

11161



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN

Diseño y construcción de una maquina experimental para solidificación continua de
aleaciones de aluminio y obtención de una aleación ternaria Al-Li-Hf.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRO EN INGENIERIA
(METAL-MECANICA)

P R E S E N T A

JOSE FRIAS FLORES

DIRECTOR: M.C. TOMAS RANGEL ORTIZ

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2004

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
COORDINACION GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARTA DE VOTOS APROBATORIOS

UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

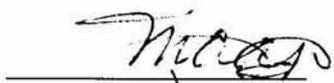
Coordinación General de Estudios de Posgrado
FES-Cuautitlán
Presente.

Por medio de este conducto nos permitimos comunicar a usted que revisamos la tesis titulada "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA EXPERIMENTAL PARA LA SOLIDIFICACIÓN CONTINUA DE ALEACIONES DE ALUMINIO Y OBTENCIÓN DE UNA ALEACIÓN TERNARIA A1-Li-Hf" que presenta el alumno FRIAS FLORES JOSÉ con número de cuenta 8525022-0 y número de expediente 100981040 para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Metal-Mecánica. Consideramos que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el Examen de Grado correspondiente, otorgamos el voto aprobatorio.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

_____ a _____ de _____ del _____

NOMBRE DE LOS SINODALES

- Presidente: M. en I. MARCO A. ALARCÓN RAMÍREZ 
- Vocal: M. en C. TOMAS RANGEL ORTIZ 
- Secretario: M. en I. ANA MARÍA PANIAGUA MERCADO 
- Primer Suplente: M. en C. ENRIQUE CURIEL REYNA 
- Segundo Suplente: M. en A. RAÚL A. LUCIDO DE LA PARRA 

INDICE

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	1
Experimento	2
CAPITULO I	
1. ANTECEDENTES	4
2. Diagramas de fase en equilibrio	5
3. Rayos X	8
CAPITULO II	
DESARROLLO EXPERIMENTAL	12
2.1. Descripción de la máquina	12
2.2. Procedimiento de obtención de las barras	16
2.3. Fusión de la barra de la aleación Al-Li-Hf	17
2.4. Caracterización de las barras	17
2.4.1. Análisis Químico	17
2.4.2. Difracción de Rayos X (RX)	18
2.4.3. Determinación de la Densidad	18
2.4.4. Microanálisis	19
2.4.5. Macroscopia y Microscopia Optica	19
2.4.6. Cálculo de tamaño de grano	20
2.4.6. Ensayo a la Tracción	21
2.4.7. Dureza	21
CAPITULO III	
RESULTADOS	22
3.1. Obtención de las barras	22
3.2. Análisis Químico	23
3.3. Difracción de Rayos X	24
3.4. Densidad	25
3.5. Microanálisis	25
3.6. Macroscopia y Microscopia Optica	29
3.7. Cálculo del tamaño de grano	30

3.8. Ensayo de Tracción	32
3.9. Dureza	33
CAPITULO IV	
ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
4.1. Obtención de las barras	34
4.2. Análisis Químico	34
4.3. Densidad	35
4.4. Microanálisis	35
4.5. Propiedades Mecánicas	35
4.6. Dureza	35
CAPITULO V	
CONCLUSIONES	36
ANEXOS 1	37
ANEXOS 2	38
BIBLIOGRAFÍA	39

AGRADECIMIENTOS

DOY GRACIAS:

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO a la FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN, por brindarme la oportunidad de ser alguien, por permitirme superarme, el de seguir aprendiendo día tras día, muchas gracias.

A mis PADRES por apoyarme cuando más lo necesitaba, por alentarme a mi superación y ahora les digo, cumplí, quizá un poco largo pero aquí esta.

A mis compañeros , amigos y los que me brindaron el apoyo para la realización de esta tesis

A mi asesor Maestro Tomás Rangel Ortiz, por brindarme su tiempo y su amistad.

A la Maestra Ana Maria Paniagua por su valiosa ayuda y comentarios a la realización de esta tesis.

Al Maestro Enrique Curiel Reyna por sus acertados comentarios a la tesis.

A los Doctores Federico Chávez Alcalá, Víctor M. López Hirata por permitirme realizar esta tesis en las instalaciones de ESIQIE, IPN.

A los que me faltaron, mil gracias.

Simbología.

T_0	Temperatura inicial
T_a	Temperatura ambiental
T_f	Temperatura final
T_{sol}	Temperatura de solidificación
ΔT	Incremento de temperatura
RX	Rayos X
λ	Longitud de onda
U	Velocidad de colada
ρ	Densidad
EDS	Espectrómetro de fluorescencia de rayos X
WDS	Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva
D	Díametro de grano promedio
D_i	Número de granos por línea
f	Factor tamaño
μm	Micras
σ	Esfuerzo de tensión
ε	Elongación
RA	Reducción de área
σ_{ced}	Esfuerzo de cedencia
σ_{UTS}	Esfuerzo máximo de tensión
E	Módulo de Young
e	Deformación lineal

INTRODUCCION

En esta investigación se hace un estudio de las barras de la aleación Al-1.4Li-0.88Hf % en peso, obtenidas por colada continua en una maquina experimental.

En principio este procedimiento para la solidificación de materiales metálicos, ha sido hasta la fecha, un proceso por el cual, se mejoran las propiedades estructurales y como consecuencia, las mecánicas; la elevada extracción de calor a través de las paredes de la lingotera, produce un enfriamiento cuya solidificación se lleva a cabo cuando la resistencia en la interfase molde-metal es dominante y la temperatura decae a través de esta, considerándose como un sumidero infinito que permanece en la pared de la lingotera a la temperatura original $T_0 = T_a$.

Cuando el metal se vacía a la temperatura $T_f + T_{sol}$, provoca una nucleación copiosa a través del metal, lo cual producirá una cristalización con tamaño de grano fino⁽¹⁾. La presencia de metales aleantes (Li, Hf) en una matriz de Al, contribuye a la mejora de las propiedades de la aleación, refinando aún más al metal solidificado y aumentando sus características mecánicas, tales como dureza y tenacidad.

La fusión de la aleación se realizó a 850°C en una atmósfera inerte de Ar para evitar la oxidación, todo el sistema fue aislado del aire para asegurar la obtención de una barra sana.

Se obtuvo una barra de prueba de 3.745 cm de diámetro y 30 cm de longitud, presentó buenas características superficiales; pocos defectos visibles, una superficie lisa, y al realizar los cortes adecuados se observó en el interior la microestructura característica de los lingotes fabricados por colada continua es decir, una estructura muy fina; una estructura columnar radial con una ligera inclinación con respecto a la periferia, y en el centro una estructura equiaxial muy fina y sin defectos interiores, tales como rechupe y porosidades.

Junto con la barra de Al-Li-Hf, se coló una barra de Al de pureza industrial, para comparar entre sí las características de ambas.

Se fundió una aleación ternaria de Al Li Hf con una composición nominal Al 2Li 1Hf % en un horno de resistencia eléctrica y se coló a una temperatura de 850°C, con un sobrecalentamiento de 50°C. La preparación de la aleación de Al Li Hf, se hizo basándose en el diagrama binario de fases en equilibrio de Al-Hf⁽²⁾; se seleccionó este diagrama por su comportamiento durante el cambio de fase, pues aumenta rápidamente la temperatura de líquidus con pequeñas adiciones de hafnio, mientras que con litio, no sucede lo mismo. Al observar el comportamiento del aluminio en presencia de este metal litio o hafnio se vio que, tiende a disminuir ligeramente la temperatura de fusión del aluminio. Por lo que, la combinación Al-Hf

es la que domina la variación de la temperatura de líquidus durante el proceso de fusión de la aleación.

La decisión de utilizar los diagramas binarios de fases en equilibrio, Al-Li y Al-Hf como auxiliares en la fabricación de la aleación ternaria, se debe a la inexistencia del diagrama ternario que involucra a los tres metales.

La preparación de la aleación presenta algunos inconvenientes que se deben superar, tales como, la gran afinidad del Li por el oxígeno y la diferencia muy amplia de temperatura entre los puntos de fusión de los tres metales. Esto nos llevó a diseñar un procedimiento específico durante todo el proceso. Se mantuvo una atmósfera inerte con gas argón para evitar la oxidación.

Durante la fabricación de la aleación se colocaron termopares, con indicadores de temperatura en los puntos estratégicos para el control del desarrollo del proceso. El cual se divide en tres fases fundamentalmente: la primera corresponde a la zona de fusión y preparación del baño líquido, la segunda es la zona de mantenimiento, dosificación, control de flujo y limpieza de la aleación. La tercera es en sí la zona de solidificación o lingotera que controla el enfriamiento y la velocidad de colada. Los indicadores en los dos primeros casos también mantienen el control de la temperatura de fusión de 850°C de acuerdo a las características de la aleación.

En las aleaciones de Al-Li se ha observado que la combinación de estos metales produce una aleación que no tiene buenas propiedades mecánicas, lo que nos obliga a agregar un tercer aleante para mejorar sus características.

La resistencia mecánica de las aleaciones de Al-Li⁽⁴⁾ se debe a la difícil precipitación, de la fase δ' inestable de Al₃Li. Sin embargo la naturaleza de esta fase contribuye a la poca tenacidad a la fractura en las aleaciones de Al-Li. δ' es una fase ordenada en la cual se forman como precipitados esféricos coherentes retenidos en un cubo^(5, 6, 7); la orientación de este cubo con la matriz α -Al⁽⁸⁾. δ' tiene una red pequeña negativa mal adaptada a la matriz de α , de -0.08%^(5, 6). El movimiento de las dislocaciones se logra por el cizallamiento de los precipitados δ' .

Esta combinación de propiedades de los metales mencionados es atractiva para la fabricación estructural en la industria aeroespacial⁽³⁾. Sin embargo, en los usos comerciales han sido limitados, debido a la baja tenacidad a la fractura de muchas aleaciones de Al-Li.

La mejora de las propiedades mecánicas en aleaciones de Al-Li ha sido alcanzada por los investigadores mediante la aplicación de nuevas técnicas rápidas de solidificación⁽⁹⁾ y aleando con metales que coprecipitan con δ' ⁽¹⁰⁾ o unen al Li en precipitados complejos. El planteamiento de este trabajo se basa en la idea de que la

resistencia para precipitar puede ser aumentada alterando la morfología básica del precipitado y la composición del mismo en Al-Li a través de adiciones de hafnio (Hf). El actual estudio viene en parte del trabajo desarrollado por Gayle⁽¹¹⁾, que demostró que las adiciones de Zr a una aleación de Al-Li modifican la fase de fortalecimiento de δ' Al_3Li a una nueva fase ternaria $\text{Al}_3(\text{Li.Zr})$ y que esta modificación dio lugar a mejoras significativas en resistencia y ductilidad⁽¹²⁾.

OBJETIVOS.

Empleando el método de colada continua para metales no ferrosos.

1. Obtener barras de aluminio puro y de la aleación ternaria Al-Li-Hf.
2. Caracterización de la aleación ternaria Al-Li-Hf, para determinar si el hafnio y el litio son retenidos en la aleación así como sus propiedades mecánicas.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

Las aleaciones aluminio-litio, han experimentado un gran desarrollo a partir de los años 70^s al aprovechar su ligereza, tenacidad y resistencia mecánica, para sustituir a las aleaciones tradicionales utilizadas hasta entonces en la industria aeronáutica.

Las aleaciones de Al-Li-X, generalmente incluyen como elemento ternario a cualquiera de los siguientes: Cu, Mg y Zr (también se incluyen el Ti y Cd)⁽¹³⁾. Cada uno tiene influencia sobre la combinación Al-Li modificando las propiedades estructurales.

