



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARACÓN
DIRECCION

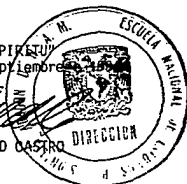
JUAN ANTONIO VEGA LARA
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 22 de septiembre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. DANIEL ALDAMA AVALOS pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado " PRODUCCION DE METALES AMORFOS POR EL METODO DE LAMINACION POR ROTACION ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Mex., 26 de septiembre de 1965
EL DIRECTOR.

[Firma manuscrita]
M. y CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO



- [Firma manuscrita]*
- c c p Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la Unidad Académica.
 - c c p Ing. Raúl Barrón Vera, Jefe de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
 - c c p Ing. Daniel Aldama Avalos, Asesor de Tesis.

[Firma manuscrita]

CCMC'AIR'11a.

DEDICATORIA

A mis padres:

José Ramón Vega Cisneros

Consuelo Lara de Vega †

Por darme la vida, la esperanza y el amor

A mis hermanos:

Consuelo, José Ramón, Patricia, Roberto, Gerardo,
Yolanda, Elisa y Carlos.

Por brindarme su ayuda y aliento

A mis demás familiares:

Por todo su cariño y comprensión

A mis amigos:

Por brindarme su amistad de manera desinteresada

A Dios:

Por bendecirme día con día

AGRADECIMIENTOS

En estas páginas deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de manera desinteresada, me ayudaron durante el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Fernando Alba Andrade, director de esta tesis en el IFUMAN, por haberme brindado todo su apoyo durante el desarrollo de este trabajo y por su interés en mi superación académica.

Al M. en C. Daniel Aldama Avalos, director de esta tesis en la ENEP Aragón, por su apoyo, su paciencia y sus valiosas sugerencias hechas durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses, Jefe del Depto. de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, por su apoyo a todos los miembros del departamento.

A los sinodales, Ing. Federique Jáuregui Renaud, Ing. Javier Nava Pérez, Ing. José Guadalupe Sánchez Barrales e Ing. Rodolfo Zaragoza Buchaín por su paciencia en la lectura de este trabajo, así como por sus valiosos comentarios.

Al M. en C. Luis Miguel Apátiga Castro, por su ayuda con el equipo de RF al momento de los experimentos, así como por sus valiosas sugerencias y comentarios en la redacción de esta tesis.

Al Físico Héctor Cruz Manjarrez Flores, por su ayuda con el sistema de vacío; además por sus críticas y comentarios que sirvieron para la realización de este trabajo.

Al Físico Ventura Rodríguez Lugo, por el manejo y la ayuda proporcionados en la obtención de los resultados de Rayos X, así como la interpretación de los mismos en estas pruebas y en el microscopio electrónico de barrido.

Al M. en C. Vicente Rivera Moras, por su orientación y sugerencias respecto al contenido de esta tesis, así como por el préstamo de información bibliográfica.

A la M. en C. Rosa Lima, por el préstamo de información bibliográfica.

Al Sr. Edgar Méndez Moreno, por todo su apoyo técnico en la construcción del equipo.

A mi compañero y amigo, Luis Flores Morales, por haberme brindado su apoyo durante todo este tiempo.

Al Departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto de Física de la U.N.A.M., por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo de tesis y por todo el apoyo dado.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme dado la oportunidad de realizarme

profesionalmente, en especial a la Escuela Nacional de Estudios
Profesionales Aragón. .

I N D I C E

INTRODUCCION	1
CAPITULO I.- METALES AMORFOS	4
I.1.- ¿Qué son los Metales Amorfos?	5
I.2.- Antecedentes Históricos	10
I.3.- Propiedades de los Metales Amorfos	12
I.3.1.- Propiedades Mecánicas	13
I.3.2.- Propiedades Químicas	16
I.3.3.- Propiedades Eléctricas	19
I.3.4.- Propiedades Magnéticas	21
I.4.- Aplicaciones de los Metales Amorfos	23
CAPITULO II.- TEORIA DE LOS METALES AMORFOS	26
II.1.- Condiciones para la Formación de Metales Amorfos	27
II.2.- Rapidez de Enfriamiento	32
II.3.- Estabilización del Estado Vítreo	34
II.4.- Métodos para Producir Metales Amorfos	40
II.4.1.- Método de Evaporación Sobre un Sustrato	
Frío	41
II.4.2.- Método de Implantación de Iones	42
II.4.3.- Método de Electrólisis	43
II.4.4.- Método de Laminación por Rotación	44

CAPITULO III.- LAMINACION POR ROTACION	46
III.1.- Antecedentes	47
III.2.- Formación de una Cinta Continua	50
III.3.- Análisis de la Transferencia de Calor	54
III.4.- Efecto de Algunas Propiedades del Fundido y del Sustrato	59
CAPITULO IV.- DESCRIPCION DEL EQUIPO	62
IV.1.- Generalidades	63
IV.2.- La Cámara de Vacío	65
IV.3.- El Disco de Rotación	68
IV.4.- El Crisol y su Soporte	70
IV.5.- El Sistema de Presión de Inyección	73
IV.6.- El Generador de Radiofrecuencia	74
CAPITULO V.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	76
V.1.- Aleaciones	77
V.2.- Descripción de los Experimentos	79
V.3.- Observaciones y Cuidados	83
CAPITULO VI.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES	86
VI.1.- Resultados	87
VI.1.1.- Análisis de Rayos X	89
VI.1.2.- Microscopía Electrónica	94
VI.1.2.1.- Formación del Patrón de Difracción	94
VI.2.- Conclusiones	99

GLOSARIO 101

BIBLIOGRAFIA 108

INTRODUCCION

Es bien sabido que los metales y aleaciones se solidifican formando una estructura cristalina consistente en un arreglo ordenado de su configuración atómica. El hierro gamma, por ejemplo, se solidifica en cristales cúbicos, que tienen un átomo en cada una de sus esquinas y uno en el centro del cubo. Esto mismo ocurre con todos los metales y aleaciones cuando la solidificación es normal y por lo tanto lenta, aunque la forma de los cristales dependerá del metal o metales que intervengan.

¿Podrían acaso los metales solidificarse de manera amorfa (como ocurre con el vidrio común) y no cristalina? Esta pregunta se la hicieron los científicos hace más de veinticinco años, y hace unos quince comenzó un gran interés por la obtención de metales amorfos, ya que sus propiedades eléctricas y magnéticas, sobre todo, resuelven importantes problemas tecnológicos; el empleo de cintas metálicas amorfas, por ejemplo, en las cabezas de las grabadoras tan usadas actualmente en computación y para la grabación y reproducción del sonido y la imagen, permite un considerable aumento en el poder de almacenamiento de datos o una mayor calidad en el audio o video obtenidos (se mejora notablemente la relación señal/ruido).

La forma de evitar que un metal o aleación se cristalice al solidificar, consiste en hacerlo pasar del estado líquido (fundido) al estado sólido mediante un enfriamiento ultra rápido. La rapidez de enfriamiento necesaria para evitar la cristalización tiene que ser muchas veces mayor que la que permite transformaciones en el estado sólido; para lograr el metal amorfo, esta rapidez es del orden de un millón de grados celsius por segundo.

Cabe señalar que el estudio de estos metales en nuestro país data de los años 80's, siendo los pioneros el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en Cuernavaca, Morelos, y el Instituto de Investigaciones en Materiales de la U.N.A.M.

El presente trabajo se desarrolló en el Instituto de Física de la U.N.A.M., con el apoyo y la asesoría del personal del Instituto.

El objetivo principal del presente trabajo es introducirnos al campo de los metales amorfos, mediante la fabricación de cintas metálicas no-cristalinas, utilizando el método conocido como "melt-spinning", que puede traducirse al español como laminación por rotación.

En el capítulo I se describe una breve historia de estos metales y se mencionan las principales propiedades de los mismos, así como sus aplicaciones.

En el capítulo II se establecen las condiciones necesarias para la formación de los metales amorfos y se describen los principales métodos para la fabricación de los mismos.

En el capítulo III se describe con mayor detalle el método de laminación por rotación, el cual es utilizado en la fabricación de cintas delgadas.

En el capítulo IV se describen cada una de las partes principales del equipo utilizado en la fabricación de las cintas metálicas amorfas.

En el capítulo V se realiza una descripción de los experimentos realizados, desde la obtención de las aleaciones hasta los cuidados que deben tomarse en cuenta.

Finalmente, en el capítulo VI se muestran los resultados obtenidos en este trabajo, utilizando difracción de rayos X y microscopía electrónica como técnicas de caracterización. Y por último, se dan las conclusiones del trabajo.

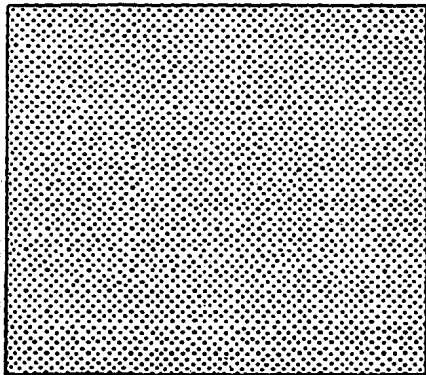
CAPITULO I

METALES AMORFOS

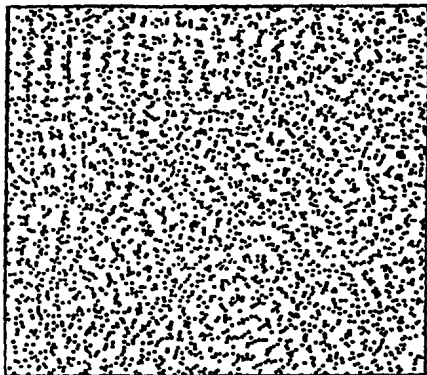
I.1.- ¿ QUE SON LOS METALES AMORFOS ?

La diferencia básica entre un metal amorfo y uno cristalino es que el primero carece de la periodicidad atómica que encontramos en los metales cristalinos. Existen diferentes métodos para alcanzar un estado amorfo o vítreo, pero en todos ellos, el objetivo principal es fundir o vaporizar la muestra, de manera que disminuya el orden de largo alcance entre las posiciones atómicas; y una vez logrado esto, se debe enfriar rápidamente el material, de modo que, incluso a temperatura ambiente, no se lleve a cabo una difusión apreciable de los átomos y se mantenga el desorden alcanzado [1].

A los materiales que poseen estas características, se les conoce comúnmente como vidrios. Son casi tan densos como las aleaciones cristalinas con la misma composición, como se puede observar en la figura I.1, pero poseen estructuras heterogéneas similares a aquellas de los líquidos correspondientes. En cierto sentido se puede considerar que un vidrio es la imagen fotográfica fija de un líquido. Al no presentar cristalinidad, no se identifican las fronteras granulares [2].



