



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

CARACTERIZACIÓN DE UNA ALEACIÓN TERNARIA (Al-  
2Li-1Hf) OBTENIDA POR DIFUSIÓN EN ESTADO LÍQUIDO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
PRESENTA:

REYNALDO TADEO LOZANO BENÍTEZ

ASESOR: INGENIERO GUILLERMO SANTOS OLMOS  
COASESOR: M. EN C. TOMÁS RANGEL ORTIZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Debo agradecer a Sandra Leticia Benítez de Lozano y José Reynaldo Lozano Amador por hacerme lo que soy y el apoyo incondicional (sobre todo en las situaciones de duda) para la consecución de este fin, que es poco en comparación con lo que recibí.

Agradezco a Cecilia Elisa Lozano Benítez porque ella hizo más amena y divertida la espera de la realización de este trabajo

Gracias LaViolinista por tocar para mi cuando lo necesité.

Gracias a Dios.

Gracias al Ingeniero Guillermo Santos Olmos por la orientación, la dirección y las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

Gracias al Maestro Tomás Rangel Ortiz por la confianza, la experiencia indispensable y los detalles.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>CAPITULO I</b>	<b>7</b>
<b>1. Generalidades</b>	<b>8</b>
<b>1.1. Aluminio</b>	<b>8</b>
<b>1.1.1. Características principales</b>	<b>8</b>
<b>1.1.2. Abundancia y obtención.</b>	<b>8</b>
<b>1.1.3. Aplicaciones</b>	<b>9</b>
<b>1.1.4. Elementos del grupo 13</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Litio</b>	<b>11</b>
<b>1.2.1. Características principales</b>	<b>12</b>
<b>1.2.2. Abundancia y obtención</b>	<b>12</b>
<b>1.2.3. Aplicaciones</b>	<b>12</b>
<b>1.2.4. Elementos del grupo 1</b>	<b>13</b>
<b>1.3. Hafnio</b>	<b>13</b>
<b>1.3.1. Principales propiedades</b>	<b>14</b>
<b>1.3.2. Obtención</b>	<b>14</b>
<b>1.3.3. Aplicaciones</b>	<b>15</b>
<b>1.3.4. Elementos del grupo 4</b>	<b>15</b>
<b>1.4. Elementos del bloque p</b>	<b>15</b>
<b>1.5. Designaciones de las aleaciones de aluminio</b>	<b>16</b>
<b>1.5.1. Aleaciones de aluminio-litio</b>	<b>16</b>

<b>1.5.2. Metalurgia física</b>	<b>19</b>
<b>1.5.2.1 Aleaciones aluminio-litio</b>	<b>20</b>
<b>1.5.3. Aleaciones de Aluminio-Litio-X</b>	<b>21</b>
<b>1.6 Molde permanente</b>	<b>25</b>
<b>1.6.1. Fundición por gravedad en molde metálico</b>	<b>26</b>
<b>1.6.2. Fundición en molde metálico o baja presión</b>	<b>26</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>27</b>
<b>2.-Proceso experimental</b>	<b>27</b>
<b>2.1.-Equipo y materiales empleados</b>	<b>28</b>
<b>2.2.-Secuencia experimental</b>	<b>28</b>
<b>2.2.1.-Preparación y fusión de la aleación</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2.-Determinación de las curvas de enfriamiento</b>	<b>31</b>
<b>2.2.3.-Análisis químico</b>	<b>32</b>
<b>2.2.4.-Tratamiento térmico</b>	<b>33</b>
<b>2.2.5.-Preparación de las probetas</b>	<b>34</b>
<b>2.2.6.-Número de Dureza Vickers</b>	<b>36</b>
<b>2.2.7.-Micro estructura</b>	<b>37</b>
<b>2.2.7.1.-Probeta en estado de fundición</b>	<b>38</b>
<b>2.2.7.2.-Probeta con tratamiento de envejecido de 1 minuto</b>	<b>42</b>
<b>2.2.7.3.-Probeta con envejecido de 10 minutos</b>	<b>45</b>
<b>2.2.7.4.-Probeta con envejecido de 1 hora</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>50</b>

<b>3. CONCLUSIONES</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>52</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>56</b>
<b>Propiedades generales del Aluminio, Litio y Hafnio</b>	<b>57</b>
<b>Aluminio</b>	<b>57</b>
<b>Litio</b>	<b>61</b>
<b>Hafnio</b>	<b>64</b>

# **INTRODUCCIÓN**

## Introducción

Las aleaciones de aluminio han tenido un auge desde la década de los 70's sobre todo para reducir el peso en las estructura aéreo espaciales, aleaciones de aluminio litio se usan como materiales principalmente para la tecnología aeroespacial y contenedores criogénicos.

En la actualidad se han desarrollado aleaciones binarias de Al- Li, debido a su ligereza y resistencia, también se usan sistemas de aleaciones ternarias de base Al-Li y otras súper aleaciones.

Para el desarrollo de esta tesis se utilizó una aleación ternaria Al-Li-Hf. El objetivo es hacer la caracterización (la micro dureza y la estructura dendrítica con diferentes tratamientos térmicos) de una aleación Al-2Li-1Hf (los números están en porcentaje en peso, es decir, 97% Al, 2%Li, y 1%Hf) obtenida por el método de difusión en estado líquido.

En el capítulo 1 esta contenida de manera general las características más importantes de cada elemento, la obtención y la abundancia, algunas de sus posibles aplicaciones, información general del grupo al que pertenecen e información general del bloque P , ya que los elementos en cuestión pertenecen a este bloque; también se aborda de manera general información de las aleaciones de base Al-Li , su metalurgia física y las aleaciones ternarias de Al-Li-X.; también se hace referencia al molde permanente ya que es por este método por el cuál se obtuvo la aleación.

En el capítulo 2 se explica detalladamente la experimentación y los materiales usados para llevarla a cabo, la secuencia que se utilizó para realizar el experimento, los procedimientos para la obtención de las curvas de enfriamiento del molde, el análisis químico, los diferentes tratamientos térmicos, las gráficas que arrojaron las pruebas de micro dureza y el estudio de la microestructura de cada probeta con los diferentes tratamientos térmicos.

En el capítulo 3 están vertidas las conclusiones obtenidas del presente trabajo. En el apéndice se enuncian otras propiedades generales de los elementos en cuestión así como la configuración de las celdas unitarias de cada uno.

# **CAPÍTULO I**

## **1.Generalidades**

### **1.1.Aluminio**

El aluminio es el elemento químico, de símbolo **Al** y número atómico 13. Es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre. Su ligereza, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y bajo punto fusión le convierten en un material idóneo para una gran variedad de aplicaciones, especialmente en aeronáutica. Sin embargo, la elevada cantidad de energía necesaria para su obtención dificulta su mayor utilización; dificultad que puede compensarse por su bajo costo de reciclado y su larga vida útil.

#### **1.1.1.Características principales.**

El aluminio es un metal ligero, blando pero resistente, de aspecto gris plateado. Su densidad es aproximadamente un tercio de la del acero o el cobre. Es muy maleable y dúctil y es apto para el mecanizado y la fundición. Debido a su elevado calor de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina  $Al_2O_3$ ) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación proporcionándole resistencia a la corrosión y durabilidad. Esta capa protectora puede ser ampliada por electrólisis en presencia de oxalatos El aluminio tiene características anfóteras, es decir que se disuelve tanto en ácidos (formando sales de aluminio) como en bases fuertes (formando aluminatos con el anión  $[Al(OH)_4]^-$ ) liberando hidrógeno. El principal y casi único estado de oxidación del aluminio es +III como es de esperar por sus tres electrones en la capa de valencia.

#### **1.1.2. Abundancia y obtención**

Aunque el aluminio es un material muy abundante en la corteza terrestre raramente se encuentra libre. Sus aplicaciones industriales son relativamente recientes, produciéndose a escala industrial desde finales del siglo XIX. Cuando fue descubierto se encontró que era extremadamente difícil su separación de las rocas de las que formaba parte, por lo que durante un tiempo fue considerado un metal precioso, más caro que el oro; sin embargo,

con las mejoras de los procesos los precios bajaron tras descubrirse un método sencillo de extracción del metal.

Las primeras síntesis del metal se basaron en la reducción del cloruro de aluminio con potasio elemental. En 1859 Henri Sainte-Claire Deville publicó dos mejoras al proceso de obtención al sustituir el potasio por sodio y el cloruro simple por doble; posteriormente, la invención del proceso Hall-Héroult en 1886 abarató el proceso de extracción del aluminio a partir del mineral, lo que permitió, junto con el proceso Bayer del mismo año, que se extendiera su uso hasta hacerse común en multitud de aplicaciones.

La recuperación del metal a partir de la chatarra (reciclado) era una práctica conocida desde principios del siglo XX. Es, sin embargo, a partir de los 60's cuando se generaliza, más por razones medioambientales que estrictamente económicas.

El proceso ordinario de obtención del metal consta de dos etapas, la obtención de alúmina por el proceso Bayer a partir de la bauxita, y posterior electrólisis del óxido para obtener el aluminio.

La elevada reactividad del aluminio impide extraerlo de la alúmina mediante reducción, siendo necesaria la electrólisis del óxido, lo que exige a su vez que éste se encuentre en estado líquido. No obstante, la alúmina tiene un punto de fusión de 2000°C, excesivamente alta para acometer el proceso de forma económica por lo que era disuelta en criolita fundida, lo que disminuía la temperatura hasta los 1000°C. Actualmente, la criolita se sustituye cada vez más por la zeolita un fluoruro artificial de aluminio, sodio y calcio.

### **1.1.3. Aplicaciones**

Ya sea considerando la cantidad o el valor del metal empleado, su uso excede al del cualquier otro exceptuando el acero, y es un material importante en multitud de actividades económicas.

El aluminio puro es blando y frágil, pero sus aleaciones con pequeñas cantidades de cobre, manganeso, silicio, magnesio y otros elementos presentan una gran variedad de características adecuadas a las más diversas aplicaciones. Estas aleaciones constituyen el componente principal de multitud de componentes de los aviones y cohetes, en los que el peso es un factor crítico.

Cuando se evapora aluminio en el vacío, forma un revestimiento que refleja tanto la luz visible como la infrarroja; además la capa de óxido que se forma impide el deterioro del recubrimiento, por esta razón se ha empleado para revestir los espejos de telescopios, en sustitución de la plata.

Dada su gran reactividad química, finamente pulverizado se usa como combustible sólido de cohetes y en el explosivo termita, como ánodo de sacrificio y en procesos de aluminotermia para la obtención de metales.

Otros usos del aluminio son:

Transporte, como material estructural en aviones, automóviles, tanques, superestructuras de buques, blindajes, etc.

Embalaje; papel de aluminio, latas, tetrabricks, etc.

Construcción; ventanas, puertas, perfiles estructurales, etc.

Bienes de uso; utensilios de cocina, herramientas, etc.

Transmisión eléctrica. Aunque su conductividad eléctrica es tan sólo el 60% de la del cobre su mayor ligereza permite una mayor separación de las torres de alta tensión, disminuyendo los costos de la infraestructura.

Recipientes criogénicos (hasta  $-200^{\circ}\text{C}$ , ya que no presenta temperatura de transición (dúctil a frágil) como el acero, así la tenacidad del material es mejor a bajas temperaturas y calderería.

Las sales de aluminio de los ácidos grasos (p. ej. el estearato de aluminio) forman parte de la formulación del napalm.

Los haluros de aluminio tienen características de ácido Lewis y son utilizados como catalizadores o reactivos auxiliares.

Los aluminosilicatos son una clase importante de minerales. Forman parte de las arcillas y son la base de muchas cerámicas.

Aditivos de óxido de aluminio o aluminosilicatos a vidrios varían las características térmicas, mecánicas y ópticas de los vidrios.

El corundo ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) es utilizado como abrasivo. Unas variantes (rubí, zafiro) se utilizan en la joyería como piedras preciosas.

#### **1.1.4. Elementos del grupo 13**

El primer elemento del grupo 13 es el boro (B), un metaloide con un punto de fusión muy elevado y en el que predominan las propiedades no metálicas. Los otros elementos que comprenden este grupo son: aluminio (Al), galio (Ga), indio (In), y talio (Tl), que forman iones con un carga triple positiva ( $3+$ ).

La característica del grupo es que los elementos tienen tres electrones en su capa más externa, por lo que suelen formar compuestos en los que presentan un estado de oxidación  $+3$ . El talio difiere de los demás en que también es importante su estado de oxidación  $+1$ . Esta baja reactividad del par de electrones 's' conforme se baja en el grupo se presenta también en otros grupos, se denomina *efecto del par inerte* y se explica considerando que al bajar en el grupo las energías medias de enlace van disminuyendo.

