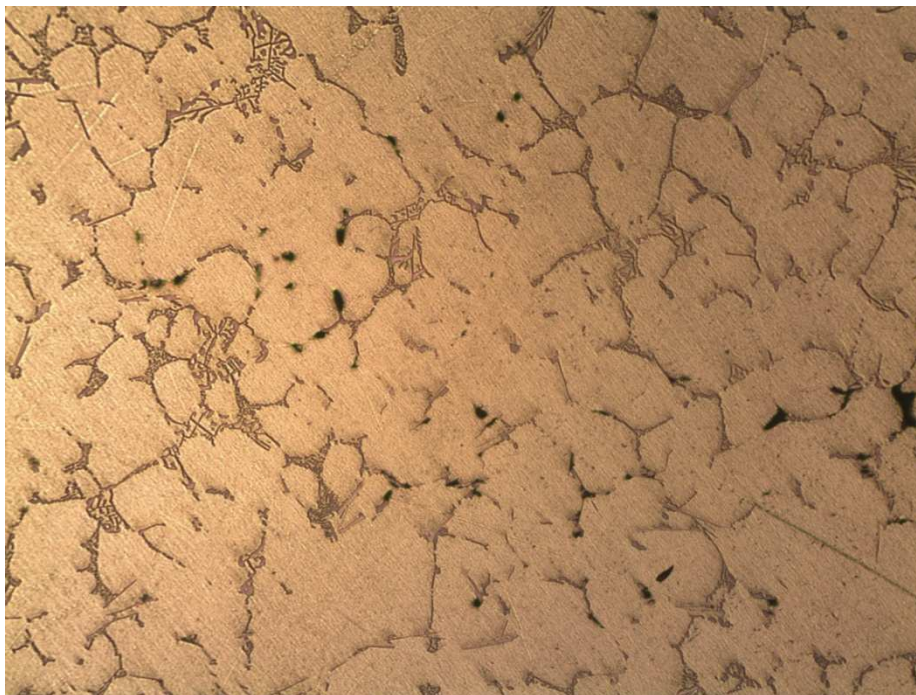


Figura 4.10a.- Micrografías de la probeta 3, tratadas a 220°C por 5h enfriado al aire

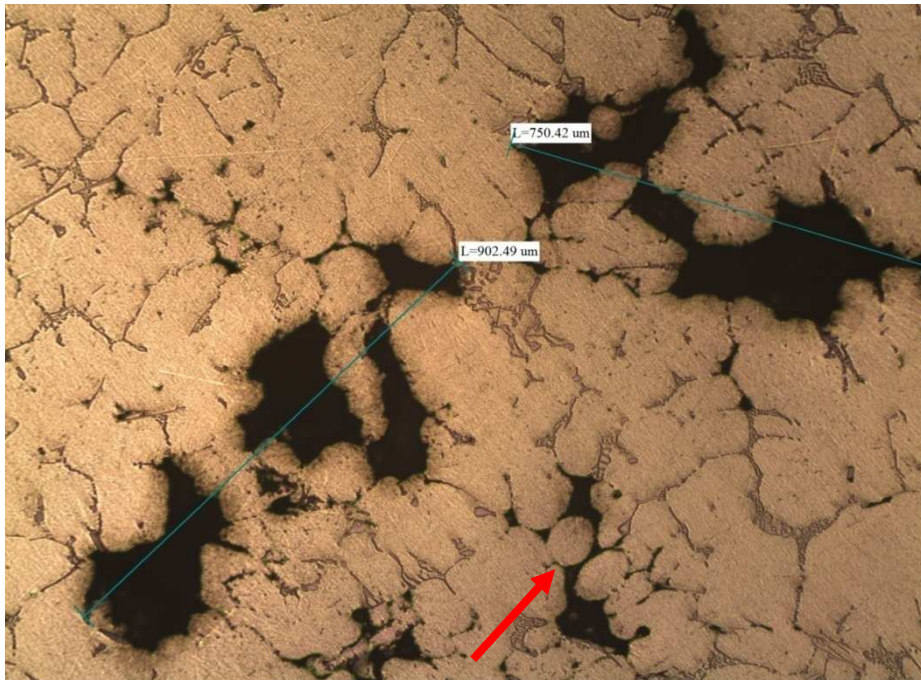


Figura 4.10.- Micrografías de la probeta 3, tratada a 220°C por 5h enfriada al aire