SOLIDO CRISTALINO



SOLIDO AMORFO

FIGURA I.1.- La densidad de los sólidos cristalinos y amorfos, es muy similar en unos y otros, aunque difieren en la forma en que se disponen los átomos.

En teoría, cualquier líquido puede formar un vidrio por medio de enfriamiento, siempre y cuando no intervenga la cristalización de una o más fases. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que para cualquier material sólido existe siempre al menos una fase cristalina que es más estable que el estado amorfo, y en consecuencia, en una solidificación en equilibrio, siempre ocurre la cristalización espontánea.

Los vidrios silíceos cristalizan despacio debido a que sus átomos están interconectados por una red de enlaces químicos covalentes.

Para que los átomos puedan ordenarse formando una estructura cristalina, es necesario que se rompan muchos de esos enlaces y que los átomos se reorganicen formando una configuración diferente. De aquí que aunque la energía libre del cristal fuera menor que la del vidrio, para llevar a cabo dicha transición, sería necesario aportar una cantidad sustancial de energía [3].

El enlace químico de los átomos en un metal es más difuso que en los silicatos. Los enlaces individuales no están dirigidos tan fuertemente de un átomo a otro sino que el sólido debe su coherencia a una interacción mutua entre un gran número de iones cargados positivamente y electrones con carga negativa.

Para reconstruir un cristal a partir de un vidrio metálico, se necesita una cantidad mínima de energía, y los vidrios

metálicos no pueden formarse sino con ciertas condiciones experimentales que están determinadas por los parámetros críticos del sistema [3].

Durante miles de años los metales han sido utilizados por el hombre y su estructura ha consistido en agregados de cristales, por lo tanto, el descubrimiento de que ciertas aleaciones metálicas pueden solidificarse lo suficientemente rápido como para evitar la cristalización causó considerable excitación entre los metalurgistas.

Al principio, los materiales amorfos fueron considerados como un grupo que marcaba una época en los materiales metálicos. Algunas de sus propiedades, en ciertas composiciones son excepcionales. Hasta ahora, la competencia técnica y económica ha aumentado el rango de aplicaciones específicas de los metales amorfos, y su uso tiende a incrementarse a medida que se desarrollan variantes en aleaciones y en aplicaciones particulares. Aparte de sustituir los materiales comunes y permitir nuevas soluciones tecnológicas, la introducción de los metales amorfos ha provocado una mejoría en los materiales existentes. Aún más, la tecnología de fabricación por solidificación rápida, se ha aplicado también a materiales cristalinos. Es probable que la principal virtud de los metales amorfos sea el hecho que pueden producirse económicamente y en forma útil. En base a una comparación de costos, tenemos como resultado que son los materiales potencialmente más fuertes

conocidos por el hombre, los más resistentes a la corrosión y los más fácilmente magnetizables. Sus costos son muy bajos debido a que se forman directamente del fundido sin necesidad de todas las etapas de la metalurgia convencional [4].

Muchas propiedades de los materiales amorfos difieren muy poco de aquellas de los metales cristalinos cuya composición es idéntica, como son la capacidad calorífica, la densidad y la compresibilidad. Las diferencias se presentan principalmente en aquellas propiedades que miden la respuesta de un cuerpo sometido a un esfuerzo en una cierta dirección, por ejemplo en los materiales cristalinos, la respuesta a un campo magnético, eléctrico o a un esfuerzo mecánico, depende del campo o de la fuerza con respecto a la red cristalina, es decir, la respuesta es anisótropa. Dado que en los metales amorfos no se presenta un orden de largo alcance, su respuesta es perfectamente isotropa, independiente de la dirección del campo o fuerza aplicados [1].

Algunas de las propiedades de los metales amorfos son sorprendentes, como la facilidad con la que se pueden magnetizar y la dureza mecánica. Algunas de las aleaciones también presentan coeficientes de resistividad eléctrica o magnética muy pequeños. Las ondas acústicas se propagan a través de ellos por distancias notablemente grandes [3].

I.2.- ANTECEDENTES HISTORICOS

La primera síntesis de una aleación amorfa o vidrio metálico, fue hecha en 1960 por Klement, Willens y Duwez en el Instituto Tecnológico de California. Estos científicos estadounidenses descubrieron accidentalmente que una aleación líquida de oro y silicio, al sobrefriarse rápidamente a la temperatura del nitrógeno líquido, se convierte en un sólido amorfo; es decir, que su estructura se agrupa sin ningún orden establecido [1].

La historia de este descubrimiento es fascinante y ha sido relatada por Duwez. A continuación tenemos una versión editada.

El caso que Duwez seleccionó como prueba para evaluar la eficiencia de las técnicas del templeado, fue cobre-plata. En septiembre de 1959 se obtuvo en el Instituto Tecnológico de California una serie completa de soluciones sólidas para éste sistema. El grado de temple no se conoció, ya que no se dedicó tiempo suficiente para tratar de medirlo, debido a que otros resultados eran más excitantes como la síntesis de un nuevo cristal con fase de no-equilibrio en el sistema plata-germanio,

que bajo condiciones de equilibrio es del tipo eutéctico simple [5].

Poco después, la meta en el templado de un estado líquido se alcanzó cuando se obtuvo una estructura no cristalina (amorfa) a partir de una aleación oro-silicio, y con ello se logró la supresión total del proceso de cristalización durante la solidificación [5].

Casi simultáneamente, Miroshnichenko y Salli en la URSS reportaron un proceso similar para preparar aleaciones amorfas; con su técnica, una gota de aleación de metal líquido se impulsa a una superficie fría, donde se extiende formando una capa delgada y se solidifica rápidamente. En realidad Duwez impulsó la gota del líquido, mientras que Miroshnichenko y Salli impulsaron dos pistones opuestos con la gota en medio. Estas técnicas adquirieron, por encima de la oposición de su inventor, la designación de "splat-cooling" (enfriamiento de una aleación fundida lanzándola, mediante un chorro de gas, contra una superficie fría). Las técnicas de splat-cooling pueden generar proporciones de enfriamiento mayores a un millón de grados por segundo, creando así un producto completamente nuevo de soluciones sólidas supersaturadas, nuevas estructuras cristalinas metaestables y aleaciones amorfas [5].

El desarrollo final en la historia de la preparación de aleaciones, fue la publicación por Pond y Maddin que presentaron

una técnica para preparar cintas continuas, que abrió la posibilidad de producción a gran escala y puso el escenario para un notable crecimiento de trabajos en aleaciones amorfas y que es posible prepararlas en grandes cantidades a bajo costo [5].

Tiempo atrás, los metales amorfos se prepararon por otros dos métodos: deposición de vapor (Kramer) y deposición electrolítica (Brenner) en los años 30's [1,5].

I.3.- PROPIEDADES DE LOS METALES AMORFOS

Existen comportamientos magnéticos, mecánicos, eléctricos y de corrosión especiales, que resultan de la estructura amorfa de los metales. Algunos ejemplos son: que actúan como materiales magnéticos muy suaves, de hecho se han medido pérdidas magnéticas en aleaciones altamente magnetizadas, en las que son más bajas que las medidas en cualquier otra aleación cristalina conocida; son excepcionalmente duros y tienen fuerza de tensión extremadamente alta y en algunas aleaciones el coeficiente de expansión térmica puede ser cero; tienen resistencias eléctricas 3 o 4 veces más altas que las que tienen las aleaciones convencionales; algunas aleaciones amorfas son excepcionalmente resistentes a la corrosión [5].

I.3.1.- PROPIEDADES MECANICAS

Las aleaciones líquidas enfriadas a temperaturas menores a su punto de congelación tienen una sobresaliente combinación de propiedades como resultado de sus estructuras poco usuales, de todas sus propiedades físicas, la más sobresaliente es en muchas de ellas, la ductilidad.

Esta es la base de su interés en usos ingenieriles, ya que las hace resistentes y fáciles de manejar. Un ejemplo de esto son las láminas a base de níquel que se introdujeron al mercado en 1978, y desde entonces su uso para unir partes de motores de aviación ha ido en aumento. Su utilidad se debe a que las aleaciones con base de níquel son quebradizas en su fase cristalina, por lo que su forma convencional es polvo, pero cuando estas aleaciones se solidifican rápidamente para obtener cintas vítreas, son dúctiles. Dichas cintas se manejan con mucho mayor facilidad que los polvos convencionales [1,3,4].

Para una misma aleación, con una misma composición, la forma cristalina es quebradiza y la amorfa dúctil. Esto se debe a los arreglos atómicos y a la naturaleza de los enlaces químicos de

los metales.

Los metales amorfos tienen una buena rigidez elástica, y algunos de ellos resisten la deformación plástica mejor que los aceros de más alta calidad.

También son muy resistentes a la ruptura, lo cual es especialmente interesante, considerando los altos esfuerzos, ya que generalmente, la resistencia a la ruptura tiende a disminuir a medida que los esfuerzos aumentan [3].

Después de que comienza el flujo plástico, los vidrios presentan muy poco endurecimiento, por lo tanto, son plásticamente inestables en tensión si se cargan en doblado, torsión y compresión, pueden sostener esfuerzos plásticos muy grandes.

Una de las consecuencias del flujo plástico es una buena resistencia a la propagación de la ruptura. Esto hace un material resistente al impacto e insensible a defectos de superficie tales como rajaduras. Esta propiedad se mide mediante un parámetro de tenacidad de fractura, el cual diferencia los vidrios metálicos de los silicatos, los cuales pueden ser bastante fuertes pero tienen muy poca resistencia a la fractura, y la magnitud de este parámetro en ellos es mucho menor que el de los vidrios metálicos.

TABLA I.1.- Dureza (H_v), Resistencia Máxima a la Tracción (σ_t)
y Módulo de Young (E) de algunos Vidrios Metálicos.