El hafnio es un elemento metálico cuyas características químicas tienen cierta semejanza tanto con el titanio como con el zirconio, ya que forman parte del mismo grupo dentro de la clasificación de la tabla periódica de los elementos⁽¹⁴⁾, por lo que se espera que tenga un comportamiento semejante al de los metales mencionados.

La presencia del hafnio es posible que forme precipitados de Al_3Hf y que se produzca deslizamiento cruzado en la estructura metalúrgica, también se considera como un refinador de grano (es posible que produzca un tamaño fino de grano de forma equiaxial y de estructura dendrítica entre 50μ a 100μ)⁽¹⁵⁾ y por lo tanto mejore las propiedades de las piezas obtenidas, tomando en cuenta el proceso de solidificación en la colada continua, se controlará aún más la microestructura de los productos obtenidos y a la vez sus propiedades mecánicas y como consecuencia el control de calidad.

Para realizar el estudio de las aleaciones Al-Li y Al-Hf, se hizo uso de los diagramas de fase en equilibrio binarios correspondientes a Al-Li y Al-Hf⁽¹⁶⁾, figura 1 y 2.

1.1. DIAGRAMAS DE FASES EN EQUILIBRIO.

Como se menciona en un principio, a falta de un diagrama ternario de fases en equilibrio Al-Li-Hf, nos orientaremos con los diagramas binarios correspondientes, para tener una idea aproximada del comportamiento de la aleación ternaria propuesta.

Los diagramas de fases binarios en que se apoya este trabajo (Al-Li y Al-Hf) ⁽¹⁵⁾, presentan solubilidad parcial en el estado sólido, lo cual da las condiciones adecuadas para realizar tratamientos térmicos de solubilidad, precipitación (envejecimiento por precipitación), estas zonas son las que determinan los rangos de composición en que se realizará la experimentación.

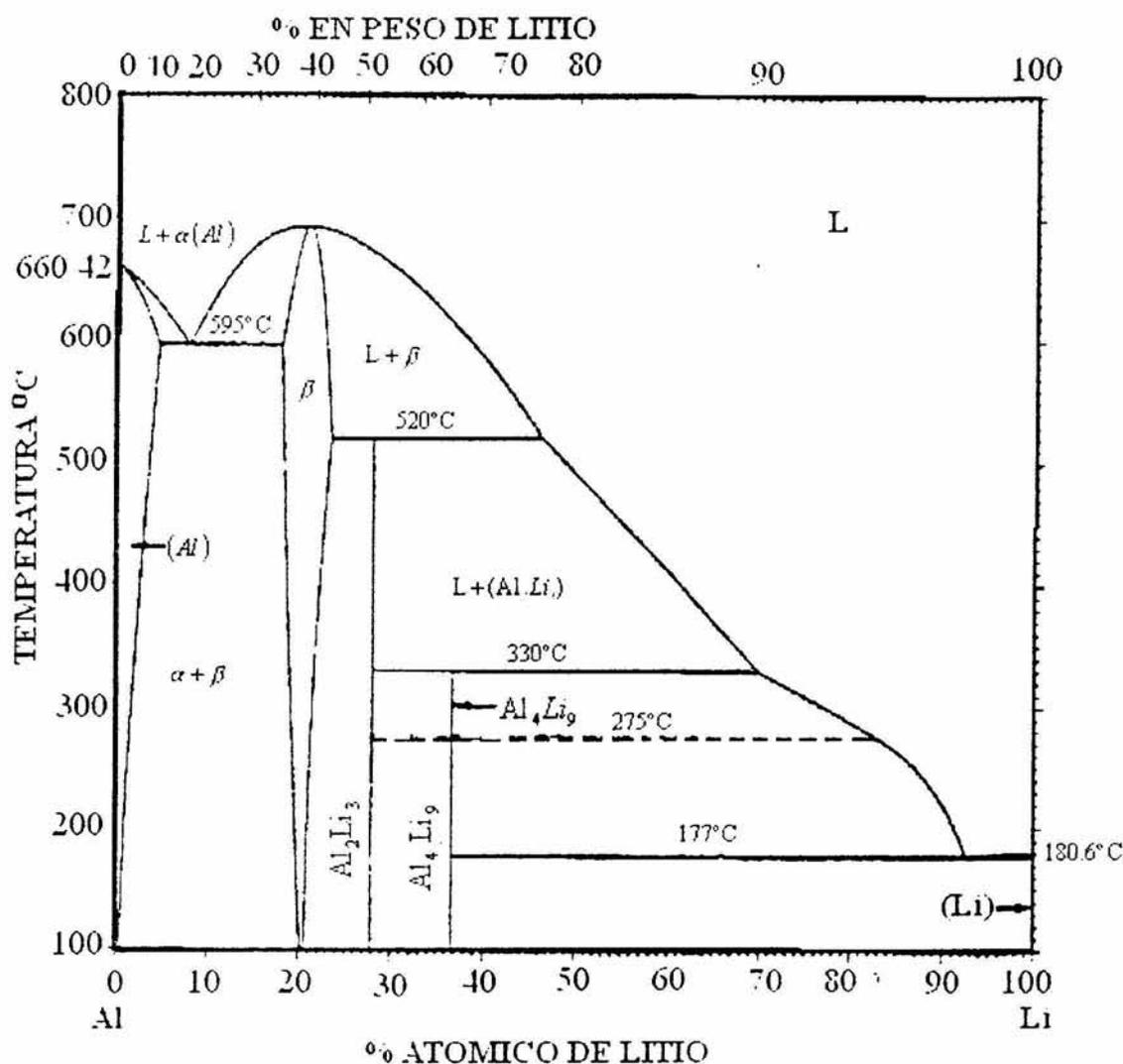


Figura 1. Diagrama de fases en el sistema Al-Li.

Fase	Estructura	% Peso de Compuesto
(Al)	FCC	0-4
AlLi (β)	FCC	17-24
Al ₄ Li ₉ (γ')	Monocristalino	36.6
Al ₂ Li ₃	HCP	28-29
Al ₃ Li (δ')	FCC Tipo Li ₂ congruente	Metaestable después de tratamiento
(β Li)	BCC	100
(α Li)	HCP	100

Tabla I. Fases en equilibrio registradas en el diagrama binario, según la composición en % de peso y las estructuras correspondientes.

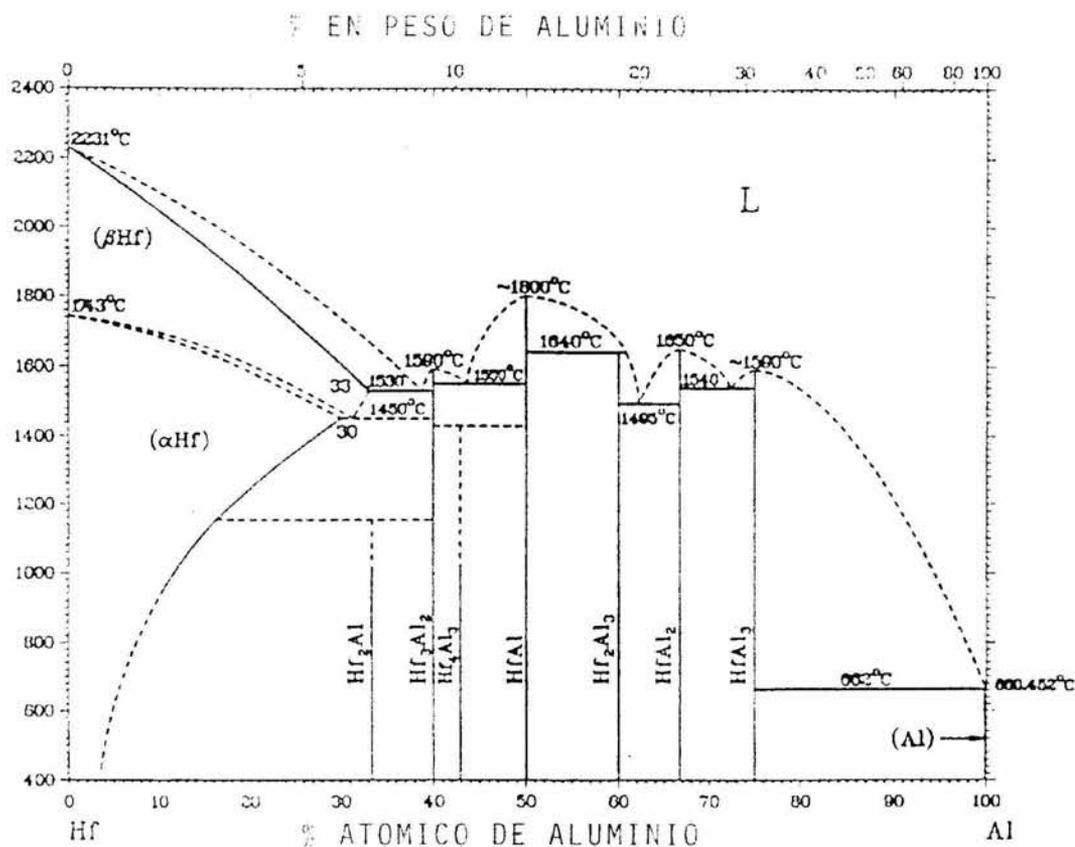


Figura 2. Diagramas de fases en el sistema Al-Hf.

Fase	Estructura	% Peso de Compuesto
(Al)	FCC	0-1.22
Al ₃ Hf (β)	Tetragonal	0.8
Al ₂ Hf	HCP	0.9
AlHf	Ortorrómico	-
Al ₃ Hf ₄	HCP	-
Al ₃ Hf ₂	Ortorrómico	-
Al ₂ Hf ₃	Tetragonal	-

Tabla II. Fases del diagrama en equilibrio en el sistema Al-Hf.

Generación y propiedades de los Rayos X.

Los rayos X son ondas electromagnéticas con longitudes de onda en el rango de alrededor de 0.1 a 100×10^{-10} m. Se producen cuando electrones que se mueven rápidamente golpean un blanco sólido y su energía cinética se transforma en radiación. La longitud de onda de la radiación emitida depende de la energía de los electrones⁽¹⁶⁾.

Existen tres propiedades diferentes de los rayos X que se pueden usar en la práctica:

- a) Absorción
- b) Fluorescencia
- c) difracción

a) Absorción.

La alta penetración de los rayos X en un material y la variación de la absorción por el material al cambiar el espesor conduce naturalmente a la técnica bien conocida de radiografía, tanto médica como industrial. Las soldaduras y las fundiciones son rutinariamente inspeccionadas por rayos X para buscar defectos como grietas. Debido a que los resultados se registran fotográficamente, existen buenas revisiones de las técnicas disponibles por parte de los fabricantes de película de rayos X, por ejemplo, Kodak, Ilford y Gevaert.

Esta técnica también se puede utilizar para monitorear continuamente el espesor de placas y hojas de papel metálico roladas y, también recubrimientos en placas de metal. Todo lo que se requiere es una fuente de rayos X en un lado de la hoja móvil y un tubo Geiger en el otro. Cualquier variación en el espesor se registrará inmediatamente como una variación en la tasa de conteo. La señal también podría usarse mediante un relé para corregir las fluctuaciones automáticamente sin la intervención de cualquier persona.

