

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIO DE POSTGRADO



INFLUENCIA DE LA CONVECCION SOBRE LA
HOMOGENEIDAD EN METALES FUNDIDOS

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA
ALEJANDRO TORRES CASTRO

CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO DE 1999

T6

1999

FIME

.M2

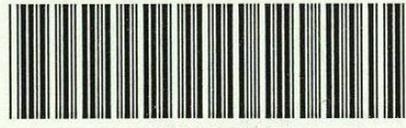
Z5853

TM

INFLUENCIA DE LA CONVENCION SOBRE LA
NUEVA LEY DE METALES FUJINDIADOS

WETALES FUJINDIADOS

W.T.C.



1020126450

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIO DE POSTGRADO



INFLUENCIA DE LA CONVECCION SOBRE LA
HOMOGENEIDAD EN METALES FUNDIDOS

PRESENTA

ALEJANDRO TORRES CASTRO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO DE 1999

TM
2585
IMD
FINE
1999
T6

0131-58160

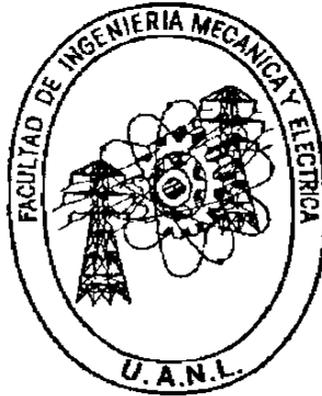


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIO DE POSTGRADO



**INFLUENCIA DE LA CONVECCION SOBRE LA HOMOGENEIDAD
EN METALES FUNDIDOS**

PRESENTA:

ALEJANDRO TORRES CASTRO

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

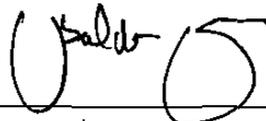
CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO 1999

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Influencia de la Convección sobre la Homogeneidad en Metales Fundidos" realizada por el Ing. Alejandro Torres Castro sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El comité de tesis



Asesor

Dr Ubaldo Ortiz Méndez



Coasesor

Dr. Virgilio Gonzalez Gonzalez



Coasesor

Dr Mario A. Martínez Hernández



Vb.Bo.

M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudio de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L., Agosto de 1999.

DEDICATORIA

A DIOS

Por sus grandes enseñanzas, su protección en este mi caminar por este mundo y por deberle todo lo que soy.

A MIS PADRES

Alejandro y María de Jesús, por brindarme sus esfuerzos, desvelos y dedicación, que tanto me han dado.

A MIS HERMANAS

Aidée y María de Jesús, por su apoyo y por todo lo que hemos compartido juntos.

A toda mi familia y amigos que me han ofrecido su amistad y comprensión desinteresadamente.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y al Doctorado en Ingeniería de Materiales, ya que le debo parte de mi formación académica.

Al Dr. Ubaldo Ortiz Méndez por aceptar guiarme en esta labor de mi tesis, por sus consejos y apoyo.

Al Dr. Virgilio González González por sus enseñanzas, paciencia y amistad brindada durante mi estancia en el DIMAT.

Al Dr. Mario A. Martínez Hernández por sus observaciones y consejos para la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Carlos Guerrero por haberme brindado sus conocimientos y apoyo.

Al Dr. Rafael Colás, al Dr. Alberto Pérez y la Dra. Patricia Rodríguez por haberme dado su apoyo durante mi etapa de estudiante en el DIMAT.

Al M.C. Lorena Cruz por sus amistad, observaciones y su participación directa para la elaboración de esta tesis.

A Peñoles por prestarme sus instalaciones para realizar los estudios de resultados.

A mis Compañeros, Luis Miguel, Edgar, Jorge A. y Jesús Garza por su amistad, y los buenos ratos que pasamos.

INDICE

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	1
Capitulo I	
Introducción.	5
Capitulo II	
Antecedentes.	
2.1.- Generales	7
2.2.- Los Patrones de Bénard.	14
2.2.1.- Fenómeno de la formación de los Patrones de Bénard.	14
2.2.2.- Parámetros que rigen la formación de los patrones.	17
2.3.- Análisis de muestras utilizando el microscopio electrónico de barrido.	18
Capitulo III	
Transferencia de Masa y Energía.	23
4.1.- Introducción	23
4.2.- Cálculo de la temperatura en la muestra expuestos a diferentes gradientes térmicos.	24

Capitulo IV

Experimentación.	31
5.1.- Material y equipo para la experimentación.	33
5.2.- Desarrollo experimental.	33

Capitulo V

Resultados.	40
Conclusiones	51
Recomendaciones.	53
Referencias Bibliográficas.	54
Lista de figuras.	56

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es relacionar la convección con el crecimiento inestable de la fase sólida y ver su influencia en la homogeneidad química de los materiales sólidos.

Normalmente en la interfase líquido-sólido, la concentración del soluto en el lado líquido difiere de la del estado sólido. De hecho para ciertos gradientes de temperatura y densidades, la concentración en exceso del soluto difunde hacia el líquido, el proceso de difusión es muy lento y aparecen inestabilidades que provocan segregación química, afectando así las propiedades del material.

Desde principios de este siglo, el físico francés Henri Bénard fué el primero en observar las inestabilidades de los fluidos al medir la conductividad térmica de los líquidos entre dos caras paralelas comprimidas e isotérmicas, comprobando que en diferentes soluciones se presenta una misma orientación de flujos convectivos, en su honor a estos flujos se les llamó patrones de Bénard².

Durante los últimos 60 años se han desarrollado nuevos estudios sobre este comportamiento de los materiales tratando de modular la inestabilidad presente en las superficies de líquidos.

Estas inestabilidades se deben también a las diferentes densidades que componen la materia y como nos encontramos inmersos en un sistema gravitatorio, se forman canales o chimeneas por donde fluyen partículas, provocando así segregación de los elementos químicos que componen la materia. Este fenómeno se puede apreciar de una manera sencilla cuando se pone a calentar agua en un depósito. Una placa de calentamiento suministra energía a un contenedor y a un fluido. La transferencia de calor se lleva a cabo por conducción y por convección. El líquido que este en contacto con el recipiente en la parte inferior eleva su temperatura ($T+\Delta T$) y como consecuencia de ello disminuye su densidad (ρ), por lo que tiende a subir. Poco a poco crece la columna de líquido que va siendo calentada y origina un movimiento del mismo. Las capas intermedias superiores son desplazadas hacia abajo por su alta densidad y por efecto de la gravedad, produciéndose así un circuito.

El movimiento de un fluido en convección natural es el resultado de fuerzas de flotación impuestas sobre el fluido cuando la densidad varía debido al proceso de calentamiento.

Cuando las diferentes partes del fluido presentan temperaturas desiguales las corrientes provocadas por las diferentes densidades transportan el calor por convección.

Entre los parámetros que rigen la formación de patrones de Bénard se aceptan: La gravedad, temperatura, densidad y geometría del recipiente.

La formación de patrones en aleaciones metálicas fundidas indica la existencia del fenómeno de convección en el sistema. Los gradientes de temperatura direccionan el flujo dentro del líquido debido a variaciones en la densidad de la aleación.

La aleación bifásica Plomo-Estaño fue calentada hasta ser fundida. En estado líquido se aplicaron tres formas diferentes gradientes térmicos para provocar flujos convectivos diferentes. Estos flujos convectivos provocan diferentes segregaciones químicas

La primera forma de calentamiento fué provocando una diferencia de temperatura de aproximadamente 200°C entre la base más caliente y su parte superior que se encuentra a una temperatura del agua congelada.

La segunda forma de calentamiento fué también por debajo del contenedor y la parte superior al aire. Después de alcanzar la temperatura de fusión en la muestra, la parte inferior se mantiene a 220°C y la energía que se suministra al sistema se pierde por convección natural a través de las paredes del contenedor y por la superficie libre del líquido hacia el aire.

La tercer forma de calentamiento consiste en calentar el contenedor con la aleación en una mufla cerrada y así uniformizar la temperatura en la

aleación fundida. El calor que suministra un horno se puede considerar uniforme en toda la cámara de calentamiento, por lo tanto, no existen gradientes de temperatura tan marcados como los formados en las pruebas antes descritas. Al no haber gradiente de temperatura no existe tampoco corrientes de convección que disipen el calor suministrado.

Al término de la experimentación las probetas fueron preparadas para su análisis en el microscopio electrónico de barrido por las técnicas de espectrometría de rayos-x en dispersión de energía y de longitud de onda. Por dispersión de longitud de onda las muestras fueron analizadas detectando los rayos-x producidos por el plomo. En dispersión de energía se analizaron las distribuciones de los elementos químicos en las muestras. También se realizaron análisis químicos cuantitativos para obtener la distribución de densidades.

A partir de los resultados queda demostrado que al ser fundidos los materiales presentan convección la cual se lleva acabo en toda la columna del metal del líquido. Además se presenta la formación de circuitos por donde fluyen las partículas de los elementos que componen la aleación.

Así mismo, los resultados muestran que no es posible obtener aleaciones 100 % homogéneas químicamente, ya que es necesario evitar la formación de gradientes de temperaturas.

CAPITULO I

INTRODUCCION

En la fundición de metales y en la cristalización de sustancias, es importante aprovechar el acoplamiento entre el flujo del fluido y el crecimiento de la fase sólida. De este acoplamiento depende la morfología de la interfase sólido-líquido, la cual a su vez determina en buena medida la calidad de los materiales sólidos.

La morfología de esta interfase se debe a la inestabilidad de los gradientes de temperatura y composición que tienen lugar durante la solidificación.

Se acepta la coexistencia de dos tipos de inestabilidades que producen que el crecimiento de la fase sólida no se lleve a cabo en una sola dirección.

La primera inestabilidad es debida a la existencia de muy pequeños cristales y líquido en un medio poroso o esponjoso a través del cual el material líquido puede fluir.

Cuando el enfriamiento del líquido es por la parte inferior, es posible la aparición de flujos convectivos que hagan flotar los componentes ligeros de la mezcla antes que solidifiquen.

La segunda inestabilidad es debido a la aparición de canales, bandas o chimeneas, donde fluye el líquido orientado por la fuerza de gravedad y la diferencia de temperaturas.

Desde nuestro punto de vista, la aparición de esta segunda inestabilidad es una consecuencia natural de los flujos de convección que dan origen a los patrones de Bénard.

El objetivo de este trabajo es relacionar la convección con el crecimiento inestable de la fase sólida y ver su influencia en la homogeneidad química de los materiales sólidos.

Normalmente en la interfase líquido-sólido, la concentración del soluto en el lado líquido difiere de la del lado sólido. De hecho para ciertos gradientes de temperatura y densidades la concentración en exceso del soluto difunde hacia el líquido, el proceso de difusión es muy lento y aparecen inestabilidades que provocan segregación química, afectando así las propiedades del material.

CAPITULO II

ANTECEDENTES.

A través del tiempo el hombre ha tratado de predecir el comportamiento de la materia en cualquiera de sus estados en que este presente. Se ha preocupado por la transferencia y la transformación de la energía que puede ocurrir entre materiales¹ como resultado de una diferencia de temperaturas o variaciones de su estado de energía.

En nuestro estudio nos enfocaremos a caracterizar la segregación química que ocurren debido a la convección natural cuando existe un gradiente de temperatura en metales.

Desde principios de siglo, el físico francés Henri Bénard, fue el primero en observar la inestabilidad de los fluidos, al medir la conductividad térmica de líquidos entre dos caras paralelas comprimidas e isotérmicas².

Cuando los diferentes puntos de un fluido presentan temperaturas desiguales, las corrientes provocadas por las diferentes densidades transportan el calor por convección².