La probeta tratada figuras 4.10a y 4.10 se realizó a una temperatura de 220°C por 5 horas, es un envejecimiento común que se realiza en la industria. Se observa que la disolución de las dendritas ha sido parcial lo que es muestra de que el envejecimiento debe ser hecho a una temperatura mayor. Se puede observar la presencia de poros de pequeñas dimensiones y un microrechupe de solidificación (flecha) se consigue estructuras con dendritas de forma más suave por el hecho de haber una mayor subdivisión de las partículas de silicio, además se puede ver claramente la fragmentación de las dendritas como consecuencia de la homogenización de la misma. Se observa con mayor claridad el crecimiento de los microrechupes en las zonas interdendríticas.



Figura 4.11.- Micrografías de la probeta 4, tratadas a 300°C tiempo int, enfriado al aire

Con un tiempo prolongado de tratamiento como muestra la figura 4.11 se ha conseguido la disolución casi total de las redes interdendríticas de silicio, se hace evidente la presencia de inclusiones de Cu y la presencia de microrechupes en esta micrografía no se aprecia de forma clara los poros de tipo gaseoso. También se denota la clara presencia de una capa profunda de oxido de aluminio debido al tratamiento térmico.

CAPITULO V

ANALISIS FINAL DEL PROCEDIMIENTO APLICADO

- Después del estudio realizado y la aplicación del control del método de fusión se ha obtenido la aleación 31932 libre de porosidades.
- Disminución del 15,07 % al 0,21 % de porosidades e inclusiones metálicas por el método aplicado, uso de fundentes y desgasificantes sólidos y gaseosos , en el control de impurezas en la colada.
- El estudio se centro en el uso de fundentes y desgasificantes que se encuentran en el medio y son aplicados por la industria nacional de la fundición de aluminio, ha sido empleado junto con el insuflado de Argón por el método de lanza para disminuir y controlar las impurezas y gases en la fusión del aluminio.
- La aplicación del insuflado de argón ha sido estudiado en el presente trabajo demostrando los beneficios que se obtienen en la limpieza de impurezas y el desgasificado de hidrogeno en la colada de aluminio .
- Los resultados finales sobre la disminución de la porosidad han demostrado que su efecto es beneficio , de fácil acceso , bajo costo y no contamina el ambiente .
- Con el uso exclusivo de fundente ALU FUNDEX EXTRA la disminución de la inclusiones y porosidad fue en comparación con el contenido inicial (15,07%) de un 30% para el crisol de Arcilla Grafito, y de hasta un 93% para el crisol de hierro fundido.
- La aplicación del fundente de limpieza junto con el empleo del Desgasificante y el Argón (insuflado) han dado como resultado una disminución en el contenido de porosidad de aproximadamente el 48% para la fusión en crisol de Arcilla Grafito y para la fusión en crisol de Hierro fundido fue de 93%.
- De las pruebas aplicadas la mayor eficiencia para el método de insuflado de Argón fueron con un caudal de 3 lt/min durante 3 minutos.
- Uno de los parámetros más importantes es el control de la atmosfera (dentro del hogar del horno) debe ser del tipo carburante, debido a la

gran afinidad del aluminio líquido con el hidrógeno presente en el aire y en el combustible.

- La fabricación de útiles para la fusión y colado (escoriador y lanza de insuflado de argón en acero inoxidable 316) no existentes en el mercado nacional ayudaron para disminuir la inclusión de partículas metálicas en la colada.
- La obtención de pintura refractaria con un contenido de 60 % de yeso, 30 % de grafito y 10 % de carbón diluidos en agua , ayudo mucho en la conservación de los útiles y del crisol de hierro fundido, además de limitar la inclusión de Hierro y metales pesados (Cr, Ni) en la colada , este tipo de pintura es capaz de soportar 3 ciclos de operación continua a una temperatura de 800 C.
- Se modifico al fundente ALU FUNDEX EXTRA (fundente de limpieza) con un agregado de 30 % de NaCl para ser usado como fundente de cobertura el cual ayudo al control de la colada sobre todo cuando se aplico la fusión en crisol de arcilla grafito en la disminución de absorción de gases hasta alcanzar la temperatura de colado luego del insuflado de argón.
- Con la aplicación del presente método se disminuyo la cantidad de escoria metálica (Aluminio), obteniendo un porcentaje de escoria de 8%.
- Con el control y clasificación de las cargas metálicas se disminuyo la presencia de partículas no metálicas y porosidades en la colada.
- Con el control del horno y modificaciones realizadas en el mismo (aumento del caudal de aire y difusores) para aumentar su eficiencia se obtuvo la disminución en el tiempo de fusión del aluminio en crisol de hierro fundido y en el crisol de arcilla grafito valores que van desde 60 minutos para el primero y 86 minutos para el segundo. Con esta disminución en el tiempo de fusión se disminuye también la absorción de hidrógeno en la colada.
- La aleación obtenida 31932 tiene propiedades mecánicas y físicas similares a la aleación comercial 356.
- El uso de los fundentes empleados en la presente investigación no trajo variaciones en el análisis de los elementos aleantes presentes, los

