



*Escuela Superior Politécnica  
del Litoral*

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**"Modificación de Estructura de las  
Aleaciones Aluminio - Silicio"**

**TESIS DE GRADO**

Prevía a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

**Presentada por:**

*Honorato León Koc*

**Guayaquil - Ecuador  
1.983**



## A G R A D E C I M I E N T O

A 1a ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

A los Profesores del Departamento de Ingeniería  
Mecánica.

Al Ing. IGNACIO WIESNER F., Director de Tesis,  
por su ayuda y colaboración para la realiza-  
ción de este trabajo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

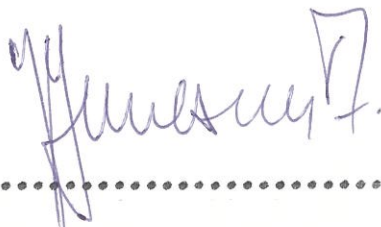
A MI TIO

A MIS HERMANOS

A MI ESPOSA

A MI HIJA



A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Ignacio Wiesner F.', is written over a horizontal dotted line.

Ing. Ignacio Wiesner F.,

DIRECTOR DE TESIS

## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



.....  
HONORATO LEON KOC

## RESUMEN

Se utilizó la aleación de aluminio con designación ASTM 336 para realizar ensayos de laboratorio tendientes a establecer la modificación de la estructura normal de solidificación en moldes de arena, compuesta por poliedros y agujas de silicio que poseen propiedades mecánicas bajas. La modificación de la estructura se lo efectúa por medio de inmersión de sodio metálico en porcentajes de alrededor de 0.1%, proceso por el cual se obtiene mejoramiento de propiedades mecánicas dado como consecuencia de un afinamiento de la microestructura del silicio en la aleación.

## INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCION.....	14
I. METALURGIA DEL ALUMINIO.....	16
1.1 Generalidades.....	16
1.1.1 Historia.....	16
1.1.2 Características y Propiedades.....	20
1.1.3 Aplicaciones.....	24
1.1.4 Aleaciones de Aluminio.....	24
1.1.4.1 Clasificación General de las aleaciones lig.	24
1.2 Aleaciones Aluminio-Silicio (Silumín).....	26
1.3 Diagrama de Equilibrio.....	28
1.4 Propiedades Mecánicas.....	31
1.5 Técnicas de Fusión.....	36
1.6 Materiales adicionales a la fusión.....	38
1.6.1 Fundentes.....	39
1.6.2 Desoxidantes.....	41

1.6.3 Desgasificantes y Métodos de desgasificación.....	46
1.7 Modificación con Sodio.....	49
1.7.1 Fundamento Teórico.....	49
1.7.1.1 Importancia de mantener un contenido de so-	
dio óptimo.....	52
1.7.2 Técnicas.....	53
1.7.2.1 Proceso de Modificación.....	53
1.7.3 Cambio de Propiedades.....	54
1.7.4 Control Metalográfico.....	57
1.8 Aplicaciones de las aleaciones Al-Si en procesos de mol-	
deo.....	58
II TRABAJO EXPERIMENTAL.....	60
2.1 Material Utilizado.....	60
2.2 Equipo de Fusión.....	63
2.3 Plan de Trabajo.....	66
2.4 Pruebas Preliminares.....	68
2.5 Ensayos de Modificación.....	71
2.6 Resultados.....	71
2.6.1 Metalografía.....	71
2.6.2 Tracción.....	77
2.6.3 Impacto.....	77
2.6.4 Dureza.....	94
III DISCUSION DE RESULTADOS.....	96

CONCLUSIONES .....	99
RECOMENDACIONES .....	100
BIBLIOGRAFIA.....	101



## INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1.1	Propiedades de Fundiciones de Aleaciones Al-Si en función del silicio en la aleación.....	56
2.1	Horno de Tratamiento térmicos Lindberg.....	64
2.2	Campana de Inmersión en el proceso de modificación.....	65
2.3	Modelo y Molde de arena para probetas.....	67
2.4	Equipo para pruebas de flexión con la probeta sin modificar	72
2.5	Equipo para pruebas de flexión con la probeta modificada...	73
2.6	Microestructura de la aleación 336 solidificada en molde de arena en los ensayos preliminares.....	74
2.7	Microestructura de la aleación 336 modificada con 0.1% de sodio metálico de los ensayos preliminares.....	75
2.8	Equipo para pulido electrolítico.....	76
2.9	Microscopio Olympus PME.....	80
2.10	Microestructura de la aleación Al-11.75Si sin tratamiento modfficador.....	81
2.11	Microestructura de la aleación Al-11.75Si con proceso de modificación con 0.1% de sodio metálico.....	82
2.12	Microestructura de la aleación Al-10.75Si sin modificación.	83
2.13	Microestructura de la aleación Al-10.75Si modificado con - 0.1% de sodio metálico.....	84

2.14	Microestructura de la aleación Al-9.75Si sin modificar.....	85
2.15	Microestructura de la aleación Al-9.75Si modificado con 0.1% de sodio metálico.....	86
2.16	Microestructura de la aleación Al-8.75Si sin modificar.....	87
2.17	Microestructura de la aleación Al-8.75Si modificado con 0.1% de sodio metálico.....	88
2.18	Microestructura de la aleación Al-7.75Si sin modificar.....	89
2.19	Microestructura de la aleación Al-7.75Si modificado con 0.1% de sodio metálico.....	90
2.20	Dimensiones de probeta para realizar ensayos de tracción de aleaciones no ferrosas, según norma ASTM E 8.....	91
2.21	Equipo para pruebas de impacto.....	92
2.22	Durómetro Brinell.....	95

## INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
1.1 Valor comparativo de las aleaciones de aluminio coladas en arena teniendo en cuenta su colada, aplicación y servicio...	33
1.2 Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio coladas en molde permanente.....	34
1.3 Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio coladas en arena.....	35
1.4 Calor necesario para fundir varios tipos de metales.....	37
1.5 Características y propiedades de algunas sales empleadas como desoxidantes y desengrasantes para el aluminio.....	43
1.6 Mezclas fundentes y desoxidantes, para la fundición del aluminio.....	44
2.1 Propiedades típicas de probetas fundidas de la aleación 336 a elevadas temperaturas.....	62
2.2 Propiedades mecánicas típicas de la aleación EC.....	62
2.3 Resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas de Al-Si sin modificar.....	78
2.4 Resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas de Al-Si modificado.....	79
2.5 Resultados de la prueba de impacto realizada en las probetas	

	silumín modificadas y sin modificar.....	93
2.6	Resultados de la prueba de dureza Brinell realizada en las probetas silumín modificadas y sin modificar.....	94

## INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo es efectuar transferencia de tecnología sobre la modificación de estructuras de las aleaciones aluminio-silicio (silumín) con sodio metálico.

En los próximos años el Ecuador tendrá necesidad de utilizar estas aleaciones para producir diversos tipos de piezas fundidas de uso automotriz, dada las condiciones restrictivas impuestas por el Gobierno Nacional.

El uso de estas aleaciones para la producción de piezas moldeadas trae consigo un problema técnico cuando estas aleaciones son colados en moldes de arena, las mismas que establecen una solidificación con bajas velocidades de enfriamiento.

La modificación de microestructuras de las aleaciones con contenido de silicio alrededor de la composición eutéctica se realizan a través del uso de cantidades muy pequeñas de sodio metálico que se introducen en el metal líquido afinando la morfología de la fase del silicio obteniendo como resultado incrementos substanciales en la resistencia a la tracción, ductilidad e impacto. De esta forma se consiguen propiedades mecánicas que se adaptan a los requerimientos de elementos de máquinas muy variadas, tales como: pistones de motores, cabezotes de motores, a-

ros para ruedas de automóviles, múltiples de admisión de motores, carcasas de bombas de agua, poleas, piñones, etc.



## CAPITULO I

### METALURGIA DEL ALUMINIO

#### 1.1 Generalidades

##### 1.1.1 Historia

El aluminio, a excepción del oxígeno y del silicio, es el elemento que más abunda en la naturaleza, pero no se presenta en estado metálico.

En 1746 Pott llegó a la conclusión de que la base del alumbre era una tierra arcillosa y poco tiempo después Margraf encontró la diferencia entre la cal y la alúmina, así como su procedencia en la arcilla, en combinación con la sílice. En 1824, Oersted obtuvo el cloruro de aluminio por el paso de una corriente de cloro a través de una mezcla de alúmina y carbón - llevada a la temperatura del rojo. En 1859, Sainte Claire Deville obtuvo el aluminio por electrólisis del cloruro fundido, simplificando después la preparación, empleando sodio en sustitución del potasio. También definió las características principales de fundición de este metal en la siguiente forma: se cola el aluminio con gran facilidad en moldes de metal o

mejor de arena, en piezas complicadas, empleando arena muy porosa para facilitar la evacuación del aire expulsado del metal. Cuando la colada es completa, es indispensable verter todavía un poco más de metal líquido para compensar la contracción, - antes que se solidifique.

La primera factoría de aluminio de Inglaterra fue instalada en Battersea, cerca de Londres, en 1859 por Gerherd, presentando muestras del metal en la Exposición de Newcastle de 1863, obtenido por fusión de una mezcla de criolita con un peso igual de sal común, adicionando cierto tanto por ciento de sodio; esta carga sólo contenía el 5% de aluminio, del que menos de la mitad se beneficiaba en forma de metal; esta fabricación fue abandonada en 1874 por antieconómica. Algunos años después (1883), Welton aseguró que el único método conocido para el beneficio industrial del aluminio es el de Deville, perfeccionado por Pechiney.

Los compuestos de aluminio prácticamente utilizables para su obtención industrial son muy estables, por lo que, no ha sido posible obtener el metal por la acción de los agentes reductores corrientes (hidrógeno, hidrocarburos, carbono).

Mallet preparó el aluminio puro, convirtiendo el aluminio comercial ordinario en bromuro por la acción directa del bromo,

pero a causa de la violencia de la reacción, el metal ha de estar en contacto con el bromo a intervalos muy cortos hasta lograr su disolución completa. El bromuro resultante se descarga del exceso de bromo por destilación fraccionada, separando la porción que hierve homogéneamente a la temperatura de  $263^{\circ}\text{C}$ , pero esta porción es incolora y perfectamente soluble en el agua, constituida por bromuro de aluminio puro. Este bromuro se calienta junto con sodio en un crisol elaborado con alúmina pura y aluminato sódico, pero la cantidad de sodio usada ha de ser insuficiente para reducir todo el bromuro, ya que de lo contrario, el aluminio puede contener sodio.

Los glóbulos de metal se funden y ~~suel~~soldan entre sí a la llama del soplete sobre un lecho de alúmina, se sumergen por breve espacio en ácido clorhídrico, se lavan y desecan.

La separación de las impurezas metálicas ofrece ciertas dificultades y para evitarlas es preciso alcanzar desde un principio la máxima pureza, empleando materiales seleccionados y evitando impurezas durante el proceso indispensable a su obtención.

La aplicación del procedimiento Castner permitió obtener el sodio a un precio mucho más económico, por lo que se estableció la industria del aluminio en Oldbury, y al poco tiempo Cowles

puso en práctica la calefacción eléctrica, que permitió la obtención de aleaciones de aluminio con el cobre y otros metales, apreciándose muy pronto las magníficas propiedades de estas aleaciones.

En 1881, W. Siemens describió un horno eléctrico para la producción de temperaturas muy elevadas. En 1886, Heroult patentó su procedimiento, aplicado muy pronto en Neuhausen y en la Société Electrometallurgique de Froges (Grenoble) en el que los ánodos son de carbón y el cátodo constituido por el revestimiento de carbón del horno, ajustándose la separación entre el ánodo y el cátodo, por desplazamiento vertical del primero. Se iniciaba el proceso por la fusión de la criolita en el baño, - aprovechando el calor generado por la resistencia a la circulación de la corriente eléctrica, adicionando la alúmina después, continuando las adiciones alternadas a medida que se va agotando el baño.

El aluminio metálico se acumulaba en el fondo de la cuba del - baño cerca del cátodo y cada 12 horas se pureza de 97.5 a 99%. En Newhausen se disponía de unos 1.000 Kw. y en Froges 390Kw., obteniéndose 0.7 Kg. de aluminio por Kw-día, con un rendimiento que no excedía del 26%.

Casi simultáneamente apareció el procedimiento de Hall, en los



Estados Unidos de Norteamérica, muy semejante al de Heroult, con ánodos de carbón de 7.5 cm. de diámetro y por electrolito, alúmina disuelta en una mezcla de fluoruros de calcio y de aluminio.

Kleiner ideó un horno destinado a la descomposición de la criolita, instalando una factoría en Lancashire. Muy pronto se impusieron los procedimientos de Heroult y de Hall; además, los combustibles minerales no podían competir con la energía hidroeléctrica, lo que originó un rápido crecimiento de la misma.

La reducción del óxido de aluminio o bauxita con carbón no es posible a causa de la gran afinidad de este metal por el oxígeno. Los sistemas de reducción química con sodio o potasio, pertenecen ya a la historia. Hoy en día, la obtención del aluminio comprende las siguientes fases:

1. Obtención de un compuesto de oxígeno y aluminio, la alúmina, lo más puro posible (óxido aluminico,  $Al_2O_3$ ); y,
2. Reducción de esta alúmina a aluminio metálico por electrólisis.

### 1.1.2 Características y Propiedades

El aluminio es un metal de color blanco con un tinte azulado. Su símbolo es (Al). La densidad del aluminio es de 2.70; su punto de fusión  $658^{\circ}\text{C}.$ ; es resistente a la corrosión, pero es disuelto por los álcalis y el ácido clorhídrico. Es no magnético, aun cuando se encuentre aleado a grandes cantidades de hierro. Sus propiedades físicas se modifican profundamente por agregado aun de pequeñas cantidades de otros elementos. Tan grande es el efecto de los elementos agregados al aluminio que un aluminio comercial de 99,2% de pureza tiene una resistencia de 25% mayor que el aluminio puro de 99,9%, pero es más duro.