### **1.2. Litio**

El **litio** es un elemento químico de símbolo **Li** y número atómico 3. En la tabla periódica, se encuentra en el grupo 1, entre los elementos alcalinos. En su forma pura, es un metal blando, de color blanco plata, que se oxida rápidamente en aire o agua. Es el elemento sólido más ligero y se emplea especialmente en aleaciones conductoras del calor, en baterías eléctricas y, sus sales, en el tratamiento de ciertos tipos de depresión.

#### **1.2.1. Características principales**

Es el metal más ligero, su densidad es tan sólo la mitad de la del agua. Al igual que los demás metales alcalinos es univalente y muy reactivo, aunque menos que el sodio, por lo que no se encuentra libre en la naturaleza. Acercado a una llama la torna carmesí pero si la combustión es violenta la llama adquiere un color blanco brillante.

### **1.2.2 Abundancia y obtención**

Es un metal escaso en la corteza terrestre que encuentra disperso en ciertas rocas, pero nunca libre, dada su gran reactividad. Se encuentra en pequeña proporción en rocas volcánicas y sales naturales.

Desde la Segunda Guerra Mundial, la producción de litio se ha incrementado enormemente, separándolo de las rocas de las que forma parte y de las aguas minerales. Los principales minerales de los que se extrae son lepidolita, petalita, espodumena y amblygonita. En Estados Unidos se obtiene de las salinas de California y Nevada principalmente

### **1.2.3. Aplicaciones**

Por su elevado calor específico, el mayor de todos los sólidos, se emplea en aplicaciones de transferencia de calor y por su elevado potencial electroquímico constituye un ánodo adecuado para las baterías eléctricas. Además tiene otros usos:

Las sales de litio, particularmente el carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) y el citrato de litio, se emplean en el tratamiento de la manía y la depresión bipolar, aunque últimamente, se ha extendido su uso a la depresión unipolar.

El cloruro de litio y el bromuro de litio tienen una elevada higroscopicidad por lo que son excelentes secantes. El segundo se emplea en bombas de calor de absorción, entre otros compuestos como el nitrato de litio.

El estearato de litio es un lubricante de propósito general en aplicaciones a alta temperatura.

El litio es un agente aleante empleando en la síntesis de compuestos orgánicos.

El hidróxido de litio se usa en las naves espaciales y submarinos para depurar el aire extrayendo el dióxido de carbono.

Es componente común de las aleaciones de aluminio, cadmio, cobre y manganeso empleadas en la construcción aeronáutica, y se ha empleado con éxito en la fabricación de cerámicas y lentes, como la del telescopio de 0,5 m de monte Palomar.

#### 1.2.4 Elementos del grupo 1

Son metales de baja densidad, coloreados y blandos. Reaccionan con facilidad con halógenos para formar sales iónicas, y con agua para formar hidróxidos fuertemente básicos. Todos tienen un solo electrón en su nivel energético más externo, con tendencia a perderlo, con lo que forman un ión monopositivo,  $M^+$ .

El hidrógeno, con un único electrón, se sitúa normalmente dentro de la tabla periódica en el mismo grupo de los metales (aunque otras veces aparece separado de éstos o en otra posición). Sin embargo, para arrancar este electrón es necesaria mucha más energía que en el caso de los alcalinos. Como en los halógenos, el hidrógeno sólo necesita un electrón para completar su nivel de energía más externo, por lo que en algunos aspectos el hidrógeno es similar a los halógenos; en su forma elemental se encuentra como una molécula diatómica,  $H_2$ , e incluso puede formar sales, llamadas hidruros,  $MH$ , con los alcalinos, de forma que el metal le da un electrón al hidrógeno, como si el hidrógeno fuera un halógeno

#### 1.3 Hafnio

El **hafnio** es un elemento químico de número atómico 72 que se encuentra en el grupo 4 de la tabla periódica de los elementos) y se simboliza como **Hf**.

Es un metal de transición, brillante, gris-plateado, químicamente muy parecido al zirconio, encontrándose en los mismos minerales y compuestos, y siendo difícil separarlos. Se usa en aleaciones con wolframio en filamentos y en electrodos. También se utiliza como material de barras de control de reactores nucleares debido a su capacidad de absorción de neutrones.

### **1.3.1. Principales propiedades**

Es un metal dúctil, brillante, plateado y resistente a la corrosión; químicamente muy similar al zirconio. Estos dos elementos tienen el mismo número de electrones en sus capas exteriores y sus radios iónicos son muy similares debido a la contracción de los lantánidos. Por eso son muy difíciles de separar (los procesos geológicos no los han separado y en la naturaleza se encuentran juntos) y no hay otros elementos químicos que se parezcan más entre sí. Las únicas aplicaciones para las cuales es necesario separarlos es en aquellas en las que se utilizan por sus propiedades de absorción de neutrones; en reactores nucleares.

El carburo de hafnio (HfC) es el compuesto binario más refractario conocido y el nitruro de hafnio (HfN) es el más refractario de todos los nitruros metálicos conocidos, con un punto de fusión de 3310 °C. Este metal es resistente a las bases concentradas, pero los halógenos pueden reaccionar con él para formar tetrahaluros de hafnio (HfX<sub>4</sub>). A temperaturas altas puede reaccionar con oxígeno, nitrógeno, carbono, boro, azufre y silicio.

### **1.3.2. Obtención**

Se encuentra siempre junto al zirconio en sus mismos compuestos, pero no se encuentra como elemento libre en la naturaleza. Está presente, como mezclas, en los minerales de circonio, como el zircón (ZrSiO<sub>4</sub>) y otras variedades de éste (como la alvita), conteniendo entre un 1 y un 5% de hafnio.

Debido a la química casi idéntica que presentan el zirconio y el hafnio, es muy difícil separarlos. Aproximadamente la mitad de todo el hafnio metálico producido se obtiene como subproducto de la purificación del zirconio. Esto se hace reduciendo el tetracloruro de hafnio (HfCl<sub>4</sub>) con magnesio o sodio en el proceso de Kroll.

### **1.3.3. Aplicaciones**

El hafnio se utiliza para fabricar barras de control empleadas en reactores nucleares, como las que se pueden encontrar en submarinos nucleares, debido a que la sección de captura

de neutrones del hafnio es unas 600 veces la del zirconio, con lo cual tiene una alta capacidad de absorción de neutrones, y además tiene unas propiedades mecánicas muy buenas, así como una alta resistencia a la corrosión. Otras aplicaciones:

En lámparas de gas e incandescentes.

Para eliminar oxígeno y nitrógeno de tubos de vacío.

En aleaciones de hierro, titanio, niobio, tántalo y otras aleaciones metálicas

#### **1.3.4. Elementos del grupo 4**

El **grupo 4** de la tabla periódica lo comprenden los elementos, titanio (Ti), zirconio (Zr) y hafnio (Hf), así como el elemento rutherfordio (Rf), aunque no se suele tener en cuenta al referirse al grupo 4 pues se trata de un elemento sintético y radiactivo. "Grupo 4" es el nombre recomendado por la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, por sus siglas en inglés); el antiguo nombre europeo es "grupo IVA", mientras que el nombre antiguo estadounidense es "grupo IVB". El nombre de la IUPAC no debe confundirse con los antiguos, dados con números romanos.

#### **1.4. Elementos del bloque p**

Los elementos del **bloque p** (de *principal*) son aquellos situados en los grupos 13 a 18 de la tabla periódica de los elementos. En estos elementos el nivel energético más externo corresponde a orbitales *p* (véase la configuración electrónica). La configuración electrónica externa de estos elementos es:  $ns^2np^x$  ( $x = 1$  a  $6$ , siendo  $1$  para el primer grupo,  $2$  para el segundo, etc.)

#### **1.5. Designaciones de las aleaciones de aluminio**

Se designan con un número de 4 dígitos de acuerdo con el sistema adoptado por la Aluminium Association. El primer dígito indica el tipo de aleación, de acuerdo con el

elemento principal. El segundo indica las aleaciones específicas en la aleación, los dos últimos indican la aleación específica de aluminio o la pureza de éste.

La designación del temple indica el tratamiento que ha recibido la aleación para llegar a su condición y propiedades actuales. El temple se indica con las letras:

O (recocidas), F (tal como fue fabricada), H (trabajada en frío) o T.

Las aleaciones de aluminio forjado se dividen en dos clases: endurecidas y reforzadas solo con trabajo en frío y las que deben sus propiedades mejoradas al tratamiento térmico. Las aleaciones más importantes endurecibles al trabajarlas son el aluminio comercialmente puro (1100) o la aleación con 1.25% de manganeso (3003); las cuales pueden endurecerse con trabajo en frío, pero no se someten a tratamiento térmico. Las aleaciones del tipo duraluminio son de alta resistencia mecánica, se trabajan con facilidad en caliente. Se debe someter a trabajo en frío prolongado después de transcurridas unas cuantas horas del temple por inmersión, donde la resistencia a la corrosión es máxima. La mayoría de las aleaciones tratables térmicamente son menos resistentes a la corrosión. Muchas de las aleaciones susceptibles de tratamiento térmico se encuentran en forma de lámina o con un recubrimiento de aluminio de gran pureza o de aleación resistente a la corrosión en cada lado; estos productos se conocen como aleaciones Alclad con excelente resistencia a la corrosión. Un nuevo tipo de producto de aluminio forjado, denominado APM, tienen resistencia mecánica a temperaturas elevadas, estabilidad y resistencia al escurrimiento plástico, superiores a las de cualquier aleación conocida de aluminio. Es un cuerpo compacto de polvo fino de aluminio de alta pureza con óxido de aluminio

### **1.5.1. Aleaciones de aluminio-litio**

Las aleaciones de aluminio-litio fueron desarrolladas para reducir el peso de estructuras aeroespaciales o aeronaves, se usa para aplicaciones criogénicas (por ejemplo como contenedores de oxígeno líquido y combustible de hidrógeno para vehículos aeroespaciales) El mayor trabajo de desarrollo comenzó en los 70's, cuando los productores de aluminio aceleraron el desarrollo de las aleaciones de aluminio-litio como reemplazos de las estructuras de avión convencionales.

La baja densidad de las aleaciones aluminio-litio que se esperaba que redujeran el peso y mejoraran el desempeño de la aeronave.

La meta era introducir una masa de metal de aleaciones de aluminio-litio que pudiesen ser fabricadas con un equipo productor de los ya existentes y después ser usada por las manufactureras de estructuras de aviones como reemplazos directos de las aleaciones convencionales de aluminio (que típicamente han constituido del 70% al 80% de peso de la aeronave).

Este desarrollo ha dejado introducir las aleaciones comerciales 8090, 2090 y 2091 a mediados de 1980; El weldalite 049 y CP276 fueron introducidas después. Estas aleaciones son caracterizadas por una aproximación nominal (% en peso) de composiciones (balance de aluminio):

- Weldalite 049: 5.4Cu, 1.3Li, 0.4Ag, 0.4Mg, 0.14Zr
- Aleación 2090: 2.7Cu, 2.2Li, 0.12Zr
- Aleación 2091: 2.1Cu, 2.0Li, 0.10Zr
- Aleación 8090: 2.45Li, 0.12Zr, 1.3Cu, 0.95Mg
- Aleación CP276: 2.7Cu, 2.2Li, 0.5Mg, 0.12 Zr.

Las aleaciones comerciales de aluminio-litio son usadas como materiales avanzados para tecnología aeroespacial, principalmente por su baja densidad, alto módulo específico, excelente resistencia a la fatiga y a las bajas temperaturas.

La resistencia de propagación de las aleaciones aluminio-litio a su máximo punto de ruptura por fatiga, en comparación con las aleaciones tradicionales 2xxx 7xxx es debido principalmente a los altos niveles de rompimiento de la punta del casco, fracturas serpenteantes (zig zag) y la dureza resultante, inducida por el cierre de la ruptura. Sin embargo el hecho que estas aleaciones derivan sus propiedades superiores intrínsecas de los mecanismos estructurales. Tiene ciertas implicaciones con respecto a pequeñas fracturas y variadas amplitudes de comportamiento, por ejemplo, las aleaciones de aluminio-litio pierden su ventaja a la fatiga sobre las aleaciones convencionales de aluminio en compresión-dominada y espectro de prueba de fatiga de amplitud-variable, sin embargo en espectro de presión-regulada, las aleaciones de aluminio-litio demuestran grandes retardos sobre la aplicación de sobrecargas de tensión de pico sencillo.

La desventaja principal de un pico de fuerza de las aleaciones de aluminio-litio son ductibilidad y fracturas reducidas, sin embargo en la dirección corta transversal en un plano anisótropo, la necesidad de trabajo en frío para conseguir propiedades de pico y rangos acelerados de rompimiento por fatiga cuando las rupturas son microscópicas.