COMPOSICION QUIMICA	H_v (GPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)
(A) VIDRIOS METALICOS FERROSOS			
$Fe_{80}B_{20}$	10.8	3620	165
$Fe_{75}B_{25}$	12.9	3670	175
$Fe_{80}P_{15}C_5$	7.4	3030	161
$Fe_{80}P_{16}C_3B_1$	8.2	2450	135
$Fe_{76}P_{16}C_4Si_2Al_2$	7.4	2060	103
$Fe_{54}Cr_{18}Mo_{12}C_{16}$	10.1	3770	189
(B) VIDRIOS METALICOS NO-FERROSOS			
$Pd_{90}Si_{10}$	3.2	1320	66
$Pd_{77.5}Cu_6Si_{16.5}$	4.9	1570	79
$Cu_{57}Zr_{43}$	5.3	1960	92
$Cu_{60}Ti_{40}$	2.0	2200	106
$Ti_{60}Be_{35}Si_5$	7.9	2450	140
$Ni_{49}Fe_{29}P_{14}B_6Si_2$	7.7	2400	129

La tabla I.1 presenta valores de dureza (H_v), resistencia máxima a la tracción (σ_t) y módulo de Young (E) para varios vidrios metálicos ferrosos y no ferrosos. Para el registro de una resistencia a la tracción tan alta como 4,500 MPa, se usó el vidrio de $Fe_{60}B_{28}Cr_6Mo_6$ y una dureza tan alta como 1,950 Kg/mm² (~19 GPa) se usó el vidrio de $Fe_{40}Mo_{40}B_{20}$ [4].

Se ha encontrado que las aleaciones amorfas presentan alta resistencia mecánica y ductilidad. A pesar de que el módulo elástico típico es 60-75% del valor del módulo elástico del cristal, se han reportado esfuerzos mayores de 3600 MPa [3].

Este alto rendimiento de esfuerzos hace a los amorfos buenos candidatos para uso en componentes reforzados con fibras [3].

I.3.2.- PROPIEDADES QUÍMICAS

Las aleaciones amorfas son nuevos materiales desde el punto de vista químico. Ellas están libres de defectos asociados con el estado cristalino como lo son el límite de grano, las dislocaciones y la acumulación de fallas [5].

Los vidrios metálicos son vistos como aleaciones homogéneamente ideales con respecto a características superficiales como corrosión y catálisis. Por otro lado, ellos contienen al menos dos componentes y frecuentemente contienen altos porcentajes de metaloides [4].

En general, una aleación amorfa metal-metaloide con un sólo componente metálico posee una resistencia a la corrosión más baja que un metal puro. Sin embargo, ésta resistencia se incrementa con la adición de casi cualquier otro elemento metálico. En particular, la adición de cromo es muy efectiva, la pasivación generalmente ocurre espontáneamente con 8% Cr o más en ácido clorhídrico a temperatura ambiente. La adición de cromo es además efectiva en mejorar la resistencia a la corrosión de aleaciones amorfas metaloides de cobre y níquel. De entre los elementos metaloides el fósforo mejora la resistencia a la corrosión de los vidrios metálicos debido a la rápida formación de una película de hidróxido e hidrato sobre la superficie [4].

La figura I.2 muestra a la izquierda, la resistencia a la corrosión de una aleación amorfa y de una aleación cristalina de Fe-Cr en función del contenido de Cr; a la derecha se puede observar, la resistencia a la corrosión de la aleación amorfa $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$, contra el acero inoxidable austenítico 18-8 cristalino [4].

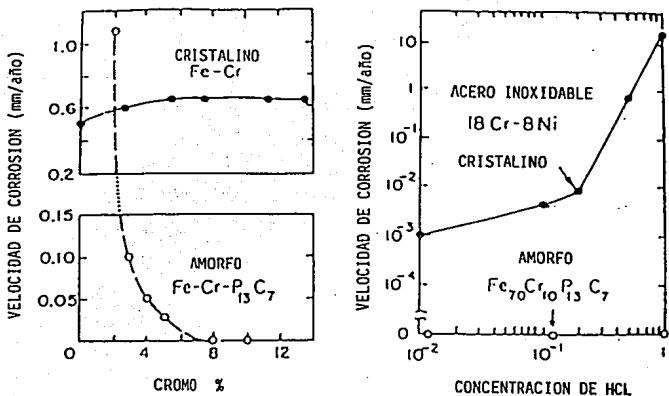


FIGURA I.2.- Comparación de la resistencia a la corrosión de vidrios metálicos y aleaciones cristalinas de hierro y cromo [4].

Desde el punto de vista catalítico, el estado amorfo se puede considerar más activo que el cristalino debido al alto desorden en sus arreglos atómicos. De este modo, la mayoría de los vidrios metaloides de Fe-Ni muestran mayor actividad catalítica que sus contrapartes cristalinas cuando se usa como catalizador para producir hidrocarburos por hidrogenación del monóxido de carbono [4].

Los vidrios metálicos parecen así tener un buen potencial industrial, basados en sus atractivas propiedades químicas y en su alta resistencia mecánica [4].

I.3.3.- PROPIEDADES ELECTRICAS

La resistividad eléctrica (ρ) de un metal amorfo es dominada por una dispersión desordenada, por lo tanto es mayor que aquella de los cristalinos y varía a temperatura ambiente de 80 a 420 $\mu\Omega\text{cm}$. La variación de ρ con respecto a la temperatura en las aleaciones vítreas se caracteriza por:

a) El coeficiente de temperatura de la resistividad (α_R) es muy pequeño y puede ser negativo.

b) La resistividad varía menos del 7% entre 5 y 300 °K.

c) La resistividad mínima sensible a la impureza ocurre a baja temperatura, T_{min} , bajo la cual ρ obedece una función $\ln T$ [4].

En la figura I.3 se muestran algunas características interesantes de la variación en la resistividad eléctrica de los vidrios metálicos. Mientras el vidrio de $\text{Pd}_{81}\text{Si}_{19}$ con una resistividad de $\sim 80 \mu\Omega\text{cm}$ tiene un valor positivo de α_R , el vidrio de $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ con una resistividad de $\sim 180 \mu\Omega\text{cm}$ tiene un valor negativo de α_R . Aparte de ésta diferencia, ambos

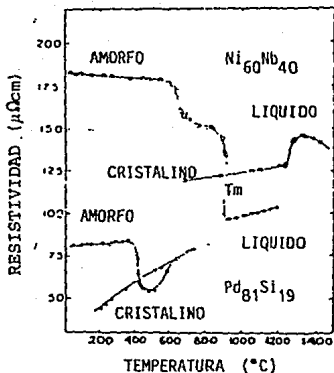


FIGURA I.3.- Resistividad eléctrica de las aleaciones vítreas, cristalinas y estados líquidos de $\text{Pd}_{81}\text{Si}_{19}$, y $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$

muestran algunas características comunes de los vidrios metálicos. Hay una repentina caída en la resistividad a la temperatura de cristalización (T_x). La resistividad de los materiales cristalinos se incrementa más rápido en el calentamiento, y registra un súbito incremento en la fusión. Finalmente, los valores de resistividad en el estado líquido están situados en una región, la cual se obtiene por una extrapolación de los datos del estado vítreo, con la diferencia que α_n del fundido es mayor que en el estado vítreo [4].

I.3.4.- PROPIEDADES MAGNETICAS

Las propiedades magnéticas de los materiales amorfos son de gran interés tecnológico porque en ellas se combinan propiedades de magnetos suaves (fácilmente magnetizables) [1].

En general, los materiales ferromagnéticos cristalinos son relativamente difíciles de magnetizar. Sin embargo, los amorfos se encuentran entre los materiales ferromagnéticos más fácilmente magnetizables. Algunos de ellos se pueden magnetizar con campos 100 veces inferiores en magnitud que el campo magnético de la Tierra. A diferencia de los materiales fácilmente magnetizables más comunes, los vidrios metálicos no requieren para su magnetización de un tratamiento térmico, por lo que no son mecánicamente más resistentes [1].

Debido a su estructura desordenada y no periódica de los metales amorfos, su movimiento magnético no está acoplado a una dirección estructural particular, por lo tanto no hay anisotropía magnetocristalina; es decir, como no existe un eje de magnetización preferente, la dirección de magnetización se puede variar con poca energía. Ya que en las estructuras amorfas los defectos con interacciones magnéticas fuertes son inestables, su

coercitividad intrínseca (propiedad magnética de conservar su imantación) es pequeña, ambas propiedades dan lugar al comportamiento magnético suave de los materiales amorfos [1].

La formación de los metales amorfos a partir del fundido requiere que la aleación tenga componentes que estabilicen la aleación y abatan el punto de fusión como los no metales: Boro, Silicio, Carbono y Fósforo, o los metales como el Titanio, Circonio y otros [1].

Estas adiciones a la aleación disminuyen claramente los efectos ferromagnéticos, esto da lugar a que la polarización a saturación (J_s) y la Temperatura de Curie (T_c) sean más bajas que las de los materiales magnéticos cristalinos convencionales [1].

Hoy en día, los vidrios metálicos superan a las aleaciones cristalinas comerciales con una permeabilidad más alta, una coercitividad más baja y una resistividad eléctrica más alta, excelente combinación para aplicarlos como magnetos suaves. Los valores de magnetización saturante y de Temperatura de Curie no son tan altos en los vidrios metálicos como en las aleaciones cristalinas, pero esa afección no es un problema grave en muchas aplicaciones [4].

Los vidrios metálicos magnéticos representan, según algunos observadores, la primera clase nueva de materiales magnéticos suaves en ser encontrados desde el descubrimiento de las ferritas

suaves en los años 40's. De este modo, los años 70's se pueden considerar como testigos del nacimiento de una nueva tecnología en materiales amorfos magnéticamente suaves, con consecuencias de gran alcance para la industria eléctrica y electrónica en todo el mundo [4].

I.4.- APLICACIONES DE LOS METALES AMORFOS

La resistencia a la deformación, la ductilidad y la resistencia a la corrosión, son un conjunto de propiedades enormemente atractivas en un metal. Uno puede imaginarse muchas aplicaciones en las que dichas propiedades podrían ser utilizadas. Más aún en las aleaciones amorfas, debido a la facilidad con la que se pueden trabajar y junto con el hecho de que su fabricación es muy económica, justifican su utilización en toda una serie de aplicaciones basadas principalmente en sus peculiares propiedades magnéticas y eléctricas [3].

Por el momento las aplicaciones más prometedoras de los metales amorfos se basan en sus propiedades magnéticas. En general, los materiales magnéticos cristalinos poseen un eje de magnetización preferente y para cambiar la dirección de este eje, es necesario aportar cierta cantidad de energía. Por el

contrario, muchos de los metales amorfos magnéticos parecen ser totalmente isótropos en lo que respecta a los campos magnéticos y no existe un eje de magnetización preferente, por lo que dicha magnetización se puede variar con la aportación de una energía mucho menor [3].

Una de las aplicaciones inmediatas es en el núcleo de un transformador eléctrico en donde la magnetización debe invertir su dirección dos veces durante cada ciclo de la corriente alterna, lo cual equivale a unas 120 veces por segundo [3].

La suavidad magnética y la elevada resistencia mecánica de las aleaciones amorfas son propiedades que respaldan su utilización en la fabricación de cabezales de lectura y de escritura en las grabadoras de cintas magnéticas y en las memorias de disco magnético. La frecuencia con que el campo se puede invertir en estos dispositivos es del orden de miles de Hertz y al utilizar aleaciones amorfas, las pérdidas se podrían reducir de manera considerable y la señal a extraer sería de un nivel máximo [1,4].