El aluminio puro sigue al oro en cuanto a maleabilidad se refiere. La resistencia a la tracción del aluminio fundido es de  $8.4 \text{ Kg/mm}^2$  y una elongación de 60%. La conductibilidad eléctrica es de 59% la del cobre y tiene un coeficiente de dilatación térmica de 0.0000137. La dureza en grados Brinell es de 30. El aluminio forjado, recocido, de 99,9% de pureza tiene una resistencia a la tracción de  $6.3 \text{ Kg/mm}^2$  y una elongación de 60%.

Las principales impurezas en el aluminio comercial son el cobre, hierro y silicio, aunque las chapas de aluminio tienen en promedio una pureza del 99,3%. Alcoa 2S es el aluminio comercialmente puro de 99% de la Aluminum Co. of America. Tiene u-



na densidad de 2.72; una resistencia a la tracción, cuando recocido, de 9.1 Kg/mm<sup>2</sup> y una elongación del 35%. Su dureza Brinell es de 23. Cuando este aluminio es trabajado en frío, tiene una resistencia a la tracción de 16.8 Kg/mm<sup>2</sup> ; elongación 5% y dureza Brinell 44.

El aluminio comercial se presenta en tres calidades; más de 99% de pureza; de 98 a 99% y de 94 a 98%. Las calidades especiales pueden llegar a 99.8%. El lingote estirado de una libra (0.453 Kg) es la forma usual en que se encuentra en el comercio este metal para fundición en moldes. También se halla el metal en el comercio en forma de barras, varillas, tubos, chapas, alambres y perfiles. Las chapas de aluminio se terminan por laminado en frío en forma de láminas grises o brillantes. La primera forma se obtiene dejando que los rodillos de las laminadoras se recubran de una capa de partículas pequeñas de óxido. Las hojas de aluminio muy finos se presentan en paquetes. Hojas hasta de 0.00125 cm. pueden obtenerse por laminado.

Debido a la gran resistencia a la tracción de este metal, una gran parte de la producción de aluminio se destina a la construcción de equipos de transporte y de piezas móviles de maquinarias. Se utiliza también para arquitectura ornamental, recipientes, baterías de cocina, equipos para trabajos químicos y

para fabricar piezas en los casos en que se requiere poco peso y buenas calidades de trabajo. El metal es transparente a los rayos X, y se usa en hojas delgadas como filtro para rayos. - Se deforma con facilidad y se utiliza por ello para reemplazar a aleaciones de estaño en la fabricación de cañerías deformables. En forma de polvo o copos se utiliza en pinturas y en pirotecnia.

El aluminio puede colorearse superficialmente con muchos colores, por inmersión en soluciones de hidróxido de amonio que contienen además sales de metales. También puede ser coloreado químicamente. El aluminio coloreado es más resistente a la corrosión que el metal pintado y conserva el aspecto metálico. Alumite, de la Aluminum Colors Inc., es aluminio en chapas con recubrimientos químicos coloreados, aplicados electrolíticamente. El aluminio anodizado, llamado originariamente Eloxal, en Alemania, es aluminio, o aleaciones de aluminio con muy poco cobre, oxidado electrolíticamente en soluciones de ácidos sulfúrico, oxálico o crómico con el objeto de obtener una capa de óxido de aluminio de 0.00254 a 0.01524 mm. de espesor para proteger el metal de posteriores oxidaciones.

El aluminio es un poderoso desoxidante para el acero y por este motivo se suele añadir el acero fundido en forma de ferroaluminio. Esta aleación Master se vende en dos tipos; el de

20% y el de 50%. El primero funde a  $1.040^{\circ}\text{C}$ . y el segundo a  $1.145^{\circ}\text{C}$ . Con el 50% de aluminio, la aleación es muy quebradiza y se desintegra a terrones. El ferroaluminio se utiliza también para agregar aluminio al acero o para añadir hierro a las aleaciones de aluminio.

### 1.1.3 Aplicaciones

El aluminio técnicamente puro tiene escasas aplicaciones en los talleres de fundición, pues sus propiedades mecánicas son bastante limitadas y las características tecnológicas poco favorables. La facilidad de labrado a las herramientas de corte, contracción volumétrica, dureza, etc., representan las características más interesantes bajo el punto de vista general, por este motivo encontramos al aluminio en la práctica en forma de aleaciones ligeras.

### 1.1.4 Aleaciones de Aluminio

#### 1.1.4.1 Clasificación general de las aleaciones ligeras

Las aleaciones a base de aluminio, llamadas ligeras, usadas para la fundición, pueden clasificarse en cuatro grandes grupos generales perfectamente definidos de acuerdo a sus aplicaciones, a saber:

- a) Aleaciones de aplicación general. En esta agrupación se comprenden todas las aleaciones de aluminio que en la mecánica general han de ir substituyendo al hierro colado, acero, bronce y latón, cuando en la elección de las primeras materias han de tenerse en cuenta determinadas propiedades fisicomecánicas.
- b) Aleaciones resistentes a elevadas temperaturas, y en especial las destinadas a la manufactura de émbolos y culatas con aplicaciones bastante limitadas, pero de considerable importancia específica. Se han realizado numerosos estudios sobre este problema, habiéndose llegado a resultados sorprendentes, por las magníficas propiedades de las aleaciones elaboradas con este objetivo.
- c) Aleaciones resistentes a corrosiones. Este es el grupo más reciente de aleaciones ligeras, en las que se han aplicado las últimas investigaciones de los grandes organismos industriales que se ocupan del aluminio y sus derivados (metales ligeros), habiendo adquirido una considerable importancia por sus numerosas aplicaciones a las construcciones navales, químicas, aviación, edificaciones, etc. en que se requiere la máxima duración.
- d) Aleaciones especiales, que han de reunir ciertas propiedades tecnológicas, físicas o químicas, como



por ejemplo, aleaciones antifricción, etc.

La aleación aluminio-silicio, también conocida como silumín, que es nuestro elemento de estudio, se encuentra en las siguientes clasificaciones mencionadas; aplicación general, resistencia a elevadas temperaturas y resistencia a la corrosión.

## 1.2 Aleaciones Aluminio-Silicio (Silumín)

Como endurecedor del aluminio, el silicio se clasifica por debajo de los otros elementos de aleación principales porque, comparativamente, poco silicio pasa a solución sólida. Además, las partículas de silicio metálico que se reprecipitan de la solución sólida son de tal naturaleza que proporcionan muy poco efecto endurecedor. Consiguientemente, no es beneficioso aplicar ningún tratamiento térmico a las aleaciones de aluminio-silicio simples.

La composición eutéctica (es decir, la que tiene mínima temperatura de fusión) parece depender algo del contenido de sodio de la aleación. Aunque la mayor parte de los autores la han situado hasta ahora alrededor del 11.6% de silicio; unos trabajos más recientes indican - que el 12.5% de silicio corresponde más exactamente a la composición eutéctica correcta.

En cualquier caso, las características de colada más sobresalientes de las aleaciones de aluminio-silicio son, fluidez comparativamente elevada en estado fundido, excelente alimentación durante la solidificación y ausencia relativa de fragilidad en caliente. El silicio no disminuye la normalmente buena resistencia a la corrosión del aluminio puro y, en algunos casos, parece que de hecho aumenta la resistencia a la corrosión en ambientes moderadamente ácidos.

Las únicas aleaciones binarias aluminio-silicio de interés comercial contienen 5% de silicio, formando la aleación SAE 443 usada principalmente para trabajo de arena y con molde permanente, y aproximadamente 12% de silicio, constituyendo la aleación SAE 413 usada principalmente para fundición en coquilla. Durante la solidificación, se depositan primeras dendritas de aluminio sustancialmente puro. Los espacios entre éstas son rellenados luego por el eutéctico aluminio-silicio. Cuando este líquido se solidifica se descompone, casi completamente en aluminio puro y silicio rudimentario. Así pues, la estructura colada retiene gran parte de las características mecánicas del aluminio puro. La aleación SAE 443, fundida por cualquier método, tiene baja resistencia y dureza, elevado alargamiento y es "gomosa" durante el mecanizado.

La aleación SAE 413 es una de las dos más empleadas en fundición a presión. En forma de lingote, la aleación A2312 es la misma del lingotillo aleado SAE A413. Sin embargo, el lingotillo de la aleación



SAE A413, con menor contenido de hierro, se denomina 2312 en forma de lingote.

### 1.3 Diagrama de Equilibrio

El silicio es uno de los elementos principales para casi todas las aleaciones comerciales de aluminio usados en el proceso de fundición, cuando es utilizado en forma individual sus cantidades alcanzan porcentajes hasta de 14%. En la siguiente figura se presenta el diagrama binario del aluminio-silicio, en el que se puede observar que la solubilidad del silicio en el aluminio, es decir, la fase  $\alpha$  del diagrama está limitado a 1.65% correspondiente a la temperatura de 577°C. y la solubilidad a temperatura ambiente es solamente de 0.05%.

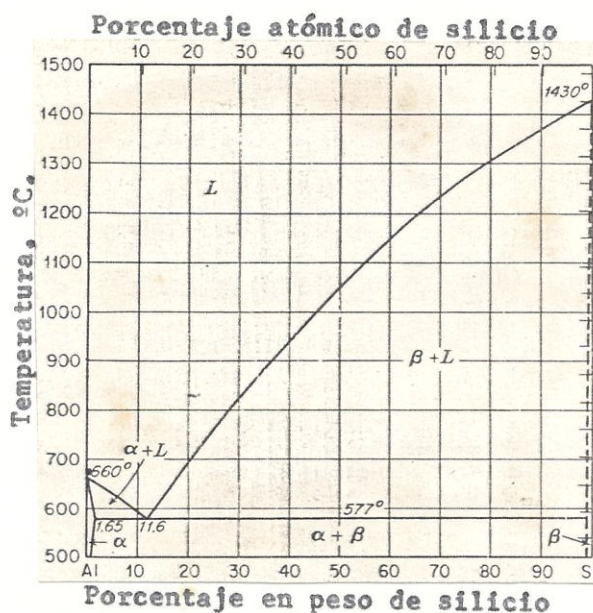


DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE AL-SI

Tal como se observa en la Figura (a), la tendencia de este eutéctico es de estar formado por láminas delgadas, claras y oscuras alternándose, pero como se observa en la misma, no existe una definición neta del eutéctico laminar, aunque sí se define la posición en la microestructura del eutéctico, ya que solidifica en los espacios libres dejados por las ramas de las dendritas de aluminio.



Fig. (a) Aleación 8%Si

Cuando la composición de silicio corresponde a la aleación eutéctica del 12%, la microestructura estará formada totalmente por la mezcla eutéctica, tal como se aprecia en la Figura (b), la misma que está constituida por poliedros y agujas de silicio que están repartidas irregularmente sobre la matriz clara de aluminio. Esta estructura característica de colado en arena o con enfriamiento lento, similar como el que proporciona el colado en arena, explica en cierta forma los inconvenientes del uso comercial de esta aleación sin modificación, los cuales se resumen en bajas condiciones de maquinabilidad, alargamiento y resiliencia. Pero un enfriamiento rápido de la aleación da lugar a ciertas variaciones en su estructura de solidificación, mejorando sus condiciones de uso. Esta condi-

ción de modificación estructural, o sea, la substitución de los granos poliédricos y las agujas de silicio por un autéctico afinado de aluminio-silicio.



Fig. (b) Aleación 12% Si

Por otro lado, el silicio se presenta en forma de fase  $\beta$ , la misma que contiene partículas extremadamente pequeñas de aluminio, considerándose prácticamente que se manifiesta como silicio puro, tal como correspondería a un diagrama de equilibrio entre dos metales insolubles con formación de un eutéctico, aunque esta última manifestación no es consistente a la ley de Raoult que dice, "si una substancia pura se le adiciona otra, soluble en ella en el estado líquido e insoluble en estado sólido, su punto de solidificación disminuirá en una cantidad proporcional al peso molecular del soluto".

Revisando nuevamente el diagrama de equilibrio con relación al estudio de una aleación hipoeutéctica, ésta debería estar formada por dendritas de aluminio primario o pro-eutéctico rodeada por una mezcla eutéctica de aluminio y silicio. También se encuentran agrega-



dos a la aleación en estado líquido, elementos tales como sodio, estroncio, antimonio y otros en pequeñas cantidades.

Si el contenido de silicio sobrepasa la composición eutéctica, entonces se encontrará en la microestructura silicio primario con morfología poliédrica y la mezcla eutéctica, tal como se observa en la siguiente figura.



Aleación 20% Si

#### 1.4 Propiedades Mecánicas

Las razones del uso masivo de las aleaciones de aluminio en aplicaciones mecánicas se deben principalmente a su bajo peso, excelente resistencia a la tracción, buena resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica, además de otras características de vital importancia para los procesos de producción de piezas fundidas tales como su excelente colabilidad, alta resistencia en caliente, menor tendencia a la fractura en caliente (hottear), menor tendencia a microrrechupes.

En base a estas últimas características, las aleaciones de aluminio-silicio son preferidos sobremanera de las otras aleaciones de aluminio cuando se trata de hacer piezas de formas muy complicadas y en cualquier proceso, ya sea en moldes de arena, en moldes permanentes o por inyección.

A continuación se pueden observar tablas de las propiedades físicas y propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio.

TABLA 1.1

Número de la aleación	(Notas)	43	108	122	142	195	212	214	B214	F214	220	355	356	363
<b>Propiedades de colada</b>														
Aptitud para alimentar la pieza	(2)	1	2	3	4	3	4	5	4	5	5	1	1	1
Estanqueidad a presión	(3)	1	2	3	3	4	4	5	4	5	5	1	1	1
Resistencia al agrietamiento en caliente	(4)	1	2	3	4	4	3	4	3	4	2	1	1	1
Fluidez	(5)	1	2	3	3	3	3	5	3	5	4	1	1	1
<b>Condiciones de aplicación y servicio</b>														
Tratamiento térmico		No	No	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	Opcional
Aptitud para el mecanizado	(6)	5	3	1	2	2	2	1	2	1	1	3	4	2
Aptitud para el pulido	(7)	4	2	2	2	2	3	1	2	1	1	3	5	3
Soldabilidad	(8)	1	2	4	4	3	3	4	4	4	5	2	2	2
Resistencia a temperatura moderada	(9)	4	3	1	1	3	3	2	3	2	..	2	3	3
Resistencia a la corrosión	(10)	2	4	5	4	3	5	1	1	1	1	3	2	3
Apariencia cuando se anodiza	(11)	5	3	3	3	2	3	1	2	1	1	4	4	4
Recubrimiento electrolítico	(12)	2	2	1	1	1	2	5	4	4	4	1	2	3

(1) El valor 1 es el mejor y 5 el peor. Los valores son aproximados; están basados sobre la opinión mayoritaria de gran número de usuarios experimentados. Las opiniones individuales pueden diferir ligeramente en algunos casos.