Estas limitaciones hacen imposible la sustitución de las estructuras de avión de aleación de aluminio, si bien es posible agrupar las aleaciones de aluminio y las aleaciones de aluminio-litio en términos de forma de producto y criterio primario de diseño en la tabla 1.1. se indica que ciertas aleaciones de aluminio-litio exhiben mas tolerancia al daño, fuerza y corrosión que otras aleaciones de aluminio-litio.

Criterio de diseño	Aleaciones aeroespaciales de aluminio.				Aleaciones aeroespaciales de Al-Li.				
	Primario	Hoja	Plato	Forjados	Extrusiones	Hoja	Plato	forjados	Extrusiones
Alta resistencia	7075-T6	7075-T651 7150-T651 7475-T651 7150-T7751			7075-T6511 7175-T6511 7150-T6511 7050-T76511	CP276 8091-T8x	Weldalite 049 8091-T851 2090-T81	Weldalite 049 8091-T652	CP276 Weldalite 049 8090-T8x 2090-T86
Resistencia media, tolerancia al daño por corrosión	7075-T76 7075-T73 2214-T6 2014-T6 2219-T87	7010-T7651 2214-T651 2014-T651 7075-T651 7075-T7351 7050-T7651 2124-T851 2219-T852	7050-T74 7075-T6 7075-T73 2014-T652		7050-T3511 2224-T3511 2219-T851 2024-T8511 2014-T6511 7075-T73511	2091-T8X 8090-T8X	8090-T7E20 8090-T8771	8090-T652 2091-T852	8090-T8X 8091-T8551
Alta tolerancia al daño	2219-T39 2024-T3	2324-T39 2124-T351 2024-T351	2219-T3511 2024-T352			2091-CPHK 2091-T3 2091-T84 8090-T81	8090-T8E57 8090-T8151 2091-T351 2091-T851		2091-T8 8091-T8551
weldabilidad		2219	2219	2219		Weldalite 049	Weldalite 049	Weldalite 049	Weldalite 049
Propiedades criogénicas		2519	2519	2519		2090/8090	2090/8090	8090	2090
Formado super plástico	7475					2090/8090 Weldalite 049			

**Tabla 1.1.- agrupaciones de aleaciones aeroespaciales selectas y condiciones de temple a requerimientos primarios de diseño. Los grupos no implican que las aleaciones puedan ser substituidas directamente por aleaciones de aluminio**

Fuente.-Aluminium and Aluminium alloys, ASM Specialty Handbook 2004

### 1.5.2. Metalurgia Física

En el desarrollo de aleaciones de baja densidad, el más simple acercamiento para reducir el peso de una aleación es añadir elementos con bajos pesos atómicos como elementos aleados. En el caso de aleaciones de aluminio, el litio y el berilio son las adiciones metálicas más efectivas para disminuir la densidad. El litio es el elemento metálico más ligero, y cada 1% de litio (arriba para el 4.2% de litio de solubilidad límite) reduce la solubilidad de la aleación en un 3% e incrementa el modulus alrededor de 5%. En suma, el litio en pequeñas cantidades permite el reforzamiento por precipitación del aluminio cuando una distribución homogénea del coherente esférico  $\delta'$ Al<sub>3</sub>Li el precipitado se forma durante el tratamiento térmico., por otra parte las adiciones de berilio no dan un aumento significativo al reforzamiento por precipitación en el aluminio. Con la combinación de reducción – densidad y reforzamiento- precipitación, las características del litio fueron la razón principal para su elección como el elemento de aleación para el desarrollo de la base de aleaciones de aluminio de baja densidad.

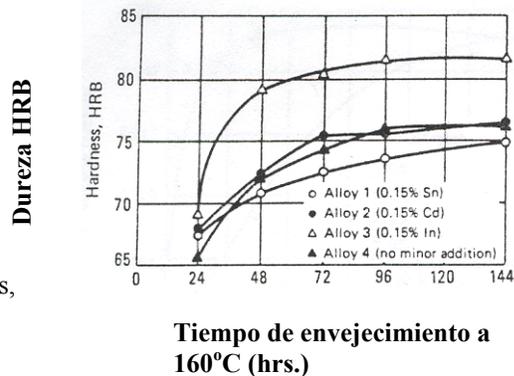
Como en otras aleaciones, endurecidas por envejecimiento, las aleaciones Al-Li alcanzan reforzamiento por precipitación de envejecimiento térmico, después de una solubilización tratada por calor.

La estructura del precipitado es sensible a un número de procesamientos de variables, incluyendo el rango de templado, siguiendo a la solubilización tratada por calor, el grado de deformación en frío previo al envejecimiento, la temperatura de envejecimiento y tiempo. Menor cantidad de adición de elementos de aleación puede tener un efecto significativo sobre el proceso de envejecimiento, en la figura 1.4 se ilustra el efecto de la adición menor de 0.15% en peso de cadmio, indio y estaño sobre la respuesta de endurecimiento por envejecimiento de la aleación Al-Li 2090 (2.3Cu, 2.3Li, 0.15Zr). Al cambiar la interfase de energía del precipitado, al incrementar la concentración de vacante y/o al incrementar la temperatura crítica para precipitación homogénea, precipitación heterogénea en interfaces y ligamiento de grano (el cual ocurre como consecuencia de la precipitación homogénea de reforzamiento de fase) puede tener un efecto adverso en el comportamiento de fractura.

Dependiendo de la composición y temperatura, el tamaño relativo y fracción de volumen de los diferentes precipitados puede ser variado sistemáticamente.

**Figura 1.4.- Efecto de las adiciones de cadmio, iridio y estaño (menores de 0.15 %peso) en la respuesta de la aleación 2090 Al-Li (2.3Cu, 2.3Li, 0.15Zr)**

Fuente.-Aluminium and Aluminium alloys, ASM Specialty Handbook 2004



### 1.5.2.1. Aleaciones aluminio-litio

El endurecimiento por envejecido de las aleaciones involucra la precipitación continua de  $\delta'$ ( $Al_3Li$ ) en una solución sólida sobresaturada. El aluminio y litio son localizados en lugares específicos de los precipitados  $\delta'$ . Los ocho sitios de esquinas compartidas están ocupadas por la composición Al-Li de precipitados  $\delta'$ . La dependencia observada de la semejanza geométrica entre la red del precipitado y la cara cúbica centrada de la red de la solución sólida, facilita la orientación cubo-cubo. Los parámetros de red del precipitado tienen dimensiones muy parecidas a los de la matriz. Por consecuencia, la microestructura de una aleación Al-Li que ha sido tratada térmicamente y envejecida por tiempos cortos, por debajo de solvus  $\delta'$  es caracterizado hacia una distribución homogénea de esférico coherente de precipitados  $\delta'$ .

Las aleaciones de base Al-Li son microestructuralmente únicas. Ellas difieren de la mayoría de las aleaciones de aluminio en que una vez el mayor reforzamiento por el precipitado ( $\delta'$ ) se precipita homogéneamente y permanece coherente, aún después del envejecimiento extensivo. En suma el envejecimiento extensivo a altas temperaturas (190°C) puede resultar en la precipitación de ligamiento de grano icosaedral que precipita con simetría de cinco-

pliegues. Aunque la estructura cuasi-cristalina y la composición de estos precipitados de ligamiento de grano no son aun exactamente entendidos, se ha sugerido que ambos, los precipitados y las zonas libres de precipitado (PFZ) cerca de los ligamientos de grano pueden jugar un rol mayor en el proceso de fractura.

La baja ductilidad y dureza de las aleaciones Al-Li pueden determinarse, al menos en parte, por la naturaleza no homogénea de su deslizamiento. Resultado de precipitados  $\delta'$  de endurecimiento de partícula-coherente. La fase en equilibrio  $\delta$ (Al-Li) precipitada en ligamiento límite de grano puede también causar PFZ, la cual puede inducir además localización de estrés y promover falla intergranular. Consecuentemente, para el desarrollo de aleaciones comerciales, el deslizamiento ha sido homogenizado al introducir dispersoides (magnesio, zirconio) y precipitados semicoherentes/incoherentes, tales como  $T_1$ (Al<sub>2</sub>CaLi),  $\theta'$  (Al<sub>2</sub>Cu), o  $\delta$ (Al<sub>2</sub>LiMg) a través de cobre o adiciones de magnesio. El desarrollo en el proceso termodinámico, ha optimizado microestructuras de Al-Li para las mejores combinaciones de resistencia y dureza. El material resultante tiende a ser altamente texturizado cuando se hacen adiciones de zirconio para inhibir la recristalización. La textura incrementa la variabilidad de las propiedades con orientación.

### **1.5.3. Aleaciones de Aluminio-Litio-X**

Como se mencionó anteriormente, varias modificaciones en la química de la aleación y técnica de fabricación se han usado en un intento para mejorar la ductilidad y dureza de las aleaciones de aluminio, manteniendo alta la resistencia. Al adicionar Cobre, magnesio y zirconio en solución se obtienen efectos benéficos. El magnesio y el cobre mejoran la resistencia de las aleaciones Al-Li, a través de una solución-sólida y producen reforzamiento por precipitación y esto puede minimizar la formación de PFZ's cercanas al límite de grano. El zirconio forma el dispersoide coherente cúbico Al<sub>3</sub>Zr, estabiliza la estructura de subgrano y suprime la recristalización.

Comparada con la alta-resistencia tradicional de las aleaciones de aluminio, las aleaciones Al-Li-X muestran de 7 a 12% la rigidez más alta, generalmente es una resistencia superior a la propagación de ruptura por fatiga, mejora la dureza a temperaturas criogénicas. En el lado negativo sus propiedades transversales-cortas bajan y desplazan significativamente

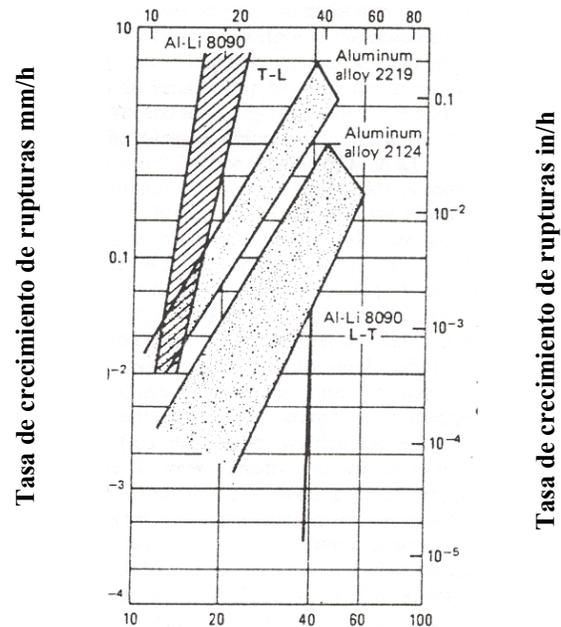
rangos acelerados de ruptura por fatiga cuando las rupturas son microestructuralmente pequeñas.

Los rangos de crecimiento de ruptura lenta en las aleaciones de Al-Li-X pueden ser más lentos o más grandes que aquellos de las aleaciones aeroespaciales de aluminio convencional, dependiendo de la orientación, la (Fig. 1.5.) compara rangos de crecimiento de rupturas en una aleación extruida Al-Li-Cu-Zr (Al-Li 8090) comparada con aquellas de otras aleaciones de aluminio.

**Figura 1.5.- comparación entre las tasas de crecimiento de rupturas para aleaciones Al-Li extruidas y para otras aleaciones de Al**

Fuente.-Aluminium and Aluminium alloys, ASM Specialty Handbook 2004

Factor de concentración de estrés ( $K$ ), ksi,  $\sqrt{in}$



Factor de concentración de estrés ( $K$ ), MPa,  $\sqrt{m}$

El rango de rupturas para Al-Li 8090 en la longitudinal-transversal (T-L) de orientación (plano de ruptura y dirección de crecimiento paralela a la dirección de extrusión) está sobre un promedio mucho más alto que aquellos para aleaciones de Al 2219 y 2114. En contraste, el rango de crecimiento por ruptura para Al-Li 8090 de orientación transversal-longitudinal

(L-T) (plano de ruptura y dirección de crecimiento perpendicular a la dirección de extrusión). Son mucho más bajas que aquellas para otras aleaciones de aluminio.

En términos de precipitación  $\delta$ , el único efecto del magnesio parece ser una reducción en la solubilidad del litio. La microestructura de una aleación Al-Mg-Li en los escenarios tempranos de envejecimiento es similar a aquél de una aleación de Al-Li. La precipitación en el sistema Al-Cu-Li es más complicada que en cualquier sistema Al-Li o Al-Mg-Li.