H. Bénard fué uno de los científicos pioneros en el campo de la hidrodinámica. Empleando el principio de la convección estudió el movimiento de líquidos viscosos, para lo cual diseñó un sistema, en el que calentaba al recipiente por abajo en forma controlada mediante placas perpendiculares a la dirección de la gravedad. En la figura 1 mostramos el equipo experimental que Bénard construyó para realizar sus observaciones; se trata de un cámara perfectamente aislada para evitar la pérdida de calor por las paredes laterales. Al calentar las placas mediante vapor de agua, entre la parte inferior del recipiente y la superior se establecía una diferencia de temperatura que se mantenía constante. En estas condiciones el calor genera una expansión del líquido, provocando que el fluido más caliente con una densidad menor, tienda a subir mientras que el que se encuentra en la superficie baja. En el experimento original, Bénard empleo una delgada capa de aceite de ballena, quedando la superficie en contacto con el aire. Para estudiar la convección utilizó como detector un corpúsculo sólido, de densidad igual a la del aceite, el cual tiene el mismo movimiento que el líquido que reemplaza, pues sus dimensiones eran despreciables; en este caso fueron granos de licopodio. Tomando placas fotográficas en distintos momentos, observó que bajo condiciones de calentamiento precisas el líquido subía por el centro del recipiente, mientras que el de la superficie descendía por los bordes.

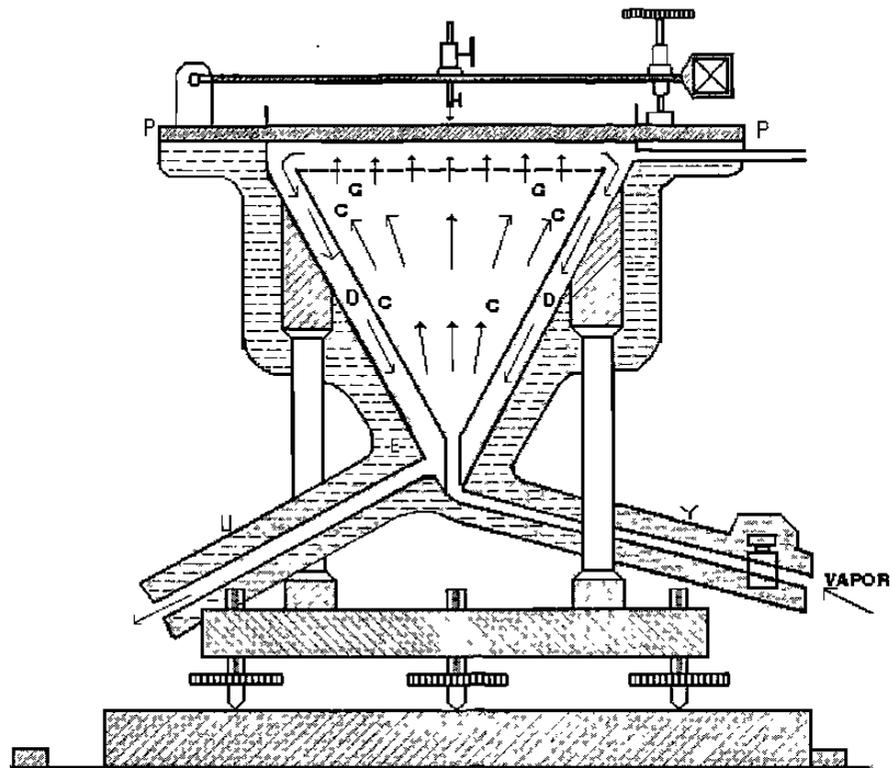


Figura 1 Máquina térmica de Bénard.

D = Cono exterior.

C = Cono interior.

P P = Placa condensadora de vapor.

U = Línea de retorno del vapor.

G = Pequeños agujeros de distribución equidistante.

Y = Línea de alimentación de vapor.

Como los granos de licopodio son de igual densidad que el fluido no se sumergen, por lo tanto, cuando Bénard añadió el polvo y esperó cierto tiempo observó la formación de celdas hexagonales con ejes verticales, como las de la figura 2.

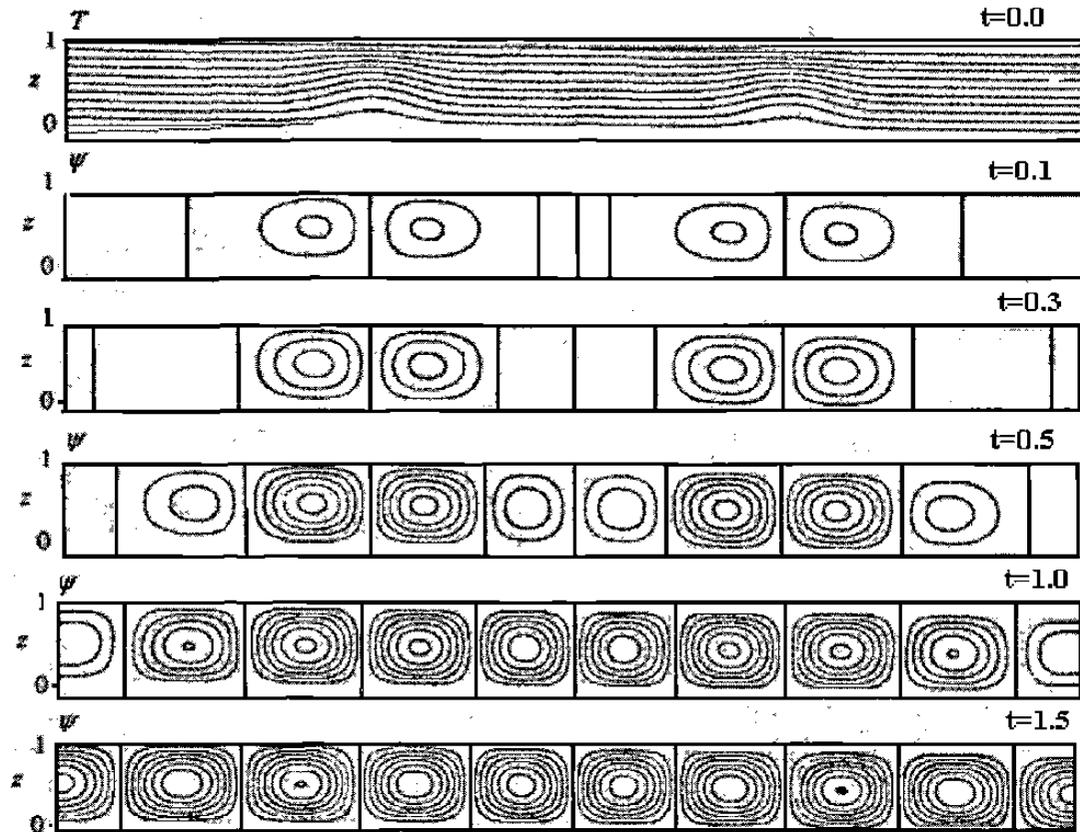


Figura 2 Formación de las celdas.

El observó que las diferentes soluciones estudiadas presentaban una misma orientación de flujos convectivos, en su honor se les llama patrones de Bénard.

Durante los últimos 60 años se han desarrollado nuevos estudios sobre este comportamiento de los materiales, tratando de modular la inestabilidad presente en las superficies del líquido.

Algunos ejemplos de los trabajos realizados, sobre la base de este fenómeno son:

- La débil segregación en co-polímeros bifásicos en función de la convección Bénard-Rayleigh³.
- Estudio de la formación de la espiral en los patrones de convección Bénard-Rayleigh⁴.
- La teoría de la estabilidad lineal en convección Bénard- Marangoni⁵.
- El desarrollo de problemas con convección de Bénard. Teoría Lineal⁶.
- La longitud-larga de onda superficial, tensión y direccionamiento de la convección Bénard. Experimentación y teoría⁷.
- La teoría planar de la convección Bénard-Rayleigh en cristales líquidos nematicos⁸.
- La teoría homotópica de la convección Bénard-Rayleigh en cristales líquidos nematicos⁹.

Estos trabajos intentan predecir la presencia de una inestabilidad en la capa superior del fluido en contacto con la atmósfera cuando se le suministra energía en la capa inferior. Se simula un avance frontal del calentamiento en la solución.

Debido al mal calentamiento de un fluido, se generan zonas concentradoras de calor¹⁰, que modifican el comportamiento de la materia creando en ellas perturbaciones (inestabilidades).

Estas inestabilidades se deben también a las diferentes densidades que componen la materia, y como nos encontramos inmersos en un sistema gravitatorio, se forman canales o chimeneas por donde fluyen las partículas, provocando así segregación de los elementos químicos que componen la materia.

En la convección o transferencia de calor en un fluido se reconocen dos regímenes: el laminar y el turbulento. Dentro del régimen turbulento existen grandes coeficientes de transferencia de calor, mientras que en el régimen laminar se presenta un orden parcial y un deslizamiento de capas en forma paralela, además los coeficientes de transferencia de calor son bajos. Nuestro trabajo se realizó dentro del régimen laminar el cual sufre modificaciones por causa de las inestabilidades, ya que estas ocasionan un direccionamiento del flujo así como una ondulación en la superficie del líquido.

Describiremos las segregaciones químicas presentes en el régimen laminar con tres gradientes térmicos en el calentamiento de metales líquidos.

La primera es un calentamiento donde la muestra es calentada por la parte inferior, las paredes y la parte superior de la muestra, sufren una pérdida de calor por convección natural al aire.

El segundo tipo, es un calentamiento por la parte inferior de la muestra y un enfriamiento por la parte superior, con lo que se crea un gradiente de temperatura importante entre la parte superior y la placa de calentamiento.

El tercero, es un calentamiento uniforme ya que la muestra es sometida en una mufla cerrada a un calentamiento uniforme.

Las muestras del metal fundido son enfriadas bruscamente en agua para así fijar sus microestructuras.

Las muestras son comparadas y analizadas entre si de manera de ver la influencia de la forma de calentamiento y la homogeneidad química de las muestras sólidas.

2.2.- PATRONES DE BÉNARD.

2.2.1.- Formación de los Patrones de Bénard

Durante el calentamiento de líquidos, se presenta en el régimen laminar un ordenamiento o direccionamiento. Este ordenamiento se le conoce como patrón de Bénard. Esta inestabilidad debida a la aparición de canales, bandas ó chimeneas donde fluye energía, es una consecuencia de la convección y de la fuerza de gravedad, que dan origen a la segregación química en presencia de un gradiente de temperatura.

Este fenómeno, se puede apreciar de una manera sencilla cuando se pone a calentar agua en un depósito.

Una placa de calentamiento como la de la figura 3, suministra energía a un contenedor y a un fluido. La transferencia de calor se lleva a cabo por conducción y por convección.



Figura 3 Arreglo experimental para el calentamiento por la parte inferior.

La conducción es a través de toda la placa de calentamiento hacia el recipiente y por toda la columna del líquido hasta la superficie libre. Existe convección natural dentro del recipiente hacia el fluido y de éste hacia la atmósfera. Así mismo existen pérdidas de calor, a través de las paredes del contenedor.

El líquido que está en contacto con el recipiente en la parte inferior eleva su temperatura ($T+\Delta T$) y como consecuencia de ello disminuye su densidad (ρ), por lo que tiende a subir.

Poco a poco crece la columna del líquido que va siendo calentada (figura 4), y origina un movimiento muy lento del mismo.

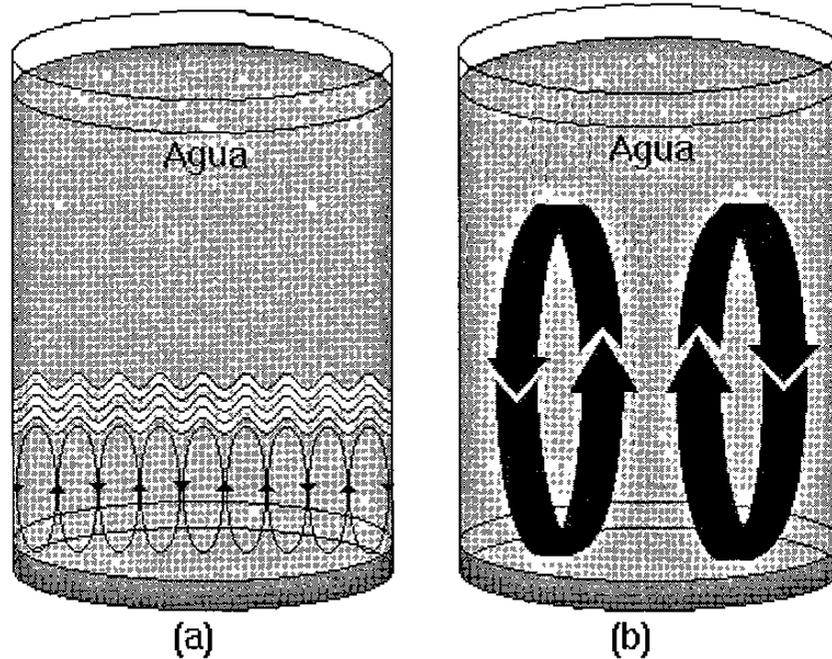


Figura 4 Formación de los patrones de Bénard.