(2) Facilidad relativa con que la zona de solidificación progresiva acepta metal líquido para llenar los espacios interdendríticos y producir una pieza sana.

(3) Aptitud relativa de la estructura colada para resistir las fugas de un gas o líquido bajo presión.

(4) Aptitud para resistir los esfuerzos de contracción durante el enfriamiento al pasar el intervalo de temperaturas donde el material es quebradizo.

(5) Aptitud del metal fundido para rellenar las partes delgadas o prolongadas del molde.

(6) Al determinar el valor se ha tenido en cuenta la facilidad de corte, las características de la viruta, el desgaste de las herramientas y la calidad del acabado. Las aleaciones de tratamiento térmico se han considerado con temple T6, excepto la 220 (T4). Los valores pueden diferir si se aplican otros tratamientos.

Si se usan herramientas de carburo de tungsteno, el mecanizado de las aleaciones de alto contenido de silicio es mejor que el indicado.

(7) Los valores tienen en cuenta la facilidad de pulido y la calidad del acabado superficial.

(8) Facilidad relativa de soldadura por fusión con varilla de aportación de la misma aleación.

(9) Calculados sobre la resistencia a la tracción y el límite de fluencia hasta 260°C. La aleación 220 no se recomienda para servicio a altas temperaturas.

(10) La resistencia a la corrosión de todas las piezas fundidas mejora con el anodizado pero, generalmente, el valor relativo no cambia.

(11) Valores que combinan la blancura de color, la uniformidad y el brillo, cuando se anodiza en electrolito de ácido sulfúrico.

(12) Aptitud de las piezas fundidas para recibir y conservar un recubrimiento electrolítico aplicado según métodos comerciales adecuados.

## VALOR COMPARATIVO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO COLADAS EN ARENA

### TENIENDO EN CUENTA SU COLADA, APLICACION Y SERVICIO.



TABLA 1.2

Aleación y temple	Valores mínimos(?)			Valores típicos						
	Resistencia a la tracción kg/mm <sup>2</sup>	Límite de fluencia ( <sup>2</sup> ) kg/mm <sup>2</sup>	Alargamiento % sobre 50.8 mm	Resistencia a la tracción kg/mm <sup>2</sup>	Límite de fluencia ( <sup>3</sup> ) kg/mm <sup>2</sup>	Alargamiento % sobre 50.8 mm	Fluencia a la compresión ( <sup>4</sup> ) kg/mm <sup>2</sup>	Dureza Brinell ( <sup>5</sup> )	Resistencia al cizallamiento kg/mm <sup>2</sup>	Límite de fatiga ( <sup>6</sup> ) kg/mm <sup>2</sup>
43-F	14.8	4.2	2.5-5.0	16.2	6.3	10.0	6.3	45	11.3	.....
A108-F	16.9	.....	.....	19.7	11.3	2.0	12.0	70	15.5	.....
122-T531	21.1	.....	.....	26.0	24.6	.....	28.1	115	21.1	6.0
-T63	28.1	.....	.....	33.8	25.3	.....	25.3	140	25.3	6.3
A132-T531	21.8	.....	.....	25.3	19.7	0.5	19.7	105	19.7	9.5
-T63	28.1	.....	.....	33.1	30.2	0.5	30.2	125	25.3	.....
D132-T5	21.8	.....	.....	25.3	19.7	1.0	19.7	105	19.7	9.5
138	18.3	.....	.....	21.1	16.9	1.5	21.1	100	16.9	.....
142-T571	23.9	.....	.....	28.1	23.9	1.0	23.9	105	21.1	7.4
-T81	28.1	.....	.....	33.1	29.5	0.5	30.9	110	24.6	6.7
B105-T4	23.2	10.5	4.5	28.0	13.4	9.0	14.1	75	21.1	7.0
-T6	24.6	15.5	2.0	28.1	18.3	5.0	18.3	90	22.5	6.3
-T7	23.2	11.3	3.0	27.4	14.1	4.5	14.1	80	21.1	.....
A214	15.5	8.4	2.5	19.0	11.3	7.0	12.0	60	15.5	.....
355-T51	19.0	.....	.....	21.1	16.9	2.0	16.9	75	16.9	.....
-T6	26.0	16.2	1.5	30.2	19.0	4.0	19.0	90	23.9	7.0
-T82	29.5	.....	.....	31.7	28.1	1.5	28.1	105	25.3	7.0
-T7	25.3	.....	.....	28.1	21.1	2.0	21.1	85	21.1	7.0
-T71	33.9	.....	.....	25.3	21.8	3.0	21.8	85	19.0	7.0
356-T6	23.2	15.5	3.0	28.1	19.0	5.0	19.0	90	22.5	9.2
-T7	20.4	.....	4.0	23.2	16.9	5.0	16.9	70	17.6	7.7
363-F	.....	.....	.....	24.6	16.2	2.5	.....	85	.....	.....
-T6	.....	.....	.....	32.4	19.7	5.0	.....	90	.....	.....

PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO COLADAS EN MOLDE PERMANENTE

TABLA 1.3

Aleación y temple	Valores mínimos (1)				Valores típicos				Resistencia al cizallamiento kg/mm <sup>2</sup>	Dureza Brinell (2)	Límite de fatiga (6) kg/mm <sup>2</sup>
	Resistencia a la tracción kg/mm <sup>2</sup>	Límite de fluencia (3) kg/mm <sup>2</sup>	Alargamiento % sobre 50,8 mm	Resistencia a la tracción kg/mm <sup>2</sup>	Límite de fluencia (3) kg/mm <sup>2</sup>	Alargamiento % sobre 50,8 mm	Fluencia a la compresión (4) kg/mm <sup>2</sup>				
43-F	12,0	4,2	3,0	13,3	5,6	8,0	6,3	9,9	40	5,6	
105-F	13,3	8,4	1,5	14,8	9,9	2,5	10,6	12,0	55	7,7	
122-T61	21,1	.....	.....	28,8	28,1	.....	30,3	22,5	115	6,0	
142-T21	16,2	.....	.....	19,0	12,7	.....	12,7	14,8	70	4,6	
-177	20,4	.....	.....	22,5	21,1	0,5	23,9	18,3	85	.....	
-177	15,2	.....	.....	21,1	16,2	2,0	16,9	16,9	75	7,4	
195-T4	20,4	9,2	6,0	22,5	11,3	8,5	12,0	18,3	60	4,9	
-T6	22,5	14,1	3,0	25,3	16,9	5,0	17,6	21,1	75	5,3	
-T62	25,3	.....	.....	28,1	23,9	1,5	25,3	22,5	95	5,6	
212-F	13,4	.....	.....	16,2	9,9	2,0	9,9	14,1	65	6,3	
214-F	15,5	6,3	6,0	17,6	8,4	9,0	8,4	14,1	50	4,9	
H214-F	12,0	.....	.....	14,1	9,2	2,0	9,9	12,0	50	.....	
F214-F	12,0	.....	.....	14,8	8,4	3,0	9,2	12,0	50	5,6	
220-T4	29,6	15,5	12,0	32,4	17,6	1,5	18,3	23,2	75	4,9	
355-T31	17,6	.....	.....	19,7	16,2	1,5	16,9	15,5	65	6,3	
355-T6	22,5	.....	2,0	24,6	17,6	3,0	18,3	19,7	80	.....	
-T6	25,3	14,1	.....	27,4	24,6	1,0	26,0	21,8	90	7,0	
-T6	25,3	.....	.....	26,7	25,3	0,5	26,7	19,7	85	6,7	
-T7	24,6	.....	.....	26,7	24,6	1,5	24,6	18,3	75	7,0	
-T71	21,1	.....	.....	17,6	14,1	2,0	14,8	14,1	60	5,3	
356-T51	16,2	.....	.....	17,6	16,9	3,5	17,6	18,3	70	6,0	
-T6	21,1	14,1	3,0	23,2	21,1	2,0	21,8	16,9	75	6,3	
-T7	21,8	.....	.....	19,7	14,8	3,5	15,5	14,1	60	.....	
-T71	17,6	.....	3,0	21,1	14,1	3,0	.....	.....	75	.....	
363-F	.....	.....	.....	26,7	15,5	3,5	.....	.....	90	.....	
-T5	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	

PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO COLADAS EN ARENA

### 1.5 Técnicas de Fusión

La función del departamento de fusión de una fundidora de aluminio es de producir un metal que tiene que llegar a la temperatura apropiada, con una calidad satisfactoria, una composición química correcta y tener bajo costo de producción. Las fundidoras de aluminio difieren grandemente en el tamaño, complejidad de operaciones y en las calidades requeridas. No hay un sólo método para la fusión de aleaciones de aluminio, cada fundidora tiene su propia técnica de fusión, éstas tienen sus ventajas y desventajas.

La fusión es la conversión del metal sólido en líquido por medio de la energía calórica, en este estado, es más apto para proporcionar una determinada forma. Esta transformación es realizada en contacto con la atmósfera, la que provoca una oxidación del metal además de otras reacciones tales como nitruración, hidrogenación, etc., - también perjudiciales. La absorción de impurezas es también un factor importante en la elección de una instalación fusora; además de la absorción del hierro derivada de las herramientas, existe también la posibilidad de captar silicio por reducción parcial de los ladrillos refractarios o del "pisé" de bajo contenido en alúmina. Esto último sólo es problema para ciertas aleaciones con mucho magnesio o zinc, la solución de esto es emplear refractarios de alto contenido en alúmina.

Aunque el aluminio tiene un punto de fusión más bajo que el latón o el bronce (aluminio puro 657°C. y las citadas aleaciones entre 900 y 1.000°C.) es preciso un 80% más de calor para fundir aluminio que latón. La tabla siguiente muestra las cantidades de calor necesario para fundir varios metales:

TABLA 1.4

Metal	Punto de fusión °C	Calor específico cal/g.	Calor latente de fusión cal/g.	Cant. de calor k.cal/kg.	Cant. de calor k.cal/dm <sup>3</sup>
Aluminio	657	0.247	93.0	265	690
Magnesio	547.5	0.282	46.5	229	399
Cobre	1.083	0.110	43.0	162	1.446
Níquel	1.451	0.128	73.0	258	2.301
Hierro	1.528	0.165	49.4	301	2.382

Tomando como base estas cifras referentes al aluminio se podrá calcular el rendimiento térmico de los diferentes tipos de hornos.

A continuación está detallado un cuadro de los tipos de hornos que cubren prácticamente el 100% de las instalaciones actuales, incluso las más modernas.

Hornos de Combustible Fuel-oil o gas	De llama indirecta	De crisol fijo De crisol basculante		
	De llama directa	Rotativos		Basculantes Fijos
		Reverbero	de solera	
			de cámaras	Basculantes Fijos



Hornos Eléctricos	De Resistencia	De solera De crisol	
	De Inducción	De canal	De una cámara De dos cámaras
		De crisol	
Hornos Mixtos	De Combustible e Inducción	Basculantes Fijos	

### 1.6 Materiales Adicionales a la fusión

Durante las operaciones que preceden a la colada, el aluminio y sus aleaciones pueden estar sujetas a varias contaminaciones, debidas a la formación de óxidos, nitruros y carburos, a la solubilización de gas, inclusión de partículas carbonosas, arcillosas o arenosas, provenientes de los combustibles o de los crisoles, o por el uso de desperdicios, manchas de pintura, grasa y aceite. Cada una de estas condiciones requiere un tratamiento peculiar, dado que no existe sustancia que pueda absorber simultáneamente las diversas tareas que el servicio requiere. Algunas sustancias disuelven de hecho el óxido de aluminio, pero tienen poca acción desgascificante; otras poseen una notable actividad desgascificadora, pero adolecen de falta de



propiedades desoxidantes. Dividiremos las sustancias aptas para ejercer una acción cualquiera purificadora, sobre el aluminio al estado líquido, en las siguientes tres categorías fundamentales:

- a) Fundentes, sustancias distribuidas sobre la superficie del baño - para impedir el contacto con el gas y el aire; estas sustancias - son conocidas también como protectores.
- b) Desoxidantes, sustancias que actúan sobre el óxido de aluminio, - disolviéndolo; también se conocen bajo el nombre de escorificantes.
- c) Desgasificantes, sustancias que actúan principalmente sobre gases disueltos, por desplazamiento mecánico o por otra acción.

#### 1.6.1 Fundentes

Los fundentes deben poseer, al estado líquido, una densidad inferior a la del aluminio fundido. Puesto que la densidad del aluminio, a  $800^{\circ}\text{C}$ , es de  $2.35 \text{ g/cm}^3$  aproximadamente, se deduce que el fundente líquido debe poseer una densidad próxima a  $2 \text{ g/cm}^3$ . El espesor de la capa que estos fundentes forman sobre el metal líquido es proporcional a su viscosidad; por este motivo, será tanto más eficaz y económica la mezcla que, fundida aproximadamente a  $800^{\circ}$ , aparezca más fluida y apta para formar una delgada capa continua. La tendencia a atacar los crisoles y refractarios, o las partes metálicas expuestas al con-

tacto del fundente líquido o de los vapores producidos por el mismo, representa un ulterior elemento de elección. En la práctica, casi todas las mezclas usadas carecen de estos últimos requisitos.