A la vista de sus propiedades mecánicas especiales, los vidrios metálicos parecen ser idóneos por su bajo costo y su alta resistencia, para usarse en el reforzamiento en concreto, plásticos o hule. También pueden emplearse como materiales para cordones de llantas y en aparatos de almacenamiento de energía, como volantes [4].

Basados en sus propiedades químicas y su alta resistencia mecánica, los vidrios metálicos tienen aplicaciones en tubos y accesorios, navajas de rasurar, cuchillería, revestimiento de recipientes de reacción, injertos biológicos, catalizadores y electrodos para pilas de combustible y celdas electrolíticas. Además en filtros químicos, escalpelos quirúrgicos, clips de sutura, etc. [4].

Algunas aplicaciones de los vidrios metálicos en base a sus propiedades eléctricas son: sensores de resistencia magnética para detectar la presencia de campos magnéticos, líneas de transmisión eléctrica, reactores de fusión, trenes levitados magnéticamente, etc. [4].

Basándose en sus propiedades magnéticas, existen tres grandes áreas de potenciales aplicaciones de los vidrios metálicos. Primeramente tendríamos dispositivos de poder, particularmente transformadores de distribución, motores eléctricos, separadores magnéticos de alto gradiente, etc. La segunda área es en equipos manuales como las cabezas de grabadoras de video y sonido, donde la permeabilidad inicial es la característica más importante. La tercer área de aplicación es en transductores y sensores [4].

CAPITULO II

TEORIA DE LOS METALES AMORFOS

II.1.- CONDICIONES PARA LA FORMACION DE METALES AMORFOS

Para obtener un material con características amorfas, es necesario enfriarlo repentinamente a una temperatura inferior a cierto umbral, conocido como temperatura de transición vítrea, la cual varía de una sustancia a otra. A temperaturas superiores al umbral, en la fase líquida sub-enfriada, los átomos son libres de trasladarse y para temperaturas inferiores, los movimientos de los átomos quedan limitados a la vibración. La posición de los átomos queda fija formando una estructura sólida amorfa, solo cuando se alcanza la temperatura de transición vítrea [6].

Sin embargo, la temperatura vítrea de todas las sustancias conocidas es inferior a la temperatura de cristalización, o punto de congelación, es decir, el líquido cristaliza antes de que pueda alcanzar una temperatura suficientemente baja como para formar un vidrio [6].

Cuando se enfría un líquido hasta una temperatura menor a la temperatura de transición, la cristalización no se inicia al mismo tiempo en todos los lugares. Para considerar una

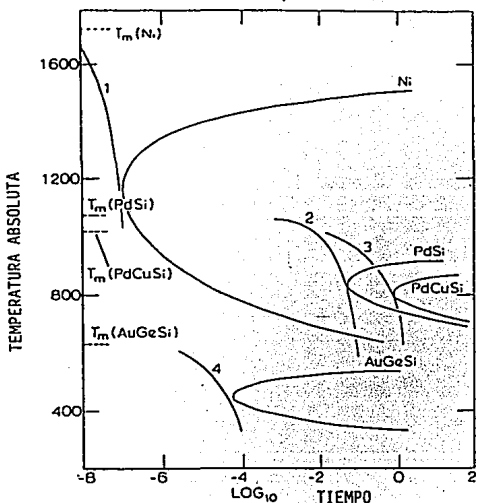
configuración cristalina es necesario que se unan ciertos agregados constituidos por unos cuantos átomos. Estos agregados se denominan centros de nucleación [6].

A continuación se produce el crecimiento de dichos centros hasta que todo el volumen solidifica. Este proceso requiere cierto tiempo; el método de producción de metales amorfos se basa en enfriar el líquido rápidamente desde una temperatura mayor que la de transición, hasta una temperatura inferior a la de transición vítrea. Si esto se lleva a cabo lo suficientemente rápido, no habrá tiempo de que se formen los cristales [6].

Para las diferentes aleaciones metálicas estudiadas hasta hoy, los valores de las temperaturas de transición vítrea T_g , y la temperatura de solidificación, T_s , presentan un intervalo muy amplio. Para comparar una sustancia con otra, es más significativo considerar la relación entre éstas magnitudes, la cual se conoce como temperatura reducida de vidrio $T_{rg}=T_g/T_s$. La velocidad crítica de enfriamiento para la formación de vidrio R_c , depende en gran parte de esta temperatura. Cuanto mayor sea la temperatura reducida de vidrio, más fácil será la solidificación en estado amorfo. Ya que la velocidad de enfriamiento será menor [6].

Se pueden construir unas curvas llamadas Tiempo -Temperatura - Transformación, que expresan el tiempo necesario para que se forme una fracción mínima de cristal X difícilmente detectable

(del orden de 10^{-6} m), en función de la temperatura. R_c está definida como la rapidez de enfriamiento necesaria para evitar apenas la formación de la fracción X, (figura II.1).



- 1) $\approx 5 \times 10^9$ °K/B ; 2) $\approx 3 \times 10^3$ °K/B ;
 3) $\approx 2 \times 10^2$ °K/B ; 4) $\approx 8 \times 10^6$ °K/B .

FIGURA II.1.- Curvas T-T-T correspondientes a una fracción de cristal de 10^{-6} para varios sistemas metálicos, mostrando también la rapidez crítica de enfriamiento requerida para evitar la cristalización.

La construcción de estas curvas requiere asumir la dependencia de la viscosidad con la temperatura en el intervalo de T_g a T_f ; donde la menor de ellas es T_g , por lo tanto cuando T_g es grande, los incrementos que se presentan en la viscosidad son más pronunciados al disminuir la temperatura y en consecuencia, el tiempo que toma la formación de una fracción dada de cristal aumenta, y la rapidez de enfriamiento crítica para la formación de vidrio R_c disminuye.

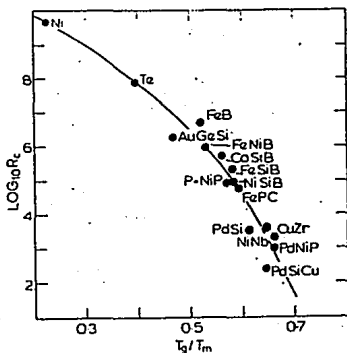


FIGURA II.2.- Valores teóricos calculados de la rapidez crítica de enfriamiento para la formación de vidrio, en función de la temperatura reducida de vidrio.

El valor teórico de R_c graficado en función de T_{g9} para diferentes vidrios metálicos se muestra en la figura II.2. Los

valores calculados de R_c varían de aproximadamente 10^{10} °K/s para un metal nominalmente puro hasta 10^2 °K/s para las aleaciones que forman vidrios fácilmente [6].

La implicación práctica de esto, es que para un enfriamiento unidireccional de una sección rectangular, el espesor máximo obtenible en fase vítrea X_m , se puede relacionar con el tiempo t_n , en el punto de inflexión de la curva T-T-T (tiempo-temperatura-transformación), por medio de la ecuación:

$$X_m = (D_1 t_n)^{1/2}$$

donde D_1 es la difusividad térmica promedio de la aleación líquida, por lo tanto, mientras menor es la velocidad de enfriamiento (R_c), mayor es el espesor máximo (X_m). Por ejemplo, X_m es del orden de 200 μm para $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ y para $\text{Pd}_{77.5}\text{Si}_{16.5}\text{Cu}_6$ es de aproximadamente 2 mm, lo cual coincide con las observaciones experimentales [6].

Para evitar la cristalización y obtener un material amorfo, el tiempo utilizado para enfriar hasta una temperatura por debajo de la curva, debe ser menor que el tiempo en el cual está posicionada en el punto de inflexión de la curva (T_n). Para silicatos y muchos polímeros orgánicos la posición del punto de inflexión esta a un tiempo de horas o incluso días, por eso es muy fácil pasar de largo la cristalización en estos materiales. Para metales puros, debido a su estructura atómica simple, toma

menos de un microsegundo para que comience la cristalización a la temperatura del punto de inflexión. De cualquier manera, en las aleaciones que forman vidrios metálicos interesantes, el punto de inflexión cae a unos cuantos milisegundos, las velocidades de enfriamiento adecuadas son del orden de 10^5 a 10^6 °C/s [6].

II.2.- RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO

Como es de esperarse, la rapidez de enfriamiento juega un papel fundamental en la posibilidad de fabricar cintas metálicas con características amorfas, sin embargo, también depende de varios factores.

Según la literatura, en el método de laminación por rotación, asumiendo que el chorro permanece poco tiempo en la superficie perimetral de un disco que gira a una velocidad de 6,000 rpm, y suponiendo que las longitudes de contacto están entre 22 y 31 mm, se obtienen tiempos de solidificación en un intervalo de 0.47 a 0.66 ms.

El hecho de que este sea o no, un tiempo suficiente de contacto para una completa vitrificación, depende de la rapidez de enfriamiento durante el contacto con el disco y de el intervalo entre T_m y T_g [6].

El problema asociado con la completa vitrificación de una aleación con ésta técnica se determina por dos factores, primero, la rapidez de enfriamiento debe ser lo suficientemente alta para pasar el punto de inflexión de la curva T-T-T; segundo, la temperatura de la cinta al salir de la superficie del disco debe ser menor que una temperatura T_c ; por debajo del punto de inflexión de la curva T-T-T, de manera que la curva de enfriamiento resultante de la radiación y convección subsecuente no intersecte la curva T-T-T de líquido cristal subenfriado, lo cual ocasionaría una cristalización parcial [6].

La rapidez de enfriamiento crítica para la formación de una fase amorfa puede estimarse a partir de la temperatura reducida de vidrio T_g/T_m de la aleación y una medición del incremento de enfriamiento requerido el cual está dado por $T_m - T_g$ [6].

Es más difícil mantener una estructura completamente amorfa en aleaciones en las que el incremento $(T_m - T_g)$ es grande, y/o el valor de T_g/T_m nos indica una velocidad crítica de enfriamiento cerca del límite del aparato. La rapidez de enfriamiento R_c producida se ha calculado en investigaciones especializadas mediante un estudio a partir de mediciones interlaminares en cintas con la composición eutéctica Al 17.3% Cu y de el tamaño de dendritas en cintas de Al 10.5%. Se obtuvo que para el método de laminación por rotación, una rapidez de enfriamiento de 3.5×10^6 °K/s [6].

A pesar de que existe cierta incertidumbre en el valor absoluto de la rapidez de enfriamiento calculada, el valor relativo es bastante confiable.