elementos se encuentran en los niveles establecidos por normas de composición química, (1) por lo tanto es recomendable el uso de este tipo de fundentes.

- El análisis metalográfico y la radiografía ha permitido visualizar la solidificación dendrítica, esta característica hace necesaria la realización de un tratamiento térmico de envejecimiento, para poder distinguir entre los poros y microrechupes de la aleación obtenida 31932 debido a que estos se generen en el seno de las zonas interdendríticas dificultando su análisis.
- Con el uso de NaCl como afinador de grano se pudo obtener una estructura homogénea, nos permiten observar la evolución de la estructura y los defectos mencionados.
- En las siguientes tablas se presenta las propiedades químicas, físicas y mecánicas de la aleación obtenida.

Tabla 5.1 Propiedades químicas y físicas de la aleación 31932

Aleación	Aleantes Principales									Densidad Especifica (g/cc ³)	Intervalo de solidificación (C)	Colabilidad (cm)
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti			
31932	3,4 -3,2	0,8-0,7	0,7	0,2	0,2	---	0,12	0,4	---	2,69	670 - 730	103

Tabla 5.2 Propiedades mecánicas de la aleación 31932

Tratamientos térmicos						Aleación 31932	Propiedades mecánicas			
T61 wa1		T62 wa2		ho			Carga a la rotura (N)	Alargamiento (%)	Dureza HB	Resistencia a la tracción (Mpa)
Tiempo (h)	Temperatura (C)	Tiempo (h)	Temperatura (C)	Tiempo (h)	Temperatura (C)	Sin tratamiento	15,6	1,46	62.5	128
						T61 wa1	17,8	0,9	100	143
						T62 wa2	17	1,4	120	93
5	220	8	220	5	550	ho	---	---	90	---

Conclusiones

- En el término de este trabajo de investigación, se encontró la aplicación de un procedimiento controlado ,tomando en cuenta todas las posibles variables (Tiempo de fusión , control de las cargas , temperatura de fusión ,uso de fundentes , uso de desgasificantes), logrando así una buena calidad de las piezas fundidas con esto los fundidores nacionales tienen un documento en el cual basarse en la producción de aluminio de buena calidad y libre de porosidades el cual ayudara a un aumento de su producción y disminución de costo de producción.
- La obtención de piezas libres de defectos se ha conseguido con la fabricación de útiles de fundición que no se encuentran en el mercado nacional , pero sin embargo nos han permitido obtener los resultados esperados , con lo cual pueden ser tomados como referencia por los fundidores nacionales.
- El objetivo primordial de este trabajo es la disminución de la cantidad de porosidad en aleaciones aluminio que se pueden obtener en el laboratorio de fundición para lo cual se ha empleado fundentes y desgasificantes, se ha realizado un estudio de los mismos y en los resultados no se ha visto que estos alteren la composición química de la aleación obtenida; además se ha aplicado en el insuflado de gases inertes en la colada para el control del hidrogeno principal causa de la porosidad en el aluminio mediante el método de insuflado de argón por medio de lanza , que puede ser fácilmente fabricada e incluso mejorada y representa una innovación en los procesos de fundición en nuestro país, se realizo un breve estudio de métodos más eficaces de insuflado que se están usando en los países industrializados y que podrían ser empleados localmente.