En general, se eligen, como base de estas mezclas, NaCl y CaCl<sub>2</sub> si bien este último es fuertemente deliquescente. Algunas composiciones aconsejables pueden ser las siguientes:

<u>TABLA 1.7</u>	
Composición ponderal en %	Punto de fusión °C.
NaCl.....	804
CaCl <sub>2</sub> .....	772
75 NaCl + 25 CaCl <sub>2</sub> .....	740
85 CaCl <sub>2</sub> + 15 NaCl .....	600
90 NaCl + 10 CaF <sub>2</sub> .....	790
85 CaCl <sub>2</sub> + 15 CaF <sub>2</sub> .....	655
60 NaCl + 30 NaF - 10 CaF <sub>2</sub> .....	750

La criolita (3NaF . AlF<sub>3</sub>) es añadida frecuentemente en las mezclas indicadas anteriormente. La fusión en ambiente favorable y el empleo de metal virgen, hacen normalmente inútil el uso de fundentes, los cuales hallan en cambio gran empleo en la recuperación de las virutas de torneado o los recortes de chapa, donde es necesario evitar en todo lo posible el contacto con el aire o con los constituyentes activos de los gases de

combustión.

### 1.6.2 Desoxidantes

El objeto de los desoxidantes es el de disolver el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o de transformarlo en un compuesto más fácil de separar del metal líquido. Precisamente por su elevada densidad, la alúmina puede permanecer aprisionada en la masa fundida y originar inclusiones, demasiado perjudiciales para la resistencia mecánica de los lingotes; los desoxidantes deberían por tanto actuar principalmente por vía química, pero en realidad poco se puede decir de su acción, que aparece principalmente de índole quimicofísica o sin duda mecánica.

Los fluoruros ejercen sobre el óxido de aluminio una acción indudablemente disolvente; pero la reducción de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  comporta la liberación de oxígeno y el inmediato restablecimiento del óxido; su acción debe por este motivo recidir principalmente, aún en este caso, en un efecto mecánico.

La acción del cloruro de zinc, tan a menudo empleado en la fundición, es también poco clara; generalmente se admite que la acción desoxidante es debida a la formación del cloruro de aluminio y a la agitación mecánica resultante de su liberación como gas. En lo que concierne a los policloruros metálicos,



los más usados son los reseñados en la Tabla 1.5, si bien en base a la metodología, parece más oportuna su clasificación entre los desoxidantes.

El clásico disolvente del óxido de aluminio es la criolita, que funde aproximadamente a  $1.000^{\circ}$ , y no es por este motivo utilizable en la fundición del aluminio, donde normalmente no se sobrepasa los  $800^{\circ}$ ; se usa mezclada con cloruro de sodio y de potasio, resultando el punto de fusión de dichas mezclas rebajado hacia los  $600/650^{\circ}$ . Otros cloruros (de sodio, bario y calcio), pueden ser usados en vez de la criolita, pero también éstos deben mezclarse con cloruros alcalinos, para bajar el punto de fusión de la mezcla que de otro modo resultaría demasiado alto.

Las mezclas salinas, aptas para dar fluidez por disolución de los óxidos peculiares, transforman la suspensión en una verdadera emulsión de dos líquidos; emulsión en la que, gracias a la importancia de las fuerzas atractivas entre los glóbulos cercanos y a la acción de la gravedad, la separación de las partes es así más fácil y completa. Sin embargo, la acción de los desoxidantes no puede traerse a tan simple esquema, porque existen desoxidantes que no pueden ejercer una efectiva disolución del óxido y que, como los cloruros y fluoruros, se piensa que deben actuar principalmente por acción mecánico-

TABLA 1.5

Denominación	Fórmula química	Densidad g/cm <sup>3</sup>		Características físicas	
		sólido	líquido	Punto Fus. °C.	Punto ebul. °C.
Aluminio, cloruro	AlCl <sub>3</sub>	2,440	1,31	190	subl. 182,7
Aluminio, Fluoruro	AlF <sub>3</sub>	3,070	--	1.040	---
Bórax.....	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	2,367	--	741	1,575
Calcio cloruro...	CaCl <sub>2</sub>	2,512	2,06	772	1.600
Calcio fluoruro..	CaF <sub>2</sub>	3,180	--	1.360	---
Zinc cloruro.....	ZnCl <sub>2</sub>	2,910	--	262	732
Carnalita.....	MgCl <sub>2</sub> ·KCl	1,6	1,5	487	---
Zinc fluoruro....	ZnF <sub>2</sub>	4,84	--	872	---
Criolita .....	3NaFAlF <sub>3</sub>	2,97	--	1.000	---
Litio cloruro....	LiCl	2,068	1,5	613	1.353
Litio fluoruro...	LiF	2,295	1,8	870	1.676
Magnesio cloruro	MgCl <sub>2</sub>	2,325	--	712	1.412
Magnesio fluoruro	MgF <sub>2</sub>	3,000	--	1.396	2.239
Potasio cloruro..	KCl	1,984	1,53	776	subl. 1500
Potasio fluoruro	KF	2,480	--	890	1.500
Potasio borato de	K <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	---	--	947	---
Potasio sulfato de	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,662	--	1.076	---
Potasio carbón de	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2,290	--	891	dec.
Sodio cloruro....	NaCl	2,165	1,55	801	1.413
Sodio fluoruro...	NaF	2,790	1,91	980	1.700

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE ALGUNAS SALES EMPLEADAS  
 COMO DESOXIDANTES Y DESENGRASANTES PARA EL ALUMINIO



TABLA 1.6

Composición ponderal en tanto por ciento (sales anhidridas)	Punto de fusión °C	Características de empleo
Criolita 15 NaCl 85	725	Fundic. de carácter general; escaso poder desoxidante
Criolita 15 NaCl 60 KCl 25	660	Desox. de uso general, indicado para aleaciones tipo Anticorodal
Criolita 50 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 15 NaCl 35	743	Desox. de uso general
ZnCl <sub>2</sub> 50 NaCl 50	—	Desox. para aleac. tipo Al-Cu y Al-Zn
ZnCl <sub>2</sub> 75 NaCl 20 KCl 5	—	Desox. para aleac. tipo Al-Cu y Al-Zn
NaCl 75 CaCl <sub>2</sub> 25	740	Fundente para la recuperación de virutas, escorias y cenizas
NaCl 73 NaF 27	675	Fundente desox. para la recuperación de escorias, cenizas y virutas
MgCl <sub>2</sub> 33 NaCl 133 KCl 33	—	Desox. para aleac. Al-Mg; fluido. Delicuescente
MgCl <sub>2</sub> 58 NaCl 24 KCl 18	—	Desox. para aleac. Al-Mg; fluido. Delicuescente
MgCl <sub>2</sub> 55 KCl 39 CaF <sub>2</sub> 6	—	Desox. para aleac. Al-Mg. Menos fluido que los precedentes preferible. Higroscópico
MgCl <sub>2</sub> 50 NaCl 7 KCl 36 CaF <sub>2</sub> 7	—	Desox. para aleac. Al-Mg. Buena fluidez. Higroscópico
MnCl <sub>3</sub>	650	Desgasif. para aleac. Al—Mg (7-12 % Mg) (1% MnCl <sub>2</sub> corresponde a la introuc. de 0,35 % Mn aprox. en la aleac.)

MEZCLAS FUNDENTES Y DESOXIDANTES,  
PARA LA FUNDICION DEL ALUMINIO.

física, reaccionando más bien químicamente con el metal pero no ejerciendo acción alguna sobre el óxido sino por rotura mecánica de las películas. Además del  $\text{ZnCl}_2$  y  $\text{ZnF}_2$ , tal acción es ejercida, por ejemplo, por el fluosilicato sódico ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) o también por los cloruros de sodio y potasio. Destaquemos, incidentalmente, cómo el problema de la desoxidación del aluminio ha sido resuelto completamente con las mezclas (o fluxos) empleados en la soldadura autógena. Dichos fluxos resultan, sin embargo, excesivamente caros.

La Tabla I.6, indica la composición de algunos desoxidantes propuestos o empleados en la práctica de la fundición. Los desoxidantes deben emplearse siempre al estado seco y conservados en condiciones tales que no absorban la humedad; por tanto es aconsejable conservarlos en botes herméticamente cerrados.

Una acción de afino y escorificante puede conseguirse también mezclando en el baño los fundentes usados como cobertura. Esto puede realizarse fácilmente con una cuchara o una campana de inmersión, de fundición o mejor de grafito, para mantener sumergido el fundente en la masa fundida hasta que se deduce, por la ebullición del baño metálico, que la reacción ha terminado. Además, también es aconsejable introducir el fundente en el baño en diferentes y sucesivas pequeñas porciones, más

fáciles de controlar. Por último, se espuma mediante palas agujereadas.

### 1.6.3 Desgasificantes y Métodos de Desgasificación

Como ya se ha dicho, durante la permanencia al estado fluido, las aleaciones de aluminio se saturan fácilmente de gas. La solubilidad del gas en el aluminio al estado líquido da lugar, en el momento de la solidificación, por la menor solubilidad, a sopladuras distribuidas por toda la masa metálica. De ahí resulta la necesidad de corregir el eventual y excesivo contenido de gas en la aleación, mediante artificios que iremos describiendo.

Uno de los métodos ya usado por los productores de metal y fundiciones de aluminio de segunda fusión, era el de mantener el metal líquido, aproximadamente a  $680/710^{\circ}$ , en un horno de cuba de gran superficie, durante un tiempo variable de 2 hasta 24 horas o más. Hemos visto, en efecto, cómo los gases son generalmente poco solubles a  $700/750^{\circ}$ , y por tanto resulta clara la explicación teórica del procedimiento. Este sistema está actualmente en desuso.

Un sistema más reciente consiste en hacer pasar a través de la masa fundida un gas activo, esto es, que pueda combinarse tam-

bién con las impurezas. Un gas que responde a estas características es el cloro, que tiene una gran afinidad para el hidrógeno y ciertos metales los que transforma generalmente en cloruros.

Durante el proceso de desgasificación al cloro, aumenta la temperatura, y el calentamiento exterior no es necesario. Al proceder a la eliminación de los gases, se forma en la superficie del metal líquido una escoria pulverulenta, gris negra, que reacciona con el aire desarrollando calor. Cuando la escoria se vuelve blanca, puede considerarse que la reacción ha terminado. El polvo blanco está constituido esencialmente por alúmina. La operación dura de 4 a 15 minutos, y es realizado normalmente a 700/720°C.

Se pensó también en perfeccionar el método utilizando un policloruro volátil, que además de suministrar la cantidad de cloro necesario para la desgasificación, introdujera, por escisión, un elemento afinador del grano. Se utilizó, en principio, el tricloruro de boro ( $\text{BCl}_3$ ) y pudo comprobarse que, efectivamente, la introducción de esta sustancia en el aluminio fundido comportaba la obtención de lingotes dotados de óptimas características macrográficas y mecánicas. En una segunda fase, se experimentó una numerosa serie de cloruros, entre los cuales, el tetracloruro de titanio ( $\text{TiCl}_4$ ) demostró ser el



más indicado porque, además de la completa desgasificación del metal, proporciona un notable afinado de la macroestructura. - En general, cualquier cloruro puede tener una acción desgasificadora, mientras no todos los cloruros pueden proporcionar a la vez una afinación de la macroestructura. Este último efecto lo consiguen el  $\text{TiCl}_4$  de modo sensible; el  $\text{BCl}_3$  y el  $\text{VCl}_4$  con menor actividad, y sin duda, menos económicamente. El uso del  $\text{MnCl}_2$  anhidro es actualmente normal para desgasificar y corregir las aleaciones del grupo Al-Mg.

El tratamiento de las aleaciones fundidas, con estos cloruros, produce una cantidad de gases más o menos tóxicos y corrosivos; para subsanar este inconveniente y para hacer el proceso menos caro, se puede emplear un tratamiento mixto, en corriente de nitrógeno. Dicho tratamiento parece ser superior al tratamiento con sólo  $\text{TiCl}_4$ , aún requiriendo una cantidad de reactivo - mucho menor. Sobre pequeñas cantidades de metal, un tratamiento mixto con 0.5 cc. de  $\text{TiCl}_2$  por Kg. se ha demostrado del todo eficaz. Sin embargo, el tratamiento mixto no afina el grano, o por lo menos, lo hace de un modo a penas perceptible y no constantemente para todas las aleaciones.

Según datos experimentales, el tratamiento de 1.000 Kg. de metal a  $760^\circ$ , requiere 1.000 cc. aproximadamente de  $\text{TiCl}_4$ . La introducción del  $\text{TiCl}_4$  en los baños no es muy fácil. Se ha



comprobado recientemente que es mucho más cómodo y eficaz el uso del hexacloretano ( $\text{CCl}_3 \cdot \text{CCl}_3$ ), el cual es sólido y no del todo delicuescente a la temperatura normal.

Es aconsejable la captación de los gases desprendidos por los policloruros por medio de un aspirador, debido a que, aún en cantidades reducidas, el cloro es siempre venenoso. Terminada la operación se espuma con cuidado y se cuela en las lingoteras.

Los procesos de cloruración no están en la actualidad muy difundidos; algunos fabricantes emplean no obstante la desgasificación al cloro para la preparación de las aleaciones Al-Mg, para elaboración plástica, con una apreciable ventaja en la calidad y constancia de las características resultantes en los semiproductos.

## 1.7 Modificación con Sodio

### 1.7.1 Fundamento Teórico

La aleación aluminio-silicio de composición eutéctica, como se ha indicado anteriormente, es de gran aplicación en fundición gracias a sus magníficas características de colabilidad, capacidad de llenado de molde y ausencia de microrrechupes.

Sin embargo, esta aleación presenta, en el estado de colado en arena, una estructura grosera con algunos cristales primarios de silicios de forma poliédrica entre los cristales mixtos Aluminio-Silicio. Para concentraciones superiores al 8% de silicio sin llegar a la del eutéctico, se presenta así mismo, en muestras enfriada lentamente, un grano basto.

La adición de sodio y su incorporación al baño metálico en concentraciones entre 0.05 y 0.1 por ciento, modifica la estructura en sentido de afinar el eutéctico. Este tratamiento de modificación implica una mejora de características mecánicas, - aumento de la resistencia a la tracción, del alargamiento y una disminución de la tendencia a la formación de rechupes en la superficie.