Si combinamos los tiempos de contacto calculados con la rapidez de enfriamiento determinada experimentalmente, y asumimos que ésta permanece constante durante todo el tiempo de contacto, la caída de la temperatura resultante mientras la cinta está en contacto con el disco, es aproximadamente $> 1000^{\circ}\text{K}$ [6].

II.3.- ESTABILIZACION DEL ESTADO VITREO

Como se mencionó anteriormente, el principal problema involucrado con la estabilización del estado vítreo puede comprenderse por lo menos parcialmente considerando dos temperaturas:

1) T_m , temperatura de fusión de equilibrio, por arriba de la cual no existe la fase sólida.

2) T_g , temperatura de transición vítrea, por debajo de la cual disminuyen los rearrreglos estructurales a tal magnitud que es posible la ocurrencia de una fase amorfa metaestable.

Se ha encontrado que el enfriamiento rápido entre estas dos temperaturas puede dar como resultado un producto amorfo, por lo cual la reducción de $T_m - T_g$, así como T_m , debería facilitar la estabilización del estado vítreo. T_g nos da una idea aproximada de la cantidad de energía necesaria para cambiar del orden de largo alcance en la fase cristalina, al orden de corto alcance en la fase amorfa, entonces T_g puede considerarse como una medida de la energía de interacción entre átomos vecinos.

Otro factor importante para obtener un producto amorfo a partir del fundido es la facilidad con la que se puede nuclear una fase cristalina, como se indica por la tensión superficial entre el cristal y el fundido [7].

Por supuesto, incluso si los puntos cristalinos fueran a nuclear, sería posible retener el estado amorfo inhibiendo el crecimiento de cristales en la muestra. A pesar de que se han encontrado correlaciones entre la facilidad de alcanzar el estado amorfo y los factores mencionados, tal parece no haber criterio absoluto para la formación de un vidrio [8,9,10].

Lo que domina la formación y la estabilidad de los metales vítreos es la desestabilización de las mezclas cristalinas y no la estabilización de la fase vítrea [11,12].

Una mezcla de elementos que por lo regular da varias fases con diferentes estructuras cristalinas, puede ser lo más adecuado

para la formación de la fase vítrea. Hay investigaciones que confirman este concepto, se ha encontrado que las aleaciones que contienen múltiples elementos como no metales y tierras raras forman un producto amorfo con mayor facilidad, esto es debido a que la velocidad crítica de enfriamiento requerida para formar una muestra amorfa con este tipo de mezclas es menor que con una muestra binaria.

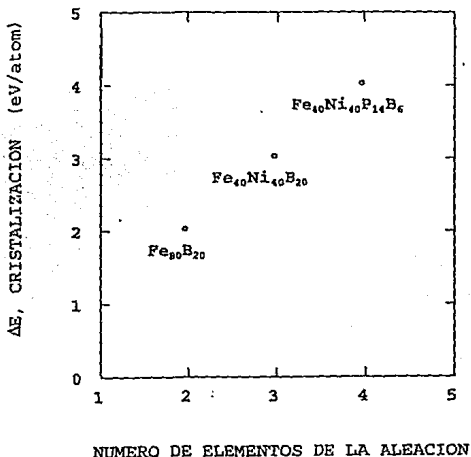


FIGURA II.3.- Estabilidad térmica de algunas aleaciones amorfas en función del número de elementos constituyentes.

La figura II.3 se basa en los datos de Luborsky [13] y

muestra que la energía de activación (estabilidad térmica) de un producto amorfo se incrementa con el número total de elementos de la aleación.

La energía de activación para la cristalización se deriva del tiempo necesario para cristalizar una muestra a varias temperaturas [13].

Algunos autores sostienen que la reducción de T_m es más importante que el aumento de T_g , ya que lo primero es más efectivo en la reducción del crecimiento de cristales [14].

A pesar de que hay efectos térmicos de aleación obvios, también existen efectos químicos que son capaces de cambiar las interacciones entre los átomos [12].

En teoría las aleaciones que se pueden obtener en estado vítreo con mayor facilidad, son los eutécticos. El diagrama de fases de la figura II.4 ilustra esto para el sistema Fe-B, que es un sistema importante por sus aplicaciones. A una composición eutéctica, la temperatura de fusión está en un mínimo, pero esa no es la característica más importante que hace que un líquido eutéctico se transforme fácilmente en amorfo. Lo que parece ser más importante es el gran cambio estructural que debe ocurrir en el líquido justo arriba, y en las dos fases sólidas, justo abajo de la temperatura eutéctica.

RANGO APROXIMADO DE
FORMACION DE CRISTALES

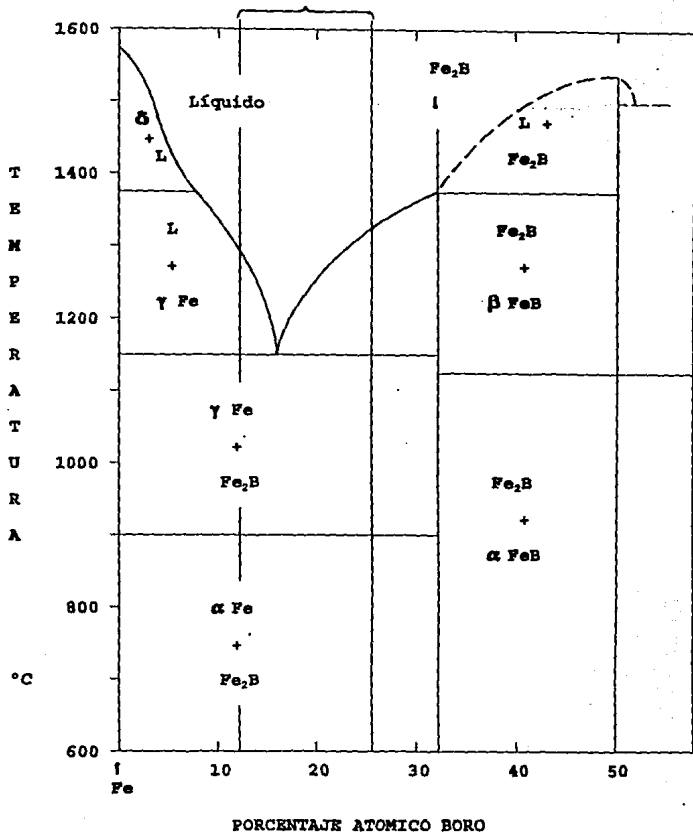


FIGURA II.4.- Diagrama de fases del sistema Fe-B.

Podríamos decir que si tenemos una aleación con una composición eutéctica, puede haber un incremento en la viscosidad del fundido, y por lo tanto, se debe facilitar la producción de una muestra amorfa.

Por supuesto, esto es una aproximación, y algunas veces se ha encontrado que el estado vítreo se consigue con mayor facilidad cuando la composición de la aleación es ligeramente diferente de la composición eutéctica.

Las dificultades que se presentan en la producción de cintas amorfas son varias y no están relacionadas únicamente con alcanzar la rapidez de enfriamiento extremadamente alta que se requiere para mantener la estructura amorfa, sino que además aparecen problemas técnicos que no son fáciles de resolver, entre los que se encuentran:

a) La dificultad de extender el proceso de aleaciones con bajo punto de fusión, a otro tipo de aleaciones más refractarias.

b) En un producto obtenido a alta velocidad a partir de un fundido, la superficie solidifica libremente.

c) La producción continua de grandes cantidades de material con la necesidad de mantener las variables térmicas y geométricas en el estado estacionario.

II.4.- METODOS PARA PRODUCIR METALES AMORFOS

Se han reportado en la literatura internacional diferentes métodos de solidificación a través de un enfriamiento ultra rápido, con la finalidad de evitar que el material fundido cristalice al solidificar. Entre los métodos más importantes están el de evaporación sobre un sustrato frío, implantación de iones, electrólisis y el de laminación por rotación. En cada uno de estos procesos es posible alcanzar un enfriamiento rápido, tal que impida la difusión atómica y por lo tanto inhiba la nucleación y el crecimiento de una estructura en equilibrio [15].

II.4.1.- METODO DE EVAPORACION SOBRE UN SUSTRATO FRIO

Estas técnicas de fabricación de muestras están basadas en una constitución del producto átomo por átomo, y requieren que la energía cinética del átomo condensador exceda la energía de unión (ligadura) de los átomos en la superficie del sustrato. Un arreglo de átomos con poca movilidad en la superficie del sustrato, fomentarán la formación de vidrio metálico por la subsecuente deposición de átomos. El método de evaporación de preparación de muestras es muy sensible a las condiciones de deposición. Por ejemplo, la presencia de una especie de átomo de impureza como el oxígeno, facilita la formación de una estructura atómica amorfa. El sustancialmente alto enfriamiento en éste método (sobre 10^8 °K/s) permite la formación de algunos vidrios metálicos, que no pueden ser producidos por otras técnicas. De hecho, las altas temperaturas de templado y los elementos químicamente reactivos (como las tierras raras) se pueden combinar con otros elementos a bajas temperaturas para formar aleaciones amorfas [5].

En éste método los ingredientes se evaporan por calentamiento y después se depositan sobre un sustrato enfriado a la temperatura de 77 °K o menos; empleando nitrógeno líquido como agente enfriante. Las aleaciones que se obtienen incluyen Mg + Cu, Mg + Sb, Bi + Ge, Cd + Ge + As y Au + Co [16].

II.4.1.- METODO DE EVAPORACION SOBRE UN SUSTRATO FRIO

Estas técnicas de fabricación de muestras están basadas en una constitución del producto átomo por átomo, y requieren que la energía cinética del átomo condensador exceda la energía de unión (ligadura) de los átomos en la superficie del sustrato. Un arreglo de átomos con poca movilidad en la superficie del sustrato, fomentarán la formación de vidrio metálico por la subsecuente deposición de átomos. El método de evaporación de preparación de muestras es muy sensible a las condiciones de deposición. Por ejemplo, la presencia de una especie de átomo de impureza como el oxígeno, facilita la formación de una estructura atómica amorfa. El sustancialmente alto enfriamiento en éste método (sobre 10^8 °K/s) permite la formación de algunos vidrios metálicos, que no pueden ser producidos por otras técnicas. De hecho, las altas temperaturas de templado y los elementos químicamente reactivos (como las tierras raras) se pueden combinar con otros elementos a bajas temperaturas para formar aleaciones amorfas [5].

En éste método los ingredientes se evaporan por calentamiento y después se depositan sobre un sustrato enfriado a la temperatura de 77 °K o menos; empleando nitrógeno líquido como agente enfriante. Las aleaciones que se obtienen incluyen Mg + Cu, Mg + Sb, Bi + Ge, Cd + Ge + As y Au + Co [16].