Las capas intermedias superiores son desplazadas hacia abajo por su alta densidad y por el efecto de la gravedad, produciéndose así un circuito.

En el inicio del calentamiento se presentan varios circuitos, por lo que no se pueden apreciar los patrones debido al movimiento caótico como se muestra en la (figura 4a), después cuando toda la columna se calienta, los circuitos se pueden ver con mayor claridad, (figura 4b).

El movimiento del fluido en convección natural es el resultado de las fuerzas de flotación impuestas sobre el fluido cuando la densidad varía debido al proceso de calentamiento. Las fuerzas de flotación no estarían presentes si el fluido no sufriera la acción de la gravedad.

2.2.2.- Parámetros que Rigen la Formación de los Patrones.

Se acepta que los parámetros que regulan la formación de estos patrones son⁵⁻⁷:

El Gradiente Térmico.- Medida de la cantidad de energía en nuestro sistema, si disminuimos el gradiente térmico podemos desaparecer los patrones.

La Gravedad.- Esta fuerza origina el movimiento cíclico del líquido, su existencia produce que los materiales menos densos estén arriba de los más pesados.

Los materiales de baja densidad tienden a subir y los mas densos descienden al fondo del contenedor produciendo así un ciclo.

La Densidad.- Es una característica inherente a la materia, que es la masa por unidad de volumen.

La Geometría del Recipiente.- Los canales o chimeneas del fluido varían con la forma del recipiente.

2.3.-ANALISIS DE LAS MUESTRAS UTILIZANDO EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.

El microscopio electrónico de barrido es una herramienta que combina una alta resolución, con una gran profundidad de campo, ver tabla I. En el microscopio se pueden generar diferentes fuentes de información: electrones secundarios, electrones retrodispersados, rayos x, etc., todos son producidos cuando un flujo de electrones incidentes entra en contacto con la muestra. Se obtiene, en un solo aparato, información topográfica química en una escala microscópica donde la resolución es hasta de 2,000 Å.

Tabla I.- Características del microscopio electrónico de barrido.

	M.E.B.
Resolución	
- rutinaria	2,000 Å
- especial	5 Å
Profundidad de Campo	elevada
Preparación de la Muestra	muy fácil
Señal	varias imágenes
Aumentos	10 ³ X

Un haz de electrones con una tensión aceleradora de 5 a 50 kV es la fuente luminosa que se usa para analizar la muestra²⁰. Un sistema de lentes electromagnéticas forman un haz de electrones bastante fino. La bobina de barrido produce un barrido cuadrado en la superficie de la muestra, el mismo barrido es reproducido sobre un tubo catódico T en perfecta sincronización. El haz de electrones que choca contra la muestra produce una emisión de señales, que es recolectada por sistemas de detección. Ver figura 5.

Las señales producidas en la muestra son de electrones secundarios, retrodispersados y rayos-x. A partir de estas señales se obtiene una imagen característica de la muestra²². Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra, esta puede reaccionar de tres formas diferentes:

a).- La primera de ellas es cuando el electrón del haz de luz incidente choca contra otro electrón de las últimas capas de valencia del átomo provocando la desviación del electrón incidente. A estos electrones se le conoce como retrodispersados.

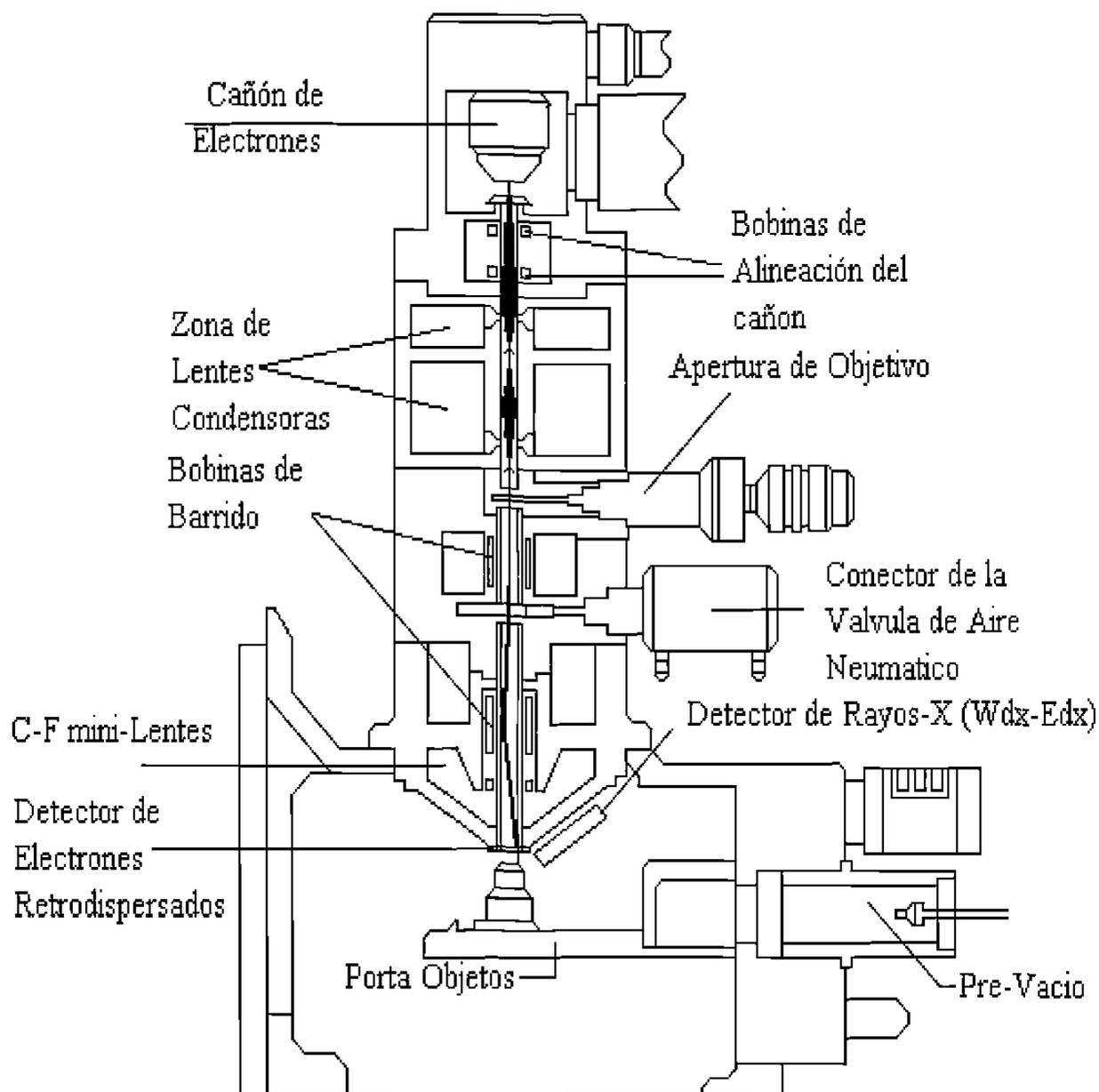


Figura 5 Principales partes del microscopio electrónico de barrido.

b).- La segunda forma de reaccionar es cuando el electrón incidente llega a la superficie de la muestra con gran fuerza y es capaz de arrancar un electrón de las ultimas capas del átomo.

El lugar de éste, es ocupado por el electrón incidente, este electrón que es desalojado de su orbital se le conoce como electrón secundario. Existe un detector que ayuda a la formación de imágenes características de la muestra.

c).- Otra señal surge cuando el electrón del haz de luz incide llega a la muestra base plomo provoca una ionización del átomo de plomo. En el momento que ocurre el salto del electrón existe un desprendimiento de energía en forma de rayo-x. Esta energía es igual a la diferencia de las energías de los orbitales del átomo. Existen dos métodos de detección de estos rayos-x, el método de detección en dispersión de longitud de onda y el de dispersión de energía.

El método de detección en dispersión de longitud de onda compara la longitud de onda con que emite el átomo de plomo con la de un patrón y determina cuantitativamente la cantidad del elemento presente en la muestra analizada. La longitud de onda es característica del número atómico del átomo de plomo. Para este análisis se trabajó el microscopio electrónico con una tensión aceleradora de 20 KV

El método de dispersión de energía, cuantifica la intensidad de los rayos-x emitidos por los átomos y los distribuye entre uno de los 30 canales dependiendo de la intensidad de energía con que llegue. Posteriormente la señal es cuantificada y procesada.

Este método sirve para analizar las distribuciones de los elementos, además, proporciona un espectro de energía de los átomos que componen la muestra y se obtiene así un análisis semicuantitativo de los elementos.

CAPITULO III

TRANSFERENCIA DE MASA Y ENERGIA

3.1.- Introducción.

En el problema que nos interesa existen dos tipos de transferencia de calor, por conducción y por convección. En este trabajo la convección es la más importante de las dos ya que gobierna toda la experimentación que se realizó. Las bajas temperaturas en las que se realizó la experimentación nos permiten despreciar la transferencia por radiación.

CONVECCIÓN: La transferencia de calor debida a la convección se relaciona con el cambio de energía que ocurre entre la superficie y un fluido adyacente. Por convección se entiende el proceso de transporte de calor que tiene lugar en virtud del movimiento de las moléculas del líquido o gas en el espacio, desde una región a otra de distinta temperatura¹². La convección sólo es posible en un medio fluido, en el cual el transporte de calor está directamente ligado al movimiento del propio fluido. Las propiedades físicas que afectan la transmisión de calor son las siguientes: conductividad térmica λ , calor específico c , densidad ρ , difusividad térmica a , y viscosidad μ ; como ya sabemos éstas son función de la temperatura¹.

La naturaleza del flujo durante la convección influye considerablemente en el proceso de transmisión de calor, esto es, dependiendo de el tipo de flujo que se tenga se puede disminuir o aumentar la transferencia. En nuestros experimentos el flujo que gobierna la convección es el laminar. El flujo laminar se debe a las bajas temperaturas a las se realizaron las pruebas. Laminar se define al movimiento de partículas que tienen una trayectoria paralela entre sí.

3.2.- Cálculo de la Temperatura en Muestras Expuestas a Diferentes Gradientes Térmicos.

Después de que el metal ha sido fundido se puede hacer un cálculo teórico para estimar la distribución de temperaturas en función de la altura.

Hay dos formas de obtener la distribución de la temperatura, la primera es la solución analítica, que permite la determinación de la temperatura en cualquier punto del sistema. La segunda solución numérica permite determinar la temperatura sólo en ciertos puntos¹¹.

La solución numérica consiste en subdividir el sistema en pequeñas regiones y asignar a cada una un punto de referencia en su centro, figura 6. El punto de referencia suele denominarse punto nodal, y el agregado de puntos se conoce como red nodal o malla. Cada nodo representa una medida de la temperatura promedio de la región¹². La precisión depende en gran medida del número de puntos nodales designados. Si este número es grande (una malla fina), es posible obtener soluciones muy precisas.

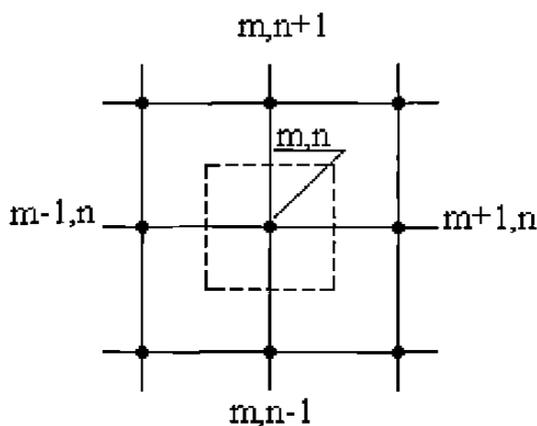


Figura 6 Esquema de la discretización de la pieza en mallas nodales.

La temperatura de un nodo al centro $T_{m,n}$ se calcula a partir de:

$$-k\Delta y \left(\frac{T_{m,n} - T_{m+1,n}}{\Delta x} \right) - k\Delta y \left(\frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \right) - k\Delta x \left(\frac{T_{m,n} - T_{m,n+1}}{\Delta y} \right) - k\Delta x \left(\frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} \right) = 0$$

donde:

k = coeficiente de conductividad

h = conductividad del aire

promedio.