En 1920, A. Pacz, descubrió que la adición de sodio al caldo fundido de esta aleación modificaba su estructura de solidificación, haciendo desaparecer los granos poliédricos y agujas de silicio, afinando el eutéctico aluminio-silicio, sustentándose el punto de vista de que la estructura modificada aparece básicamente a causa de que el crecimiento del cristal de silicio es mecánicamente suprimido o inhibido, siendo la pureza de la aleación y la velocidad de solidificación los principales factores que lo controlan.

Parece ser que el efecto del sodio es reducir la velocidad de crecimiento de los cristales de silicio (al cambiar la velocidad de difusión del silicio en el líquido y posiblemente la energía superficial de los cristales de silicio), y esto conduce a una solidificación a temperatura superior, ya que la cristalización del silicio es el principal origen del calor latente de difusión de la fase eutéctica. A través de esta exposición se puede deducir que la adición de sodio, o un enfriamiento rápido en una aleación sin tratamiento, aumentará el número de cristales de silicio en el eutéctico al originarse un gran número de núcleos nuevos o heterogéneos que tienen el crecimiento de los cristales de silicio ya existentes.

Aunque existen muchos elementos que tienen un pronunciado efecto modificante, hasta el momento sólo el sodio se ha utilizado comercialmente. Ha sido formulada también la hipótesis de que la modificación del eutéctico aluminio-silicio se debe a la formación de un eutéctico ternario Al-Si-Na, pero esta teoría falla al tratar de explicar la efectividad de muy pequeñas cantidades de sodio, y también como una estructura modificada puede obtenerse solamente con un enfriamiento rápido.

La teoría más aceptada universalmente es que la modificación de la aleación eutéctica de aluminio-silicio por el sodio se debe a la combinación de dos efectos del sodio; uno sobre la

nucleación y otro sobre el crecimiento.

El fenómeno de nucleación tiene lugar de la siguiente manera: el aluminio nuclea al silicio, así como también lo hace el Al-Si-Na, necesitando ambos sólo un pequeño subenfriamiento. En ausencia de aluminio primario, Al-Si y Al-Si-Na, el silicio primario es nucleado por impurezas no identificadas a enfriamientos muchos mayores. Como consecuencia, es necesario una continua renucleación del silicio por el aluminio, rebajando por consiguiente el punto de solidificación del eutéctico a la temperatura a la que el aluminio nuclea al silicio.

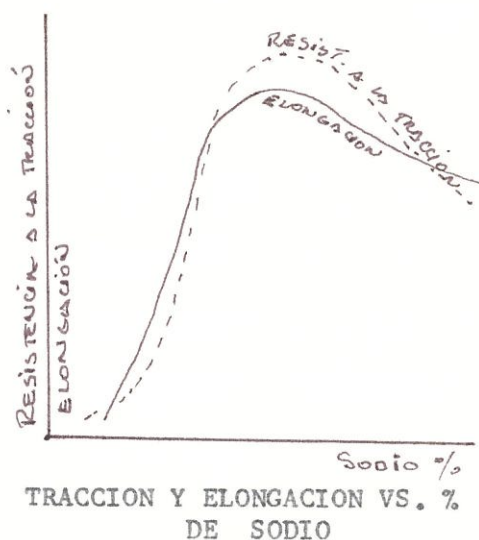
Para tratar de conseguir una modificación permanente mediante el sodio, se han ensayado diferentes formas. Una de ellas consiste en la adición de mezclas de sales sódicas, que liberan el sodio lentamente. En el trabajo de Riedelbauch, se da conocer un método más efectivo que la adición de sodio metálico o mezcla de sales, que consiste en la introducción de tabletas de reacción esotérmica, que reaccionan rápidamente, con un excelente aprovechamiento del sodio con efecto modificador.

#### 1.7.1.1 Importancia de mantener un contenido de sodio óptimo

Una serie de análisis realizados en laboratorios muestran la importancia de mantener un contenido de sodio



de 0.1% a 0.14%. A estos niveles, la resistencia a la tracción y el alargamiento adquieren valores máximos. La excesiva adición de sodio, o sobremodificación reduce los valores de las propiedades antes mencionadas apreciablemente.



## 1.7.2 Técnicas

### 1.7.2.1 Proceso de Modificación

A pesar de que las aleaciones de aluminio-silicio fueron las primeras aleaciones de aluminio producidas, el doctor Pacz en el año 1921 encontró que las propiedades mecánicas podían ser mejoradas considerablemente mediante la adición de fluoruros de sodio, y fue entonces que se le dio importancia industrial. El proceso por el cual se hacían las adiciones de fluoruros de so-



dio u otros fluoruros alcalinos al metal fundido, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas; fue llamado "modificación". Más tarde, varios investigadores se dieron cuenta de que la modificación podía ser obtenida por el uso de otros agentes, como los metales alcalinos o sus sales. De estos agentes modificadores, los dos más ampliamente usados han sido el sodio metálico y los fluoruros alcalinos.

El efecto de la modificación es pronunciado en todas las propiedades mecánicas de las aleaciones, pero el mayor efecto es posiblemente en la ductibilidad y en la dureza.

Hay tres formas de conseguir una modificación satisfactoria de estas aleaciones antes de colar:

- 1º) Por la introducción de 0.1% de sodio metálico, envuelto en papel de aluminio.
- 2º) Por la introducción de sales de sodio.
- 3º) Por la introducción de sodio envasado en vacío.

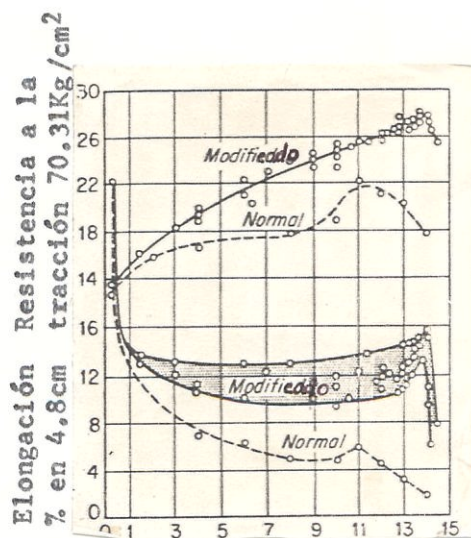
### 1.7.3 Cambio de Propiedades

Ya en el artículo 1.7.1 se menciona al investigador Pacz como

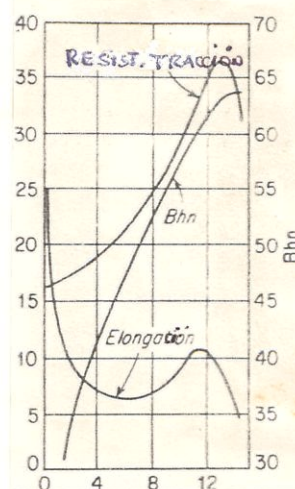
descubridor de la forma de modificar la microestructura de las aleaciones aluminio-silicio, que como consecuencia trae consigo cambios en propiedades mecánicas, por consiguiente, en esta parte se tratará de establecer con más detalles la relación entre la modificación y los beneficios en propiedades, tales como resistencia a la tracción, elongación e impacto.

El trabajo de este investigador y otros, fue motivado por la aplicación de estas aleaciones en fundiciones y colados en arena, en que la aleación tiende a acercarse a condiciones de solidificación que manifiesta el diagrama de equilibrio, tal como lo describe el artículo 1.3. Además, estas condiciones microestructurales de poliedros y agujas de silicio no se manifiestan cuando se hace un enfriamiento rápido, tal como se lleva a cabo en los colados por inyección y en coquilla.

En resumen, ha quedado establecido que la velocidad de enfriamiento y la inclusión de ciertos elementos ayudan al silumín a obtener una estructura afinada con relación al silicio, la misma que altera sus características mecánicas de acuerdo a la Figura 1.1. Investigación en la que se analiza el cambio de la resistencia a la tracción, elongación, dureza Brinell - de acuerdo a los diferentes porcentajes de silicio y en las condiciones modificado y sin modificar de la aleación silumín,



(a) Porcentaje de Si



(b) Porcentaje de Si

FIGURA 1.1 PROPIEDADES DE FUNDICIONES DE ALEACIONES AL-SI EN FUNCION DEL SILICIO EN LA ALEACION.

De la Figura 1.1 se observa que la elongación de un material modificado es mayor en cualquier nivel de contenido de silicio entre 1 y 14% de silicio, con respecto al mismo material de igual porcentaje de silicio, sin modificar y fundido en arena.

Con respecto a la resistencia a la tracción, se observa que existe una tendencia a incrementarse conjuntamente con el porcentaje de silicio en ambos casos, es decir, modificado y sin modificar; del material modificado se tiene una curva con va-

lores superiores de resistencia a la tracción hasta llegar al 14% de silicio. Con relación al gráfico (b) de la Figura 1.1, tenemos las curvas de la elongación, resistencia a la tracción y dureza Brinell con respecto al porcentaje de silicio que se encuentra en la aleación de aluminio-silicio y que corresponden a un colado rápido.

La resistencia a la tracción, así como la elongación, poseen un comportamiento similar al de la Figura (a) de la aleación sin modificar, pero con respecto a las curvas que identifican al silumín modificado, además de coincidir con la tendencia conocida, también los valores absolutos de los parámetros anotados, o sea, elongación y resistencia a la tracción. Esto demuestra que el decrecimiento causado al silumín por una solidificación lenta puede ser compensado con la modificación por medio del sodio metálico.

#### 1.7.4 Control Metalográfico

La evaluación de una práctica de modificación inferido del artículo precedente se puede llevar a cabo de dos maneras:

- 1.- Por medio de ensayos mecánicos.
- 2.- Por medio de análisis metalográficos.



El análisis metalográfico demuestra sí es que realmente existe un cambio de microestructura en relación con la morfología de la solidificación del silumín en condiciones de modificación con sodio metálico. Del artículo 1.3 que corresponde al diagrama de equilibrio, tenemos que las estructuras que se admiten para materiales hipoeutécticos, eutécticos e hipereutécticos poseen en su microestructura la fase de silicio en forma de poliedros y agujas de silicio, la misma que incrementa su porcentaje de acuerdo al aumento de silicio en la aleación.

La preparación de las probetas para su observación por medio de microcopia por reflexión puede ser realizada con un pulido mecánico o un pulido electrolítico. Teniéndose presente que deben quedar completamente definida las fases que constituyen la aleación.

### 1.8 Aplicaciones de las aleaciones Al-Si en procesos de moldeo

Una pieza metálica de silumín fundida se puede obtener por procedimientos de moldeo muy diversos. Los sistemas de moldeos más importantes son:

En moldes de arena, en moldes metálicos a la presión atmosférica y en moldes metálicos con la aplicación de una presión externa elevada.



Las aleaciones aluminio-silicio tienen una amplia aplicación en las industrias debido a las propiedades mecánicas que poseen.

El empleo de las aleaciones silumín en vehículos es muy importante por su bajo peso y sus propiedades mecánicas. En este caso se encuentran los siguientes elementos mecánicos: carcazas de cajas de cambios automáticas, de bombas de agua, de bombas de gasolina, múltiples o mofles de admisión de motores, cabezotes de motores, etc.

Fuera de la industria del automóvil son muy diversas las aplicaciones de las aleaciones silumín en piezas fundidas y obtenidas por procesos de inyección.

## CAPITULO II

### TRABAJO EXPERIMENTAL

#### 2.1 Material Utilizado

Para realizar el trabajo propuesto se utilizó los siguientes materiales:

Aleación 336, esta aleación tiene designaciones comerciales A-332 y A-132, en la norma ASTM SN122A y SAE 321, constituye el elemento de trabajo de esta tesis de grado. Su composición química es la siguiente:

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn
0.5 a 1.5	max. 1.3	max. 0.35	11 a 13	max. 1.2	max. 0.35
Ti	Otros	El remanente aluminio.			
max. 0.35	max. 0.05 para c/u.				

Sus aplicaciones típicas la constituye los pistones para motores de combustión interna a diesel y gasolina, poleas, cajas de cambio automáticas y otras aplicaciones donde se requiera buena resistencia a las temperaturas elevadas, bajo coeficiente de expansión térmica

y buena resistencia al desgaste. Sus propiedades mecánicas se encuentran identificados en la Tabla 2.1, en la que no sólo están los resultados de los ensayos a temperatura ambiente, sino que también a temperaturas más elevadas. La dureza Brinell tomada con 1500 Kgs. de carga y un penetrador de 10 mm. de diámetro, está ubicada entre 100 y 125 unidades de dureza.

Aluminio puro, también conocida como aleación EC, con 99.45% de aluminio. La designación ASTM para este material son B230, B231, B232, B233, B236, B262, B314, B323 y B324. Sus aplicaciones típicas corresponden a la fabricación de alambres para conductores. Las propiedades mecánicas de este material para condiciones de función, deformación plástica y recocido parcial se encuentran tabulados en la Tabla 2.2.

Además de los materiales previamente identificados, se utilizó otro material para el proceso de modificación de la estructura, el sodio metálico, clasificado con el número 6261 de la industria MERCK, cuya composición química se detalla a continuación:

Cl	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	N	Pb	Fe	Ca	K
0.002	0.002	0.0005	0.0005	0.0005	0.001	0.05	0.01

También se utilizó material para la fabricación de los moldes de solidificación, y que para el caso fue la denominada arena Posorja, la

TABLA 2.1

Temperatura °C	Resistencia a la tracción Kg/mm <sup>2</sup>	Límite elástico Kg/mm <sup>2</sup>	Elongación %
25	25.51	19.90	0.5
150	21.94	15.31	1.0
205	18.37	10.71	2.0
260	12.76	7.14	5.0
315	7.14	3.06	10.0

PROPIEDADES TÍPICAS DE PROBETAS FUNDIDAS DE  
LA ALEACION 336.0 A ELEVADAS TEMPERATURAS

TABLA 2.2

Templado	Resistencia a la tracción Kg/mm <sup>2</sup>	Límite elástico Kg/mm <sup>2</sup>
0	28.44	9.48
H12	33.18	28.44
H13	40.28	37.91
H14	37.91	33.18
H16	42.65	37.91
H17	47.39	45.02
H19	63.98	56.87

PROPIEDADES MECANICAS TÍPICAS DE LA ALEACION EC.



misma que constituye una arena de moldeo natural a la que se le agregó 1% de bentonita y 5% de agua, ambos porcentajes con respecto al peso de arena seca.