Recomendaciones

- Evitar el constante picado de la colada ya sea en el momento del ingreso de las cargas metálicas o en el momento del retiro de la escoria, para evitar la formación de escoria innecesaria.
- La aplicación del espiral de fluidez da a conocer de una manera simple y sencilla datos sobre el tipo de aleación que estamos obteniendo.
- El uso de la pintura refractaria es uno de los parámetros más importantes para el control de inclusiones de hierro en el aluminio lo que disminuye las propiedades de maquinabilidad de la aleación.
- Para un mejor efecto del argón sobre la colada es necesario el movimiento de la lanza alrededor del crisol para que las burbujas de Argón cubran el mayor volumen posible .

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) W Hufnagel ; MANUAL DE ALUMINIO 1995.
- (2) George E Totten ; HANDBOOK OF ALUMINUM V1 PHYSICAL METALURGY AND PROCESSES ; 2003.
- (3) Margozata Warmuzek ; ALUMINUM SILICON CASTING ALLOYS ATLAS OF MICROGRAPHS ; 2004.
- (4) Vadim S Zolotarevsky ; CASTING ALUMINUM ALLOY ; 2007.
- (5) Brian Cantor and Keyna O Reilly ; SOLIDIFICATION AND CASTING ; 2003.
- (6) ASM V3 ; HANDBOOK ALLOY PHASE DIAGRAMS ; 1992.
- (7) ASM V4 ; HANDBOOK HEAT TREATING ;1991.
- (8) ASM V 17 ; HANDBOOK NONDESTRUCTIVE AND EVALUATION QUALITY CONTROL ;1992.
- (9) Grain Refinement of Secondary Aluminium Silicon Casting Alloys Light Metals 2003.
- (10) Metals handbook volume 7
- (11) José Luis Enríquez Berciano Dr., Enrique Tremps GuerraDr., Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte II, METALURGIA SECUNDARIA. 2007
- (12) Mario Renno Gomes ; EMPREGO DO ALUMINIO E SUAS LIGAS ASSOCIACO BRASILEIRA DE METAIS ;1976.
- (13) D.A. Granger, Q.T. Fang, and P.N. Anyalebechi ; EFFECTS OF SOLIDIFICATION CONDITIONS ON HYDROGEN POROSITY IN ALUMINUM ALLOY CASTINGS, AFS Trans, 1989.
- (14) S. Akhtar, R. Molina, M. Di Sabatino, L. Arnberg ,Metallurgical ; ON THE QUALITY OF A354 INGOTS AND ITS IMPACT ON CAST PRODUCT V21 ;2009.

ANEXOS

**ANEXOS 1 RECOMENDACIONES DE USOS DE DESGASIFICANTES
ALU FUNDEX EXTRA Y APARTAGAS DADAS POR JUVAL**

ALUFUNDEX EXTRA

ALU FUNDEX son una serie de fundentes que protegen, cubren y limpian las aleaciones de aluminio durante la fusión. Estos productos forman una capa protectora sobre el metal fundido, la cual reduce la oxidación y minimiza la absorción de hidrógeno.

VENTAJAS QUE SE OBTIENEN CON EL USO DE ALU FUNDEX:

Reducción de la oxidación y las pérdidas de aluminio con un consiguiente incremento de la fluidez.

Absorción de materias no metálicas o inclusiones es otro de los problemas que resuelve el ALU FUNDEX, con la consiguiente mejora en las propiedades mecánicas.

Formación de una capa protectora que conlleva a una menor facilidad de absorción de gases.

Reducción del contenido metálico en las escorias, por lo tanto mayor rendimiento de fusión.

Seguridad. Actuación siempre idéntica. Suministro del fundente libre de humedad

TIPOS DE ALU FUNDEX:

ALU FUNDEX EXTRA:

Fundente escorificante de alta eficiencia, aplicado en la fundición de aluminio en crisol u horno de reverbero. Aplicación del 0.30.5% en peso con respecto a la carga dependiendo del tipo de material a fundir. Tiene excelente recuperación de metal en hornos tipo reverbero.

Las temperaturas adecuadas de colada son:

750°C para piezas livianas de espesor inferior a 10 mm.

710°C para piezas de espesor entre 10 y 35 mm.

690°C para piezas de espesor superior a 35 mm.

Debe evitarse la excesiva temperatura, de lo contrario aumentar la absorción de gas y las pérdidas por oxidación.

METODO DE APLICACIÓN DEL ALU FUNDEX EXTRA EN HORNO REVERBERO:

Una vez terminada la colada y alcanzada la temperatura de vaciado, adicionar sobre la superficie de metal ALU FUNDEX ECO y EXTRA en bolsas pequeñas procurando distribuir el material homogéneamente sobre el baño. Si se dispone de una pistola aplicadora de fundente sobre el baño.