$T_{m,n}$ = Temperatura del punto

$T_{m,n+1}$ = Temperatura del nodo

deseada.

continuo.

Δx = discretización en el eje x

Δy = discretización en el eje y

La temperatura de un nodo al extremo $T_{m+1,n}$ se calcula a partir de:

$$-k\Delta x \left(\frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} \right) - k\Delta y \left(\frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \right) - k\Delta x \left(\frac{T_{m,n} - T_{m,n+1}}{\Delta y} \right) - h\Delta y (T_{m,n} - T_{\alpha}) = 0$$

La temperatura de un nodo en esquina se puede calcular con la siguiente expresión:

$$-k\Delta x \left(\frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} \right) - k\Delta y \left(\frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \right) - h\Delta y (T_{m,n} - T_{\alpha}) - h\Delta x (T_{m,n} - T_{\alpha}) = 0$$

Los parámetros que rigen el cálculo de la temperatura son:

Para el plomo se tiene un coeficiente de conductividad térmica es de 31 W/mK a 227°C.

Para el estaño se tiene un coeficiente de conductividad termica de 62 W/mK a 127°C.

El coeficiente de conductividad promedio es:

$$K = K_{pb} X_{pb} + K_{sn} X_{sn}$$

Donde:

K_{pb} = Conductividad térmica del plomo.

K_{sn} = Conductividad térmica del estaño.

X_{pb} = Fracción en peso de plomo.

X_{sn} = Fracción en peso de estaño.

$$K = (0.60)(31.4) + (0.40)(62.2) = 43.72 \text{ W/m K}$$

Conductividad del aire:

a 25°C = 0.0262 W/m K

a 0°C = 0.0240 W/m K

En el caso donde existe un gradiente de temperatura de 200°C , la probeta es calentada por la parte inferior y enfriada con hielo la discretización tiene los valores siguientes: $\Delta x = 2 \text{ mm}$, $\Delta y = 2 \text{ mm}$.

Para el caso donde no existe un gradiente de temperatura significativa, la probeta es calentada por la parte inferior y enfriada al aire en la parte superior, la discretización toma valores de: $\Delta x = 2 \text{ mm}$, $\Delta y = 4 \text{ mm}$.

El esquema dentro del cual se pueden apreciar las condiciones a las cuales se efectuarón los cálculos estan representados en la figura 7.

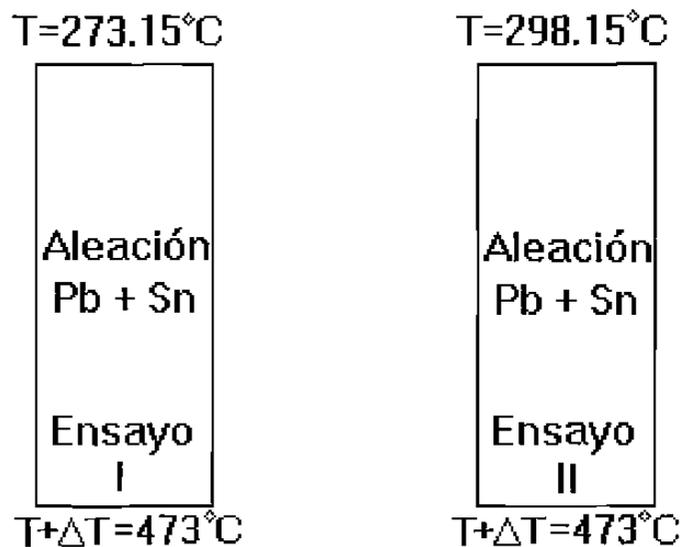


Figura 7 Esquemmatización de los ensayos para el cálculo de las temperatura esperadas.

Una consideración dentro del cálculo de las temperaturas en las muestras es, que la atmósfera circundante a las paredes de la probeta tiene una temperatura de 25°C en ambos casos. Además, las paredes del contenedor de vidrio son de un espesor muy delgado y se considera que no absorben calor. El calor se disipa al aire.

Dentro de nuestro análisis obtuvimos las siguientes temperaturas, figura 8.

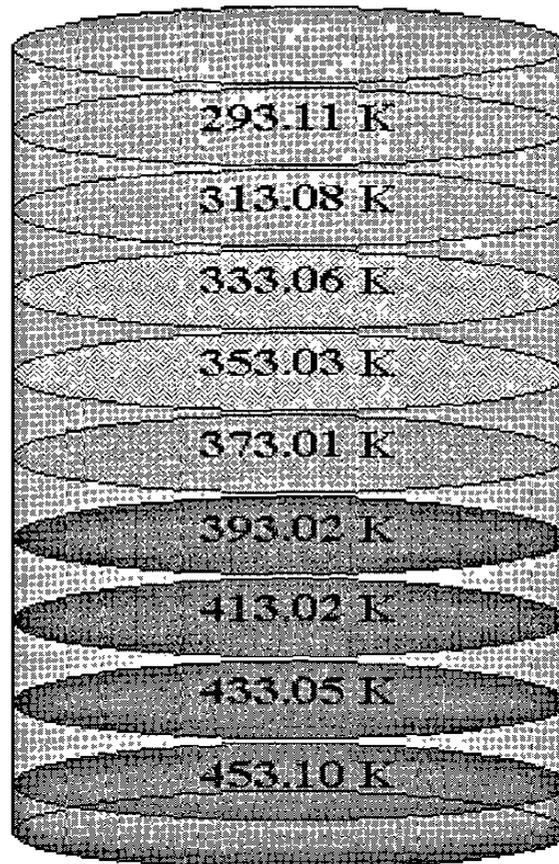


Figura 8 Distribución de temperatura en un sistema con un gradiente térmico de 200°C .

Como el contenedor es cilíndrico existe una simetría en las temperaturas de la muestra como se puede observar en las figuras 9 y 10.

Durante la experimentación, el metal líquido que entra en contacto con la placa a alta temperatura eleva su temperatura y sufre una expansión térmica.

Cuando no existe un gradiente de temperatura, es más difícil que exista movimiento, para este caso, cuando existe solo convección libre al aire se obtienen las siguientes temperaturas figura 9.

La temperatura de 200°C es en la base de la aleación metálica y la temperatura de 198°C es en la superficie libre de la muestra que tiene convección natural al aire.

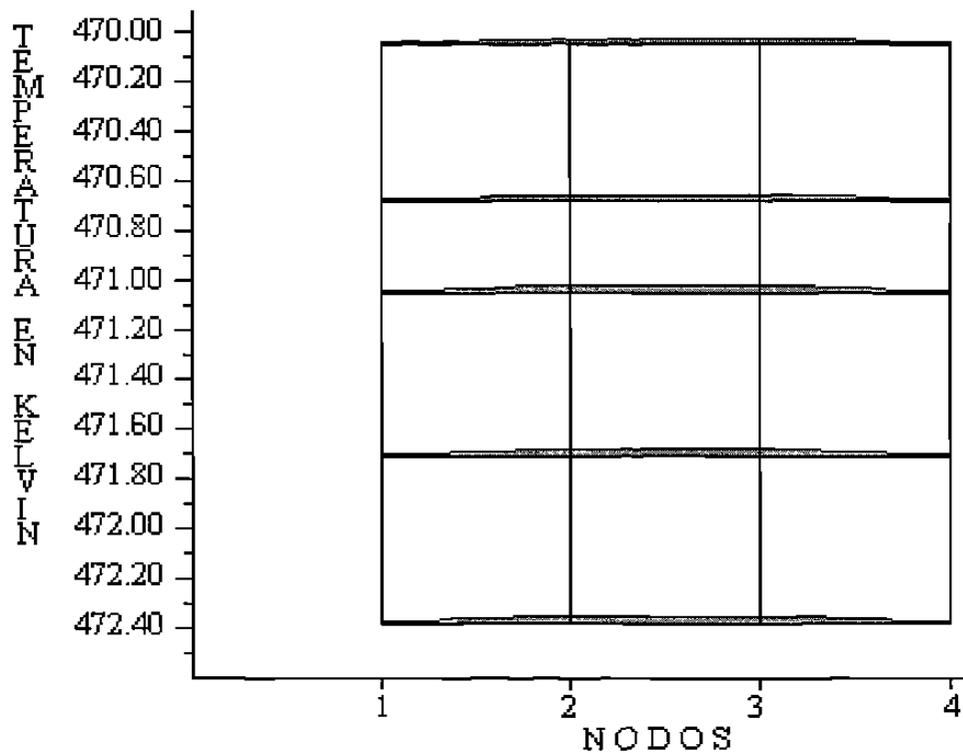


Figura 9 Distribución de temperatura con convección libre al aire.

La distribución de temperaturas en la pieza cuando existe un gradiente térmico de 200°C entre la base y la parte superior, se muestra en la figura 10 además, se aprecia la isometría en las temperaturas, debido a la geometría del recipiente que contenía a la muestra.

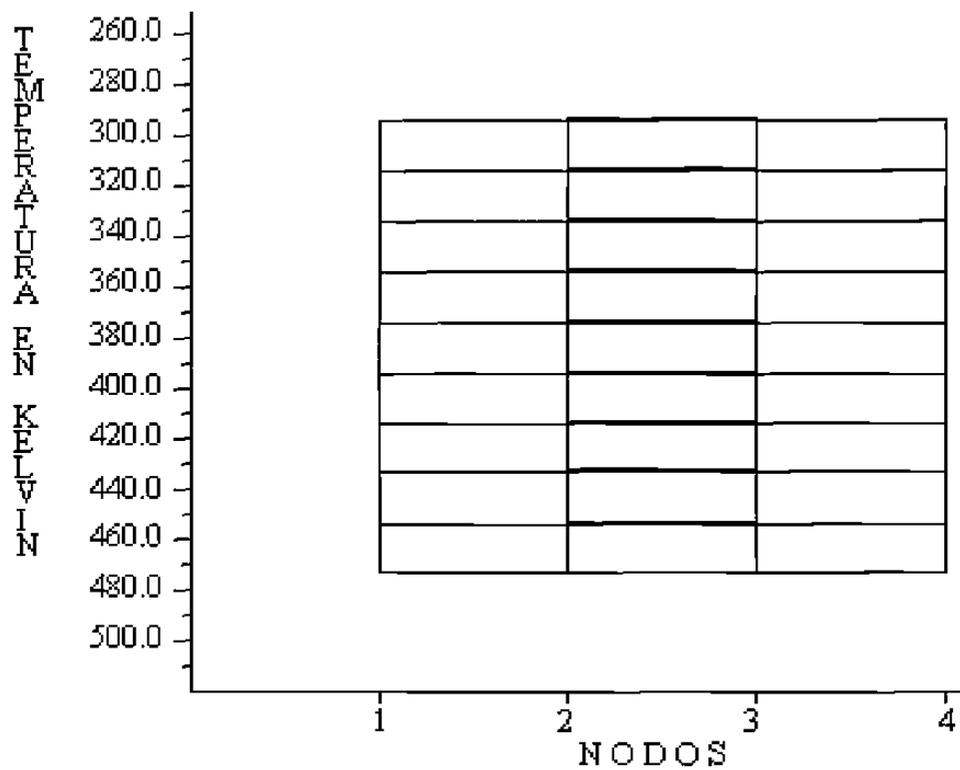


Figura 10 Distribución de temperaturas con un gradiente térmico provocado por un calentamiento por debajo y enfriamiento por arriba.

CAPITULO IV

EXPERIMENTACION

La formación de flujos en las aleaciones metálicas fundidas indican la existencia del fenómeno de convección.

Los gradientes de temperatura direccionan el flujo dentro del líquido debido a variaciones en la densidad de la aleación estudiada.

Las aleaciones bifásicas Plomo-Estaño fueron calentadas hasta ser fundidas.