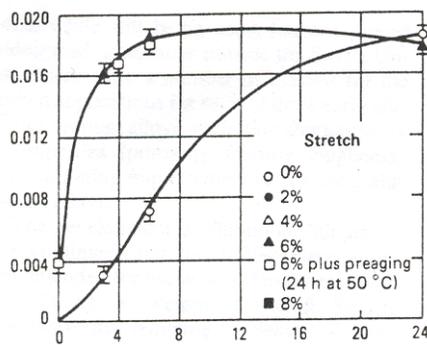
**Efectos termodinámicos.** En suma, el endurecimiento por precipitación de las aleaciones Al-Li, derivan parte de su resistencia a través de una deformación en caliente y frío, se genera una microestructura controlada de grano. La adición de aleaciones de elementos metálicos auxiliares tales como: manganeso, cromo y zirconio, se hace para el control de la microestructura de grano durante las operaciones termomecánicas. De estos elementos el zirconio ha mejorado la combinación de resistencia a pesar de la fractura en las aleaciones base Al-Li.

A diferencia de las aleaciones base Al-Zn-Mg, en las aleaciones base Al-Li se incrementa la resistencia y el esfuerzo de deformación previos al envejecimiento. Este fenómeno inusual ha dado aumento a un número de pasos para procesamiento termomecánico, de aleaciones Al-Li mejorando las propiedades mecánicas después del envejecimiento artificial.

La deformación previa al envejecimiento también afecta la extensión de reforzamiento por precipitación. Por ejemplo, en aleaciones Al-Li-Cu tal como la aleación 2090, el  $T_1(Al_2CuLi)$  precipitados reforzadores son nucleados en dislocaciones. De hecho, se cree que las dislocaciones son necesarias para la nucleación de la fase  $T_1$ . Efectos similares también aplicados para el  $\delta'(Al_2LiMg)$  reforzamiento por precipitado en aleaciones Al-Li-Cu-Mg tal como 8090. A causa del efecto de las dislocaciones sobre el reforzamiento por precipitado de estas aleaciones, se usa frecuentemente la deformación previa al envejecimiento, para incrementar la densidad de las dislocaciones y así los sitios de nucleación para reforzamiento por precipitación. Esta deformación es aplicada normalmente por un esfuerzo de tensión (para lámina, placa y material extruido) o por compresión (para forjados). La deformación tensil (capaz de estirarse) es comúnmente muy

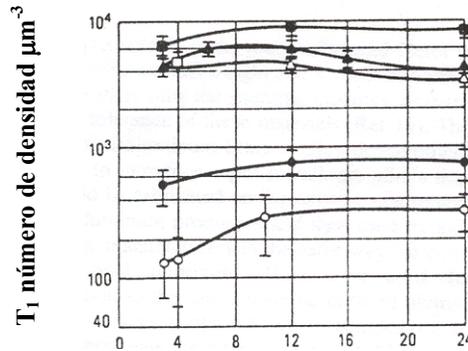
uniforme; sin embargo, la compresión de tensión puede variar considerablemente de la superficie a la línea central del producto. Por lo tanto, es importante comprender la relación entre la magnitud de tensión y la respuesta de envejecimiento de la aleación.

El efecto de deformación en el número, densidad, y volumen de fracción de  $T_1$  Al-Li-Cu-Zr se muestra en la figuras 1.6 y 1.7, en las cuales se muestra el efecto de deformación (dilatación) sobre la resistencia de cedencia de muestras envejecidas por varios tiempos en  $190^\circ\text{C}$  correlaciona con la figura 1.6 sobre el efecto de dilatación en la fracción de volumen de reforzamiento por precipitados. Está bien establecido que la resistencia de las aleaciones de aluminio depende del tamaño y del volumen de fracción del reforzamiento por precipitados. Este ejemplo muestra que la respuesta de envejecimiento es muy sensible al grado de deformación previo al envejecimiento artificial. Un importante punto para notar es que una distribución no homogénea de deformación puede tener un pronunciado efecto sobre la respuesta de envejecimiento y así sobre la resistencia local en las aleaciones de Al-Li-X.



Tiempo de envejecimiento a  $180^\circ\text{C}$

a)



Tiempo de envejecimiento a  $180^\circ\text{C}$

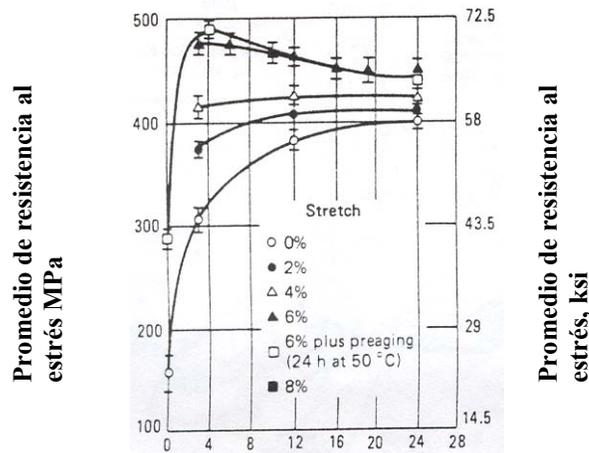
b)

**Figura 1.6.- efecto previo a la deformación y tiempo de envejecimiento en la cantidad de precipitados  $T_1$  en aleaciones Al-Li 2090 (2.4%Li, 2.4%Cu, 0.18%Zr balance de Al) a) fracción de volumen de  $T_1$  b) número de densidad de  $T_1$**

Fuente.-Aluminium and Aluminium alloys, ASM Specialty Handbook 2004

Este comportamiento del efecto de deformación en la respuesta de envejecimiento disminuye la cantidad de trabajo más allá de 4%. Consecuentemente cuando las secciones son alargadas o comprimidas, suceden grandes variaciones en las propiedades, esto puede

resultar si la deformación no es homogénea o al menos en exceso de algún mínimo alrededor de 4%.



**Figura 7.- promedio de resistencia al estrés contra el tiempo de envejecimiento para aleación Al-Li de aleación 2090 (2.4%Li, 2.4%Cu, 0.18%Zr balance de Al)**

Fuente.-Aluminium and Aluminium alloys, ASM Specialty Handbook 2004

## 1.6 Molde permanente

Se vierte el metal fundido en un molde metálico permanente bajo gravedad y bajo presión centrífuga solamente. Las piezas fundidas así tienen una estructura de grano más fino, y son más resistentes que las piezas fundidas con moldes de arena, debido a que la velocidad de enfriamiento es más rápida. Además, las piezas fundidas en molde permanente poseen generalmente menores contracciones y porosidad que las piezas fundidas en arena. Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño, y para piezas complejas puede resultar difícil o imposible.

### **1.6.1. Fundición por gravedad en molde metálico**

En la fundición en molde permanente, el molde se hace de metal o grafito, quizá revestido con un metal refractario. La colada es por gravedad, lo cual significa que el proceso es similar a la fundición en arena, pero el molde de arena está reemplazado por un molde metálico, a menudo hecho de hierro colado. El proceso proporciona un buen acabado superficial, buena reproducción de detalles y tolerancias cercanas a:

0.02 (cm/cm), se usa principalmente para aluminio, aleaciones de aluminio, zinc/aleaciones, zinc y a veces para latón y bronce de aluminio.

### **1.6.2. Fundición en molde metálico o baja presión**

En este proceso se monta un molde -hecho de grafito o metal- sobre un horno de inducción y el metal es empujado al interior de la cavidad por un gas inerte. La presión del gas varía entre 0.12 y 0.20 MPa. Las piezas de fundición hechas por este método son densas, están libres de inclusiones y tienen alta precisión dimensional.

Los moldes permanentes producen piezas libres de arena, con buen acabado y buenos detalles en la superficie. Se adaptan especialmente a la producción de piezas pequeñas y de tamaño medio y son capaces de mantener tolerancias que van desde 0.064 a 0.25 mm

## **CAPÍTULO II**

## **2.-Proceso experimental**

### **2.1.-Equipo y materiales empleados**

- Horno de crisol de resistencia eléctrica, de temperatura máxima de 1200 °C .
- Sistema de medición y registro continuo de temperatura.
- Crisol de SiC (carburo de silicio).
- Molde de Cobre, de medidas 5x 1x10cm en forma de cuña, Temperatura de colada 850°C.  
Flujo de agua de enfriamiento 17.0 l/ min. = 283.33 cm<sup>3</sup>/s.  
Temperatura del agua 18°C.  
Termopares tipo K 3(uno x c/2.5cm).
- Contenedor del molde y agua, de acero inoxidable.
- Graficador. Multicanal, rango de lectura 100%, intervalo de lectura en la carta –200°C a 1300°C, velocidad del papel 16.66 mm/ s.
- Tanque de Argón.
- Mangueras de cobre para inyección de argón en el horno.
- Termopar tipo K para medir temperaturas.
- Tenazas de acero para crisol.
- Agitador de acero recubierto con arcilla cerámica, para homogenizar el baño.
- Desescoriador de acero recubierto con arcilla cerámica.
- Aluminio, Litio y Hafnio de alta pureza.
- Horno de tratamientos térmicos, Marca Carbolite tipo CTF 12/65/550.
- Difractómetro marca Siemens D5000, 35kV, 25mA, Velocidad 2.0<sup>o</sup>/min. 2θ: 30.0 a 130.0<sup>o</sup>.
- Durómetro marca Future Tech, Modelo FM 7249, Carga 100gf, Velocidad del cabezal 12s.
- Microscopio electrónico de barrido, Marca JEOL JSM-6300.
- Microscopio óptico, marca Olympus Modelo Mg.

### **2.2.-Secuencia experimental**

- 1.-Selección y preparación de los materiales.

- 2.-Fusión de la aleación.
- 3.-Vaciado y obtención de gráficas de enfriamiento.
- 4.-Preparación de probetas para su estudio.
- 5.-Caracterización de la aleación.
  - a) Análisis químico.
  - b) Determinación de la prueba de la dureza Vickers.
  - c) Estudio de la microestructura (microscopía óptica)
  - d) Difracción de rayos X
  - e) Microscopía electrónica de barrido
- 6.-Tratamiento térmico de envejecido
  - a) 1min. (60 s.)
  - b) 10min. (600 s.)
  - c) 1hr. (3600 s.)
- 7.-Caracterización de la aleación
  - a) Determinación de la prueba de la dureza Vickers
  - b) Estudio de la microestructura por microscopía electrónica de barrido
  - c) Difracción de rayos X

### **2.2.1.-Preparación y fusión de la aleación**

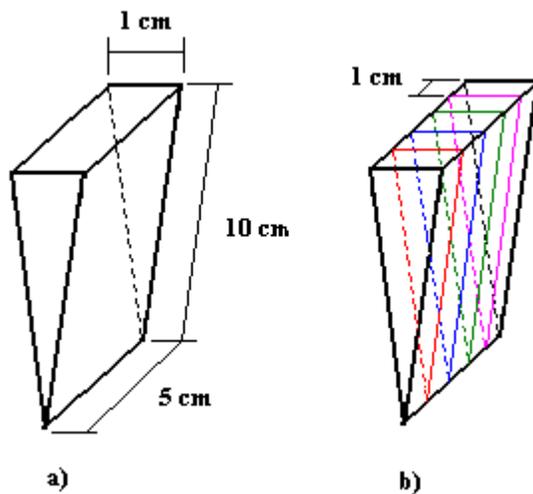
En un molde metálico de cobre que fue enfriado por agua se vació metal con una atmósfera controlada de Argón para evitar la oxidación.

- 1.- Se fundió aluminio a  $950^{\circ}\text{C}$  en atmósfera de Argón
- 2.- Se agregó el Hf (envuelto en aluminio) con una campana de inmersión hasta el fondo del Al líquido y se agita periódicamente cada 10 min. para inducir la difusión del Hf en el Al líquido, manteniendo por una hora el metal líquido a  $950^{\circ}\text{C}$  (se agita con una varilla metálica recubierta con arcilla cerámica, para evitar contaminación)
- 3.-Se deja enfriar a temperatura ambiente hasta  $700^{\circ}\text{C}$  y se agrega el Litio (envuelto en aluminio) con la campana de inmersión, se mantiene sumergido hasta su total disolución.

4.-Cuando la aleación en estado líquido está homogénea se vacía en el molde con forma de cuña. Previamente se distribuyen tres termopares tipo K en la disposición de  $T_1$  en la punta del lingote,  $T_2$  en el centro del lingote,  $T_3$  en la parte superior del mismo; y estos se conectaron a un graficador de funciones, para obtener las curvas de enfriamiento

5.-Se cortaron las muestras del lingote con un cm de espesor para su estudio como se puede ver en la figura 2.1, las probetas que se trataron fueron las obtenidas del centro del lingote ya que en esa zona es más representativa la forma, dimensiones de grano, hay menor contacto con las paredes del molde y menos factores externos que puedan afectar a la fundición ; se realizaron las siguientes pruebas:

- a) Análisis químico
- b) Determinación del número de dureza Vickers.
- c) Estudio de la microestructura en estado de fundición y tratada térmicamente con microscopia electrónica de barrido
- d) Se realizó difracción de rayos X para determinar la presencia del Hf.