II.4.2.- METODO DE IMPLANTACION DE IONES

La gran variedad de muestras atómicas las cuales pueden ser introducidas en la superficie de muchos materiales por implantación de iones ha generado un reciente interés en el uso de éste método para la fabricación de capas superficiales amorfas. Las medidas estructurales de algunas muestras, indican que las aleaciones implantadas son idénticas a las aleaciones de la misma composición nominal, hechas por técnicas convencionales. La implantación de iones tiene que ser considerada como una técnica de modificación superficial debido a la pérdida de energía sufrida por la penetración de iones en las colisiones sucesivas con los átomos en la superficie del material. Por lo tanto, la probabilidad de modificar la mayoría de las muestras en una etapa simple de operación por implantación de iones, parece no ser mucha para muestras delgadas [5].

En éste método se colocan en un plasma (en este caso un gas se mantiene ionizado mediante un campo eléctrico) el blanco con la composición deseada y el sustrato. Los iones del gas se aceleran hacia la superficie del blanco y arrancan átomos de la misma; estos átomos se depositan sobre el sustrato formando una capa delgada. De este modo se han obtenido fases de Ni + P + B, Fe + C, Fe + B + P y Pd + Co + Si [16].

II.4.3.- METODO DE ELECTROLISIS

Mientras varios sistemas de aleaciones amorfas de metal-metaloide en transición han sido preparados por deposición química y electrodeposición, la composición precisa del producto depende mucho de las condiciones de depósito y composición de baño durante la formación de muestras. En contraste, la fabricación de muestras por otros métodos da como resultado un producto con una composición muy similar al fundido del cual fueron formados [5].

Se han descrito varios tipos de composiciones de baño y parámetros de depósito. En particular, algunos efectos de composición de baño y parámetros de quimioplastia (revestimiento por reducción química) en la formación de la aleación amorfa de Ni-B ha sido estudiada por Watanabe y Tanabe[5]. Las aleaciones amorfas pueden ser formadas por métodos de deposición si el baño usado está apto para suministrar 10-30 % de átomos de fósforo y boro. La tendencia a incorporar hidrógeno en la estructura atómica de las muestras puede tener un efecto adverso en las propiedades de las aleaciones amorfas hechas por los métodos de deposición química o deposición electrolítica.

Este proceso es básicamente el mismo que se emplea en la galvanoplastia con níquel; y permite obtener aleaciones de P con Ni, Fe, Co o Pd [16].

II.4.4.- METODO DE LAMINACION POR ROTACION

Laminación por rotación es el método más usado hoy en día para producir cintas largas y continuas. De hecho, el desarrollo de ésta técnica ha sido la principal causa del progreso tan acelerado que ha tenido la tecnología de rápida solidificación desde los años 70's [4].

Este proceso debe su nombre (melt-spinning) al hecho que éste incluye la extrusión del metal fundido para producir fibras finas en una forma tan semejante a la usada para la manufactura de fibras textiles sintéticas [4].

El proceso de laminación por rotación consiste en fundir en un crisol una aleación previamente preparada. Cuando dicha aleación está fundida, se aplica presión mediante un gas inerte (argón) en un extremo del crisol, lo que obliga a que el material fluya por el otro extremo, que tiene un pequeño orificio. El material al salir choca contra la superficie de un disco giratorio. El choque hace que el chorro se aplane transformándose en una cinta que es enfriada súbitamente por el propio disco, lográndose que al solidificar quede en estado amorfo [15].

Algunas aleaciones obtenidas mediante éste método son aquellas que contienen Au + Si, Pd + Si, Fe + P + C y Cu + Zr [16].

En el capítulo siguiente, profundizaremos más sobre éste método, que por su importancia es considerado más ampliamente.

CAPITULO III
LAMINACION POR ROTACION

III.1.- ANTECEDENTES

Por más de doscientos años se han formado láminas delgadas lenta y directamente del fundido a partir de aleaciones con bajo punto de fusión. En 1908 se patentó un proceso que ya comprendía todas las características de lo que hoy llamamos melt-spinning. Antes y después de esto, se llevaron a cabo avances para producir filamentos metálicos a partir del fundido, pero ninguno de ellos se había puesto en práctica a escala industrial. No fue sino hasta después del descubrimiento de las propiedades únicas de los metales amorfos que se tomaron medidas para la investigación en éste campo [17].

La laminación por rotación no es de ninguna manera un proceso concebido recientemente, a lo largo del siglo ha sido publicado, sin embargo no se había presentado la posibilidad de producir aleaciones amorfas por éste método sino hasta mediados de la década de los años sesentas, cuando ocurrió un incremento en la actividad de la investigación en éste campo, ya que se intentaba desarrollar un método de enfriamiento rápido para producir sólidos de no equilibrio, soluciones supersaturadas, nuevas fases metaestables y sólidos no cristalinos [17].

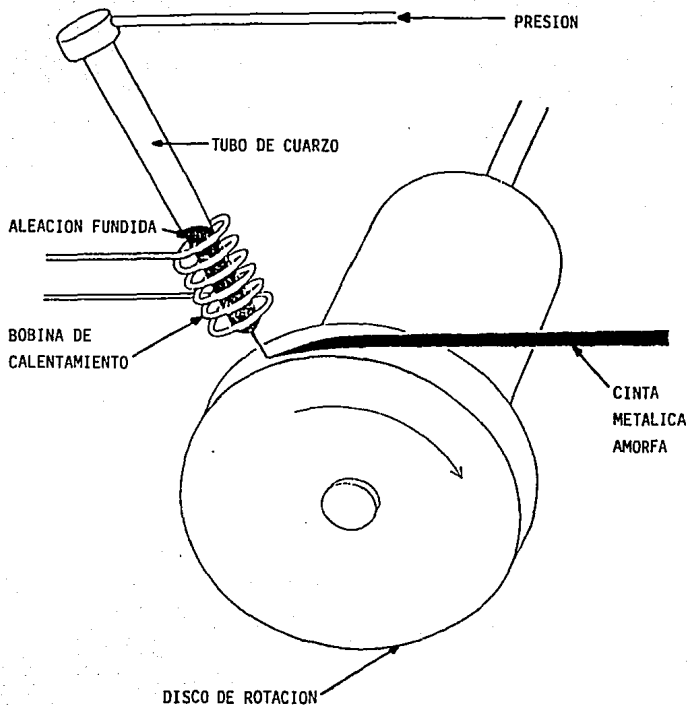


FIGURA III.1.- Diagrama esquemático en donde se puede observar el proceso de laminación por rotación, alcanzándose grandes razones de enfriamiento necesarios para la formación de los vidrios metálicos.

En ésta técnica, el propósito es fundir el material en un crisol, y una vez fundido, obligarlo a salir a través de un orificio, aplicando presión de gas para formar un chorro estable de material fundido, como se muestra en la figura III.1.

En algunos casos se utiliza argón como gas de expulsión, el chorro se dirige a la superficie exterior de un disco que gira rápidamente. Este disco es una superficie fría, moviéndose a alta velocidad, lo cual genera una cinta cuya anchura es igual a la de la superficie que se expande el chorro de material fundido al caer sobre el disco [18,19].

En detalle, la eficiencia de solidificación de ésta técnica depende de varios factores: diámetro y velocidad del chorro, la velocidad del disco, las conductividades térmicas tanto del material a fundir como del sustrato (disco), el coeficiente de transferencia de calor de la interfase fundido-sustrato y el tiempo de contacto entre ambas [3].

El diámetro del chorro y la velocidad del disco determinan las dimensiones finales de la cinta, altas velocidades y perforaciones pequeñas, dan como resultado cintas delgadas, las cuales, para una presión de expulsión dada incrementan su ancho proporcionalmente a la velocidad del disco, debido a la dispersión del fundido [20].

III.2.- FORMACION DE UNA CINTA CONTINUA

En todas las modalidades del método de laminación por rotación sobre bloque frío, se dirige el chorro de aleación sobre el disco, inmediatamente ocurre la formación de una acumulación de material líquido formando una especie de charco de fundido relativamente grueso, justo debajo del orificio del crisol, en éste charco de fundido ocurre parte del enfriamiento antes de que el material se extraiga en forma de cinta por medio del giro del disco [21,22].

Existen dos posibles maneras de considerar la formación de la cinta, una de ellas es con transporte controlado y otra es con equilibrio de energía [1].

La primera considera que la cinta se forma por transporte de momentum y/o calor entre la acumulación de material fundido y la superficie del disco.

La segunda de estas consideraciones propone que las dimensiones de esta acumulación de fundido que mencionamos y por lo tanto las dimensiones de la cinta, estarán determinadas por el

equilibrio de la energía cinética, la energía de la superficie y la disposición viscosa del chorro, el charco, la superficie fría y la capa límite de aire que se mueve con la superficie fría [1].

Si consideramos la acumulación de material fundido como una especie de charco, la región del charco donde inicie el chorro se encuentra a un régimen térmico e hidrodinámicamente complejo, pero se pueden hacer simplificaciones importantes aplicando la teoría de la capa límite [23]. La cual analiza al charco de líquido en una zona en la cual los efectos térmicos y de momentum de la superficie fría son máximos; y una capa externa en la que éstos efectos son prácticamente nulos. Lo cual nos lleva a distinguir ciertas limitantes para la formación de la cinta:

a) Si la transferencia de calor es mucho más rápida que la transferencia de momentum, se formará una capa límite sólida adyacente a la superficie fría, que se propagará a través del "charco" de material fundido. El material que se encuentra dentro de la capa congelada se moverá a la velocidad del disco.

Fuera de la capa congelada, habrá una zona de transición de velocidad cuya extensión dependerá de la temperatura y viscosidad características de la aleación. Finalmente en la zona exterior, el material fundido va a enfriarse únicamente debido al transporte de momento, figura III.2.

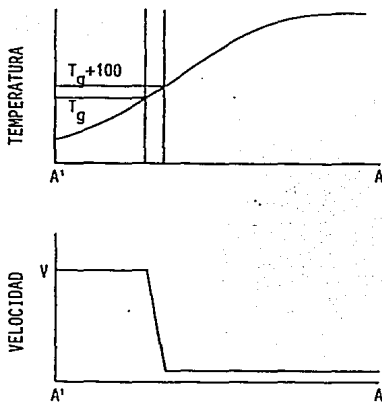
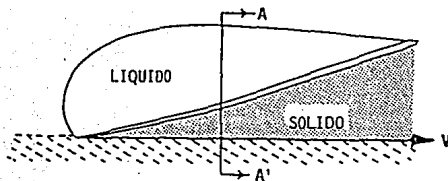


FIGURA III.2.- Perfiles de temperatura y velocidad a través de la acumulación de material fundido [1].

b) Si el transporte de momento de la superficie fría es mucho más rápido que la transferencia de calor, una capa líquida será arrastrada fuera del charco de material fundido por el sustrato móvil, de manera que lo que solidifica es la corriente de material fundido [1].