## 2.2 Equipo de Fusión

Para la fusión de la aleación, que como se verá más adelante, constituyen las coladas, porciones de un kilogramo por cada colada, se seleccionó el horno de tratamientos térmicos Lindberg, modelo 41-HC-10188-18AM, tal como se muestra en la Figura 2.1, La precisión de la temperatura es de  $\pm 2^{\circ}\text{C.}$  para el rango entre  $600^{\circ}$  y  $900^{\circ}\text{C.}$  Tiene una capacidad máxima de  $1.100^{\circ}\text{C.}$

Un crisol de grafito, con capacidad para 2 Kgs., completamente limpio y libre de impurezas.

Una balanza con capacidad para 2.5 Kgs. con escala de 0.10 gramos, en el cual se pesan los elementos que componen la aleación en las proporciones determinadas, lográndose una precisión de  $\pm 0.05$  gramos.

Fue necesario construir una campana de inmersión para el proceso de modificación con sodio metálico, se prefirió para este efecto, utilizar acero inoxidable con el fin de no contaminar el caldo con hierro. Se puede observar este aparato en la Figura 2.2, con la



FIGURA 2.1

HORNO DE TRATAMIENTO TERMICOS LINDBERG



FIGURA 2.2  
CAMPANA DE INMERSION EN EL  
PROCESO DE MODIFICACION

introducción del sodio metálico, envuelto en papel de aluminio, en la campana mencionada; el objeto de la envoltura del sodio metálico es para evitar la reacción prematura con el metal líquido.

Un molde de arena, formado por la arena mencionada anteriormente con la ayuda de un modelo de probetas hecho de madera, los mismos que se muestran en la Figura 2.3.

### 2.3 Plan de Trabajo

Con el fin de cumplir el objetivo propuesto en esta experimentación, se ~~elaboró~~ <sup>elaboró</sup> el siguiente plan de trabajo:

Realizar pruebas preliminares de fusión de la aleación y someterla a la acción de diferentes porcentajes de sodio metálico como elemento modificador de la estructura acicular generada por una solidificación lenta. Para establecer esta condición de solidificación, se tendría que colar el material en un molde hecho de arena, y para verificar el efecto de la modificación se prefirió usar un modelo de fundición para probetas normalizadas, que posteriormente colado con la aleación modificada, se pueda hacer un ensayo de flexión y verificar rápidamente si existen cambios en la ductilidad del material. Posteriormente se harán los ensayos definitivos variando los porcentajes del contenido de silicio en la aleación original, para establecer el efecto del proceso modificador en un amplio ran-



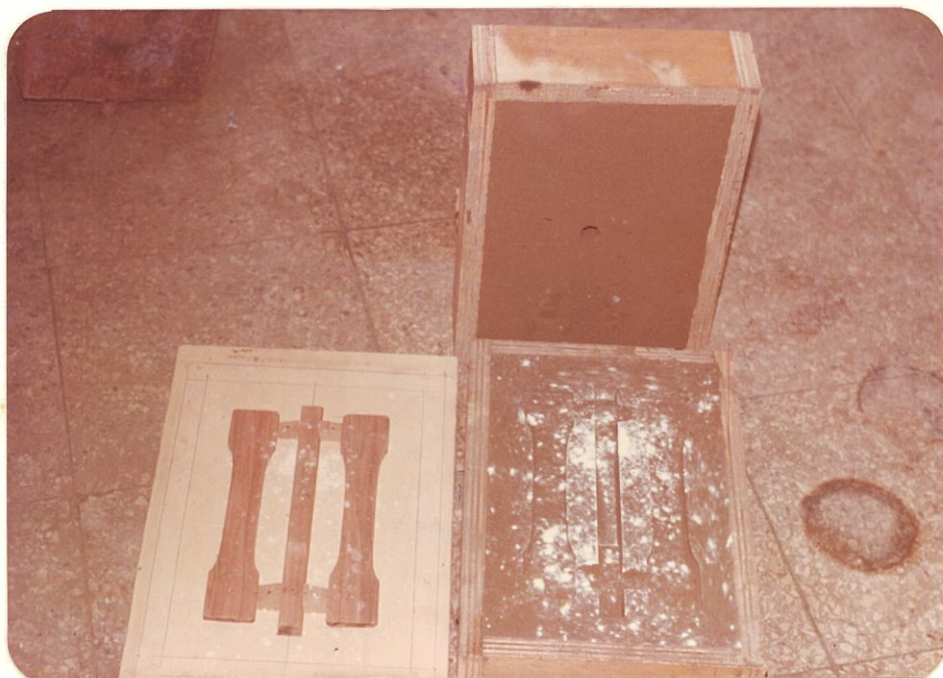


FIGURA 2.3

MODELO Y MOLDE DE ARENA PARA PROBETAS

go de aleaciones, para lo cual se harán las siguientes aleaciones:

Fusión	Aluminio	Silicio	Otros
1	83.95%	11.75%	4.3%
2	84.95%	10.75%	4.3%
3	85.95%	9.75%	4.3%
4	86.95%	8.75%	4.3%
5	87.95%	7.75%	4.3%

Después de haber obtenido las probetas de las diferentes coladas, se procederá a realizar los ensayos de laboratorio para verificar los cambios microestructurales que identificarán cambios en las propiedades mecánicas y finalmente se harán las pruebas de dureza y resistencia a la tracción.

#### 2.4 Pruebas Preliminares

Estas pruebas son necesarias realizarlas previo a los ensayos definitivos, puesto que no existen indicios de experiencias anteriores en nuestro medio que ayuden a tener en mano todos los detalles del proceso que se quiere estudiar, de esta manera se comenzó por fijar las condiciones de fusión de la aleación haciendo uso de las recomendaciones técnicas que para el caso manifiestan los fabricantes de productos adicionales a la fundición tales como fundentes y desgasificantes producidos por Foseco de Inglaterra. Con relación al

proceso de fusión, se siguieron los siguientes pasos:

1. Calentamos el crisol y cargamos el material a fundirse.
2. Tan pronto como la carga comenzó a fundirse, cubrimos su superficie con fundente, en la proporción de 0.5% del peso del metal.
3. Seguimos fundiendo rápidamente dejando la capa de fundente intacta en lo posible.
4. Cuando la temperatura llegó a los  $760^{\circ}\text{C}.$ , controlamos el horno para que mantenga esta temperatura.
5. Desgasificamos el metal retirando una parte de la capa del fundente hacia un costado, y sumergimos las pastillas desgasificantes en el fondo del metal. Se utilizó 0.2 por ciento de desgasificante con respecto al peso del metal fundido.
6. En este momento el metal estuvo listo para la modificación, con una temperatura promedio de  $720^{\circ}\text{C}.$  Sumergimos el sodio metálico en el fondo del metal, cuando la reacción terminó, se agitó la campana con la que se introdujo el sodio metálico, a fin de revolver el metal.
7. Esparcimos una nueva capa de fundente en la superficie del metal y dejamos de 3 a 5 minutos quieto.
8. Revolvemos la capa de fundente que está en la superficie, hasta ver que la escoria tome un color rojo fuerte.
9. Desescoriamos y colamos sin demora.

Realizadas estas pruebas se logró encontrar que la cantidad adecuada-

da para que se verifique la modificación estructural, fue de 0.1 % de sodio metálico, lo cual se estableció a través de dos ensayos, - a saber:

#### Ensayo No. 1

Se fundió la aleación 336 a la temperatura de 760°C., el peso tratado fue de 1.418 gramos. El peso de sodio metálico fue de 0.7 gr. que equivale al 0.05% del peso de la aleación. Se obtuvo un resultado negativo, puesto que el ensayo de flexión no manifestó dobléz antes de la fractura, tampoco hubo cambios en la microestructura.

#### Ensayo No. 2

En esta ocasión, nuevamente la aleación 336 fue llevado a la temperatura de 760°C., el peso tratado fue el mismo, pero el peso del sodio fue 1.4 gramos que equivale al 0.1% del peso del metal. En esta ocasión sí se obtuvo un resultado positivo, lográndose apreciar en el ensayo de flexión un dobléz de aproximadamente 15 grados, antes de la fractura. El ensayo de microestructura también se encontró los cambios deseados, pues la fase acicular de aluminio-silicio fueron disminuidos, siendo reemplazado por unas pequeñas partículas esferoidales que constituyen el eutéctico. Verificando la información bibliográfica se encontró que la decisión de aumentar la cantidad de sodio fue una buena práctica, ya que para materiales de aluminio-silicio con un porcentaje del 12%, se recomienda la cantidad de sodio usado.



Los ensayos de doblado y análisis metalográfico mencionados anteriormente se presentan en las Figuras 2.4 y 2.5 y en las Micrografías 2.6 y 2.7 respectivamente.

## 2.5 Ensayos de Modificación

Después de haber obtenido las aleaciones con las proporciones de silicio establecido en el plan de trabajo, por medio del proceso de fusión indicado en las pruebas preliminares, se procedió a la modificación del metal remanente de cada una de las aleaciones, con un porcentaje de sodio metálico, el mismo que fue determinado en las pruebas mencionadas. Ya obtenido la modificación, se llevó a cabo las pruebas de propiedades mecánicas y microestructurales.

## 2.6 Resultados

De las probetas obtenidas, modificadas y sin modificar, fueron sometidas a varios ensayos que veremos a continuación.

### 2.6.1 Metalografía

Para el control metalográfico hubo la necesidad de utilizar un equipo de pulido electrolítico, marca Struers, modelo Lectro-pol, tal como se observa en la Figura 2.8. Se requirió este sistema de preparación de probetas, ya que la preparación ma-

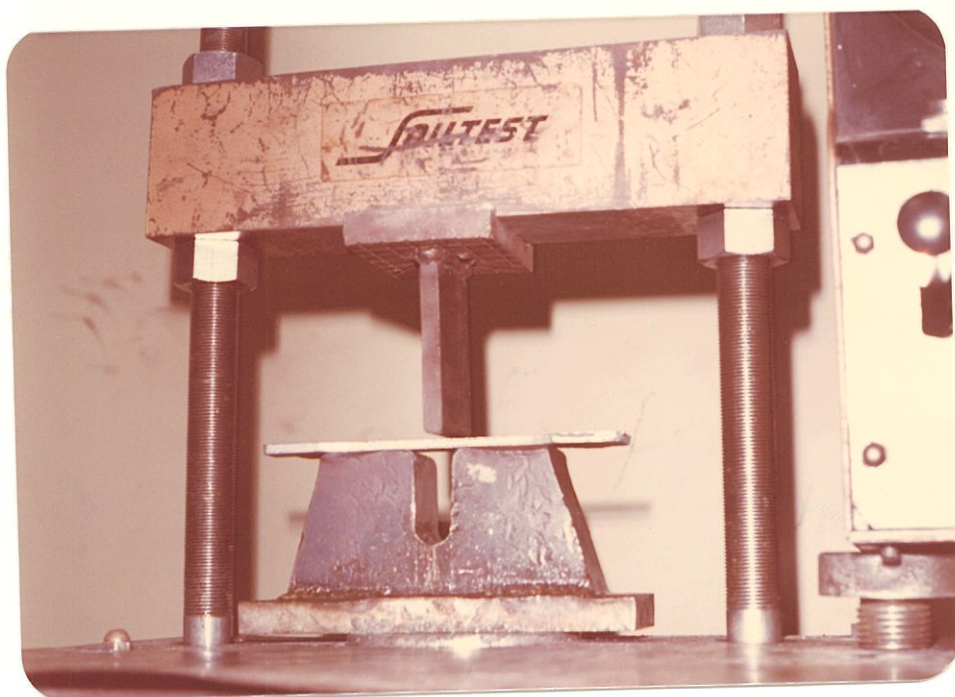


FIGURA 2.4

EQUIPO PARA PRUEBAS DE FLEXION  
CON LA PROBETA SIN MODIFICAR

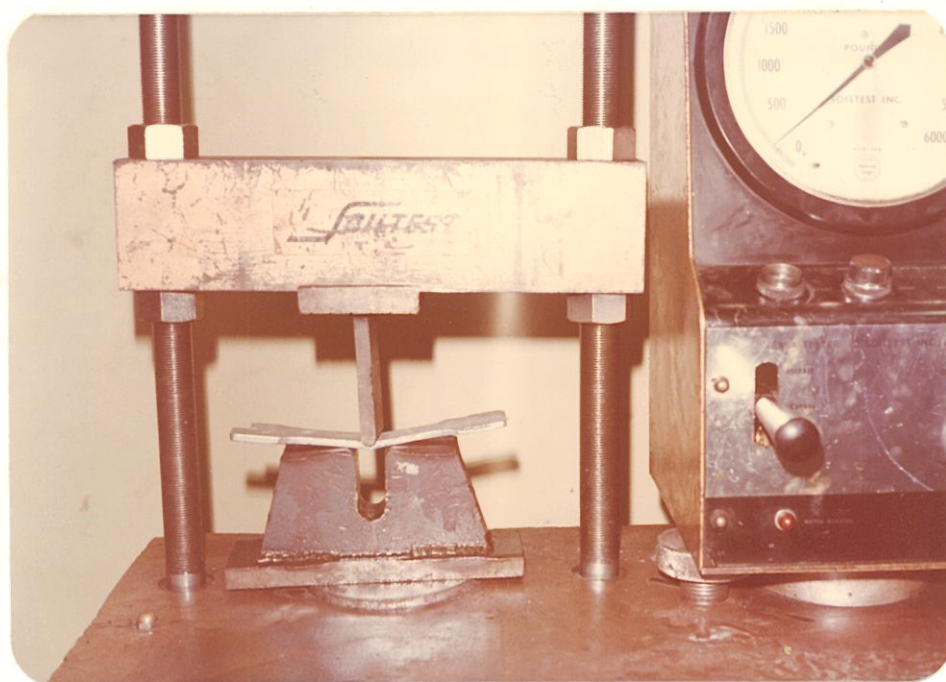


FIGURA 2.5

EQUIPO PARA PRUEBAS DE FLEXION

CON LA PROBETA MODIFICADA

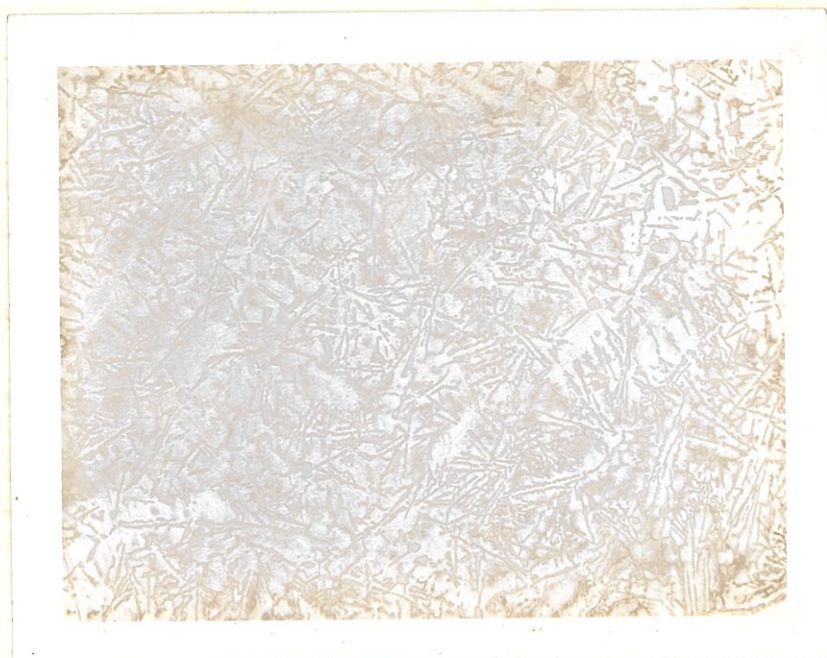


FIGURA 2.6

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION 336 SOLIDIFICADA EN  
MOLDE DE ARENA EN LOS ENSAYOS PRELIMINARES, ATACA-  
DO CON ACIDO FLUORHIDRICO AL 5%, 100X.