**Figura 2.1.- a) El lingote obtenido b) Diferentes cortes que se hicieron para la caracterización**

### 2.2.2.-Determinación de las curvas de enfriamiento

En el molde se distribuyeron tres termopares tipo K como se muestra en la figura 2.2

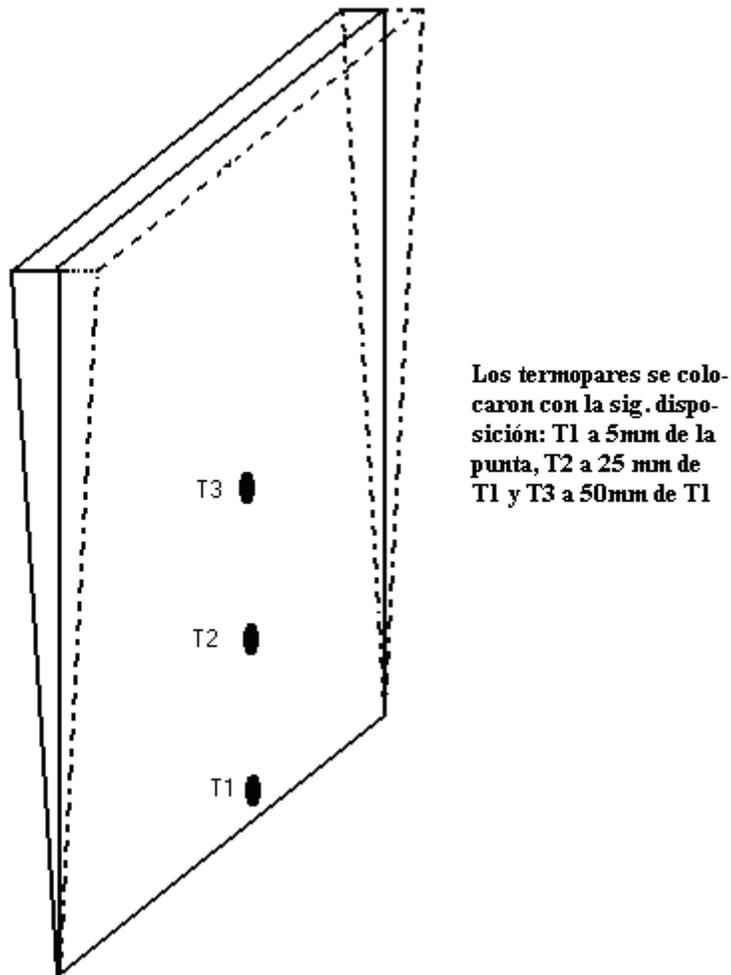
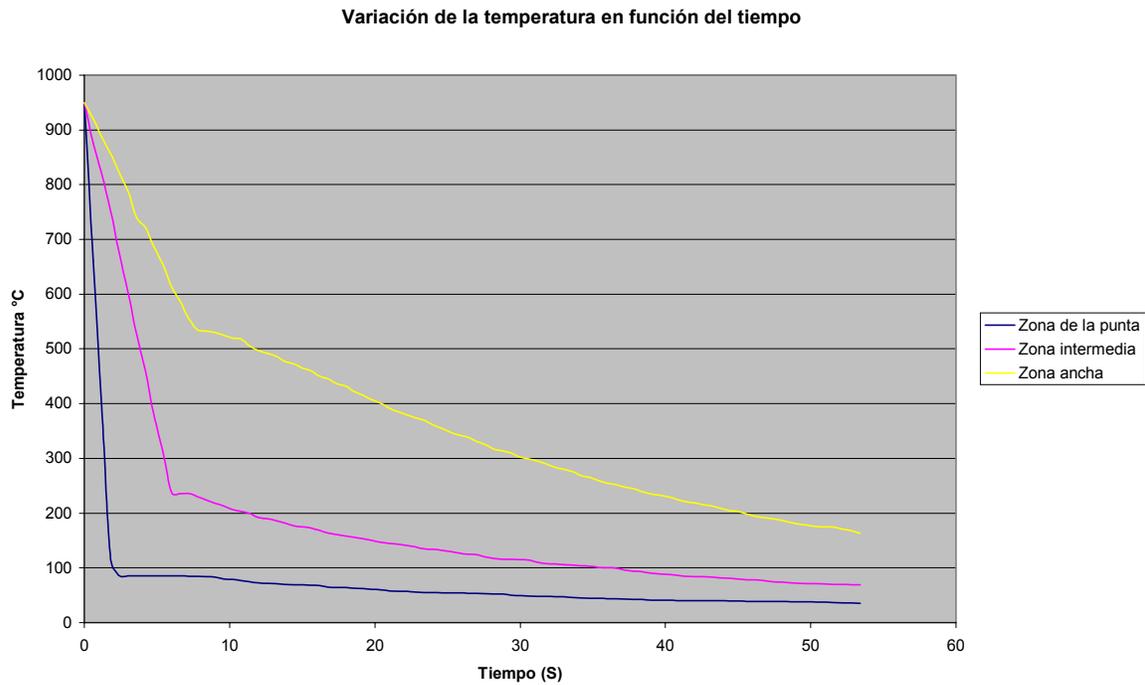


Figura 2.2.- Localización de los termopares T en el lingote obtenido

En este caso se determinó la diferencia de potencial en milivolts de los termopares dando lecturas directas en °C, en una carta graduada cuya velocidad de avance fue de 16.666mm/s que se editó graficándose en excel y obteniendo las curvas de enfriamiento a través del proceso, desde el estado líquido hasta el estado totalmente sólido, pasando por la transformación de fases sólidos-liquidus.

En la figura 2.3 se puede apreciar el enfriamiento de las distintas partes de la probeta, desde el vértice , hasta la parte mas ancha



**Figura 2.3.-** En esta gráfica se muestran los valores obtenidos de la carta de enfriamiento

### **2.2.3.-Análisis químico**

El análisis químico se realizo con el método de absorción atómica y por espectrometría de fluorescencia por rayos X, en estas pruebas sólo se detectó la presencia del Al.

#### 2.2.4.-Tratamiento térmico

Las probetas se cortaron del lingote con la forma que se muestra en la figura 2.4 y se sometieron a un tratamiento térmico sumergidas en un baño de aceite industrial para altas temperaturas en un recipiente a  $190^{\circ}\text{C}$  durante un minuto, la probeta 2 se metió durante 10 minutos, y la probeta 3 se trató por una hora. Posteriormente se sacaron y se sometieron a un enfriamiento en un recipiente con hielo fundente aproximadamente a  $0^{\circ}\text{C}$

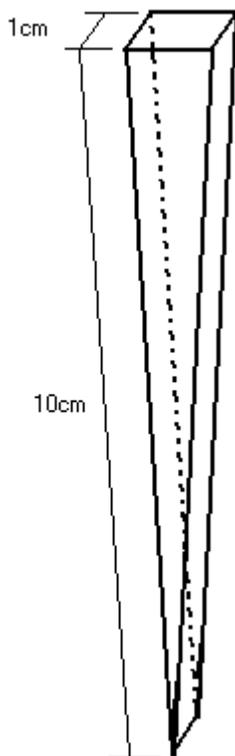
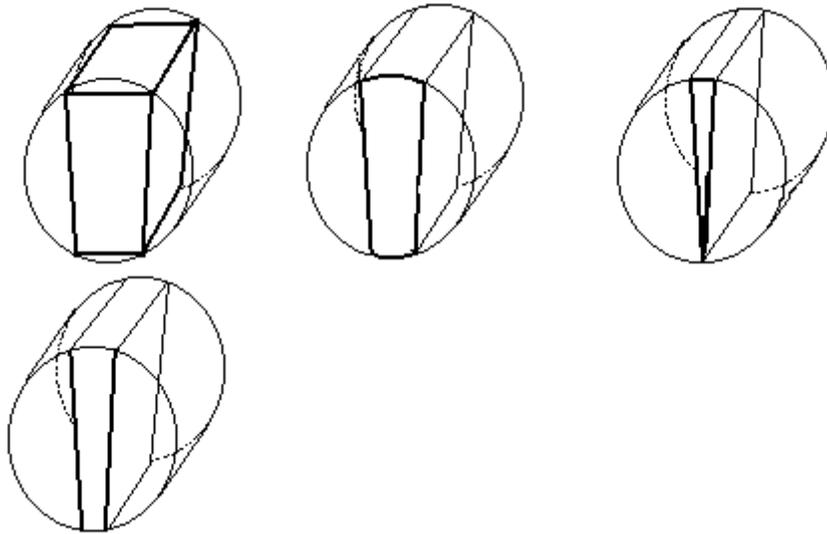


Fig. 2.4.- Probeta que se metió al tratamiento térmico

### 2.2.5.-Preparación de las probetas

Las probetas se cortaron en cuatro partes y se encapsularon en resina cristal para facilitar su manejo y pulido, como se ilustra en la figura 2.5.



**Fig. 2.5.- Así es como se cortaron las probetas para facilitar su manejo**

Las probetas se lijaron con papel de lija para metal de los siguientes tamaños de grano, de 600, 1200, 2000, y se enjuagaron con un chorro de agua a presión, después se lavaron con alcohol y se secaron con aire caliente a presión; se pulió con alúmina de 0.03 y 0.005 $\mu$ m para dejarse a espejo, posteriormente se enjuagaron con un chorro de agua a presión y con alcohol, y se secaron con aire caliente a presión para evitar la oxidación, se limpiaron con ultrasonido en un baño de alcohol a intervalos de dos minutos así hasta completar dos horas; de esta manera se trató de evitar que las probetas tuvieran algún residuo de el papel de lija o de alúmina.

Posteriormente se procedió a atacar las piezas con el reactivo Keller para revelar la micro estructura y hacer la microscopia electrónica de barrido, apoyado con microscopia óptica.

El reactivo Keller tiene la siguiente composición:

- 95 ml de H<sub>2</sub>O destilada

- 2.0ml de HNO<sub>3</sub> 65% (ácido nítrico)
- 1.5ml de HCl 32% (ácido clorhídrico)
- 1.0ml de HF 40% (ácido fluorhídrico)

Primero se preparan las soluciones por separado:

- 65 ml HNO<sub>3</sub> + 35 ml de H<sub>2</sub>O
- 32 ml HCl + 68 ml de H<sub>2</sub>O
- 40ml HF + 60 ml de H<sub>2</sub>O

Se debe atacar la pieza en intervalos de 10 segundos

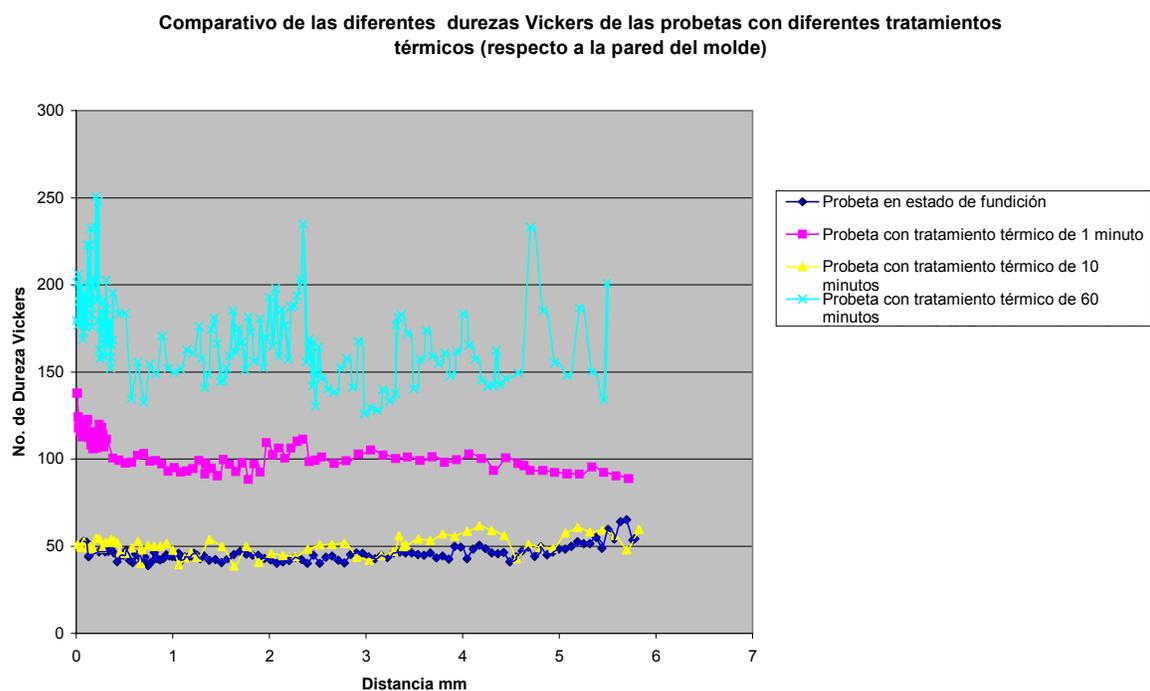
Reactivo Keller modificado:

- 2 ml de HF (ácido fluorhídrico)
- 3 ml de HCl (ácido clorhídrico)
- 20 ml de HNO<sub>3</sub> (ácido nítrico)
- completar a 200 ml de agua destilada

Este proceso se repitió para los distintos tratamientos térmicos (1min, 10min y 60 min.).