Para la aleación Pb-Sn en la que se tiene una relación 62-38 que corresponde al punto eutéctico, la temperatura de fusión es 183°C como se observa en el diagrama de fase de la figura 11

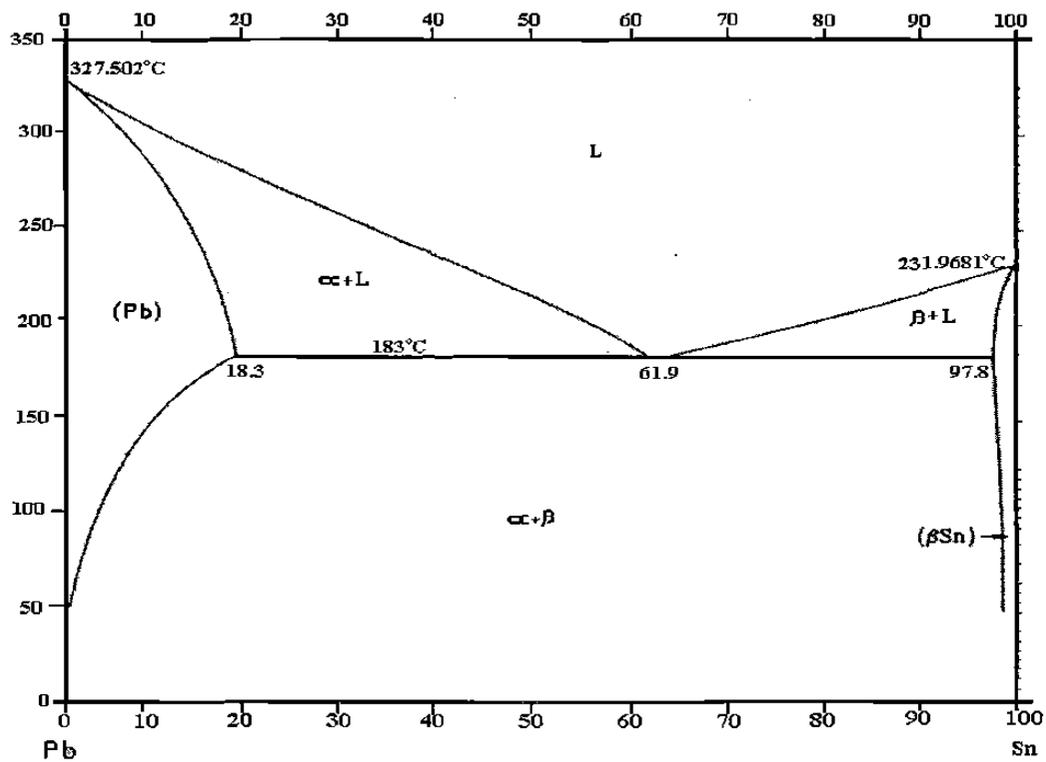


Figura 11 Diagrama de fase plomo-estaño.

Una vez en estado líquido se aplicaron tres condiciones distintas de calentamiento para provocar flujos convectivos diferentes. Estos flujos convectivos provocan diferentes segregaciones químicas.

4.1.- Equipo y Material para la Experimentación

En la tabla II se enlistan los equipos y materiales utilizados en la experimentación.

Tabla II.- Lista de materiales utilizados en los experimentos.

1.- Placa de Calentamiento. Marca Lindberg Modelo 5306	6.- Deposito de Acero. Capacidad 20 Litros
2.- Termómetro de Mercurio. Marca Brannan Rango de -5 a 400 ⁰ C Precisión de 2° C Error ± 2° C	7.- Contenedor de Vidrio. 0.8 cm de diámetro por 2.20 cms de altura
3.- Placa de Aluminio. Dimensiones: ½ * 8 * 8 plg.	8.- Termómetro Digital. Marca Extech Modelo 421509 Resolución 0.1° Error 0.05°
4.- Estaño. (Sn) Por ciento de pureza 99.9	9.- Horno de Resistencia Eléctrica. Marca Lindberg Modelo 51894 Error ± 5° C
5.- Plomo. (Pb) Por ciento de pureza 99.8	

4.2.- Desarrollo Experimental

En la tabla III se puede apreciar el tipo de pruebas a las que se sometio la aleación.

Aleación	Pruebas con Gradiente de Temperatura de 200°C	Pruebas con Gradiente de Temperatura de 2°C	Pruebas sin Gradiente de Temperatura
62% Pb-38% Sn	X	X	X

Tabla III.- Experimentos realizados a la aleación.

La primer prueba de calentamiento fué provocando una diferencia de temperatura de aproximadamente 200°C entre la base del calentador y su parte superior que se encuentra a una temperatura del agua congelada. Esto se llevó acabo de la manera siguiente: ver figura 12, la placa de calentamiento proporciona la energía suficiente para llevar la aleación metálica al estado líquido, el calor atraviesa una placa de aluminio, la cual se encarga de uniformizar el frente de calor evitando la existencia de zonas concentradoras de energía que inestabilicen los flujos.

En su avance frontal el calor llega al depósito que contiene la muestra y es direccionado hacia la zona más fría del sistema, ya que se encuentra a una temperatura de 0°C. Durante las pruebas la temperatura de esta zona siempre se mantuvo constante ya que era alimentada periódicamente con hielo, creándose así el diferencial de temperatura.

Es de esperarse que entre los componentes que constituyen las muestras, los más pesados (los del plomo) tienda a descender y los más ligeros (los del estaño) tiendan a ascender.

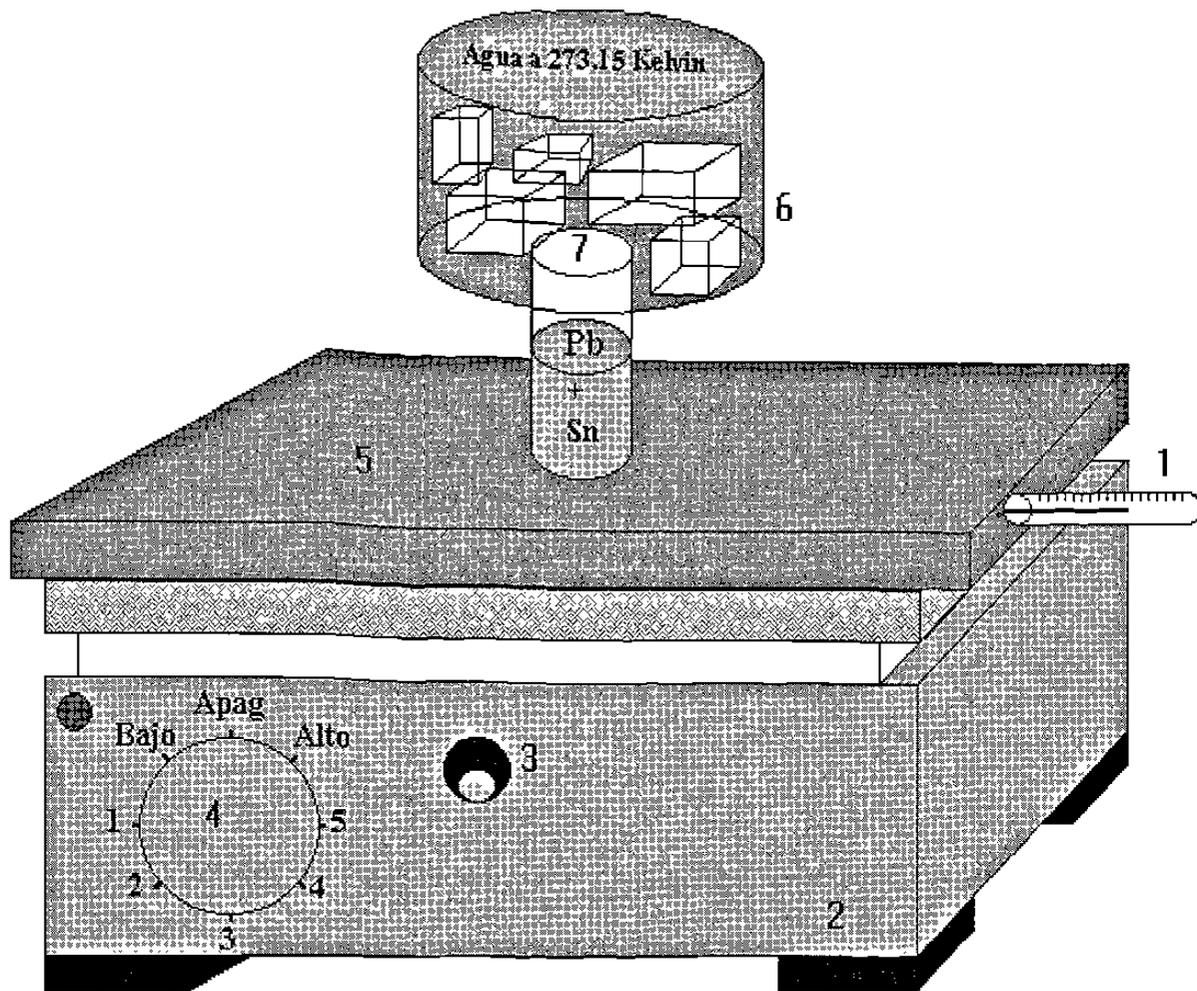


Figura 12 Arreglo experimental para provocar un gradiente de temperatura usando hielo.

Componentes del arreglo experimental

- 1.- Termometro de mercurio.
- 2.- Placa de calentamiento.
- 3.- Interruptor de encendido.
- 4.- Controlador de temperatura.
- 5.- Placa de aluminio.
- 6.- Cubierta de hielo.
- 7.- Aleación metálica.

La segunda prueba fué calentando también por debajo del contenedor, mientras que la parte superior se mantiene a la temperatura del aire.

Después de alcanzar la temperatura de fusión, la parte inferior de la muestra se mantiene a 200°C y la energía que se suministra al sistema se pierde por convección natural a través de las paredes del contenedor y por la superficie libre del líquido hacia el aire.

El arreglo experimental para esta forma de calentamiento se esquematiza en la figura 13.

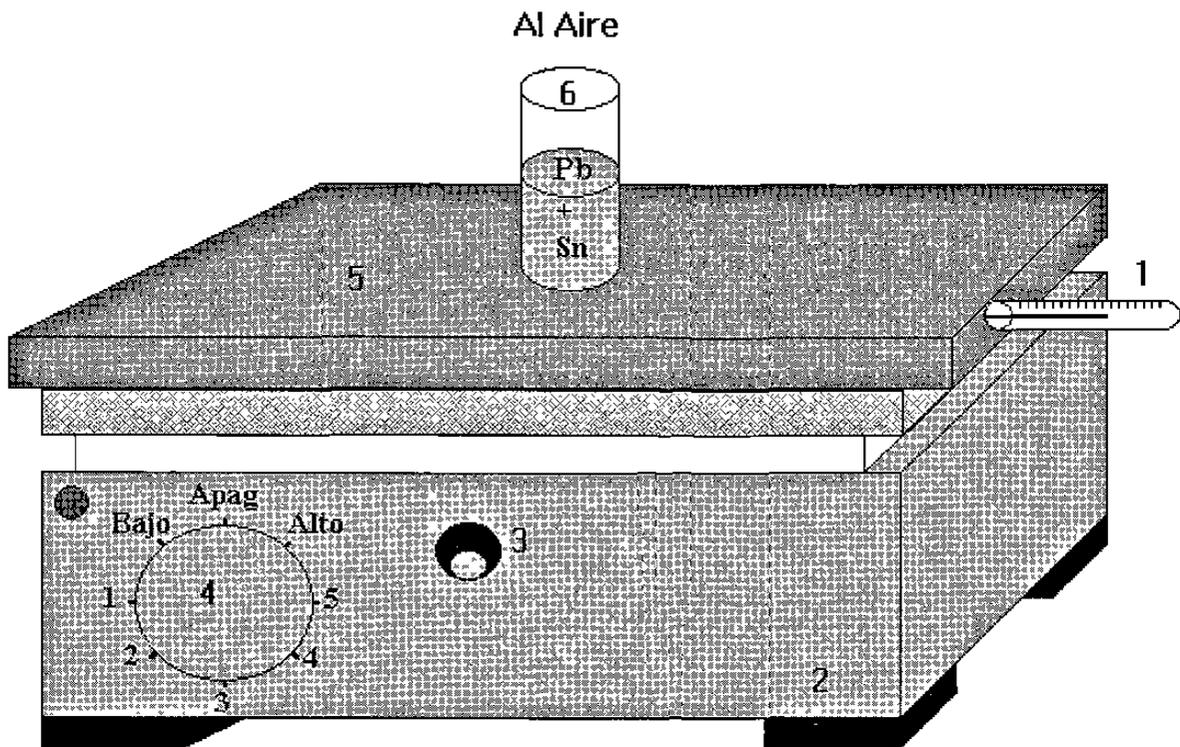


Figura 13 Arreglo experimental para el calentamiento al aire.