Agitar enérgicamente el baño para llevar las inclusiones a la superficie y poner el ALUFUNDEX EXTRA en íntimo contacto con la escoria y metal.

Retirar la escoria con la rastra y observar la consistencia de la escoria. Si presenta todavía mucho aluminio metálico atrapado, deberá ajustarse la cantidad hasta encontrar el punto ideal de aplicación. La adición de ALU FUNDEX EXTRA se puede situar entre 0,3 a 0,5% en peso.

A P A R T A G A S

PASTILLAS DESGASIFICANTES

APARTAGAS es un rápido y efectivo desgasificante para aluminio y sus aleaciones, evitando así la porosidad en la pieza fundida.

CAUSA Y EFECTO DE LA POROSIDAD GASEOSA:

La porosidad que se presenta en las piezas coladas y conocida con el nombre de "picado de aguja", es siempre debida a hidrogeno disuelto en el metal fundido, cuyo gas es expulsado en pequeñas burbujas a través de la pieza mientras esta se solidifica. La presencia de hidrógeno se debe en primer lugar a condiciones defectuosas del horno, herramientas húmedas, chatarra oxidada y prolongado mantenimiento del metal a excesiva temperatura. Piezas de aluminio porosas, significan piezas rechazables, con baja resistencia mecánica, ausencia de compacidad y mal acabado superficial.

DESGASIFICACION:

Con el objeto de eliminar la porosidad, se ha desarrollado el APARTAGAS que proporciona una rápida y cómoda desgasificación, del baño, a la vez que es más efectiva que cualquier otro tipo de desgasificación, por las siguientes razones:

Se sumerge en el baño.

No requiere destreza en su manejo.

No necesita equipo complicado ni costoso.

No es tóxico.

Es extraordinariamente eficaz, dada la descomposición de sus moléculas, ya que se producen elementos en estado activo que reaccionan químicamente con el hidrógeno.

Refina el grano.

No ofrece peligro ni para el operario ni para el metal.

TIPOS DE APARTAGAS:

APARTAGAS H7:

Enérgico desgasificante con reacción rápida, para hornos de crisol y de reverbero pequeños.

Empaque: Caja x 720 unid .(Pastilla x 50 grs).

Caja x 36 kls (Pastilla x 1 kl)

PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO:

APARTAGAS se presenta en dos formas -Pastillas y Polvo-, ambos tienen la misma finalidad y efecto. Las pastillas vienen en un tamaño de 50, 200, 500 y 1000 gramo.

CANTIDADES RECOMENDADAS:

Para coladas a base de lingotes se recomienda el 0.15 % de APARTAGAS con respecto al metal.

Si las coladas son hechas a base de desperdicios o chatarras, se deberá utilizar un 0.25%.

MODO DE EMPLEO:

APLICACION EN HORNO DE CRISOL:

Cuando la temperatura alcance 700°C, apagar el quemador o sacar el crisol del horno. El calor residual elevará la temperatura de la carga hasta unos 750°C. Debe evitarse la excesiva temperatura, de lo contrario aumentará la absorción de gas y las pérdidas por oxidación.

Cuando la temperatura comienza a descender, se sumergen por medio de una campana perforada, las tabletas o el polvo necesario para desgasificar el metal fundido. Manténgase la campana en el fondo del crisol hasta que cese el desprendimiento de burbujas. La eficacia del APARTAGAS radica en su suave y prolongado desprendimiento de pequeñas burbujas sin verter el metal fuera del crisol.

Se hace énfasis en que la desgasificación debe hacerse con una temperatura descendente. Si la temperatura aún está subiendo, la desgasificación no va a ser igual de efectiva.

APLICACION EN HORNO REVERBERO:

De acuerdo al tamaño del horno, calcular la cantidad a adicionar y hacer dos aplicaciones, cada una con la mitad del total de APARTAGAS a emplear. Las pastillas se deben sumergir al fondo mediante una bandeja invertida perforada,

para que permita la salida de gases en la medida en que se van generando. Una vez sumergida la bandeja, ésta debe ser movida por todas las zonas del horno.

APLICACION EN HORNO DE INDUCCION:

La aplicación es igual a la del horno de crisol.

NOTA: Pinte todas las herramientas con la pintura de protección PASTAL 57