### 2.2.6.-Número de Dureza Vickers.

La dureza Vickers se determinó con una carga de 100g y la velocidad del cabezal de 12 s con el durómetro Future Tech modelo FM 7249. Los resultados obtenidos se graficaron con ayuda de excel. La figura 2.6 nos muestra los distintos números de Dureza Vickers que hay a lo largo de las probetas tratadas con diferentes tratamientos térmicos



**Figura 2.6.- Ésta gráfica muestra el comportamiento de la dureza Vickers de las probetas con distintos tratamientos térmicos**

En la figura 2.7 se pueden observar las líneas de tendencia del número de Dureza Vickers en cada una de las probetas tratadas con diferentes tratamientos térmicos.

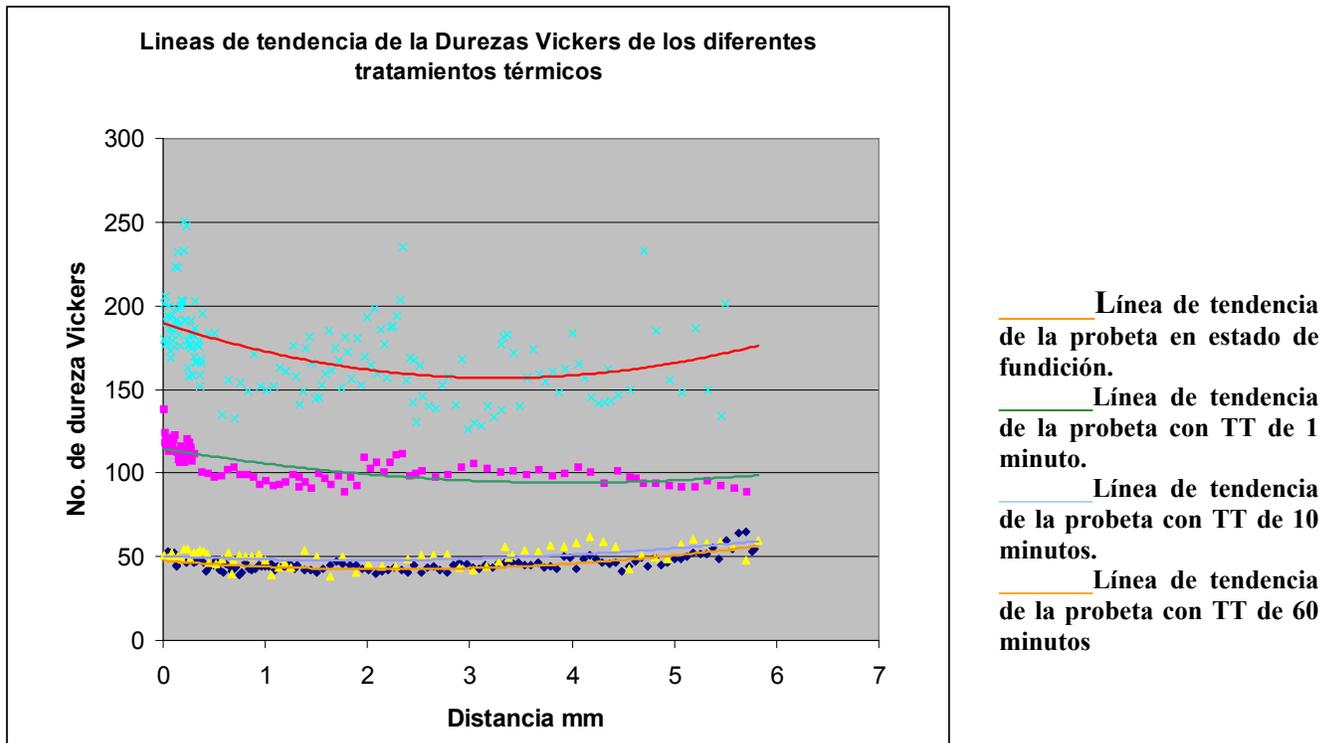
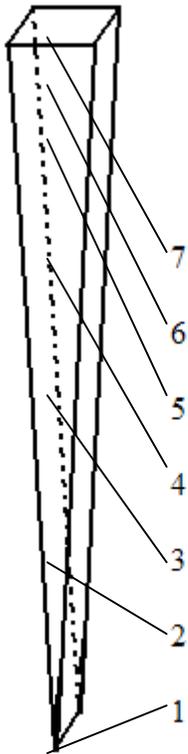


Figura 2.7.- Esta gráfica muestra las líneas de tendencia de las gráficas de la dureza Vickers

### 2.2.7.-Micro estructura

Se tomaron distintas fotografías con el microscopio de barrido electrónico a (20KV y en modo SEM) de cada una de las probetas, en estado de fundición y de cada una de las envejecidas, a 1min., 10 min., y una hora. El microscopio de barrido electrónico fue un JEOL JSM 6300 equipado con un sistema de microanálisis para determinar el tipo de la microestructura y la posible formación de precipitados con alto contenido de Hf, su forma y su influencia en las propiedades mecánicas de la aleación.

### 2.2.7.1.-Probeta en estado de fundición



Esta es la localización de las fotos en la probeta

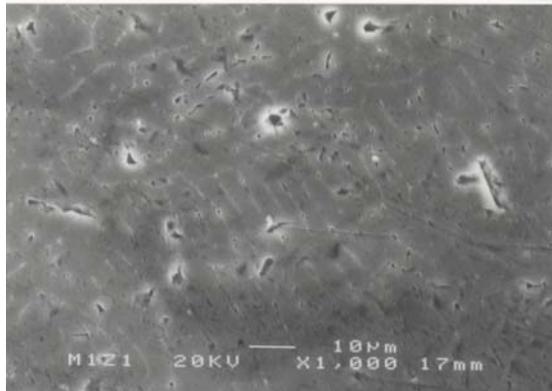


Foto 1 tomada a 450 μm de la punta el tamaño de la celda es de 7.58 μm el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Se observa una estructura dendrítica con algunas cavidades o poros en los límites de grano.

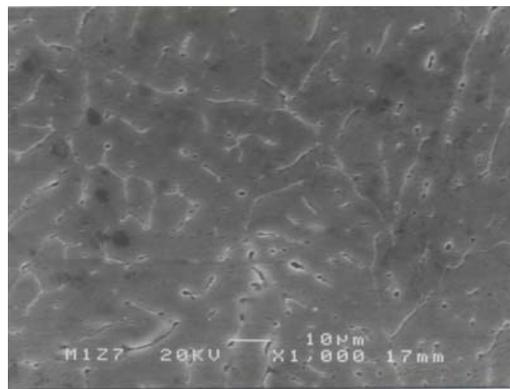
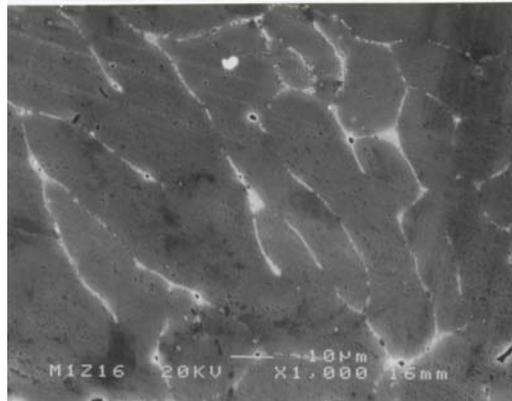
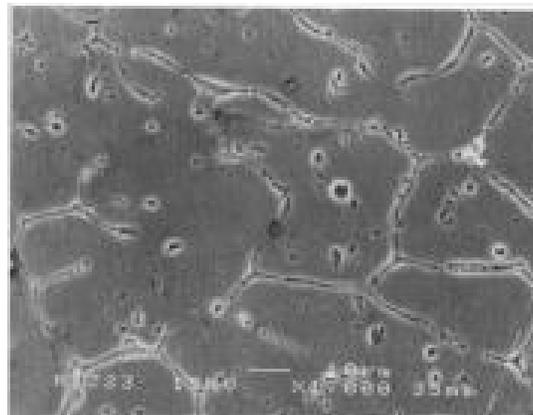


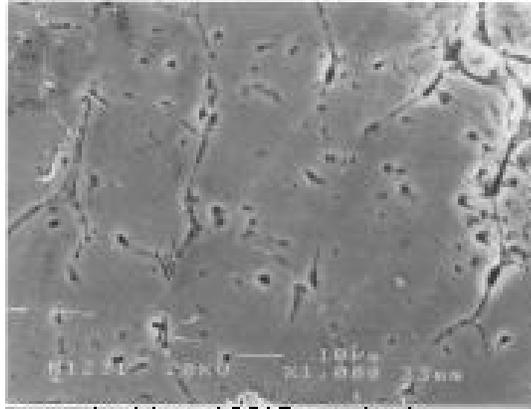
Foto 2 tomada a 26.00 mm de la punta el tamaño de celda es de 10.22 μm, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Se observa una estructura dendrítica con algunas cavidades o poros en los límites de grano



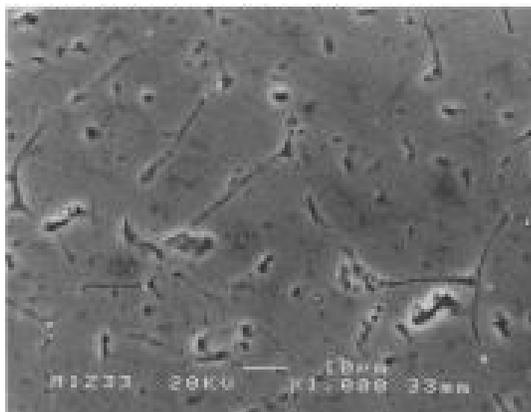
**Foto 3 tomada a 48.666 mm de la punta, el tamaño de la celda es de  $14.84\mu\text{m}$ , el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Estructura dendrítica, con poros en la zona interdendrítica, con crecimiento en una dirección determinada.**



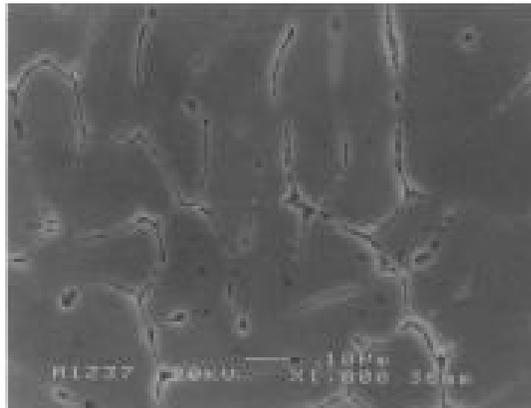
**Foto 4 tomada a 66.666mm de la punta, el tamaño de la celda es de  $20.48\mu\text{m}$ , el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Estructura dendrítica.**



**Foto 5 tomada a 85.334 mm de la punta, el tamaño de celda es 25.33 $\mu$ m, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Estructura dendrítica**



**Foto 6 tomada a 90.668 mm de la punta, el tamaño de celda es de 23.33 $\mu$ m, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Estructura dendrítica**



**Foto 7** tomada a 101.336 mm de la punta, el tamaño de celda es de 20.00 $\mu\text{m}$ , el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Estructura dendrítica

### 2.2.7.2.-Probeta con tratamiento de envejecido de 1 minuto

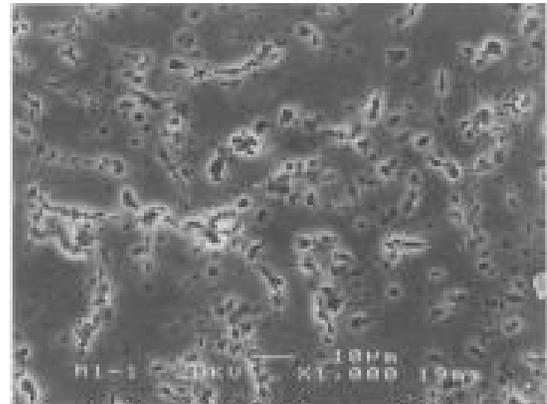


Foto 1 Tomada a 5µm de la punta, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. El tamaño de la celda es 14.066µm, se observa estructura dendrítica.