La radiografía se utiliza todos los días en muchas industrias. Se utiliza para examinar llantas radiales, para inspeccionar soldaduras o elementos de calentamiento y para muchos propósitos: las posibilidades son prácticamente ilimitadas.

b) Fluorescencia de Rayos X (análisis químico de las barras de la aleación)

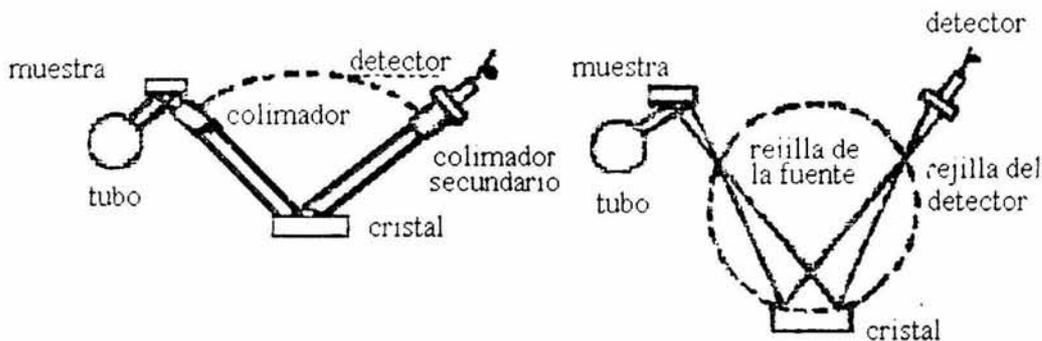
Cuando son excitados adecuadamente, los átomos de todos los elementos emitirán radiación característica cuya longitud de onda es función del recíproco de la raíz cuadrada del número atómico Z del elemento. En principio, es posible identificar los elementos en una muestra excitándola y midiendo la longitud de onda de los rayos X característicos que son emitidos. La eficiencia de emisión –el Rendimiento

Fluorescente- depende del número atómico y rápidamente decreciente conforme Z (número atómico) disminuye por debajo de 20.

Incrementando la concentración de cualquier elemento en la muestra resultara en un incremento proporcional en la intensidad de la radiación fluorescente característica de ese elemento. Entonces, la fluorescencia de rayos X es simultáneamente una técnica cualitativa y cuantitativa: ideal para análisis no destructivo de aleaciones.

En la práctica la muestra se excita por un haz de rayos X de alta intensidad, algunas veces monocromático, algunas veces blanco (o continuo). La selección del blanco del tubo no solo está dictada por el tipo de análisis a efectuar, la correcta selección de la corriente del tubo y del potencial es igualmente importante.

Dos arreglos típicos para un espectrómetro de rayos X se muestran en el diagrama siguiente. El corazón del instrumento es el analizador de cristal. Este se selecciona de tal forma que un conjunto de planos de espaciamiento d exactamente conocido sea presentado al haz fluorescente de rayos X. El cristal se puede rotar de tal forma que θ puede variarse, y entonces la ecuación de Bragg, $\lambda = 2d \sin \theta$, se aplica, d está fijo, θ se puede medir directamente y entonces la longitud de onda λ del haz difractado de rayos X puede ser calculada. La selección del cristal de análisis está determinada por el intervalo de longitudes de onda a ser medido, la magnitud de las tasas de conteo aceptables y por el tipo de detector a ser usado⁽⁵⁾.



Existen al menos cuatro tipos de detectores bien definidos, disponibles comercialmente.

1. Geiger-Muller
2. Proporcional
3. De Flujo de Gas
4. Centelleo

La selección del contador está determinada por la longitud de onda de los rayos X que serán detectados, las tasas de conteo requeridas, la sensibilidad y por un ruido de fondo aceptable.

c) Difracción de Rayos X.

Se aplica para determinar la presencia de las fases presentes en la muestra utilizando la ley de Bragg, determinando los planos cristalinos en que se produce la difracción.

Con mucho, el uso industrial más importante de la difracción es la técnica de polvos. Típicamente esta puede utilizarse para:

Análisis Cualitativo.

El patrón de polvos de una muestra registra, los espaciamientos d (o los ángulos θ) y las intensidades relativas a las 10 líneas más fuertes, se miden y estas son comparadas con los patrones de sustancias conocidas.

Análisis Cuantitativo.

Las concentraciones relativas de cada uno de los componentes en una mezcla de dos componentes puede obtenerse midiendo las intensidades relativas de dos líneas fuertes que no se traslapen, una perteneciendo al componente A y la otra al componente B, en el patrón de polvos de la muestra.

Estructura de Aleaciones.

Cuando los componentes de una aleación se encuentran distribuidos uniformemente a través de un metal, la muestra producirá una fotografía de puntos típica. Si el metal es "trabajado", o en ciertos casos, enfriado, uno de los componentes frecuentemente "precipita". Esto se puede observar en la fotografía como "puntos" donde anteriormente existían líneas uniformes.

Determinación de Esfuerzos en Metales.

Si una pieza de metal es deformada, las dimensiones de la celda unitaria se alterarán ligeramente. Debido a que la magnitud del ángulo de cono de un cono de difracción es función del espaciamiento d , cualquier pequeño cambio en el espaciamiento d puede ser observado como un cambio correspondiente en el ángulo θ del cono de difracción.

Determinación del Tamaño de Cristal.

La dispersión angular de las reflexiones desde un plano cristalino se ve afectada no sólo por la perfección del cristal sino también por el tamaño de cristal. Conforme el tamaño promedio de las cristalitas decrece, la dispersión angular de las reflexiones provenientes de un polvo se incrementarán.

Identificación y Evaluación de Materias Primas.

Para materiales complejos (por ejemplo, polvos de cementos, arenas y arcillas), el patrón de polvos será complejo, pero característico del material. A pesar de que el patrón no puede ser analizado para cada uno de los componentes individuales, materiales similares siempre exhibirán patrones similares.

CAPITULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

La experimentación se desarrollo en dos fases:

- Optimación de la maquina
- Obtención, estudio analítico y caracterización de las muestras

2.1. Descripción de la máquina.

Para la construcción de la máquina de colada continua se realizó un estudio previo de las partes que la componen y se puede dividir básicamente en cuatro partes que son las siguientes, figura 3a y 3b.

- Estructura principal
- Sistema de fusión
- Sistema motriz
- Sistema de enfriamiento y Lingotera

Estructura principal.

Tiene como finalidad alojar los equipos e instrumentos del proceso de colada semicontinua.

El material empleado en esta parte de la construcción fue de cuatro barras de acero cilíndricas de 3.81 cm de diámetro, cuatro placas de acero 1045 de 80cm x 40cm y 1.905 cm de espesor, una de las placas es móvil y contiene el falso fondo.

En la elaboración de la estructura principal fue necesario maquinar algunas partes para poder hacer el ensamble correspondiente tales como la elaboración de dos husillos a través de los cuales se desplaza el falso fondo.

Sistema de fusión.

Este consta de dos hornos eléctricos de resistencia de 46 KW, figura 4, los cuales pueden alcanzar una temperatura de hasta 1200°C. Además de dos crisoles de carburo de silicio, para un kilogramo de aleación cada uno. Los cuales tienen colocado un tubo de ladrillo refractario, que sirven para comunicar el horno de fusión con el horno de distribución y este a su vez con la zona de colada (lingotera), los hornos tienen sus respectivos termopares los cuales están conectados a controladores de temperatura marca TEYCO en un panel de control.

Zona de colada.

Esta consta de una lingotera de cobre refrigerada por agua como enfriamiento primario, y un falso fondo y un sistema de enfriamiento secundario que consta de dos tubos laterales de cobre que sirven para irrigar con agua directamente a la barra a temperatura ambiente la cual tiene como objetivo el de enfriar la barra.

Sistema motriz.

Este sistema consta de un motorreductor de velocidad variable de corriente directa de dos caballos de potencia, a través del cual se transmite el movimiento a dos husillos permitiendo el movimiento vertical en dos sentidos del falso fondo.

Sistema de enfriamiento.

Se basa fundamentalmente en hacer circular agua por medio de la gravedad, y elevándola con una bomba de manera constante. El agua enfría la lingotera y rocía la barra de metal emergente por la parte inferior.

Lingotera.

Como se indico anteriormente la parte fundamental del sistema es la lingotera Y es en ella que se hace el mayor énfasis. Está construida por cilindros concéntricos a través de los cuales circula agua bañando la pared, el material usado es cobre, debido a su alta conductividad térmica.

Las áreas de fusión y colada están controladas por medio de un sistema de control manual con atmósfera inerte controlada, el cual esta suministrado por medio de tubos de cobre conectados y alimentados por un tanque de gas inerte. Este sistema es utilizado para evitar que durante la adición de los elementos aleantes estos se oxiden fácilmente.

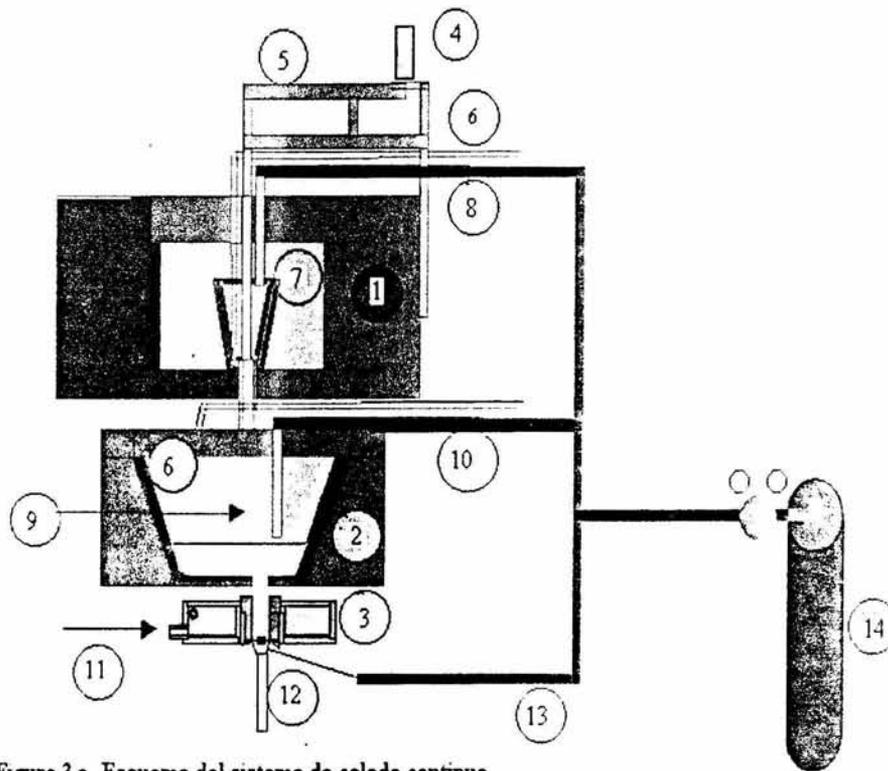
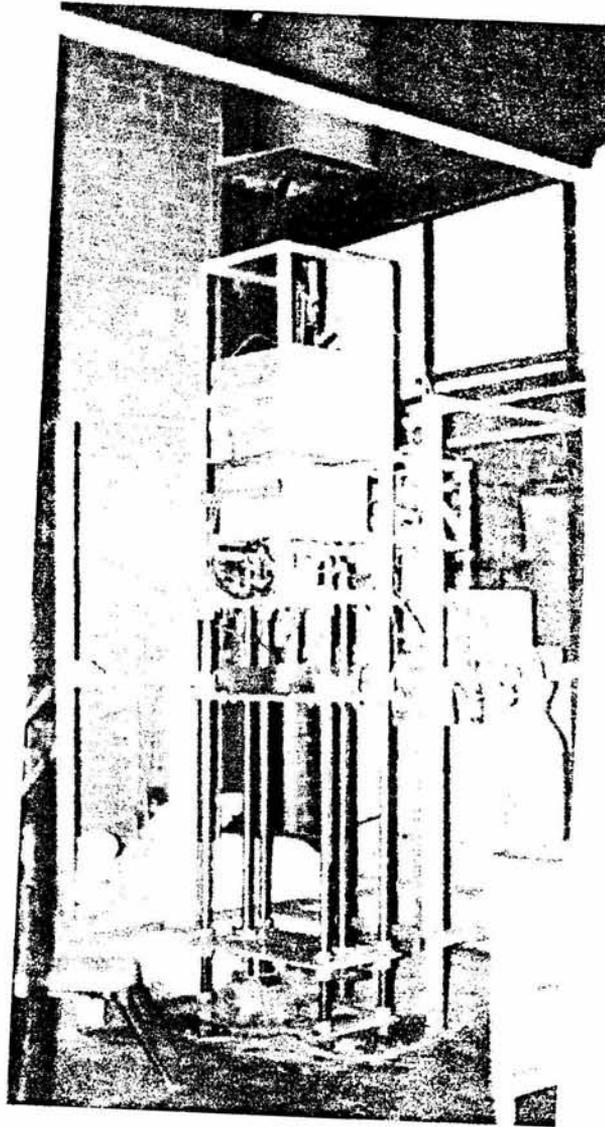


Figura 3 a. Esquema del sistema de colada continua.