FIGURA 2.7

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION 336 MODIFICADA CON  
0.1% DE SODIO METALICO, ATACADO CON ACIDO FLUORHI-  
DRICO AL 5%, 100X.



FIGURA 2.8

EQUIPO PARA PULIDO ELECTROLITICO

nual con pulido mecánico, no proporcionaba los resultados requeridos.

Además se utilizó un microscopio metalográfico marca Olympus, modelo PME (Figura 2.9), para estudio de los cambios microestructurales de las diferentes coladas modificadas y sin modificar, con el cual se obtuvo las fotografías de las microestructuras de cada una de las probetas. Con estas fotografías se pueden determinar las formas estructurales de cada una de las aleaciones obtenidas, las mismas que se presentan a continuación como las Figuras 2.10 hasta la 2.19.

#### 2.6.2 Tracción

Para realizar el ensayo de tracción, se tuvo que colar probetas con las dimensiones establecidas por la norma ASTM E 8 como se indica en la Figura 2.20. Los resultados obtenidos de los ensayos de tracción se encuentran tabulados en las Tablas 2.3 y 2.4, probetas sin modificar y probetas modificadas respectivamente.

#### 2.6.3 Impacto

En esta prueba se utilizó el equipo que se encuentra en la Figura 2.21, en el cual se obtuvo los valores de la Tabla 2.5.



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Apartado 5863 Guayaquil Ecuador

Lab. Ensayo de Materiales

Solicitado por: Honorato León Koc

Material: Silumin

Temp. de ensayo:

Velocidad de ensayo:

Equipo usado:

Fecha: Agosto 1/83

PRUEBA No. 1

Método: Utilizando aleación Al-Si (88-12)

## ENSAYO DE TENSION

Observaciones:  
Normas:  
Grado:  
Resistencia a la tracción:  
Límite de fluencia:  
Alargamiento:

Prueba No.	Diámetro de la muestra mm	Sección de la probeta mm <sup>2</sup>	Longitud Inicial mm	Longitud final mm	Límite de fluencia kgf/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción kgf/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la rotura kgf/cm <sup>2</sup>	Alargamiento		OBSERVACIONES
									o/o	
1	9.60	72.38	50.00	51.15		26.44			2.30	
2	9.60	72.38	50.00	52.00		26.45			4.00	
3	9.60	72.38	50.00	51.56		26.15			3.12	
4	9.60	72.38	50.00	51.37		26.01			2.75	
5	9.60	72.38	50.00	51.62		25.94			3.24	

TABLA 2.3





# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Apartado 5863 Guayaquil Ecuador

Lab. Ensayo de Materiales

Solicitado por: Honorato León Koc

Material: Silumin

Temp. de ensayo:

Velocidad de ensayo:

Equipo usado:

Fecha: Agosto 1/83

PRUEBA No. 2

Método: Utilizando aleación Al-Si (82-12) modificado.

Observaciones:

Norma:

Grado:

Resistencia a la tracción:

Límite de fluencia:

Alargamiento:

## ENSAYO DE TENSION

Solicitud No.

Probeta No.	Diámetro de la muestra mm	Sección de la probeta mm <sup>2</sup>	Longitud inicial mm	Longitud final mm	Límite de fluencia kgf/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción kgf/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la rotura kgf/cm <sup>2</sup>	Alargamiento		OBSERVACIONES
									o/o	
1	9.60	72.38	50.00	54.56		37.55			9.13	
2	9.60	72.38	50.00	54.65		36.92			9.30	
3	9.60	72.38	50.00	54.80		36.29			9.60	
4	9.60	72.38	50.00	54.87		35.64			9.75	
5	9.60	72.38	50.00	54.96		35.02			9.92	

TABLA 2.4

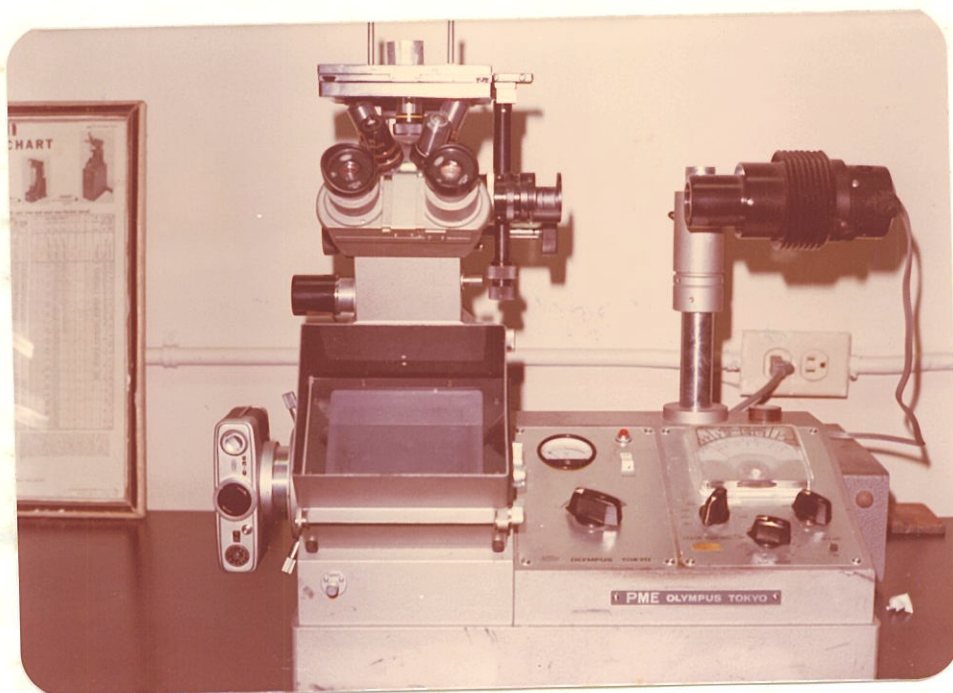


FIGURA 2.9

MICROSCOPIO OLYMPUS PME.



FIGURA 2.10

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-11.75SI SIN TRATAMIENTO MODIFICADOR, CON PULIDO Y ATAQUE ELECTROLITICO AL 25 CC. DE ACIDO NITRICO Y 75 CC. DE ALCOHOL METILICO, 200X.

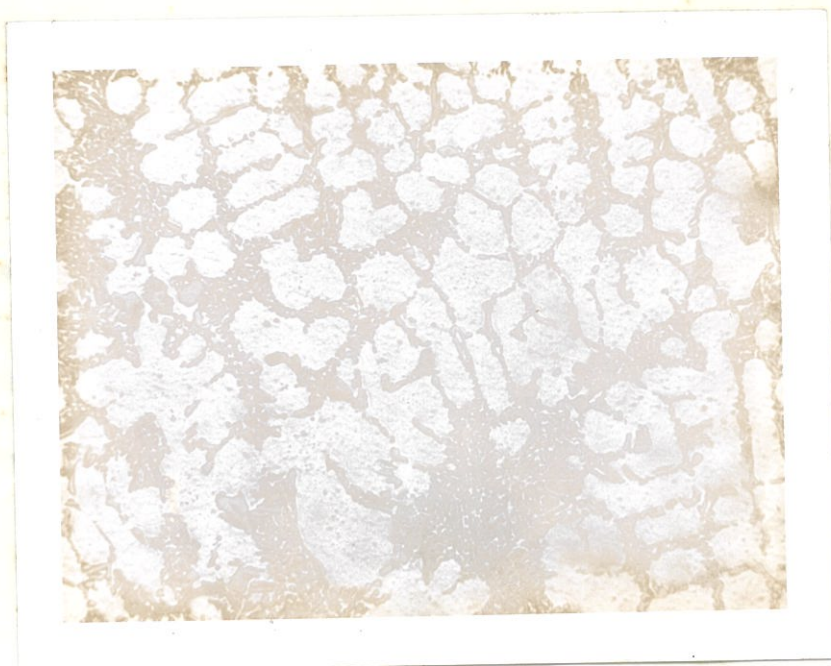


FIGURA 2.11

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-11.75SI CON PRO -  
CESO DE MODIFICACION CON 0.1% DE SODIO METALICO,  
PULIDO Y ATAQUE ELECTROLITICO, 200X.





FIGURA 2.12

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-10.75SI SIN MODIFICACION, CON PULIDO Y ATAQUE ELECTROLITICO, 200X.



FIGURA 2.13

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-10.75SI MODIFICA-  
DO CON 0.1% DE SODIO METALICO, CON PULIDO Y ATAQUE  
ELECTROLITICO, 200X.

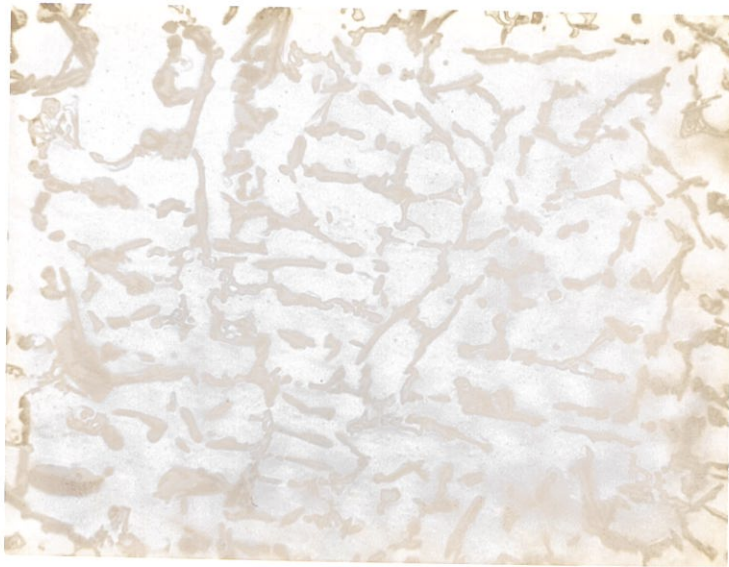


FIGURA 2.14

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-9.75SI SIN MODIFICACION, CON PULIDO Y ATAQUE ELECTROLITICO, 200X.



FIGURA 2.15

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-97.5SI MODIFICADO  
CON 0.1% DE SODIO METALICO, CON PULIDO Y ATAQUE E-  
LECTROLITICO, 200X.



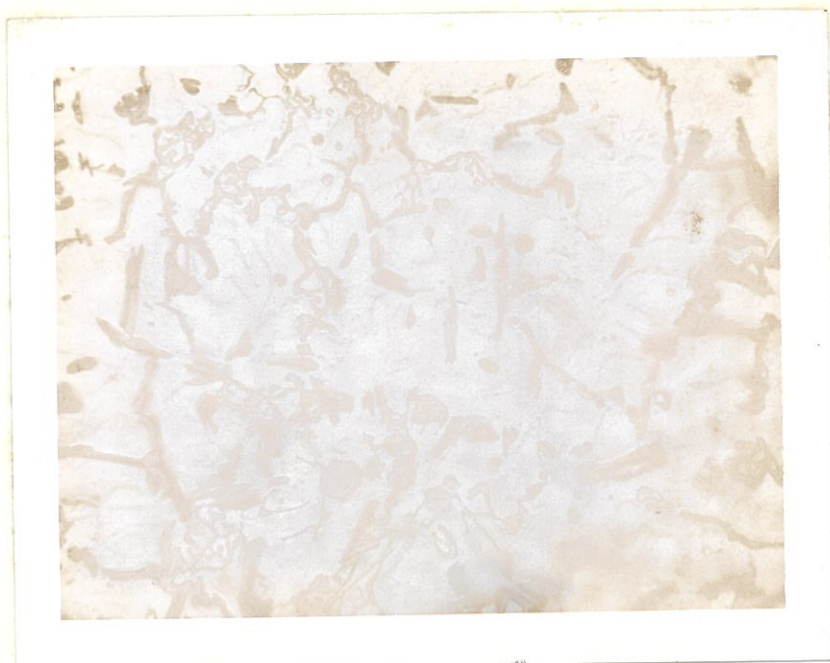


FIGURA 2.16

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-8.75SI SIN MODIFICAR, CON PULIDO Y ATAQUE ELECTROLITICO, 200X.



FIGURA 2.17

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-8.75SI MODIFICADO  
CON 0.1% DE SODIO METALICO, PULIDO Y ATAQUE ELECTRO-  
LITICO, 200X.