Componentes del arreglo experimental

- 1.- Termometro de mercurio.
- 2.- Placa de calentamiento por resistencia eléctrica.
- 3.- Interruptor de encendido.
- 4.- Controlador de temperatura.
- 5.- Placa de aluminio.
- 6.- Aleación metálica.

La tercer prueba de calentamiento consiste en calentar el contenedor con la aleación en una mufla cerrada y así uniformizar la temperatura en la aleación fundida. El calor que suministra un horno se puede considerar uniforme en toda la cámara de calentamiento, por lo tanto, no existen gradientes de temperatura como los formados en las pruebas antes descritas. Al no haber gradiente de temperatura no existen tampoco corrientes de convección por donde se disipe el calor suministrado. Después de encender el horno se dio tiempo suficiente para que la cámara alcanzara la temperatura de 200°C . Luego se procedió a colocar la muestra en el interior de la mufla hasta fundir la aleación. En la figura 14 se muestra el arreglo experimental de como se llevó a cabo la prueba.

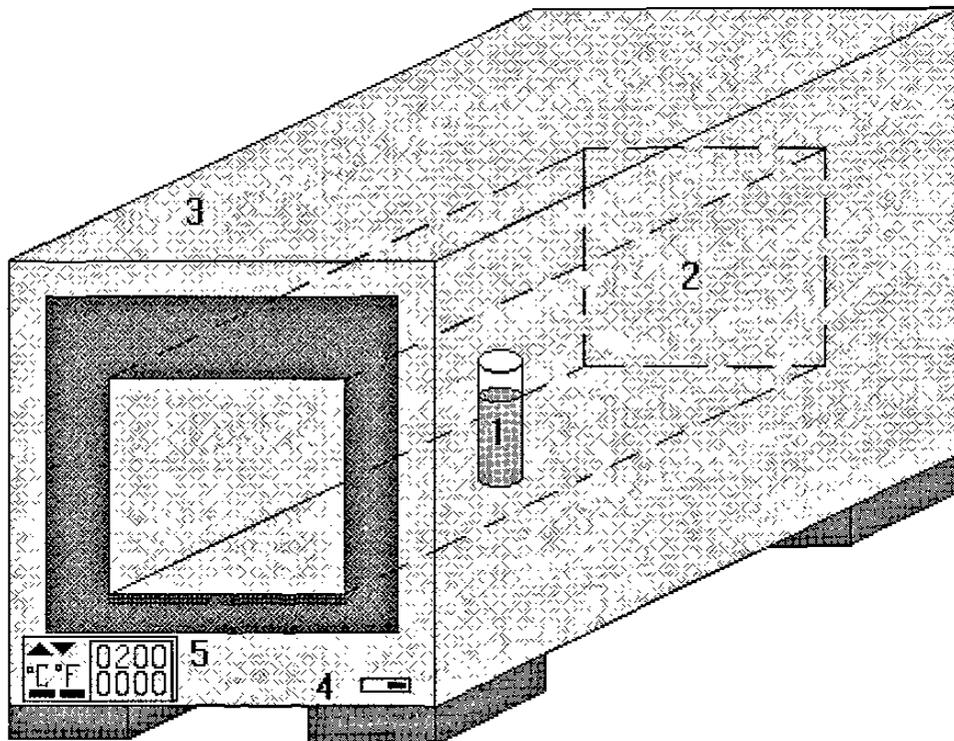


Figura 14 Calentamiento uniforme.

Componentes del arreglo experimental.

- 1.- Aleación metálica.
- 2.- Cámara de calentamiento.
- 3.- Horno de resistencia eléctrica.
- 4.- Interruptor de encendido.
- 5.- Controlador de temperatura.

En todos los casos después de que las aleaciones metálicas eran fundidas se mantuvieron éstas en los diferentes arreglos experimentales durante 120 minutos.

Al término de cada ensayo las muestras fueron enfriadas bruscamente en un depósito con agua a temperatura ambiente. Para **grabar** la convección que se presenta en cada experimento.

Las muestras así obtenidas fueron observadas por Microscopía Electrónica de Barrido para después hacer un análisis cuantitativo de las imágenes y observar la distribución de los elementos de las aleación y su microestructuras.

Con esta técnica es posible determinar la composición en regiones tan pequeñas como de unas cuantas micras. En la tabla IV se dan las condiciones en la que se opero el microscopio para las dos aleaciones.

Tabla IV.- Condiciones de operación del microscopio electrónico de barrido.

Aleación	Cristal utilizado	Voltaje utilizado	Nivel de Energía	Elemento analizado
Plomo-Estaño	PET ¹	20 kV	Mα	plomo

PET¹.- Pentaery Thritol

CAPITULO V

RESULTADOS

El objetivo de este estudio es demostrar que la convección presente durante la fusión de aleaciones metálicas trae como consecuencia la inhomogeneidad química del metal en estado sólido. Como los experimentos no son independientes del sistema gravitatorio éste ejerce su influencia modificando el movimiento ascendente de los elementos químicos. La precipitación de los elementos más pesados es debida a la gravedad, lo que trae como consecuencia nuevamente inhomogeneidad química.

La geometría del contenedor provoca que el movimiento del fluido adopte formas particulares, variando con la altura del nivel de la aleación en el recipiente.

Antes de presentar los resultados de este trabajo, vale la pena recordar que cuando una aleación de composición eutéctica como la del plomo-estaño se enfría lentamente al aire hasta una temperatura inferior al punto eutéctico, una de las fases del eutéctico crece. Suponiendo que esa fase es α , durante el crecimiento el líquido se enriquece de β , aumentando así el sobre enfriamiento del líquido con respecto a la fase β . Tomando a la fase α como un buen catalizador de nucleación, en su superficie, aparece la fase β , que crece a lo largo de α ¹⁵. Llega el momento en que ambas fases alcanzan un tamaño que les permite formar un frente común y es entonces cuando puede ocurrir el crecimiento del grano eutéctico, ver figura 15. El crecimiento puede ocurrir en varias direcciones y las fases forman un bicristal eutéctico que es llamado

grano eutéctico. En un líquido contenido dentro de una cavidad, en las zonas más sobre enfriadas cerca de las paredes aparecen granos eutécticos orientados aleatoriamente, la convección del líquido ocasiona esto. Se sabe que las fases crecen perpendicularmente al frente de la solidificación^{15, 21}.

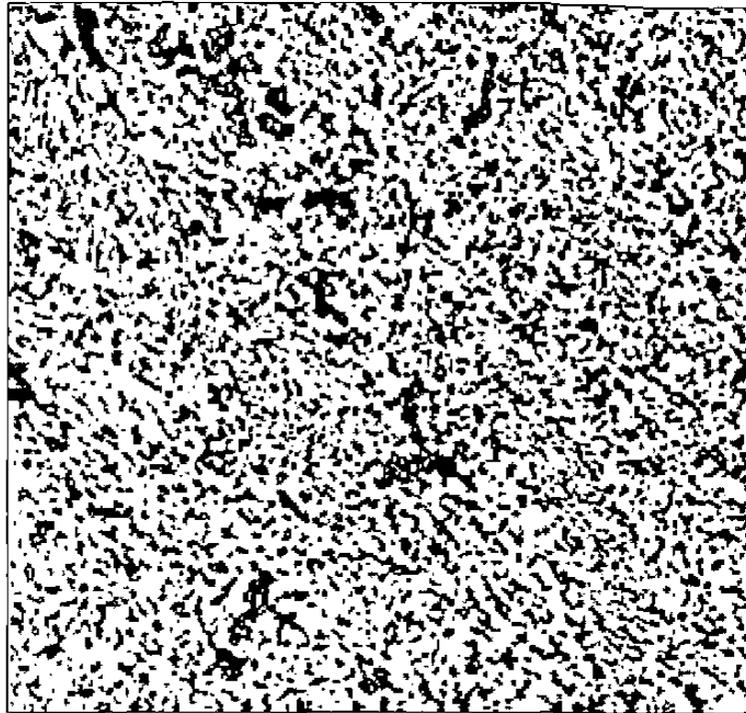


Figura 15 Solidificación típica de una aleación eutéctica plomo-estaño, fotografía tomada en un microscopio metalográfico a una magnificación de 375X.

Durante el crecimiento del eutéctico la fase α rechaza los átomos de soluto β , mientras la fase β rechaza átomos de soluto de α . Bajo condiciones de crecimiento estable, el flujo de átomos rechazados del elemento A es igual al flujo de átomos rechazados de elemento B. Esto hace posible el establecimiento de un gradiente de concentración constante en el líquido del frente de solidificación y establece así un proceso de difusión como mecanismo de transporte, lo cual determina a su vez la distancia interfásica, ver figura 16.

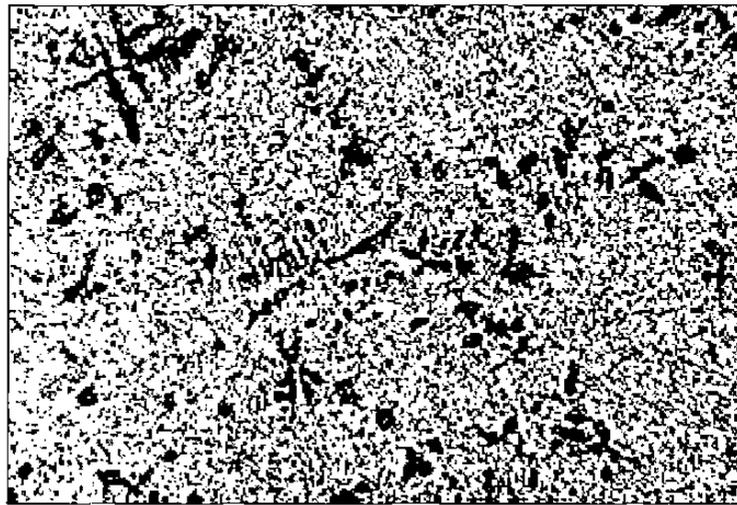


Figura 16 Solidificación de una aleación con un enfriamiento convencional, la fotografía fue obtenida a una magnificación de 150X.

5.1.-Distribución Elemental Química en las Muestras Estudiadas.

Para las diferentes muestras se realizaron mapeos químicos elementales en diferentes zonas tal como se indica en la figura 17.

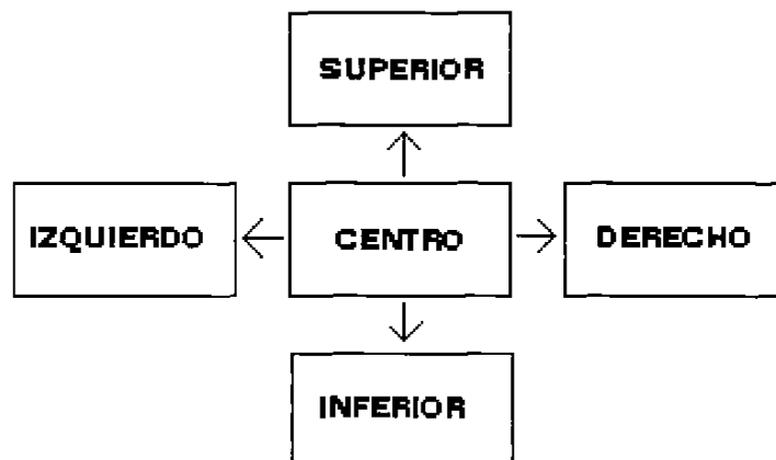


Figura 17 Mapeos en las muestras.

En la figura 18 se presenta la distribución característica de las composiciones químicas de los elementos constituyentes de las aleaciones, cuando las muestras se mantuvieron 2 horas con un gradiente térmico de 200°C y son enfriadas rápidamente en agua. Además de notar la inhomogeneidad química entre las columnas al centro y los extremos. Es la parte de abajo la que presenta una menor densidad en todas las muestras. Las diferencias de densidad son del orden de 0.4 entre la zona menos densa y las más densas. La parte superior de esta imagen no muestra una gran inhomogeneidad por el orden de largo alcance que prevalece en ella, ya que se encuentra a una temperatura de 0°C.