Esta es la localización de las fotos en la probeta

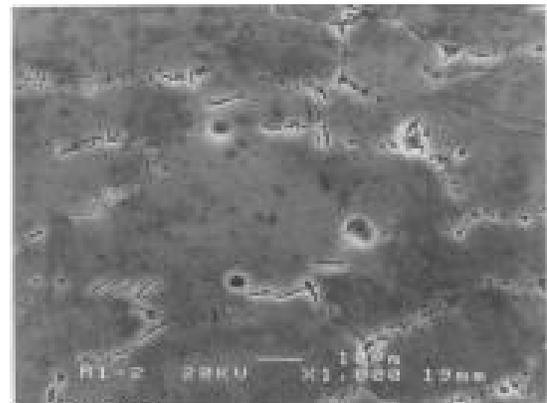
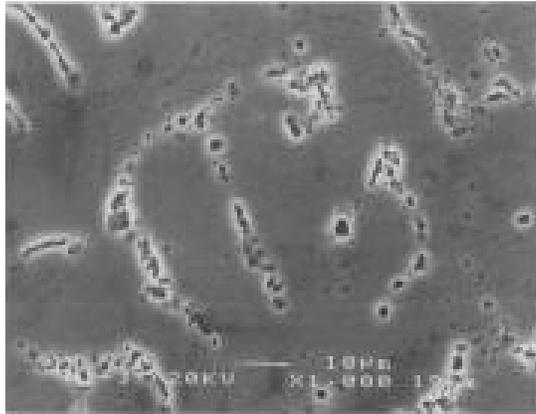
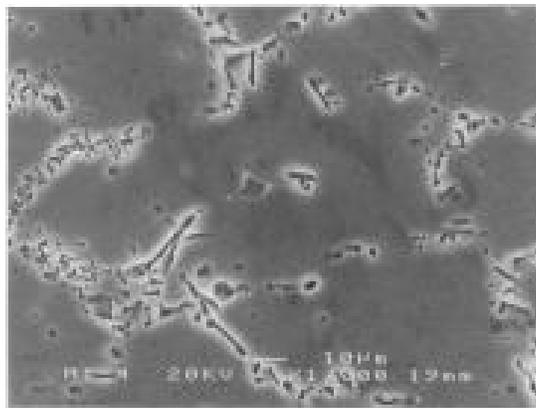


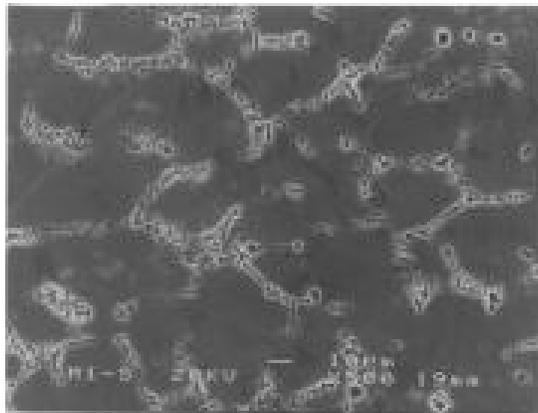
Foto 2 tomada a 25µm de la punta, la celda tiene 23.411µ de largo, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Sólo se observa estructura dendrítica.



**Foto 3 tomada a 50.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 23.411µm, a X1000 aumentos. El análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), sólo se observa estructura dendrítica.**

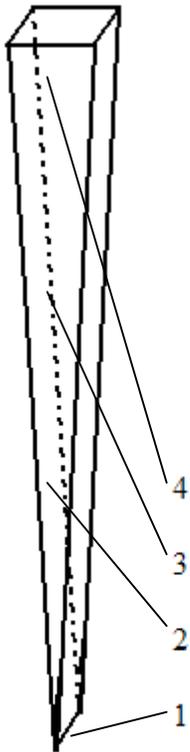


**Foto 4 tomada a 75.00mm de la punta a X1000 aumentos. El tamaño de la celda es de 31.215µm, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), Sólo se observa estructura dendrítica.**



**Foto 5 tomada a 75.00mm de la punta a X500 aumentos. El tamaño de la celda es 32.812 $\mu$ m, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), sólo se observa estructura dendrítica.**

### 2.2.7.3.-Probeta con envejecido de 10 minutos



Esta es la localización de las fotos en la probeta

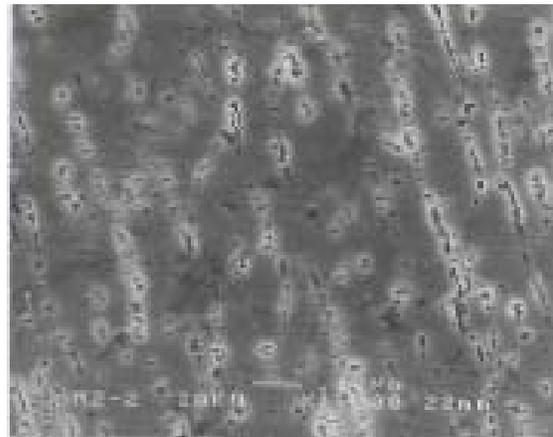


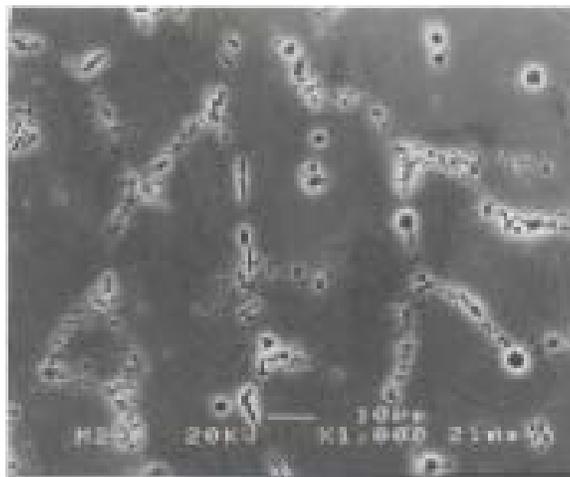
Foto 1 tomada a 10µm de la punta, el tamaño de la celda es de 8.75µm, el análisis químico muestra α Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Se observa estructura dendrítica.



Foto 2 tomada a 30.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 23.33 µm, el análisis químico muestra α Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Se observa estructura dendrítica



**Foto 3 tomada a 60.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 35.0  $\mu\text{m}$ , el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Se observa estructura dendrítica**



**Foto 4 tomada a 90.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 28.0 $\mu\text{m}$ , el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. Se observa estructura dendrítica**

#### 2.2.7.4.-Probeta con envejecido de 1 hora

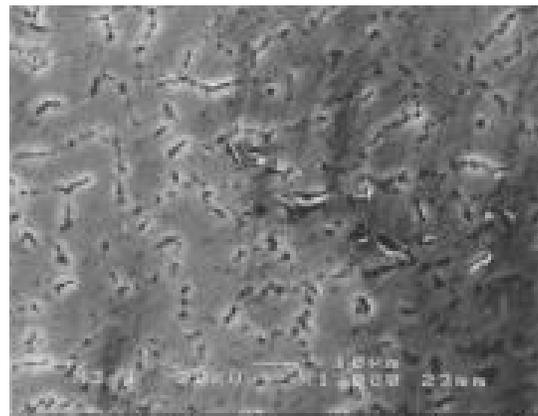
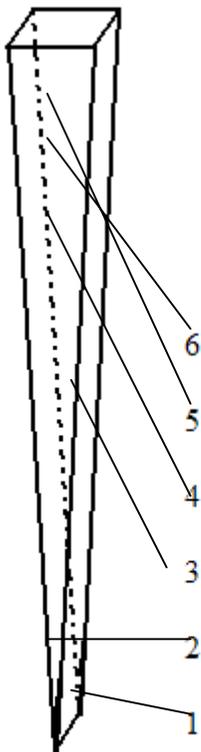


Foto 1 tomada a 11.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 11.66µm, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al ( Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. No se observaron precipitados solo se determinó una matriz de Al, la foto se tomó en modo SEI

Ésta es la localización de las fotos en la probeta

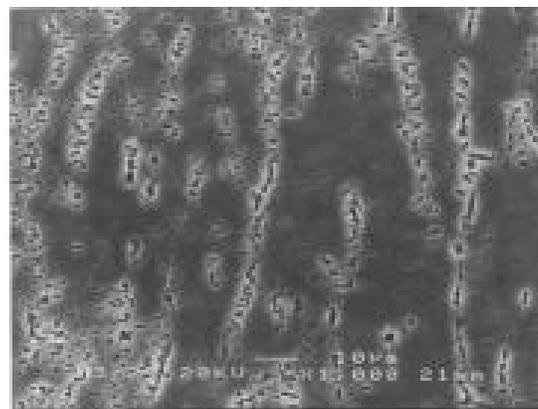
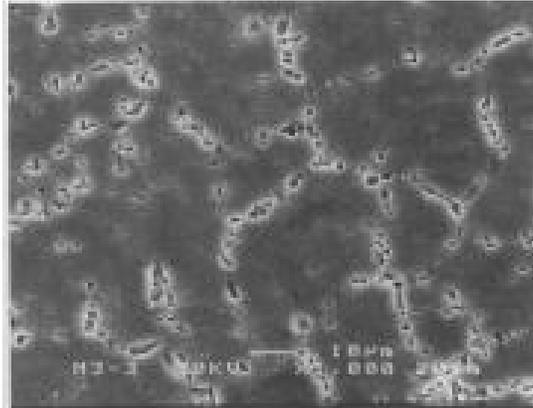
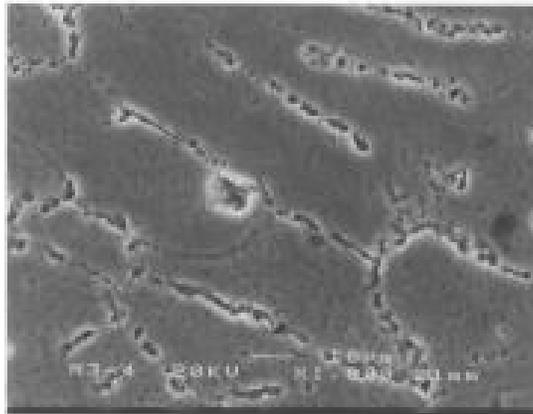


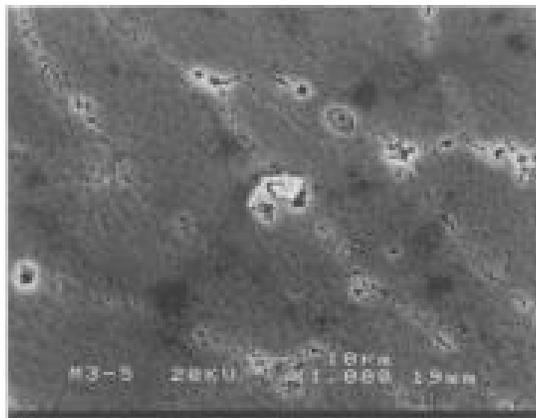
Foto 2 tomada a 23.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 13.99µm, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. No se observaron precipitados solo se determinó una matriz de Al, la foto se tomó en modo SEI.



**Foto 3 tomada a 55mm de la punta, el tamaño de la celda es de 15.55 $\mu$ m, el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. No se observaron precipitados solo se determinó una matriz de Al, la foto se tomó en modo SEI**



**Foto 4 tomada a 76.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 20.00 $\mu$ m el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), a X1000 aumentos. No se observaron precipitados solo se determinó una matriz de Al, la foto se tomó en modo SEI.**



**Foto 5 tomada a 85.00mm de la punta, el tamaño de la celda es de 28.09 $\mu$ , el análisis químico muestra  $\alpha$  Al (Al en forma de solución sólida), y agujas de Silicio, a X1000 aumentos. Estructura dendrítica, aparece un precipitado formado por un conjunto de agujas**

## **CAPÍTULO III**

### 3. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente trabajo la aleación de Al-Li-Hf que se caracterizó mostró en la zona de mayor enfriamiento una estructura muy fina, una Dureza relativamente uniforme durante la aplicación de cada tratamiento térmico y el tamaño de celda se mantuvo casi constante en cada tratamiento que se aplicó a las probetas.

Con respecto al enfriamiento en el molde de fundición, como se puede ver en la figura 2.3, en la parte más cercana al vértice de la probeta el enfriamiento es más rápido que en las partes más anchas; la probeta en estado de fundición tiene un promedio de tamaño de celda de  $18.54\mu\text{m}$  y el promedio de Dureza Vickers es de 45.8654545.

En la probeta con tratamiento térmico de un minuto, la estructura dendrítica no cambió, como se puede ver en las fotos que se tomaron, el promedio de tamaño de celda es de  $24.983\mu\text{m}$  y el promedio de Dureza Vickers es de 105.477778.