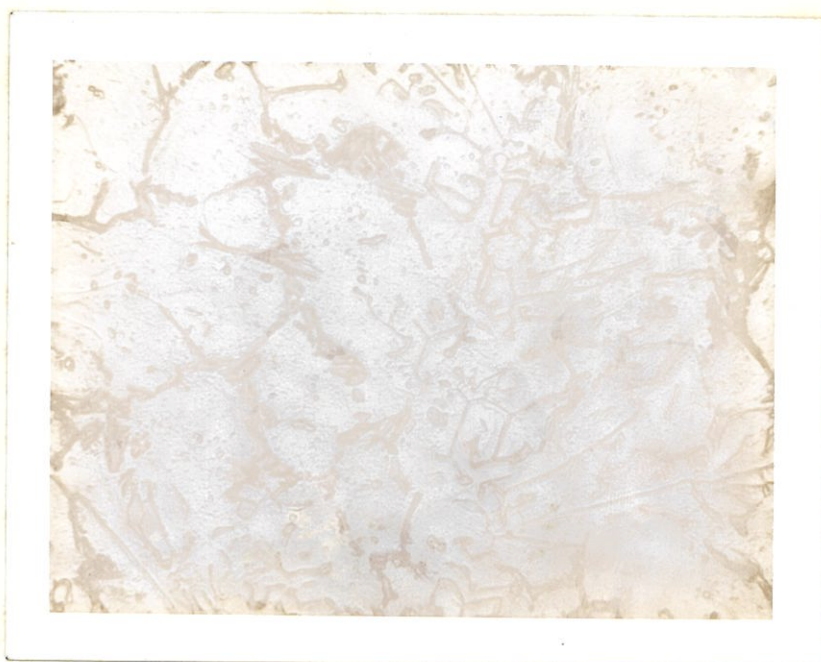


FIGURA 2.18

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-7.75SI SIN MODIFI-  
CAR, CON PULIDO Y ATAQUE ELECTROLITICO, 200X.



FIGURA 2.19

MICROESTRUCTURA DE LA ALEACION AL-7.75SI MODIFICADO  
CON 0.1% DE SODIO METALICO, CON PULIDO Y ATAQUE E-  
LECTROLITICO, 200X.



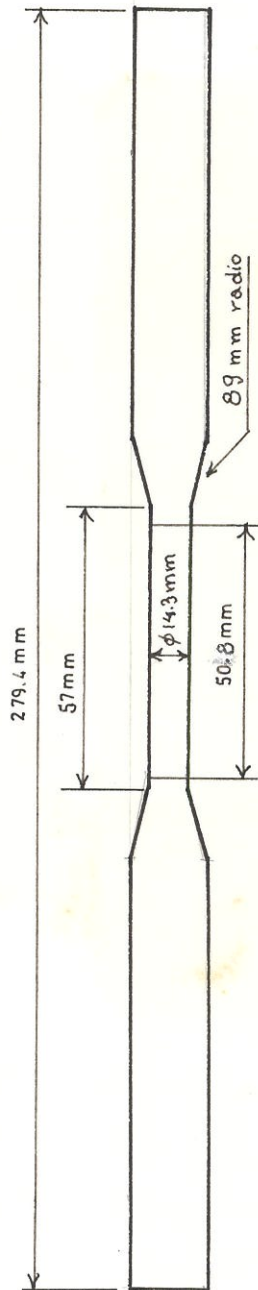


FIGURA 2.20

DIMENSIONES DE PROBETA PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCION

DE ALEACIONES NO FERROSAS, SEGUN NORMA ASTM E 8

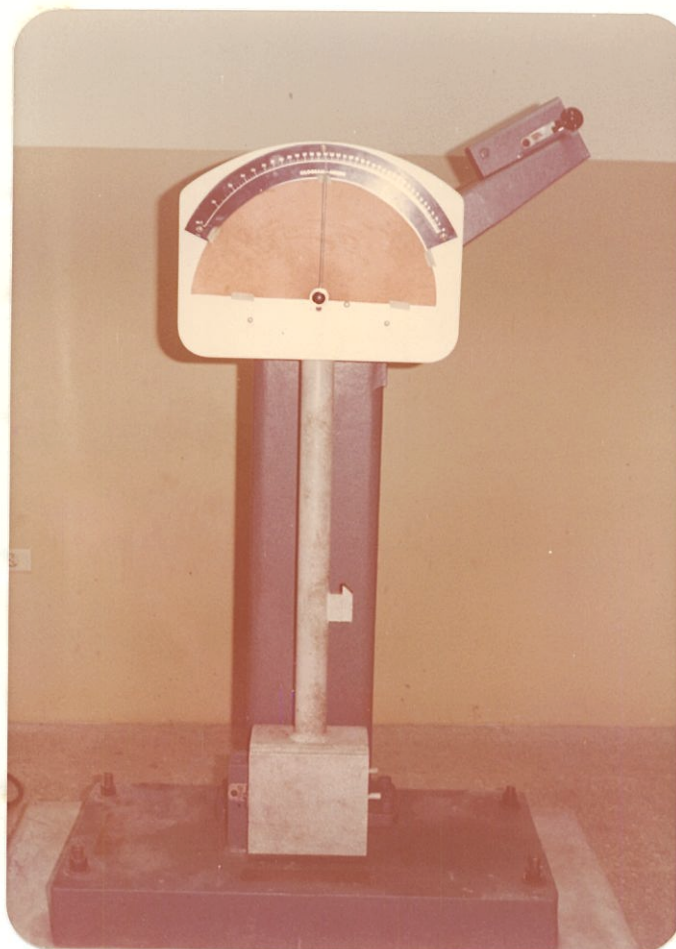


FIGURA 2.21

EQUIPO PARA PRUEBAS DE IMPACTO

TABLA 2.5

Probeta	Modificada	Sin Modificar
1	11.00	7.00
2	10.20	6.50
3	10.40	6.00
4	9.90	5.80
5	9.50	5.50

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE IMPACTO (KG-M) REALIZADA EN LAS  
PROBETAS SILUMIN MODIFICADAS Y SIN MODIFICAR.

#### 2.6.4 Dureza

Finalmente, para los ensayos de medición de dureza de las aleaciones modificadas y sin modificar, se empleó un durómetro de dureza Brinell (Figura 2.22) con una carga de 1.500 Kgs. y una bola de acero de 10 mm. de diámetro, las mismas que se hizo actuar sobre la muestra de la aleación durante 30 segundos, obteniéndose de esta manera los datos de la Tabla 2.6.

TABLA 2.6

Probeta	Modificada	Sin Modificar
1	115	124
2	110	118
3	107	113
4	104	108
5	100	105

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DUREZA BRINELL REALIZADA  
EN LAS PROBETAS SILUMIN MODIFICADAS Y SIN MODIFICAR



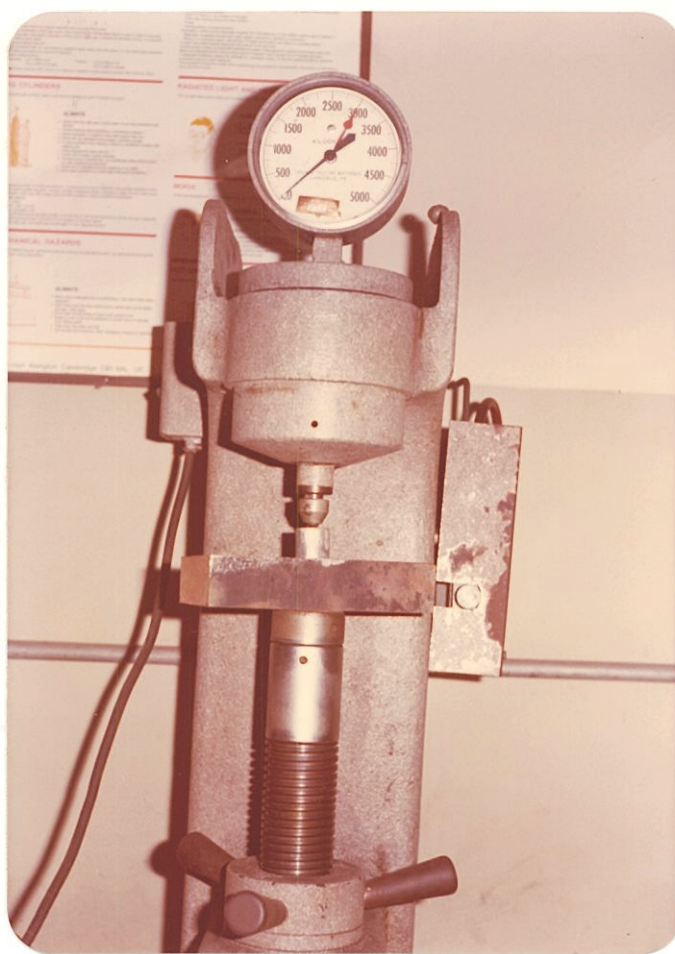


FIGURA 2.22

DUROMETRO BRINELL

### CAPITULO III

#### DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados sobre la modificación de las aleaciones aluminio-silicio, han sido metalográficos principalmente, sólo en aquellos casos en que metalográficamente se obtuvo un resultado satisfactorio, se realizaron los ensayos mecánicos. Los valores referenciales de los porcentajes de sodio metálico que se deben añadir a la aleación en estado líquido están ubicados entre 0.05 y 0.5%, aunque también existen datos de investigadores que señalan haber trabajado con porcentajes hasta de 0.005% de sodio metálico.

Para encontrar una modificación satisfactoria se trabajó con la aleación eutéctica, en la cual se añadió el sodio metálico cuando tenía una temperatura de 715°C. aproximadamente, colándolo después de haber transcurrido unos 5 minutos a una temperatura comprendida entre 675° y 700°C. en molde de arena con silicato de sodio y CO<sub>2</sub>. En la obtención de las probetas para los ensayos de tracción e impacto, se tomó la mejor modificación, la cual se obtuvo con la adición de 0.1% de sodio metálico (Ver en la Figura 2.7).

Para modificaciones con porcentajes mayores a 1.1% de sodio metálico, se encontró un efecto de sobremodificación especialmente con valores sobre 0.2% de sodio y para valores inferiores a 0.1% de sodio el efecto modificador no es apreciable en la metalografía.

Se ha hecho caso omiso de las teorías que tratan de explicar el fenómeno de la modificación con sodio u otros elementos "Estroncio principalmente", al cual se le atribuye efectos de modificaciones permanentes, y se ha centrado la atención sobre los cambios de las características mecánicas como consecuencia de la modificación estructural.

Las aleaciones ensayadas con contenido de silicio comprendidos entre 7.75% y la composición del eutéctico (12%), se observó que de acuerdo a los resultados obtenidos, tanto en los ensayos metalográficos (Figuras 2.10 al 2.19) como en los ensayos mecánicos (Tablas 2.3 al 2.6), el efecto modificador es más sensible en las aleaciones próximas al eutéctico. De los resultados de dureza (Tabla 2.6) se observa también esta tendencia, encontrándose que para la composición eutéctica existe un diferencial de dureza entre la probeta sin modificar y la modificada de alrededor de 9 puntos de dureza, en cambio que para la composición con menor porcentaje de silicio el mismo diferencial es solamente de 5 puntos de dureza. Esto lo explica más claramente las metalografías de los ensayos (Figuras 2.10 al 2.19), ya que a menor porcentaje de silicio

se observan una menor cantidad de estructura acicular y polihédrica de silicio.

Los resultados de los ensayos de tracción e impacto (Tablas 2.3, 2.4 y 2.5) demuestran claramente que el efecto modificador tiene una influencia marcada sobre estas propiedades, observándose que mientras la dureza disminuye, los valores de la resistencia a la tracción y la resiliencia aumenta, volviéndose a apreciar en estos resultados el efecto marcado del porcentaje de silicio en la aleación.



## CONCLUSIONES

De la discusión anterior se concluye que:

- 1.- La modificación de las estructuras de las aleaciones de aluminio-silicio, con sodio metálico, cambian beneficiosamente las propiedades.
- 2.- El porcentaje de sodio metálico que se debe añadir a la aleación en estado líquido debe estar alrededor de 0.1%.
- 3.- El efecto modificador en las aleaciones con menos de 10% de silicio, no es muy significativo en cuanto a mejoramientos de propiedades.
- 4.- Es preferible realizar esta modificación en las aleaciones que tengan porcentaje de silicio mayores al 10%.

### RECOMENDACIONES

- 1.- Usar la técnica de fusión y colado utilizado en este trabajo.
- 2.- Realizar investigaciones sobre procesos de modificación versus tiempo de colado, en caso de que se use sodio metálico.
- 3.- Realizar investigaciones sobre procesos de modificación por medio de estroncio.
- 4.- No se debe de utilizar el proceso de modificación en aleaciones menores al 10% de silicio.
- 5.- Usar 0.1% de sodio metálico en las modificaciones de las estructuras de las aleaciones aluminio-silicio.

## B I B L I O G R A F I A

1. AVNER SIDNEY H., Introducción a la Metalurgia Física, Cap. 6.
2. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Materials Handbook, Vol. 1, Properties and Selection.
3. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Materials Handbook, Vol. 1, Metallography, Structures and Phase Diagrams.
4. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Materials Handbook, Vol. 2, Forging and Casting.
5. FOSECO (F.S.) LIMITED, Aluminium Silicon Alloys, England (Folleto).
6. FOSECO ESPAÑOLA, S.A., Aleaciones de Aluminio Silicio (Silumín) - (Folleto de información técnica No. 16).
7. FRED O. TRAENKNER, Practical Techniques for Casting Aluminum, - (Folleto de Información técnica, Diciembre 1981).
8. HEINE, LOPER Y ROSENTHAL, Principles of Metal Casting, Cap. 11.
9. INGENIEROS DEL GRUPO PECHINEY, Enciclopedia del Aluminio, Urmo.
10. KAISER ALUMINIUM, La Fundición de Aluminio.
11. PANSERI C., Manual de Tecnología de las Aleaciones Ligeras, Cap. 4.
12. SPECHT Y TANZEN, Tratado de Metalurgia de Metales Ligeros, Cap. 1 y Cap. 4.