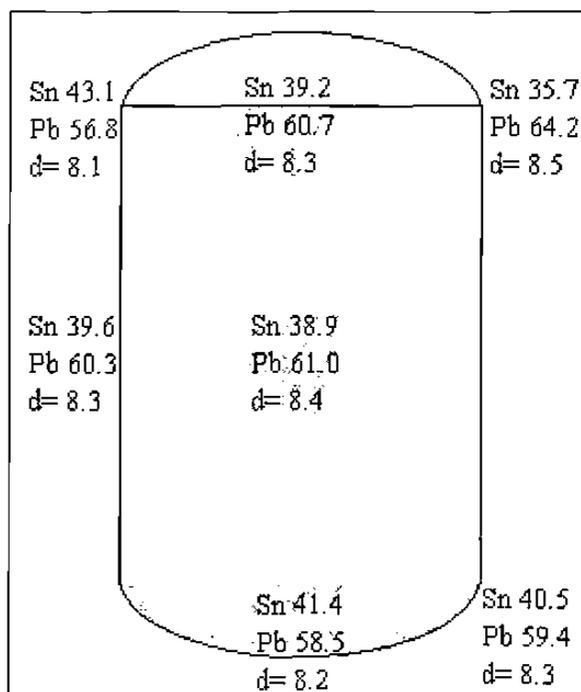


Figura 18 Distribución de las densidades [gr/cm^3] de una aleación con gradiente de temperatura de 200°C.

En la figura 19 se presenta la distribución elemental característica de las muestras que se mantuvieron con un gradiente de temperatura entre su parte inferior y superior de 2°C. Nuevamente las aleaciones fundidas se mantuvieron 2 horas y luego fueron enfriadas bruscamente en agua, para así fijar las distribuciones químicas como la que se presenta.

Se notó que con respecto a las muestras con un gradiente térmico mayor, la densidad en la parte baja de las muestras era de 0.2 mayor. En esta imagen se alcanza apreciar una alta inhomogeneidad química en la parte superior, ya que existe una mayor convección en toda la columna del metal líquido. La densidad esta en gr/cm^3 .

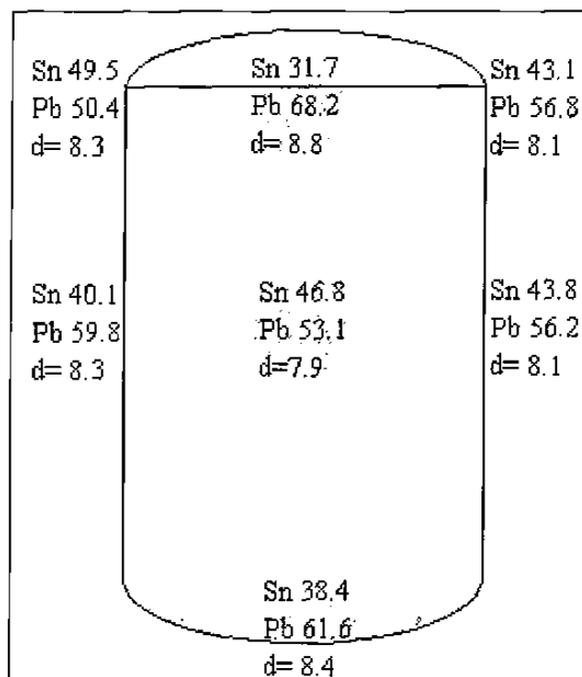


Figura 19 Distribución química de una aleación con un gradiente de temperatura de 2°C.

Muestras mantenidas a 200°C dentro de un horno de resistencia eléctrica durante 2 horas, y después enfriadas bruscamente en agua tienen distribuciones químicas con densidades mayores en la parte de abajo, como se muestra en la figura 20. En las muestras con gradientes térmicos la densidad es menor debido seguramente a la fuerza de flotación impuesta por los gradientes térmicos existentes.

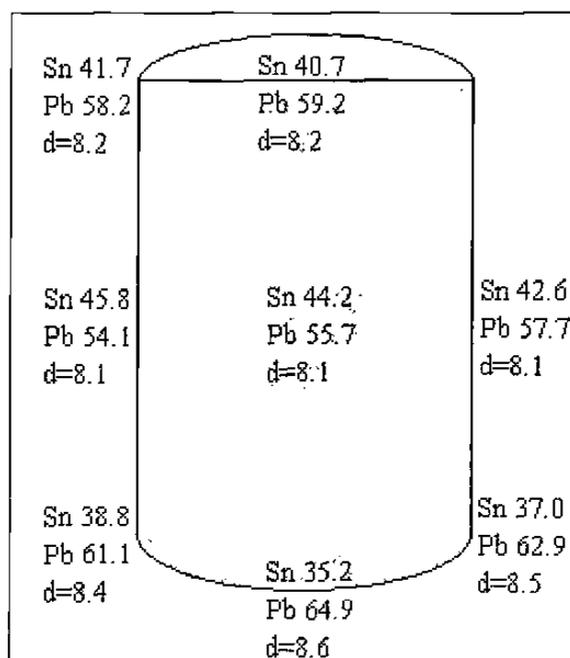


Figura 20 Distribución de elementos químicos donde existió un calentamiento uniforme, la densidad esta en gr/cm^3 .

La imagen de la figura 21 es característica de los experimentos donde la parte superior de la muestra se mantuvo a una temperatura de agua congelada y la parte inferior a 200°C. Aquí se aprecia un orden de largo alcance en la microestructura de la muestra ya que se encuentra a una temperatura de 0°C, también se ve que el tamaño de las celdas es mayor que el de la figura 24 que fue tomada en la parte inferior de este mismo experimento, esto se debe a la alta temperatura que ahí se alcanzó. La fotografía fue tomada con el microscopio electrónico de barrido en un corte transversal superior de la muestra.

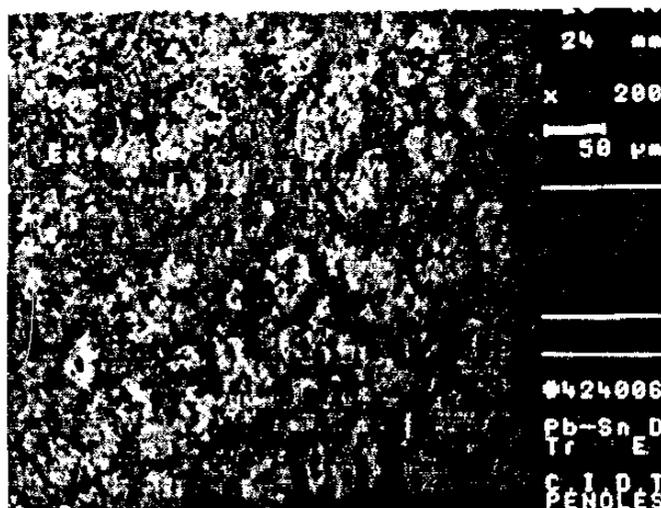


Figura 21 Imagen por microscopía electrónica de barrido de la microestructura característica de la zona mantenida a 0°C, fotografía obtenida por dispersión en longitud de onda.

La fotografía 22 es representativa de los experimentos donde se presentó una convección al aire en la parte superior de las muestras y la temperatura en la base fue de 200°C.

Esta fotografía fue tomada en un microscopio electrónico de barrido en un corte transversal en la parte superior de la muestra, en la cual se aprecia un tamaño de celda muy parecido al de la figura 25 que corresponde a las microestructuras que se observan en las partes inferiores de las muestras, ya que las dos se mantuvieron a temperaturas muy próximas y pertenecen al mismo tipo de experimento.

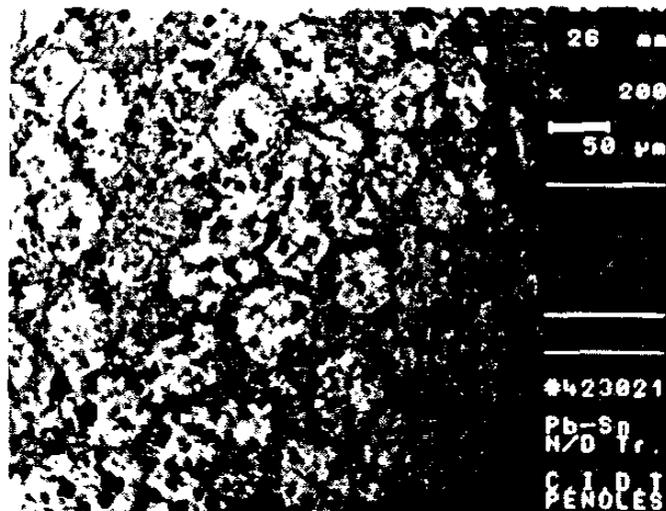


Figura 22 Distribución química en una aleación con gradiente de temperatura de 2°C, fotografía obtenida por dispersión en longitud de onda.

La figura 23 fue tomada en la parte superior transversal de una muestra de Pb-Sn, en el microscopio electrónico de barrido, la imagen es característica de un calentamiento uniforme proporcionado por un horno de resistencia eléctrica; en ella se aprecia la formación de celdas producto de la convección.

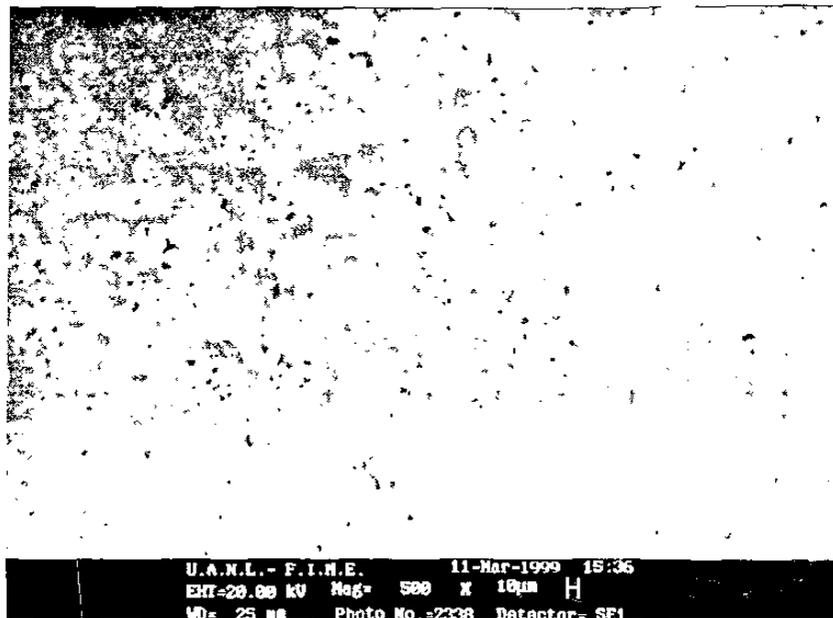


Figura 23 Distribución de elementos en una aleación que se mantuvo en un calentamiento uniforme por 2 horas, fotografía obtenida por electrones secundarios.

El siguiente bloque de fotografías fue tomado en la parte transversal inferior de las diferentes muestras expuestas a diversos gradientes.

La figura 24 fue tomada en la parte inferior de una muestra, con un microscopio electrónico de barrido, pertenece al experimento donde existió un gradiente de 200°C . Se puede observar la baja densidad que se mantiene en la parte inferior de la probeta debido a la alta temperatura que prevalece en esa zona, además un tamaño de celda menor que en la figura 21 que pertenece a la parte transversal superior y pertenecen al mismo tipo de experimento.

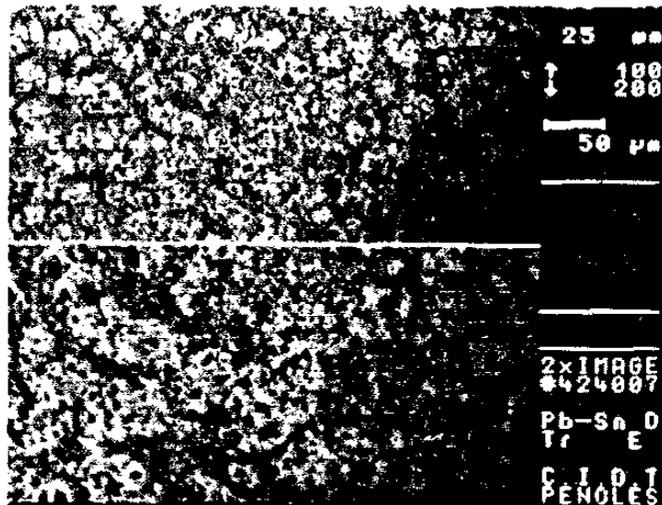


Figura 24 Fotografía de una región que se mantuvo a alta temperatura, la imagen inferior es de una magnificación de 2X de la imagen superior, la fotografía fue obtenida por dispersión en longitud de onda.