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. Horno de fusión | 8. Atmosfera de argón |
| 2. Distribuidor | 9. Conducto de descarga del metal fundido |
| 3. Lingotera | 10. Atmosfera de argón |
| 4. Motor de control de colada | 11. Entrada de agua de enfriamiento |
| 5. Valvula de control de vaciado | 12. Falso fondo |
| 6. Termopar | 13. Atmosfera de argón |
| 7. Crisol de fusión | 14. Tanque de argón |



3b. máquina de colada continua experimental.

2.2. Procedimiento de obtención de las barras.

2.2.1. Fusión de la Barra de Aluminio Puro.

Se realizó la producción de la barra de Aluminio puro en la máquina experimental de colada continua descrita anteriormente, con la siguiente composición del Aluminio como materia prima.

Elemento	% peso
Aluminio	99.985
Hierro	0.015

Tabla III. % de aluminio puro.

El procedimiento para el manejo de la máquina y la obtención de la barra es el siguiente: se debe llevar una secuencia estricta sobre todo en el manejo de los tiempos y movimientos por ser crítico su desarrollo.

- a) Sello del falso fondo con la lingotera .
- b) Sellar el tubo de colada con crisol del horno de fusión.
- c) Cargar el metal al crisol de fusión.
- d) Encender sistema de enfriamiento.
- e) Establecer velocidad de colada al sistema motriz.
- f) Elevar temperatura hasta fundir metal cargado.
- g) Mantener la temperatura óptima para colada.
- h) Abrir llaves de paso y tanque de gas inerte. *
- i) Destapar el crisol de fusión.
- j) Arrancar sistema motor de colada e intercambiar paso de agua en el sistema secundario de enfriamiento.

* Opcional para metales reactivos de fácil oxidación.

La obtención de la barra de aluminio puro se realizó con el procedimiento antes descrito, la colada se llevo a cabo a una temperatura de 715°C con un incremento de la temperatura aproximadamente de 55°C (ΔT) (sobrecalentamiento para mantener el metal liquido y asegurar que no solidifique antes del vaciado) fijado por los diagramas de fase para garantizar la fluidez del metal liquido durante el proceso y una velocidad de colada de 0.25 cm/seg.

2.3. Fusión de la Barra de la Aleación Al – Li – Hf.

En las aleaciones ternarias en que se involucra Al-Li se considera a este par de metales como aleación base y se modifican sus propiedades adicionando otro metal denominado X, en este caso el elemento utilizado es el hafnio.

Para la producción de la barra de la aleación se estableció la siguiente composición: nominal para 1000 gr.

Elemento	% Peso
Al	97.0
Li	2.0
Hf	1.0

Tabla IV. Composición inicial de la aleación.

Materias primas utilizadas:

- 1.- Al con una pureza de 99.985% de peso
como impurezas Fe 0.015% de peso
- 2.- Litio en barras con una pureza de 99.00%
- 3.- Hafnio en láminas con una pureza de 97.00%
como impureza se encuentra el circonio ~ 2.00%

2.4. Caracterización de las barras.

2.4.1 Análisis Químico.

El análisis químico es una parte fundamental del estudio y, se realizó con dos finalidades:

- a). Obtener una composición química promedio, representativa de la masa total que interviene en el proceso
- b). Conocer la variación de la composición a través de las barras en estado de fundición, para determinar el comportamiento de los elementos que intervienen en la aleación ternaria.

2.4.2 Difracción de Rayos X

La técnica de la difracción de Rayos X son de los más usados en la caracterización de materiales cristalinos, tal como metales, cerámicos, minerales, polímeros, plásticos y compuestos orgánicos e inorgánicos, la técnica de los Rayos X se vio en la identificación de las fases presentes en las muestras a través de su procesamiento hasta la terminación del producto y promueve información sobre el estado físico de la muestra, así como el tamaño de grano, textura y perfección cristalina en las muestras se realizó difracción de RX a las secciones de la figura 5, con un ángulo de 10 a 120 °.

2.4.3 Determinación de la Densidad.

Se realizó la determinación de la densidad de las diferentes secciones de la barra de la aleación Al – Li – Hf. Por medio del método del picnómetro en, base al principio de desplazamiento de volumen.

Se muestreó sacando por cuarteo de las diferentes secciones

El método de medición para el cálculo de la densidad es el siguiente:

- Pesar el picnómetro seco
- Pesar el material en un vidrio de reloj (entre más material sea, más precisión se tiene, se recomienda llenar entre un 30% a un 50%)
- Se pesa el picnómetro con agua
- Se pesa el picnómetro con alcohol
- Se descarga el 60% aproximadamente del alcohol y se agrega el material. El principal problema es la eliminación de las burbujas. Cuando esto se logra se llena con alcohol y se pesa

La densidad se calculo con la siguiente formula:

$$\rho = \frac{\rho_{muestra} (\rho_{picnometro + alcohol} - \rho_{picnometro})}{[(\rho_{picnometro + alcohol}) + \rho_{muestra}] (\rho_{picnometro + alcohol + muestra} - \rho_{picnometro + agua})}$$

2.4.4 Microanálisis

Este estudio fue realizado en un laboratorio exterior bajo la técnica : Microanálisis de Hf con EDS (Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de Longitud de Onda) y WDS (Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva) acoplado a MEB marca JEOL6300, a la aleación proporcionada con composición nominal Al-1.88%Li-0.85%Hf.

Preparación de las muestras: Montaje en baquelita conductora, debaste con lijas de diferente tamaño de grano y pulido con oxido de Magnesio (MgO); aplicándoseles un ataque químico con el reactivo de Keller para revelar la microestructura.

Método aplicado: Espectrómetro de discriminación de energía de rayos X y espectrómetro de discriminación de longitud de onda acoplados a microscopio Electrónico de Barrido.

Procedimiento: Observación con el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y posterior análisis en varias áreas con espectrómetros de fluorescencia de RX de longitud de onda (EDS) y espectrómetro de fluorescencia de Rx de energía dispersiva (WDS).

El análisis químico nos permite obtener un criterio de los elementos presentes en el aluminio como de la aleación ternaria.

2.4.5 Macroscopia y Microscopia Óptica.

Se realizó la metalografía a la barra de aluminio puro, así como, también a la de la aleación, la cual fue seccionada de acuerdo a la figura 5.

Las macrografías se hicieron para observar la estructura de solidificación y la metalografía para observar las fases presentes.

Los reactivos de ataque utilizados fueron Toker y Keller (ver anexo 1) para macroscopia óptica se hicieron observaciones a 500X en el microscopio OLIMPUS PM 3- PV respectivamente.

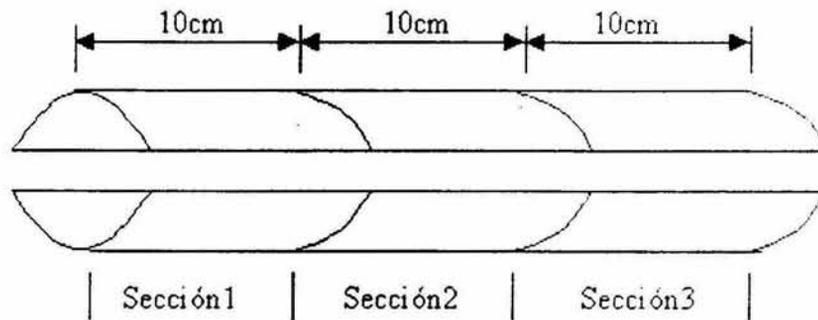


Figura 5. Secciones de la aleación Al-Li-Hf, una mitad se utilizó para análisis de macroestructura y microestructura y la otra para realizar pruebas mecánicas.

2.4.6 Cálculo del tamaño de grano.

Considerando la macrografía de la barra se hicieron las siguientes consideraciones:

- Se amplificó 2.76 veces (esto fue en función al tamaño más adecuado que presenta el monitor en la pantalla) el tamaño de la foto.
- se imprimió la imagen
- Se trazaron líneas en la zona de granos equiaxiales y se midieron las longitudes de cada línea.
- Se procedió a medir o contar cuantos granos están en cada línea
- Se divide la longitud de la línea entre el número de granos $D_i = l_i / n_i$ (esto da el diámetro del grano).
- Se calcula el diámetro de grano promedio $\bar{D} = \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{N}$
- Se determina el factor tamaño $f = \frac{3.62mm}{1cm} = 0.362mm$
- Se multiplica f por \bar{D} para calcular el diámetro real.

2.4.7. Ensayo a la Tracción.

Se maquinaron probetas de tensión con las dimensiones que se muestran en la figura 6, de la barra de aluminio y de la aleación se tomaron muestras de acuerdo a las secciones de la figura 5. El ensayo de tracción se realizó en la máquina AG-10TG SHIMADZU con una velocidad de deformación de 500 mm/min y una carga de 1KN bajo la norma ASTM E8⁽¹⁷⁾.

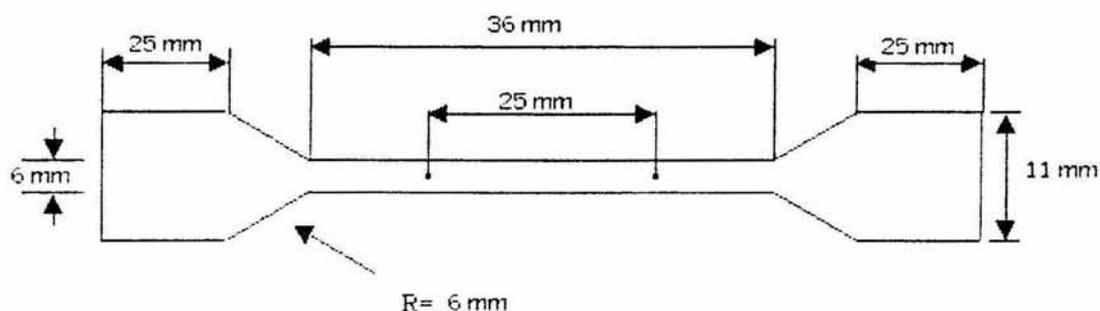


Figura 6. Esquema de la probeta de tensión

2.4.8. Dureza.

Se realizó la prueba de dureza a las barras de aluminio y la aleación Al-Li-Hf de la parte superior de acuerdo a la figura 5, con la máquina de pruebas de dureza Vickers con una carga de 200 grs en la máquina Future Tech FM3249 Microhardness Testter, previamente se pulió la superficie y se atacó con el reactivo de Keller para revelar la microestructura.