En la probeta con tratamiento térmico de diez minutos, la estructura dendrítica sigue sin cambiar, el promedio de tamaño de celda es de 23.77 y el promedio de Dureza Vickers es de 50.3507463.

En la probeta con tratamiento térmico de sesenta minutos, la estructura dendrítica tampoco cambió, el promedio de tamaño de celda es de  $17.858\mu\text{m}$  y el promedio de Dureza Vickers es de 171.94.

Los distintos tratamientos térmicos a los que fueron sometidas las probetas no fueron suficientes para romper la estructura dendrítica; en las fotos que se tomaron a estos procesos no se puede apreciar visiblemente la presencia del Li y del Hf ya que se encuentran en la fase  $\alpha$  de Al, están perfectamente homogenizados; en el análisis químico sólo se encontró la presencia del Al.

## **BIBLIOGRAFÍA**

## Bibliografía.-

- 1.- Ciencia de materiales selección y diseño  
Pat L. Mangonon  
Ed. Prentice Hall
- 2.-Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones 3<sup>ra</sup> edición  
Richard A. Flinn  
Ed. McGraw-Hill
- 3.-‘Atomic defects and diffusion in intermetallic compounds with DO<sub>3</sub> structure: an ab-intio study’  
M. Fahnle, L. Schimmele  
Z. Metallkd. 95 (2004) 10 pp 864-869
- 4.-‘The effect of slip distribution on the monotonic and cyclic ductility of Al-Li binary alloys’  
T. H. Sanders jr. and E. A. Starke jr.  
Acta metallurgica Vol.30 pp 927 - 939 (1982)
- 5.-‘Strengthening mechanisms in powder metallurgy Al-Li-Hf alloys’  
A. F. Norman and P. Tsakiropoulos  
Materials Science and technology Vol. 9 No.3 Marzo 1993 pp. 228-234
- 6.-‘The microstructure an properties of high pressure gas-atomized Al-Li-Hf alloys’  
A. F. Norman and P. Tsakiropoulos  
Materials Science and Engineering, A134 (1991) pp 1144-1147
- 7.-‘The influence of Zirconium on the Coarsening of  $\delta'$  (Al<sub>3</sub>Li) in an Al-2.8 wt.% Li-0.14wt.% Zr alloy’  
A.P. Gu, G. L. Liedl, T. H. Sanders jr. and K. Welpmann  
Materials Science and Engineering, 76 (1985) pp. 147-157

8.-‘Gravity chill casting of eutectoid Zn-Al alloy into a wedge-shaped copper mould’

Y.H. Zhu, J. Torres, J.L. Reyes, L. Baños and J.A. Juarez-Islas  
Material Science and Engineering, Rapidly Quenched & Metaestable  
Materials, supplement (1998) pp 33-36

9.-‘Phase Transformations, in the Al-Li-Hf and Al-Li-Ti systems’

Nancy F. Levoy and John B. Vandersande  
Metallurgical Transactions A, Vol. 20A June (1989) pp. 999-1029

10.-Ensaye e Inspección de los Materiales de Ingeniería

Harmer E. Davis, George Earl Troxell y Clement W. Wiskocil  
Ed. Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V., México

11.-Estructura

William G. Moffat, George W. Pearsall y John Wulff  
Ed. Limusa-Willey México

12.-Procesos para Ingeniería de Manufactura

Leo Alting  
Ed. Alfaomega

13.- Aluminium and Aluminium alloys

ASM Specialty Handbook 2004  
Pp 121-142, 292-326, 487-531

14.-Materiales y Procesos de Fabricación

Harry D. Moore, Donald R. Kibbey  
Ed. Limusa

15.-es.wikipedia.org/wiki/Aluminio

16.-environmentalchemistry.com/yoghi

17.-[www.webelements.com/webelements/elements/text/Al/xtal.html](http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Al/xtal.html)

## **APÉNDICE**

## Propiedades generales del Aluminio, Litio y Hafnio

### Aluminio

Nombre	Símbolo	Número atómico	Grupo	Periodo	Bloque
Aluminio	Al	13	13	3	p
Serie química	Metales del bloque p				
Densidad, dureza Mohs	2702 kg/m <sup>3</sup> , 2,75				

### Propiedades atómicas del Aluminio

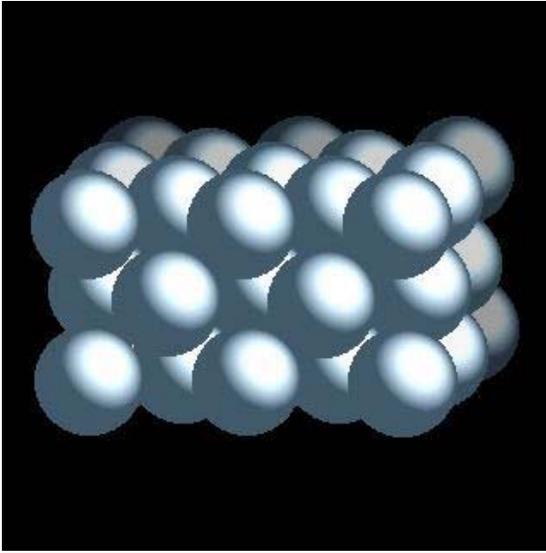
Peso atómico	26,981538 uma
Radio medio	125 pm
Radio atómico calculado	118 pm
Radio covalente	118 pm
Configuración electrónica	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>
Estados de oxidación (óxido)	3 (anfótero)
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras

## Propiedades físicas del Aluminio

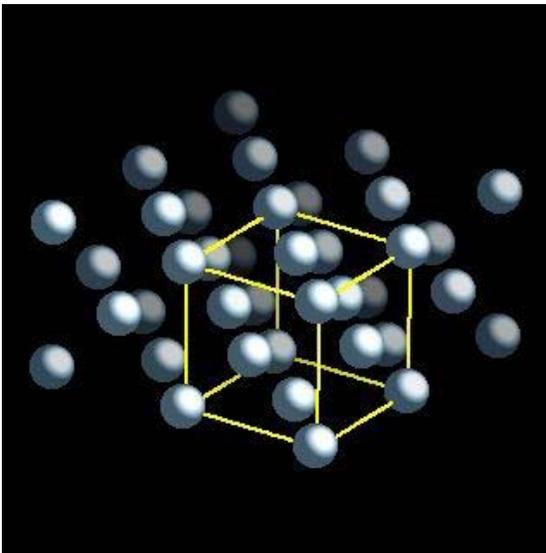
<b>Estado de la materia</b>	<b>sólido</b>
Punto de fusión	933,47 K
Punto de ebullición	2792 K
Entalpía de vaporización	293,4 kJ/mol
Entalpía de fusión	10,79 kJ/mol
Presión de vapor	$2,42 \times 10^{-6}$ Pa a 577 K

## Información diversa del Aluminio

<b>Electronegatividad</b>	<b>1.61 (Pauling)</b>
Calor específico	900 J/(kg.K)
Resistividad eléctrica a 20 °C	2,850/cm <sup>2</sup> /cm.
Conductividad eléctrica	37,7x10 <sup>6</sup> /m Ω
Módulo de elasticidad	6.700 kg/mm <sup>2</sup>
Carga de ruptura	de 16 a 20 kg/mm <sup>2</sup>
Conductividad térmica	237 W/(m.K)
<u>Potenciales de ionización:</u>	
1° = 577,5 kJ/mol	
2° = 1816,7 kJ/mol	
3° = 2744,8 kJ/mol	
4° = 11577 kJ/mol	
5° = 14842 kJ/mol	
6° = 18379 kJ/mol	
7° = 23326 kJ/mol	
8° = 27465 kJ/mol	
9° = 31853 kJ/mol	
10° = 38473 kJ/mol	



**Celdas del Aluminio**



## Litio

Nombre	Símbolo	Número atómico	Grupo	Periodo	Bloque
Litio	Li	3	1	2	S
Serie química				Metales alcalinos	
Densidad, dureza Mohs				535 kg/m <sup>3</sup> , 0,6}	

### Propiedades atómicas del Litio

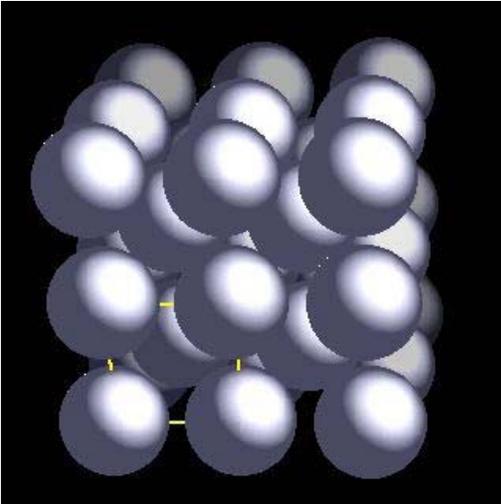
Peso atómico	6,941 uma
Radio medio	145 pm
Radio atómico calculado	167 pm
Radio covalente	134 pm
Configuración electrónica	[He]2s <sup>1</sup>
Estados de oxidación (óxido)	1 (base fuerte)
Estructura cristalina	Cúbica centrada en el cuerpo

### Propiedades físicas del Litio

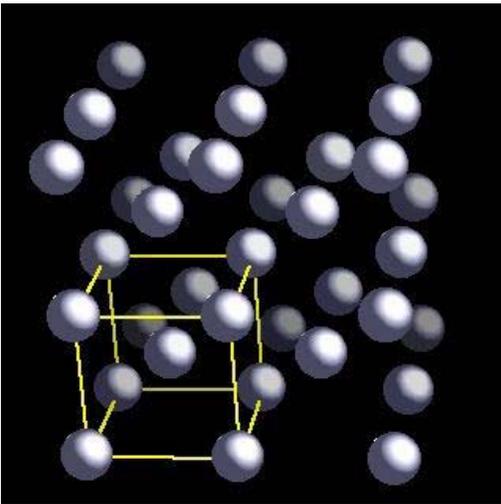
Estado de la materia	sólido (no magnético)
Punto de fusión	453,69 K
Punto de ebullición	1615 K
Entalpía de vaporización	145,92 kJ/mol
Entalpía de fusión	3 kJ/mol
Presión de vapor	1,63x10 <sup>-8</sup> Pa a 453,7 K

## Información diversa del Litio

<b>Electronegatividad</b>	<b>0,98 (Pauling)</b>
Calor específico	3582 J/(kg.K)
Conductividad eléctrica	$10,8 \times 10^6 / \text{m } \Omega$
Conductividad térmica	84,7W/(m.K)
1º potencial de ionización	520,2 kJ/mol
2º potencial de ionización	7298,1 kJ/mol
3º potencial de ionización	11815,0 kJ/mol



**Celdas del Litio**



## Hafnio

Nombre	Símbolo	Número atómico	Grupo	Periodo	Bloque
Hafnio	Hf	72	4	6	d
Serie química				Metal de transición	
Densidad, dureza Mohs				13310 kg/m <sup>3</sup> , 5,5	

### Propiedades atómicas del Hafnio

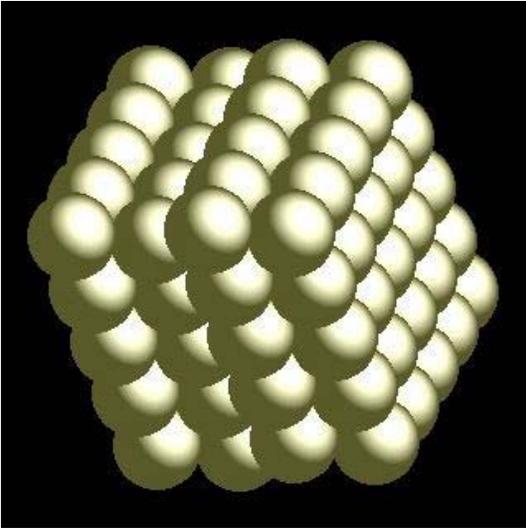
Peso atómico	178,49 uma
Radio medio	155 pm
Radio atómico calculado	208 pm
Radio covalente	150 pm
Configuración electrónica	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>
Estado de oxidación (óxido)	4 (anfótero)
Estructura cristalina	hexagonal

### Propiedades físicas del Hafnio

Estado de la materia	Sólido
Punto de fusión	2506 K
Punto de ebullición	4876 K
Entalpía de vaporización	575 kJ/mol
Entalpía de fusión	24,06 kJ/mol
Presión de vapor	0,00112Pa a 2500K

## Información diversa del Hafnio

<b>Electronegatividad</b>	<b>1,3 (Pauling)</b>
Calor específico	140 J/(kg.K)
Conductividad eléctrica	$3,12 \times 10^6 \text{ m}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$
Conductividad térmica	23 W/(m.K)
1° potencial de ionización	658,5 kJ/mol
2° potencial de ionización	1440 kJ/mol



### Celdas del Hafnio