La imagen 25 pertenece al experimento donde la parte superior de la aleación se mantuvo en convección natural al aire con una duración de 2 horas, la fotografía fue tomada en la parte inferior de la muestra, además se aprecia un tamaño de celda igual al de la figura 22, señal de que la temperatura de la parte superior e inferior de la muestra son muy parecidas.

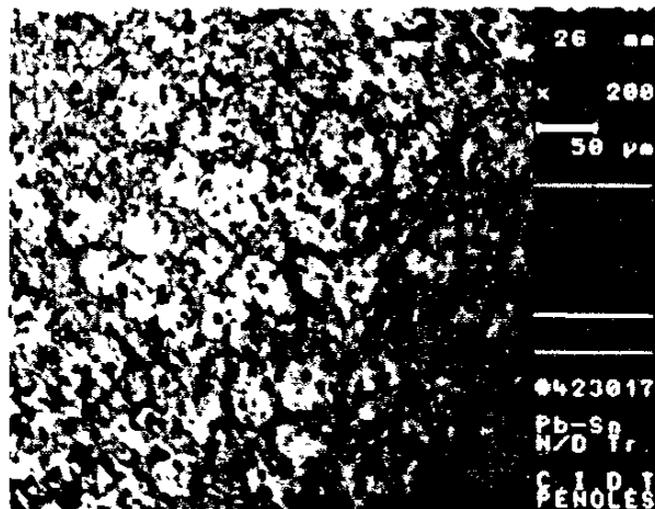


Figura 25 Distribución de elementos en un gradiente térmico de 2°C que se mantuvo constante por 2 horas fotografía obtenida por dispersión en longitud de onda.

La figura 26 muestra un mayor ordenamiento de las celdas debido a la uniformidad con que se les suministró el calor comparado con las microestructuras de las figuras 24 y 25 donde la inhomogeneidad es alta por la existencia de los gradientes térmicos. La imagen fue tomada en la parte inferior transversal de la muestra, utilizando el microscopio electrónico de barrido.

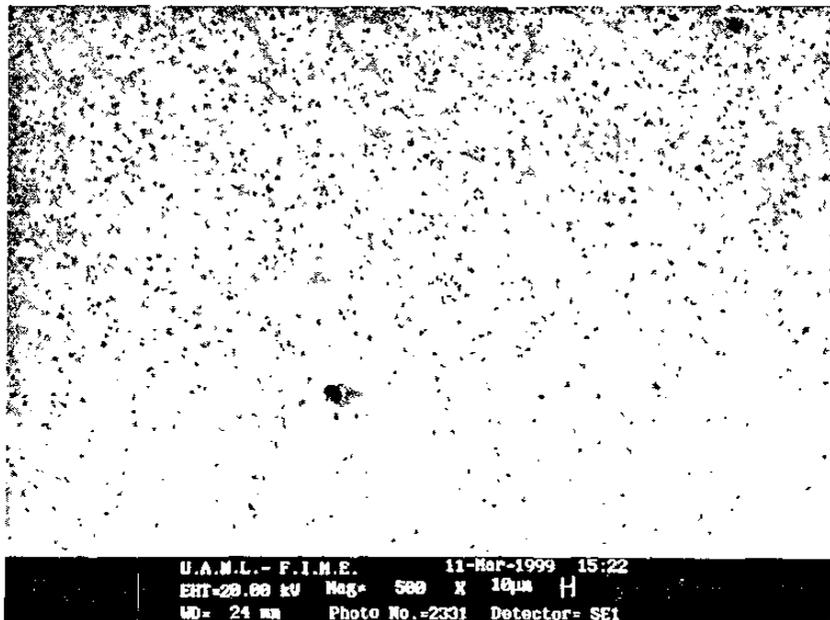


Figura 26 Solidificación de una aleación en ausencia de gradientes de temperatura
fotografía obtenida con el detector de electrones secundarios.

De los del análisis químicos realizados a las diferentes probetas se observa que los gradientes de temperatura impuestos a las muestras muestran su influencia en la distribución química de los elementos. Esto es, cuando existen grandes gradientes de temperatura se presenta inhomogeneidad química en la distribución de los elementos, a medida que los gradientes térmicos disminuyen la inhomogeneidad también disminuye. En ausencia de gradientes de temperatura, la presencia de la gravedad se manifiesta; esto es, cuando el gradiente térmico es nulo existe una precipitación de elementos pesados, lo cual provoca el aumento en la densidad.

CONCLUSIONES

Apartir de los resultados obtenidos podemos concluir que para obtener aleaciones 100 % homogéneas se tienen que eliminar los gradientes de temperatura, la gravedad y las zonas concentradoras de calor ya que estos factores alteran el comportamiento del metal fundido.

En este estudio las probetas que se sometieron a un gradiente térmico de 200°C presentaron una inhomogeneidad alta en la distribución de los elementos, comparados con los análisis realizados a las probetas que se mantuvieron con un gradiente de 2°C donde la inhomogeneidad en la distribución de los elementos es menor. En los estudios realizados a las probetas que tuvieron un calentamiento uniforme, la inhomogeneidad química es menor debido seguramente a la no existencia de gradientes de temperatura. Se aprecia el efecto de la gravedad provocando la precipitación de elementos pesados en la base de las muestras y aumentando así la densidad.

Así, cuando aparece el gradiente térmico aparece la inhomogeneidad química dentro de la aleación. Cuando el gradiente térmico tiende a cero la inhomogeneidad química también tiende a cero. Sin embargo, aún si se eliminará el gradiente de temperatura, faltaría eliminar la gravedad, ya que esta provoca la precipitación de elementos pesados en las aleaciones.

1020126450

Las densidades que se presentaron en las muestras con gradientes térmicos reflejan el acomodamiento más o menos compacto de los átomos. La parte de abajo de las probetas tiene una mayor temperatura y por ende una menor densidad lo que provoca una tendencia a la flotación de los elementos en la aleación.

Se comprobó la existencia del movimiento de los átomos debido al gradiente de temperatura y a la gravedad, además que puede ocurrir uno o varios de estos movimientos dentro de un mismo contenedor.

La gravedad es una fuerza que siempre hay que tomar en cuenta ya que esta nos modifica los resultados en el momento en que ocurre la fusión, y nos impide al movimiento ascendente de los átomos.

RECOMENDACIONES

- 1.- El estudio de la formación de las inestabilidades cambiando la geometría del recipiente, y observando la forma que toma la segregación química de los elementos.
- 2.- El análisis de la convección dentro de materiales poliméricos, así como la segregación química que aparece.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- James R. Welty, Ingeniería de Transferencia de Calor, John Wiley Sons Año 1983 pag
- 2.- M. Henri Bénard. Les Tourbillons Cellulaires Dans une Nappe Liquide.- Thèse Docteurs, A la Faculté des Sciences de Paris,Año: 1901
- 3.- Jacob J. Christensen and Alan J. Bray. Pattern Dynamic of Rayleigh-Bénard convective rolls and weakly segregated diblock copolymers. Cond-mat.1998 Vol 2, pag 1-7
- 4.- Hao-wen Xi. Study of Spiral Pattern Formation in Rayleigh-Bénard Convection. Cond-mat.1992 Vol 2, pag 1-9
- 5.- Rafael D. Benguria. On the linear stability theory of Bénard-Maragoni convection. Physics Fluids. 1989 Vol 7, pag 1123-1127
- 6.- M. Errafiy and Kh. Zeytounian. The Bénard Problem for Deep Convection: Linear Theory Int. Journal Engenering Sciencie.1998 Vol. 29 pag 625-635
- 7.- Stephen J. Vanhook, Michael F. Schatz, J.B. Swift, and W.D. McCormick.Long-wavelength surface-tension-driven Bénard convection: experiment and theory. Journal Fluid Mechanics.1997 Vol. 343, pag 45-78.
- 8.- Quanyuan Feng, Werner Pesch and Lorenz Kramer Theory of Rayleigh-Bénard convection in planar nematic liquid crystals. Physical Review 1992 Vol. 45, pag 7242-7256
- 9.- Q. Feng, W. Decker, W. Pesh and L. Kramer. On the Theory of Rayleigh-Bénard convection in homeotropic nematic liquid crystals. Journal de Physique II. Francia.1992 pag 1303-1325.
- 10.- A.V. Getling, Rayleigh-Bénard Convection Structures and Dynamics, World Scientific, Año de 1998
- 11.- Frank P. Incropera y David P. DeWitt, Fundamentos de Transferencia de Calor, Prentice Hall, Año 1999 pag 284-333.
- 12.- V. Isachenko, V. Osipova y A. Sukomel, Transmisión del Calor, Boixareu Marcombo, Año 1979 pag 165-174.
- 13.- Joseph R. Davis, Penelope Allen y Steven R. Lampman, ASM. Handbook, Properties and Seleccion: Nonferrous Alloys and Special-porpuse Materials, Volumen 2, ASM internacional, Año 1990

- 14.- Joseph R. Davis, Penelope Allen y Steven R. Lampman, ASM. Handbook, Alloy Phases Diagrams, Vol 3, ASM internacional, Año 1990
- 15.- Sydney H. Avner, Jose Luis Estrada, Introducción a la Metalurgia Física, Mc Graw Hill, Año 1988, pag 514-516.
- 16.- John D. Verhoeven, Fundamentos de Metalurgia Física, Limusa Noriega, Año 1987
- 17.- John P. Mckelvey, Física del Estado Sólido y de Semiconductores, Limusa Noriega, Año de 1989
- 18.- Samuel H. Maron y Carl F. Prutton, Fundamentos de Ficoquímica, Limusa Noriega, Año de 1980
- 19.- Robert E. Reed-Hill, Principios de Metalurgia Física, Continental S.A, Año de 1972
- 20.- Joshep I. Goldstein, Dale E. Newbury, and Eric Lifshin, Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Plenum Press, Año 1992
- 21.- Joseph R. Davis, Penelope Allen y Steven R. Lampman, ASM. Handbook, Metallography and Microestructures, Volumen 9, ASM internacional Año 1990
- 22.- John B Wachtman, Characterization of Materials, Butterworth-Heinemann Año de 1993

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Máquina térmica de Bénard.	9
2	Formación de celdas hexagonales.	10
3	Arreglo experimental para calentamiento por la parte inferior.	15
4	Formación de los patrones de Bénard.	16
5	Principales partes del microscopio electrónico de barrido.	20
6	Esquema de la discretización de la pieza en mallas nodales	25
7	Esquematación de los ensayos para el cálculo de temperaturas.	27
8	Distribución de temperaturas en un sistema con gradiente térmico.	28
9	Distribución de temperaturas con convección libre al aire.	29
10	Distribución de temperaturas con un gradiente térmico provocado por un calentamiento por debajo y un enfriamiento por arriba.	30
11	Diagrama de fase plomo-estaño.	32
12	Arreglo experimental para provocar un gradiente de temperatura usando hielo.	35
13	Arreglo experimental para el calentamiento al aire.	37
14	Calentamiento uniforme.	38
15	Solidificación clásica de una aleación eutéctica plomo-estaño.	41
16	Solidificación de una aleación con enfriamiento convencional.	42
17	Mapeos en las muestras.	42
18	Distribución de las densidades de una aleación con gradientes de temperatura de 200°C.	43
19	Distribución química de una aleación con un gradiente de temperatura de 2°C.	44
20	Distribución de elementos químicos donde existió un calentamiento uniforme.	45
21	Imagen por microscopía electrónica de barrido de la microestructura de la zona mantenida a 0°C.	46
22	Distribución química de una aleación con un gradiente de temperatura de 2°C.	47
23	Distribución de elementos en una aleación con calentamiento uniforme.	48
24	Fotografía de una región que se mantuvo a una alta temperatura.	49
25	Distribución de elementos en un gradiente térmico de 2°C que se mantuvo constante por 2 horas.	49
26	Solidificación de una aleación en ausencia de gradientes de temperatura.	50