CAPITULO III

RESULTADOS

3.1. Obtención de las Barras.

En la tabla V se presentan las siguientes características dimensionales de las barras obtenidas, tanto del aluminio puro como de la aleación Al-Li-Hf en la máquina de colada continua .

Barra	Peso inicial carga (grs)	Peso final carga (grs)	Peso de la escoria (grs)	Longitud (cm)	Diámetro (cm)
Aluminio	1000	437.5	160	15	3.743
Al-Li -Hf	1000	860	140	31.5	3.743

Tabla V. Características de las barras Al puro y Aleación ternaria

La barra de Aluminio puro figura 7. Presenta las siguientes características superficiales, buen acabado, color gris brillante, terso, presenta ligeras ondulaciones, la masa de la carga disminuye ya que se forma escoria y se pierde algo de aluminio.

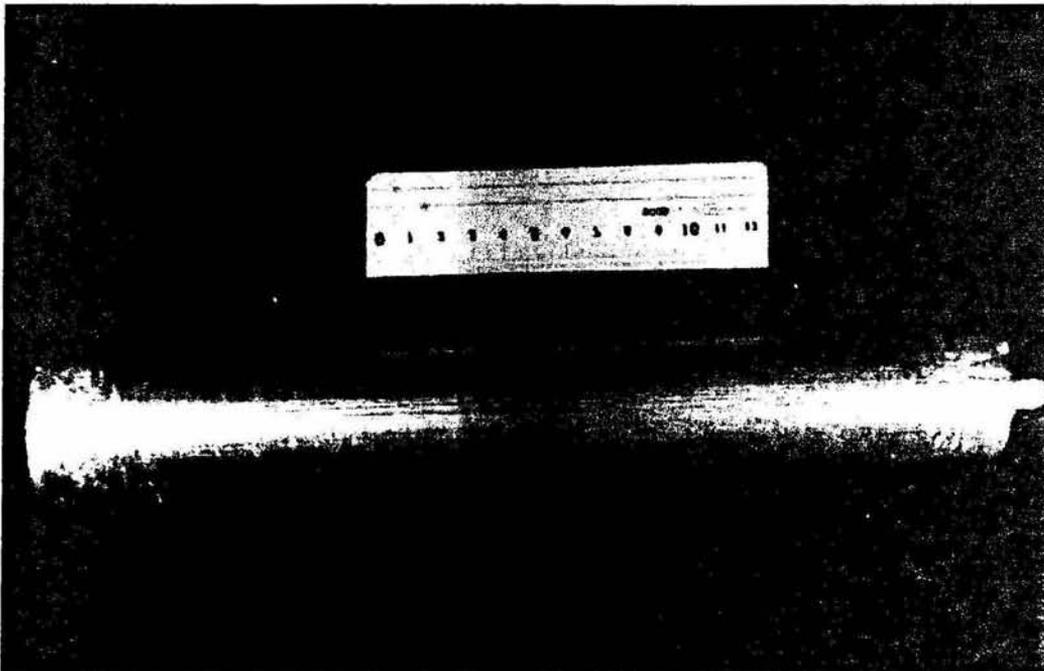


Figura 7. Barra de aluminio puro obtenida por colada continua.

La barra de la aleación Al-Li-Hf figura 8. Presenta las siguientes características, superficie ligeramente rugosa, no presenta grietas, se observan pequeñas ondulaciones periódicas color gris opaco y una pequeña porosidad en la base.

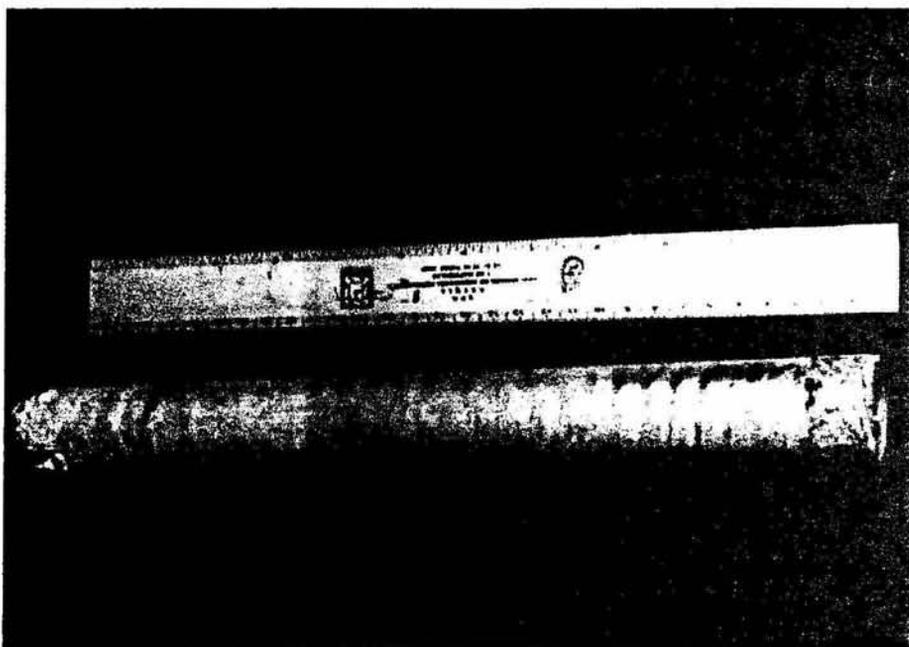


Figura 8. Barra de la aleación (Al-Li-Hf) obtenida por colada

3.2. Análisis Químico.

Método de Fluorescencia de Rayos X,

Se realizó el estudio en un laboratorio externo en el equipo ANALIZADOR DE ALEACIONES, METALLURGIST-PRO SERIE 1505, FLUORESCENCIA DE RAYOS X obteniéndose los resultados que se presentan en la tabla VI.

Elemento	%
Al	96.96
Ti	0.02
Hf	0.88
Cr	0.11
Mn	0.06
Fe	0.25
Ni	0.07
Cu	0.06
Zn	0.07
Ta	0.04
Li	1.48

Tabla VI. Composición química de la aleación obtenida Al-Li-Hf.

La barra de la aleación Al-Li-Hf figura 8. Presenta las siguientes características, superficie ligeramente rugosa, no presenta grietas, se observan pequeñas ondulaciones periódicas color gris opaco y una pequeña porosidad en la base.

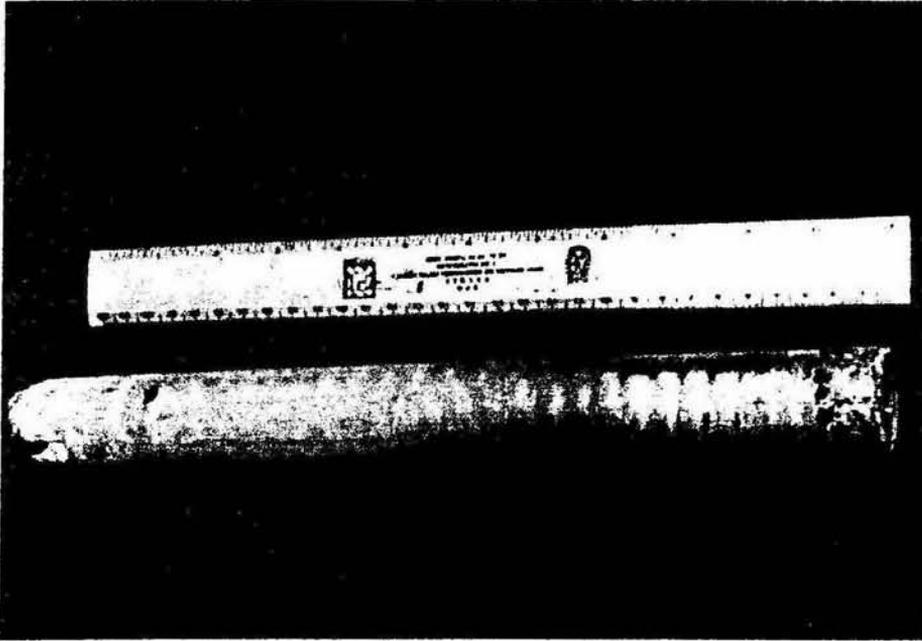


Figura 8. Barra de la aleación (Al-Li-Hf) obtenida por colada

3.2. Análisis Químico.

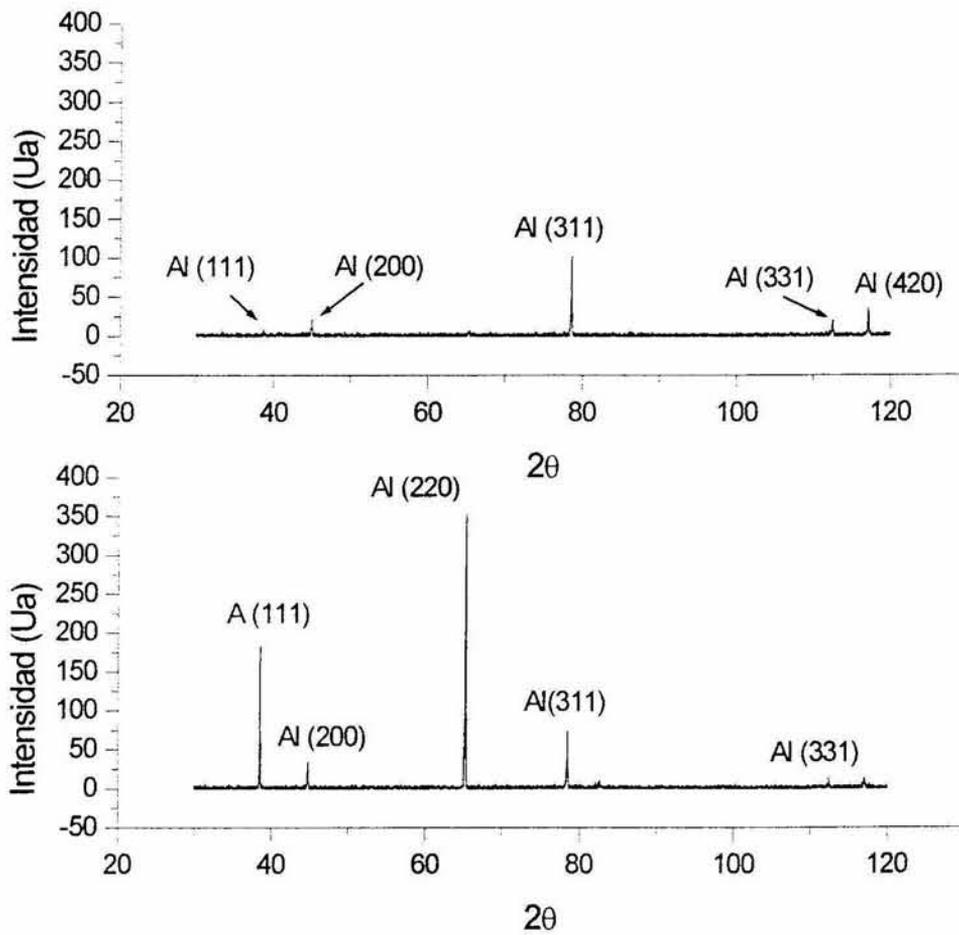
Método de Fluorescencia de Rayos X,

Se realizó el estudio en un laboratorio externo en el equipo ANALIZADOR DE ALEACIONES, METALLURGIST-PRO SERIE 1505, FLUORESCENCIA DE RAYOS X obteniéndose los resultados que se presentan en la tabla VI.