Para determinar cual de los casos es el que se presenta, nos basamos en las propiedades de transporte de material fundido. Se ha demostrado (estudios realizados por Schlichting) [23], que la relación entre las profundidades de penetración de los efectos térmicos y de momentum en un fluido cerca de una frontera sólida, está dada por:

$$\delta_T / \delta_m \approx (P_r)^{-1/2}$$

donde P_r es el número de Prandtl del fluido:

$$P_r = C_p \mu / k$$

éste número es adimensional; δ_T es el espesor de la capa límite térmica y δ_m es el espesor de la capa límite de momentum, ambas en [cm]; C_p es la capacidad calorífica, en [cal/g °C]; μ es la viscosidad, en [g/cm s]; k es la conductividad térmica, en [cal/cm s °C] [1].

Para un metal en estado líquido, la propagación térmica es aproximadamente tres veces mayor que la propagación de momentum. Es por esto que se espera que la formación de las cintas metálicas amorfas esté dominada por la formación y crecimiento de una capa límite en la zona de contacto del líquido con el sustrato frío.

En el contexto de los metales vítreos, la penetración de una

capa límite solidificada, podría definirse como la isoterma correspondiente a la temperatura de transición vítrea [1].

III.3.- ANALISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Existe solamente un análisis de la transferencia de calor para ésta situación en particular, aquí se presenta un análisis aproximado, para el cual se hicieron las siguientes aproximaciones:

- a) Propiedades térmicas constantes (no hay cambio de fase).
- b) Distribución inicial de temperatura constante para el sustrato y para el charco.
- c) Enfriamiento despreciable en la superficie superior del charco.
- d) La temperatura en la parte inferior del bloque frío se mantiene a la temperatura inicial por medio de la circulación de un enfriador.

- e) Calentamiento viscoso despreciable en la zona de transición en el límite solidificado de la capa y el charco de líquido.
- f) Espesor constante del charco.
- g) Flujo de calor unidimensional (no se consideran los efectos en las orillas).

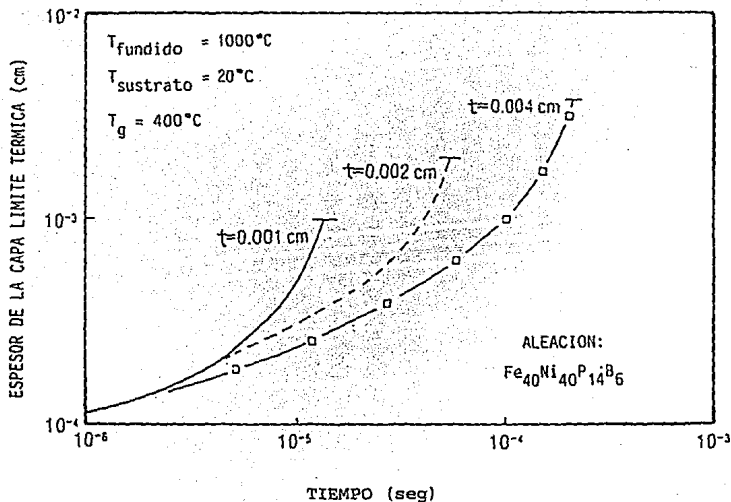


FIGURA III.3.- Espesor de la capa limite solidificada contra tiempo para varios espesores de cinta [1].

h) Resistencia constante despreciable en la interfase entre el charco y el sustrato frío [1].

Debe hacerse notar que la característica principal del material del sustrato es el producto de su conductividad térmica, su densidad y su capacidad calorífica ($k\rho C_p$); y no su difusividad térmica ($k/\rho C_p$).

Aplicando la teoría de la capa límite [23], podemos considerar ésta acumulación de material como formada por dos zonas, como se muestra en la figura III.2. Los efectos de la superficie fría sólo afectan a la zona inferior (zona de la capa límite). En la figura III.3 se muestra el espesor de la capa límite térmica en función del tiempo para diferentes espesores de cinta, como resultado de cálculos realizados por Kavesh [22].

En un análisis experimental hecho por Pond y Winter [24] se obtiene como resultado básicamente la forma general de la interfase dinámica sólido-líquido, como se predice con la teoría de la capa límite. Los conceptos generales acerca de la acumulación de material fundido sobre el sustrato, ayudan a explicar algunas observaciones experimentales, por ejemplo, la expulsión de la aleación a presiones muy altas, da como resultado una cinta con sección transversal en forma de hueso, es decir, el filamento es más ancho en las orillas que en el centro.

Esto se puede explicar fácilmente considerando que a velocidades de expulsión muy altas, se incrementa el volumen de aleación fundida depositada. En lugar de tener éste exceso de material disperso y mojando la superficie, se puede acumular alrededor del chorro en el impacto, dando como resultado un mayor espesor de material en las orillas de la cinta, como se muestra en la figura III.4 [24].

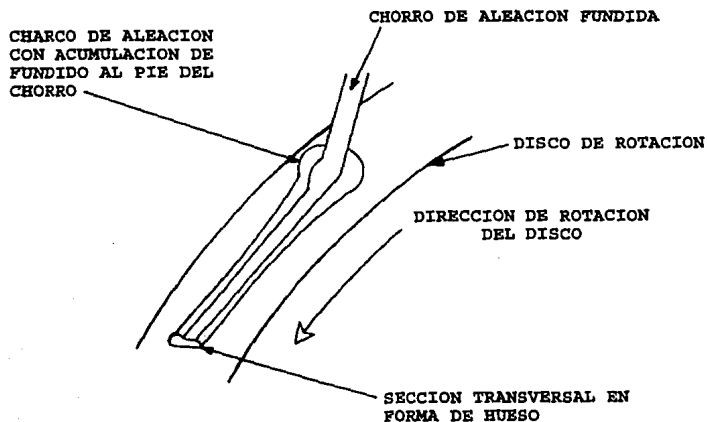
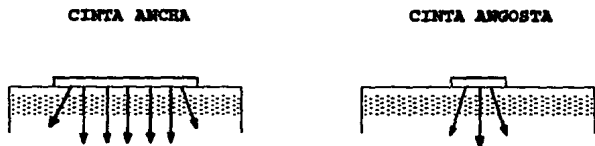


FIGURA III.4.- Formación de una cinta de sección transversal en forma de hueso.

El uso de crisoles con orificios alargados debería dar como

resultado una acumulación de material fundido más ancha. Sin embargo, el aumento en el tamaño del orificio ocasiona problemas con la disipación del calor, entonces la capacidad de enfriamiento del disco no es lo suficientemente grande como para evitar ondulaciones en las cintas cuando éstas tienen un espesor de 2.5 a 3 mm de ancho [25].



DISCO DE ROTACION
VISTA TRANSVERSAL

FIGURA III.5.- Representación esquemática de patrones de flujo de calor para la formación de cintas anchas y delgadas.

La manufactura de cintas anchas involucra una mayor transferencia de calor que la necesaria para producir cintas angostas, como se muestra en la figura III.5. Uno de los parámetros más importantes que controlan la transferencia de calor durante el enfriamiento del producto, es el coeficiente de transferencia de calor entre la cinta y el sustrato [25]. Este coeficiente depende de una gran variedad de factores, tales como

velocidad, densidad, viscosidad, conductividad térmica, calor específico, etc. Dicha dependencia tan amplia, hace difícil llegar a una expresión analítica para determinar al coeficiente de transferencia de calor.

Existen estudios de solidificación de un gran número de líquidos que se han usado como gúta; además se han realizado estudios numéricos sobre el enfriamiento de aleaciones cristalinas [26,27].

III.4.- EFECTO DE ALGUNAS PROPIEDADES DEL FUNDIDO Y DEL SUSTRATO

A pesar de que la tensión superficial de una aleación fundida se ve afectada por la temperatura, éste efecto es relativamente pequeño comparado con la dependencia de la viscosidad con la temperatura. La viscosidad del fundido es altamente dependiente de la temperatura y puede afectar por lo tanto las dimensiones de la cinta. De hecho, investigaciones realizadas indican que el ancho de la cinta se incrementa significativamente con el sobrecalentamiento del fundido, como es de esperarse [28].

El límite superior de sobrecalentamiento se puede establecer con la temperatura de operación máxima permisible del crisol de expulsión y/o por la capacidad de enfriamiento del disco [28].

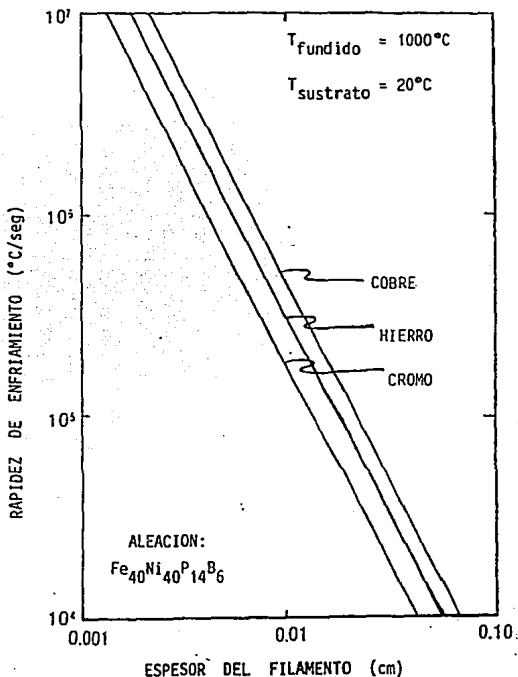


FIGURA III.6.- Relación de la rapidez de enfriamiento con el espesor de la cinta y el material del sustrato.

Un factor crucial para alcanzar las velocidades extremadamente altas requeridas para hacer una muestra amorfa, es la naturaleza del sustrato y la condición de su superficie [17].

Algunos autores reportan muy poca diferencia en la efectividad usando cualquiera de los metales de alta conductividad como sustrato, pero cálculos obtenidos por Kavesh [22] indican una diferencia significativa en la velocidad de enfriamiento con diferentes materiales, como se muestra en la figura III.6.

Se espera que la temperatura del sustrato tenga poco efecto en la velocidad de solidificación de la cinta, siempre y cuando ésta temperatura esté por debajo de las temperaturas de transición vítrea y de cristalización de la especie amorfa. Los patrones de difracción de rayos X y pruebas mecánicas de la muestra no reportan diferencias en la parte inicial y final de la cinta. Con sustratos con propiedades de transporte térmico pobres, se anticipa un alto grado de calor local generado. Este efecto se ha verificado experimentalmente comparando discos de cobre con discos de acero inoxidable [29].