Elemento	%
Al	96.96
Ti	0.02
Hf	0.88
Cr	0.11
Mn	0.06
Fe	0.25
Ni	0.07
Cu	0.06
Zn	0.07
Ta	0.04
Li	1.48

Tabla VI. Composición química de la aleación obtenida Al-Li-Hf.

3.3. Difracción de rayos X.



La figura 9. Difractogramas correspondientes de la aleación Al-Li-Hf.

3.4. Densidad.

La densidad que fue determinada en la barra seccionada de la aleación Al-Li-Hf por medio del picnómetro, en base al principio de desplazamiento de volumen presenta los siguientes resultados tabla VII.

Sección de la Barra	Densidad (g/cm ³)
A	2.6580
B	2.6227
C	2.6208
Densidad Promedio	2.6338

Tabla VII. Densidad en las diferentes secciones de la barra Al-Li-Hf.

3.5. Microanálisis.

Las micrografías figura 10 y 11 muestran algunos precipitados ricos en Hf, mientras que en los límites de granos se encuentran precipitados ricos en otros elementos como Pb, Sn, Fe, Ni y Si.

Sección superior de la aleación Al-Li-Hf					
Amplificación	% Al	%Hf	%Pb	%Sn	%Fe
2500X	97.51	0.51	0.79	1.15	0.34
1000X	98.99	0.07	0.26	0.47	0.20
Sección central de la aleación Al-Li-Hf					
Amplificación	% Al	%Hf	%Pb	%Sn	%Fe
2500X	97.12	1.40	-----	0.87	0.44
1000X	98.23	0.78	-----	0.65	0.33

*La incertidumbre de la técnica utilizada es de $\pm 5\%$ relativo.

Tabla VIII. Resultados del microanálisis en zonas con precipitados ricos en Hf.

Estos análisis se realizaron a una muestra que se obtuvo de la parte central y superior de la barra, representa los parámetros reales de trabajo.

Resultados con EDS		
	Hafnio promedio	Desviación Estándar
Sección superior	0.367	0.96
Sección central	0.587	0.27
Resultados con WDS		
Sección superior	0.502	0.219
Sección central	0.512	0.147

Tabla IX. Resultados globales en zonas de 200 μm x 200 μm determinados por microanálisis. La tabla IX presenta los resultados globales para el hafnio obtenidos por EDS y WDS en las sección central y superior de acuerdo a la figura 5.

Los precipitados ricos en hafnio se encuentran distribuidos heterogéneamente en el material en ambas muestras.

La tabla VIII muestra los resultados promedio obtenidos a diferentes aumentos para la aleación (Al-Li-Hf), que representan las secciones media y superior de la barra obtenida donde se encuentran los precipitados ricos en hafnio, en zonas adyacentes a estos precipitados no se encontró el elemento de interés.

Calculo del tamaño de grano

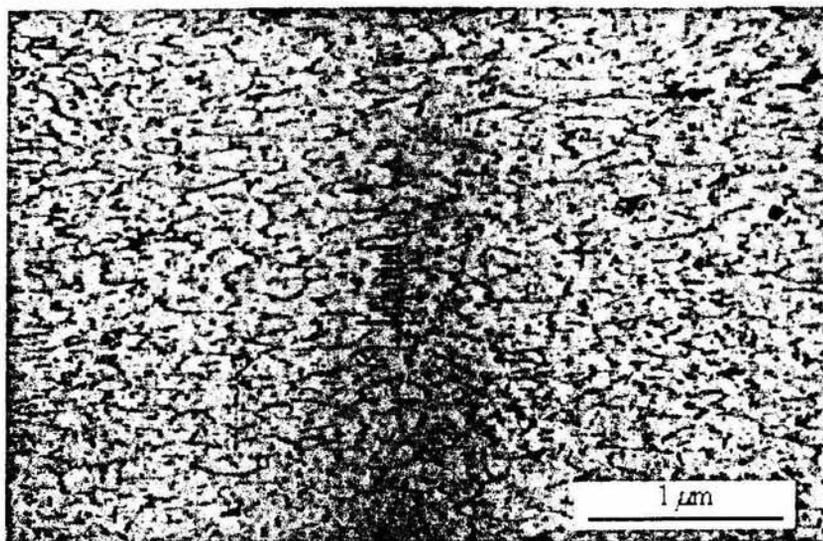


Figura 13. Estructura metalográfica de la sección central de la barra de Aleación Al-Li-Hf, obtenida por colada continua. 100X.

En la figura 13 y 14 se desarrollaron las siguientes mediciones para calcular el tamaño de grano.

N° de línea	Longitud de línea (mm)	N° de cruces	Tamaño de grano
1	85	6	3.26
2	117	8	4.50
3	127	7	4.88
4	160	5	6.15
5	78	4	3.00
6	95	7	3.65
7	107	5	4.11
8	60	5	2.30

Para la figura 13 se tuvo un promedio de 3.98 μm (micras)

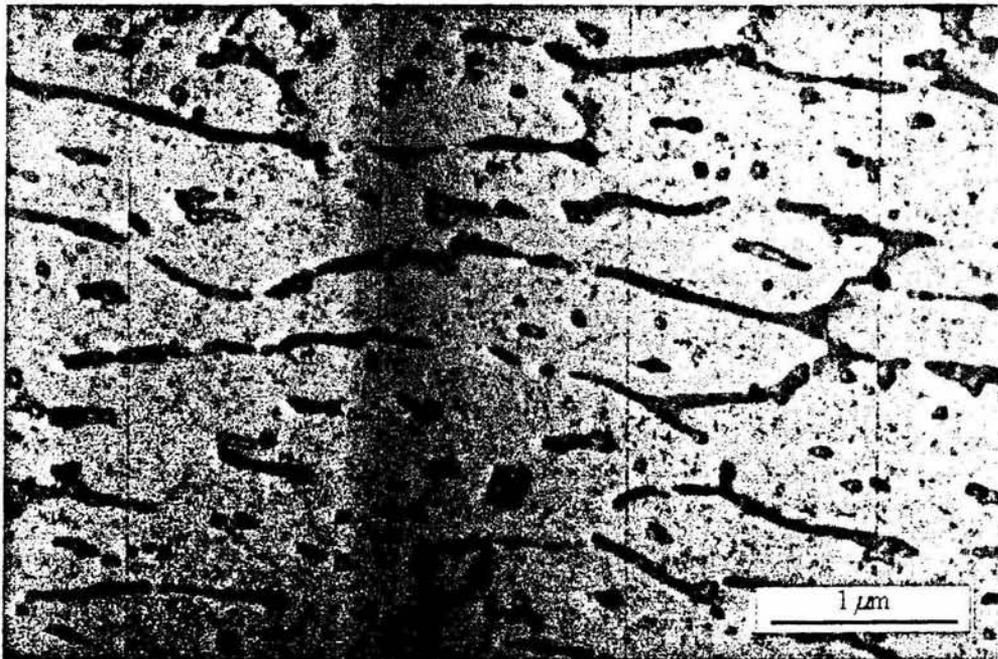


Figura 14. Estructura metalográfica de la misma zona mostrada en la foto anterior, obtenida por microscopía electrónica de barrido, 800X

Nº de línea	Longitud de línea (mm)	Nº de cruces con la línea	Tamaño de grano
1	80	5	3.07
2	115	7	4.42
3	105	3	4.03
4	95	3	3.65
5	100	4	3.84
6	97	5	3.73
7	144	7	5.53
8	157	5	6.03

Para la figura 14 se tuvo un promedio de 4.28 μm (micras)

3.6. Macroscopia y Microscopia.

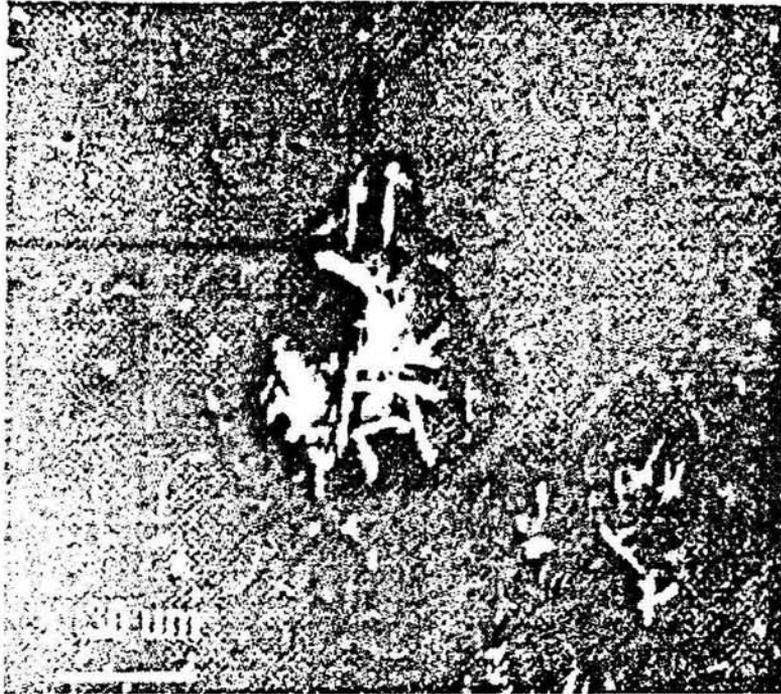


Figura 10. Precipitados ricos en Hf y límites de granos ricos en elementos como Sn, Pb, Fe y Ni en la aleación Al-Li-Hf.

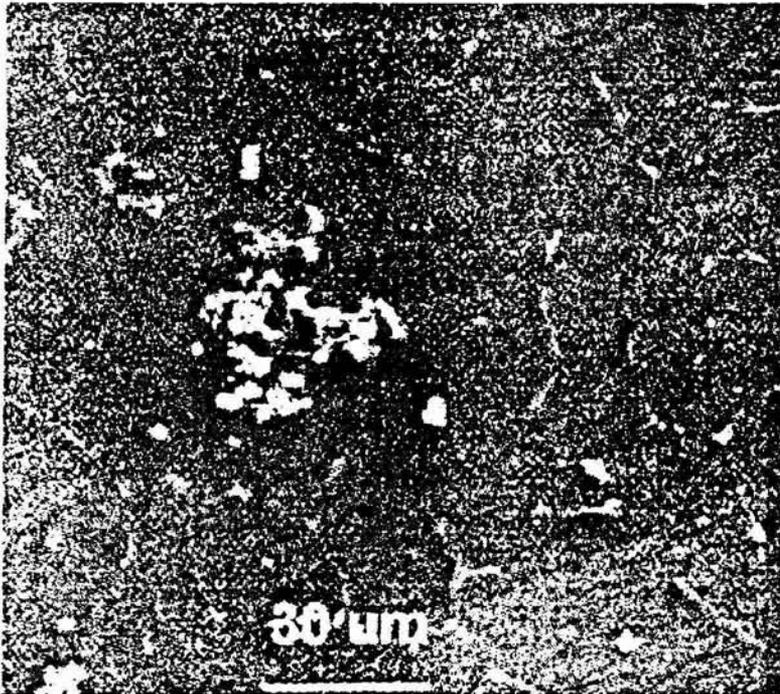
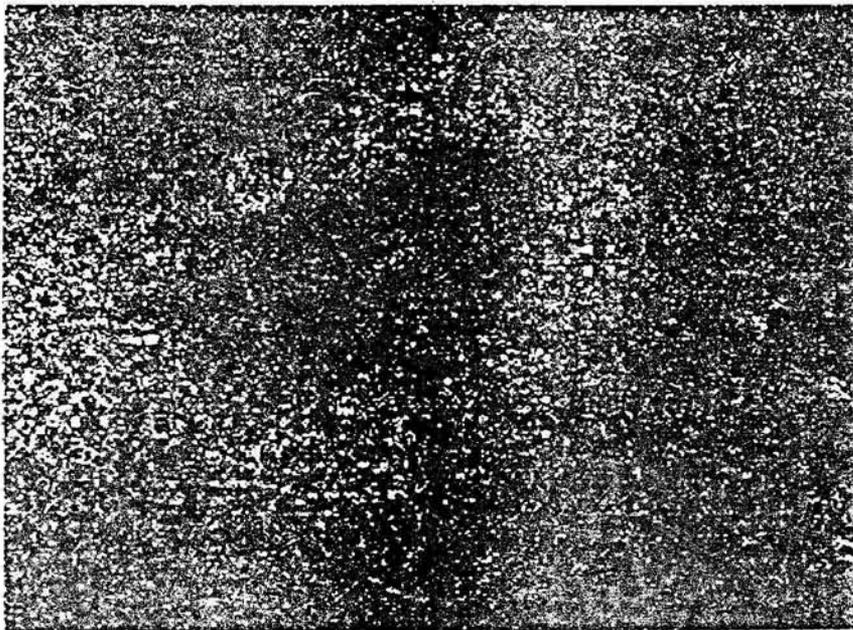


Figura 11. Aleación Al-Li-Hf, la cual muestra precipitados ricos en Hf repartidos heterogéneamente en la matriz de Al.



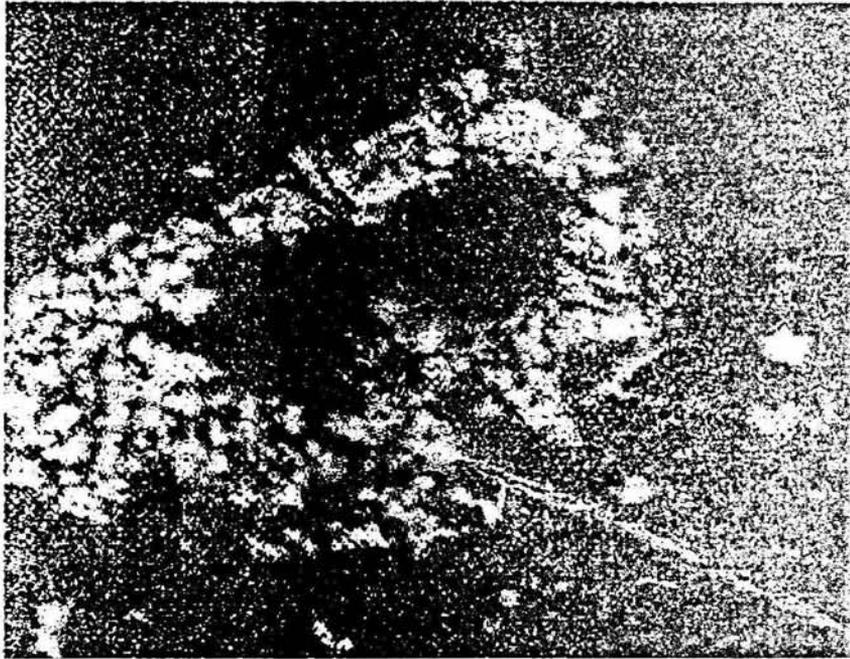


Figura 12, representa el mapeo para el elemento hafnio, en donde se observa que este elemento se encuentra en mayor cantidad en el precipitado de forma irregular (forma característica de los precipitados ricos en hafnio) por lo que existen zonas empobrecidas del mismo elemento a su alrededor.



Figura 15. Macroestructura de la barra Al-Li-Hf, obtenida por colada continua por el método de colada directa (direc chill), sección correspondiente a la base de la misma. Se observa una estructura de grano columnar en la periferia y grano equiaxial en el centro.

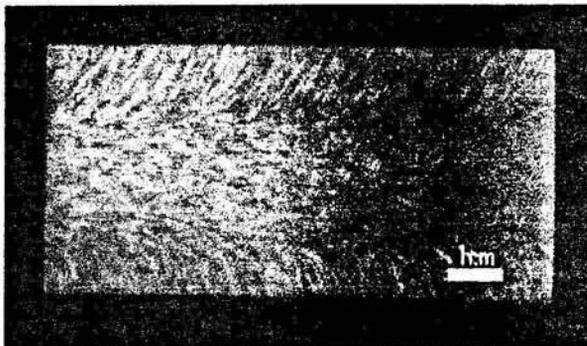


Figura 16. Macroestructura de la barra parte media, se observa continuidad de la estructura de la sección anterior



Figura 17. Se observa la continuidad de la macroestructura de la sección superior

3.7. Ensayo de Tensión.

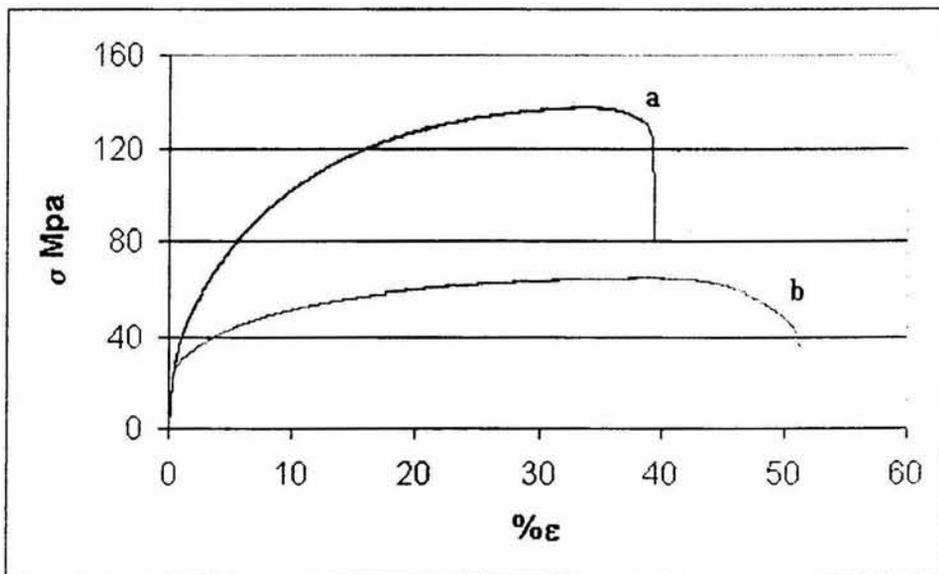
La tabla X y XI muestran los resultados obtenidos y las figuras 15 muestran las graficas σ vs ϵ de las barras de aluminio y de la aleación en sus diferentes secciones

Barra de aluminio puro	Esfuerzo de tensión Máx. σ (Mpa)	Elongación % ϵ	% de reducción de área
Probeta 7	65.3581	50.72	60.30
Probeta 8	64.2309	51.28	60.34

Tabla X. muestra el esfuerzo de tensión del Aluminio puro

Barra de Al-Li-Hf	Esfuerzo de tensión Máx. σ (Mpa)	Elongación % ϵ	% de reducción de área
Probeta 1	130.5848	39.52	32.00
Probeta 2	130.8418	35.24	31.44
Probeta 3	137.4743	39.28	30.70
Probeta 4	138.9704	42.88	41.25
Probeta 5	135.3083	31.24	33.73

Tabla XI muestra el esfuerzo de tensión de la aleación Al-Li-Hf



La figura 18 muestra la comparación de gráficas de esfuerzo-deformación promedio de la aleación Al-Li-Hf (a) y del Aluminio puro (b)

3.8 Dureza.

La tabla muestra los resultados obtenidos en la maquina Future Tech, serie FM7249 (carga a 200 gr).

Se realizaron 96 lecturas de la aleación Al-Li-Hf divididas en seis diferentes secciones de las muestras.

N° de prueba	Dureza
1	48.4583
2	48.6749
3	48.8916
4	44.6580
5	43.9083
6	45.5516
Promedio	46.6904

Para el aluminio puro se realizaron 24 lecturas en dos secciones donde:

N° de prueba	Dureza
1	23.3330
2	23.0163
Promedio	23.1746

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. Obtención de las barras.

La observación superficial de las barras, tanto de Al como de la aleación Al-Li-Hf nos lleva a hacer un análisis de sus características de acuerdo a otros productos que se han obtenido por procesos de colada continua (C.C). Estas se sitúan de muy buena calidad puesto que presentan muy leves variaciones en la superficie, sobre todo en la sección donde ya se mantiene una velocidad constante y, en la cuál se desarrolla todo el estudio que da lugar a este trabajo de tesis.

Puede decirse que se observan los defectos característicos de colada continua (desgarres en caliente, reborde en frío, refusiones), sobre todo en la barra de la aleación Al-Li-Hf, es más propensa a este tipo de defectos por sus características de solidificación en donde hay un intervalo amplio de coexistencia de fases sólida y líquida, a diferencia de los metales puros. Por lo que la velocidad de colada seleccionada para ambos tipos de barras son las adecuadas.

4.2. Análisis Químico.

Uno de los estudios que tienen mucha importancia en la caracterización de las muestras es la determinación del análisis químico, el cual va a determinar las condiciones de trabajo al conocer la composición química se va a encontrar en los diagramas de fases binarios en equilibrio la temperatura de cambio de fase líquido – sólido; por lo tanto, se determina el sobrecalentamiento ΔT , temperatura de colada ($T_f + \Delta T$).).

El análisis químico de la aleación nos muestra una variación de los componentes como se observa en la tabla 6, no se obtuvo exacto, pero se encuentra dentro de los valores recomendados por la literatura ⁰ y por los diagramas de fases donde se observa que el aumento de la composición del Hf aumenta la temperatura del líquido.

4.3. Densidad.

Uno de los objetivos también de relevancia por el uso al cual se les destina este tipo de aleaciones (aeronáutica, aeroespacial, material especial para criogenica) es mantener la densidad en valores limitados inclusive por debajo de la densidad del Al, se encontró que disminuye en un 2.8% con esta composición química.

Por cada 1% de litio disminuye 0.43%

4.4 Microanálisis

Las aleaciones de Al-Li-Hf , contienen hafnio el cual se encuentra segregado en la matriz en forma de precipitados de forma irregular, los análisis obtenidos muestran que en muchas zonas existen regiones empobrecidas de hafnio en diferentes puntos de la aleación, mientras que en otras regiones que es la gran mayoría se carece de este elemento en la matriz, por lo que los resultados nos indican que el porcentaje global de hafnio en las aleaciones es probablemente mucho menor del 1%.

4.5 Propiedades mecánicas

En las curvas de ingeniería esfuerzo contra deformación tanto para el aluminio puro como para la aleación Al-1.88Li-0.85Hf se muestran en la figura 18. Se observa el incremento en el esfuerzo de tensión y baja ductilidad con respecto al aluminio puro, así como un incremento en el límite de fluencia. El modulo elástico también se incrementa debido a la presencia del litio. En la tabla X y XI se muestran las propiedades de tensión, la fuerza máxima de tensión S_{UTS} , el límite de cedencia, el % de elongación y el % de reducción de área para ambos materiales.

Una mención importante son la similitud de los valores en las tres partes segmentadas de la barra.

4.6 Dureza

En la tabla XII se observa un incremento del doble en la aleación con respecto del aluminio puro ya que influye la presencia del hafnio así como en las demás pruebas.

Muestra	Dureza (kg/mm ²)
Barra de Aluminio puro	23.1749
Barra aleación Al-Li-Hf	46.6904

Tabla XII. Diferencia entre las durezas del aluminio puro y de la aleación Al-Li-Hf.

MATERIAL	ANÁLISIS x EDS	DENSIDAD [$\frac{gr}{cm^3}$]	% σ_{CED} [MPa]	% σ_{UTS} [MPa]	% REDUCCIÓN DE AREA	% ELONGACION	DUREZA	MODULO DE ELASTICIDAD
ALUMINIO PURO	0.477	2.700	29.47	64.79	60.22	37.41	23.174	154.81
ALEACIÓN Al-Li-Hf	0.502	2.633	44.21	136.31	30.66	51.00	46.690	446.65

Tabla XIV. Promedio de las propiedades tanto de la aleación como del aluminio puro.

CAPITULO V

V. CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron barras de aluminio puro y de la aleación Al-1.88Li-0.85Hf por medio de la maquina de colada continua para la caracterización de la aleación.
2. Las barras obtenidas presentaron buenos acabados superficiales y no presentaron problemas que se llegan a tener en este tipo de procesos como son las grietas, rupturas y porosidades.
3. El limite de tensión y la fuerza de tensión de la aleación Al-1.88Li-0.85Hf cambia con la adición de hafnio y litio.
4. La aleación Al-Li-Hf presentó una disminución en la densidad de un 3% con respecto al del aluminio puro, hubo incremento en el módulo elástico, la dureza y el esfuerzo de tensión se incrementaron con respecto al aluminio puro.
5. Las propiedades de la aleación se mejoran aun en estado de fundición, lo que permite pensar en un estudio en base a tratamientos térmicos de precipitación y envejecimiento en una caracterización detallada para conocer sus propiedades mecánicas y microestructurales de la aleación (futuros estudios).

ANEXO 1

Reactivos utilizados para revelar la macroestructura y microestructura .

HNO ₃	16.25 ml
HCl	24.00 ml
HF	2.00 ml
H ₂ O	65.75 ml

Reactivo de Keller

HNO ₃	2.5 ml
HCl	1.5 ml
HF	1.0 ml
H ₂ O	95.0 ml

ANEXO 2

Propiedades Físicas de los metales.

Nombre	Densidad relativa (ρ)	Punto de fusión °C	Peso Formula
Aluminio (Al)	2.70 ^{20°}	660	26.97
Litio (Li)	0.53 ^{20°}	186	6.94
Hafnio (Hf)	12.1	1700	178.6

BIBLIOGRAFÍA

1. Aluminum-Lithium Alloys
Richard S. James, Aluminum Company of America, pp. 178-81
2. Microstructural Characteristics of Al-Li Alloys
D. B. Williams, Department of Metallurgy & Materials Engineering, Lehigh University, Whitaker Laboratory 5, Bethlehem, Pennsylvania 18015.
3. T. H. Sanders: in Aluminum-Lithium Alloys, T. H. Sanders and E. A. Starke, eds., TMS-AIME, New York, N. Y., 1981, pp. 63-67
4. Alloying Additions and Property Modification in Aluminum-Lithium-X Systems.
F. W. Gayle, Reynolds Metals Company, Metallurgical Research Division, Richmond, Virginia 23261.
5. D. B. Williams and J. W. Edington: *Metal Sci.*, 1975, vol. 9, pp. 529-32.
6. J. M. Silcock: *J. Inst. Metals*, 1959-1960, vol. 88, pp.357-64.
7. B. Noble and G. E. Thompson: *Met. Sci. J.*, 1971, vol. 5, pp.114-20.
8. M. Tamura, T. Mori, and T. Nakamura: *J. JIM*, 1970, vol. 34, pp. 919-25.
9. E. J. Lavernia: Ph. D. Thesis, MIT, Cambridge, MA, Feb. 1986.
10. T. H. Sanders and E. A. Starke: Aluminum- Lithium Alloys II, E. A. Starke and T. H. Sanders, eds., TMS-AIME, New York, NY, 1984, pp.1-15.
11. F. W. Gayle: Ph. D. Thesis, MIT, Cambridge, MA. June 1985.
12. Nancy F. Levoy and John B. Vandersande, Phase Transformations in the Al-Li-Hf and Al-Li-Ti Systems, *Metallurgical Transactions A*, vol. 20 A, June 1989, pp. 999-1019.
13. Aluminum-Lithium Alloys, Richard S. James, Aluminum Company of America.
14. Structure and Properties of P/M-Aluminum Alloys, J. Albrecht, U. Habel, B. Sopart, G. Lütjering, Techn. University Hamburg-Hamburg, 2100 Hamburg 90, FRG. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1991, pp. 77-86.
15. Binary Alloys Phase Diagrams, Second Edition, vol. 1, ASM international, The Materials Information Society.
16. Una Introducción a la Cobertura, Potencial y Aplicaciones del Análisis por Rayos-X, Machael Laing, Publicado para la Unión Internacional de Cristalografía por University College Cardiff Press, Cardiff, Wales, 2001.

BIBLIOGRAFÍA

1. Richard S. James, Aluminum-Lithium Alloys, Aluminum Company of America, pp. 178-81
2. D. B. Williams, Microstructural Characteristics of Al-Li Alloys, Department of Metallurgy & Materials Engineering, Lehigh University, Whitaker Laboratory 5, Bethlehem, Pennsylvania 18015.
3. T. H. Sanders: in Aluminum-Lithium Alloys, T. H. Sanders and E. A. Starke, eds., TMS-AIME, New York, N. Y., 1981, pp. 63-67
4. F. W. Gayle, Alloying Additions and Property Modification in Aluminum-Lithium-X Systems, Reynolds Metals Company, Metallurgical Research Division, Richmond, Virginia 23261.
5. D. B. Williams and J. W. Edington: Metal Sci., 1975, vol. 9, pp. 529-32.
6. J. M. Silcock: J. Inst. Metals, 1959-1960, vol. 88, pp.357-64.
7. B. Noble and G. E. Thompson: Met. Sci. J., 1971, vol. 5, pp.114-20.
8. M. Tamura, T. Mori, and T. Nakamura: J. JIM, 1970, vol. 34, pp. 919-25.
9. E. J. Lavernia: Ph. D. Thesis, MIT, Cambridge, MA, Feb. 1986.
10. T. H. Sanders and E. A. Starke: Aluminum- Lithium Alloys II, E. A. Starke and T. H. Sanders, eds., TMS-AIME, New York, NY, 1984, pp.1-15.
11. F. W. Gayle: Ph. D. Thesis, MIT, Cambridge, MA. June 1985.
12. Nancy F. Levoy and John B. Vandersande, Phase Transformations in the Al-Li-Hf and Al-Li-Ti Systems, Metallurgical Transactions A, vol. 20 A, June 1989, pp. 999-1019.
13. Richard S. James, Aluminum-Lithium Alloys, Aluminum Company of America.
14. J. Albrecht, U. Habel, B. Sopart Structure and Properties of P/M-Aluminum Alloys, G. Lütjering, Techn. University Hamburg-Hamburg, 2100 Hamburg 90, FRG. The Minerals, Metals & Materials Society, 1991, pp. 77-86.
15. ASM international, Binary Alloys Phase Diagrams, Second Edition, vol. 1, The Materials Information Society.
16. Machael Laing, Una Introducción a la Cobertura, Potencial y Aplicaciones del Análisis por Rayos-X, Publicado para la Unión Internacional de Cristalografía por University College Cardiff Press, Cardiff, Wales, 2001.
17. D. B Williams in Proc. 5th Intern. Conf. Al-Li Alloys, eds T.M. Sanders Jnr and E. A. Starke Jnr, MCEP, Birmingham, Vol.2 1989, pp 819.
18. A. F. Norman and p. Tsakirooulos, Sixth International Aluminium-Lithium, Garmish-Partekirchen. Germany, Vol. 1 & 2, pp. 502-12. 1991.
19. B. Noble, S. H. Harris and K. Dinsdale, Yield Characteristics of Al-Li Alloys. Metal Science. 16. 1982, pp.425.

20. E. F. Emley, Continuous Casting of Aluminium, International Metals Reviews, Review 206, 1976, pp. 80-89.
21. A. Vasudevan, R. D. Doherty, Aluminium Alloys-Contemporary Research and Applications, Academic Press Inc. 3, 1989, pp. 111-24.
22. J. E. Jacoby, Functions of Molds and Starting Blocks in Vertical Casting Processes, 4th Australian Asian Pacific Conference, The Minerals, Metals and Materials Society, 1995, pp. 293-96.
23. M.C. Flemings, Solidification Processing, McGraw Hill, New York, 1, 1974, pp. 21-27.
24. H. Yu and D. A. Granger, Proc. of Conf. On Fundamentals of Alloys Solidification Applied to Industrial Processes. NASA Conf. Publication 2337, 1984, pp. 157-68.
25. B. Indyk, R. Hadden, Continuous Casting of Small Cross Sections Billets. First Step Towards a General Model, Metallurgy, 1979, pp. 444-50.
26. W. R. Wilson & D. J. Allan, Aluminium-Lithium Aerospace Alloys: New Challenge for Recycling, Alcan International, Ltd. Banbury, Oxon., England. Pp. 311- 18.
27. D. Little. Proc. Int. Conference on Al-Li Alloys III, Oxford, England 1985, pp. 15-21, Publ. Inst. Metals.
28. R. Grimes, W. S. Miller, M. A. Reynolds, A. Gray, Aluminium-Lithium : The Successes and the Problems, Proc. Int. Conference on Al-Li, Westec 86. Los Angeles, usa 1986, pp 38-73, publ. ASM.
29. A. F. Norman and P. Tsakirooulos, Department of Materials Science and Engineering, University of Surrey, Guildford, Gu2 5XH, England, UK, pp.597 – 612.
30. P Furrer ., “Continuos Casting and Quality of Wrough Aluminium Alloys”, the Minerals Metals & Materials Society, pp 88 – 104, 1989.
31. John D Verhoven, Fundamentos de Metalurgia Física, Ed. Limusa S. A. de C.V., 1987.
32. Merton C. Flemings, Solidifications Processing, Ed. McGraw-Hill, N. Y. USA 1974.
33. D. B. Williams, Microestructure Characteristics of Al-Li Alloys. Departament of Metallurgy & Materials Engineering, Lehigh University, pp 90-97.
34. John H. Perry, “Chemical Engineering Handbook”, McGraw-Hill, secc. 3. 1980, pp. 147-427.
35. ASTM E8, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
36. J. Quattrocchi, D. Johansen, M. Obrien, N. Khankan, « On the Transformation Characteristics of 2029 Al-Li Alloy Light Weight Alloys for Aerospace Applications”. The Minerals, Metals & Materials Society, 1991.
37. Barrand, P. Gadeau. “Enciclopedia del Aluminio” Ings, Grupo Pechiney, Ed. URMO, V2.

38. D. Altempohl, "Aluminium und Aluminium Legierungen", 144 (1965), Berlin, Springer Verlag.
39. J. Szekely & N. J. Themelis, Rate Phenomena in Process, John Wiley and Sons Inc. 10, pp. 323-330 (1971)
40. T. Rangel, A. Herrera, M. Quintero, Defectos Externos en Colada Semicontinua de Al Comerc. Puro: Simp. Al en LA, 243-253, (may 1982).
41. P. K. Raiford: Continuous Casting Seminar. Papers, Aluminium Assoc., 1975, Paper II-1.
42. R. W. Hazelett and C. E. Swartz: Papers presentado en AIME Annual Meeting, New York, 1964.
43. E. F. Emley Int. Met. Reviews, Rev 206, (jun 1976).
44. Robert F Mehl. "Metals Handbook", V 7, "Atlas of Microest. Of and Alloys", A. S. M. (1972)
45. Donald Q. Kern, "Process Heat Transfer", McGraw- Hill, Book, Co. Inc. (1950).