CAPITULO IV
DESCRIPCION DEL EQUIPO

IV.1.- GENERALIDADES

El sistema utilizado en la realización de éste trabajo se encuentra en el Laboratorio del Departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto de Física de la U.N.A.M., donde se construyó un equipo experimental para producir aleaciones amorfas por el método de laminación por rotación.

En la figura IV.1 se muestra una ilustración esquemática del equipo utilizado para producir cintas metálicas amorfas, y en ella se pueden observar algunos de sus componentes principales, como lo son: la cámara de vacío (1), la bomba mecánica de vacío (2), el disco de rotación (3), el motor de inducción (4), el crisol donde se funde el material (5), el soporte del crisol (6), el sistema de presión de inyección (7) y el generador de radiofrecuencia (8).

A continuación se describen cada una de las partes principales del equipo, para la fabricación de cintas metálicas amorfas.

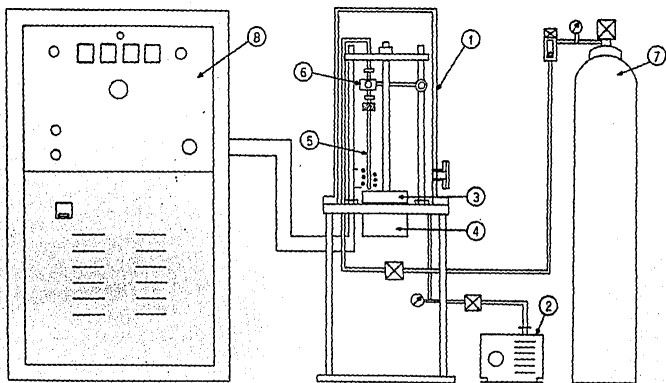


FIGURA IV.1.- Ilustración esquemática del equipo utilizado para producir cintas metálicas amorfas, donde se observan las siguientes partes: Cámara de Vacío (1), Bomba de Vacío (2), Disco de Rotación (3), Motor de Inducción (4), Crisol (5), Soporte del Crisol (6), Sistema de Presión de Inyección (7) y Generador de Radiofrecuencia (8).

IV.2.- LA CAMARA DE VACIO

Para hacer la cámara de vacío, se cortó un cilindro de aluminio a una altura aproximada de 56 cm, y se le soldó una tapa con un diámetro aproximado de 30 cm del mismo material en su parte superior. Además, se le hizo una ventana circular de aproximadamente 13 cm de diámetro en la parte lateral, y se le acopló un aro de aluminio de 38 cm de diámetro externo en la parte inferior, como se puede observar en la fotografía de la figura IV.2.

La ventana lateral se hizo con la intención de poder observar el momento preciso en que se funde la aleación, y para poder medir la temperatura del fundido por medio de un pirómetro óptico. Se utiliza un o-ring como sello entre la ventana y una tapa que se encuentra atornillada a ésta. La tapa tiene una ventanilla circular sellada con un vidrio mediante un o-ring.

La parte inferior del cilindro se acopla sobre una placa circular de acero inoxidable de 38 cm de diámetro y 1.8 cm de espesor. Esta placa está soportada por cuatro patas (barras) de acero de bajo carbono atornilladas en un extremo a ésta, y en el

otro a una base (placa) de acero de aproximadamente 43 cm de diámetro y 1.3 cm de espesor. La longitud aproximada de las patas es de 82 cm y su diámetro es de una pulgada (figura IV.2).

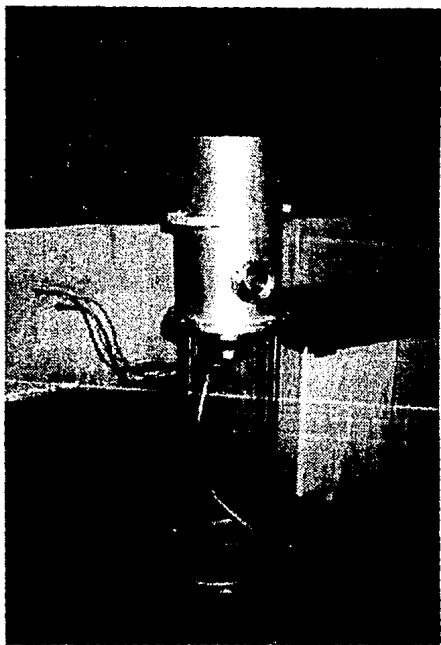


FIGURA IV.2.- Fotografía de la cámara de vacío.

La cámara de vacío tiene tres tubos de cobre de 3/16" de diámetro exterior que la atraviesan por la parte inferior. Dos de éstos sirven para conectar la bobina inductora colocada dentro de la cámara con el generador de radio frecuencia. El otro tubo sirve para inyectar argón a presión por el extremo superior del crisol. Los tres tubos están sujetos a la pared de la cámara con sellos de teflón, cajas y cuerdas.

Para lograr el vacío requerido y evitar que las muestras se oxiden, se utilizó una bomba mecánica de vacío "Trivac", Modelo DBA, con motor trifásico A.C., cuya velocidad nominal o desplazamiento es de 10 m³/hr.

Esta bomba es de tipo compuesta, ya que lleva a cabo el bombeo en dos etapas en serie, permitiendo así obtener vacíos del orden de 10⁻⁴ torr.

La bomba funciona mediante un mecanismo de bombeo que se encuentra inmerso en un depósito de aceite. Además de sellar el mecanismo de bombeo de la atmósfera, el aceite sirve como refrigerante y lubricante. Y a bajas presiones, donde el volumen de gas es bajo, el aceite inyectado en la segunda etapa suministra la masa necesaria para forzar a la válvula de la segunda etapa a abrirse. Las moléculas de gas que se desprenden son impulsadas hacia el depósito para así esparcirse hacia la atmósfera [30].

A la cámara de vacío se le hicieron múltiples pruebas, primero para detectar las fugas que tenía y corregirlas, y después para medir el vacío que podía alcanzarse. Las principales fugas que se detectaron a la cámara de vacío fueron localizadas en los sellos de los tubos de cobre y en el vidrio de la ventana, las cuales fueron corregidas oportunamente. Mientras que el vacío alcanzado dentro de la cámara fue de 10^{-3} torr.

IV.3.- EL DISCO DE ROTACION

El disco de rotación utiliza un rotor centrífugo con baleros magnéticos e hidrodinámicos, y es movido por un motor externo que opera por inducción magnética.

El disco de rotación es en realidad una pirinola de aluminio, que tiene un cilindro de 13 cm de diámetro y 3 cm de altura, y una barra de 1" de diámetro y 32 cm de longitud (figura IV.3). En la parte inferior, la pirinola tiene un rodamiento de 2.5 cm de diámetro y un espesor aproximado de 9 mm. Y en la parte superior, la pirinola tiene pegado un imán, el cual permite una mejor estabilidad.

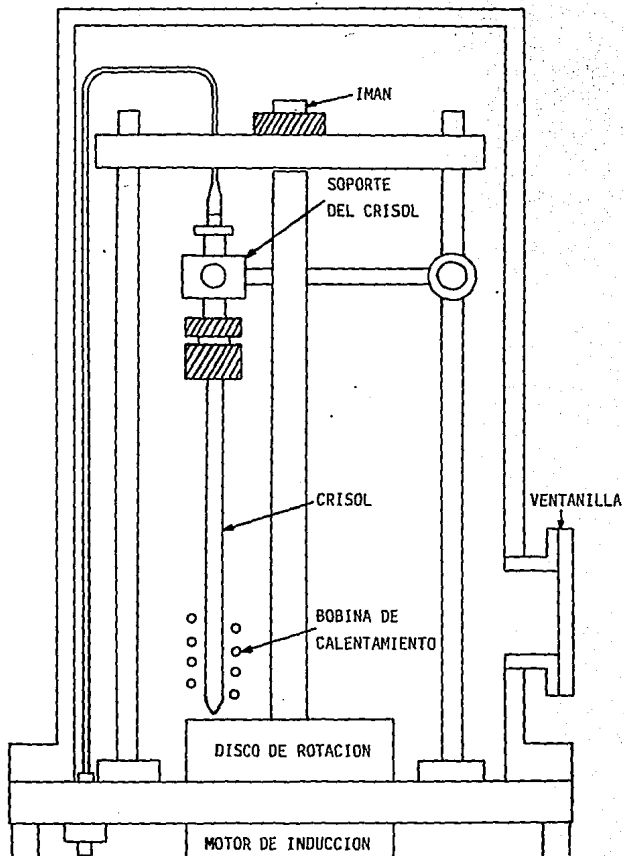


FIGURA IV.3.- Ilustración esquemática de la cámara de vacío, en donde se pueden observar el disco de rotación, el crisol y su soporte.

Uno de los problemas en ésta parte del trabajo fue el balancear el disco, ya que teníamos que evitar que éste comenzara a vibrar, y pudiese con ello quebrar los tubos de cuarzo.

Cabe mencionar que fue necesario balancear tanto en la parte superior, como en la parte inferior de la pirinola. Primero se balanceaba arriba colocando los pesos necesarios, y posteriormente la parte de abajo. Finalmente se logró balancear casi por completo, colocando un pequeño peso arriba y dos aún menores debajo del disco, y haciendo una pequeña muesca en la parte superior de la barra.

Una vez balanceado el disco, se realizaron varias pruebas para conocer la velocidad angular que podía alcanzarse; lográndose obtener velocidades superiores a 15,000 rpm en pruebas realizadas al vacío.

IV.4.- EL CRISOL Y SU SOPORTE

Como crisoles se utilizaron tubos de cuarzo, los cuales por ser transparentes nos permiten observar la fundición directamente, haciendo posible la medición de la temperatura de

la aleación fundida mediante un pirómetro óptico. Otra ventaja de los tubos de cuarzo es que son malos conductores del calor, y por lo tanto, evitan que éste se conduzca a través de ellos y funda el o-ring que sujeta al tubo con el soporte.

Los tubos se encuentran completamente abiertos en su extremo superior y tienen un pequeño orificio de aproximadamente 1 mm de diámetro en el fondo, por el cual debe fluir la aleación al fundirse.

El soporte consiste en un dispositivo que se sujeta a una de las tres barras que se encuentran fijas, mediante tornillos sobre la placa inferior de la cámara de vacío. Este dispositivo puede deslizarse a lo largo de la barra, alcanzando con esto la altura requerida por el crisol; además sujeta a otra barra perpendicularmente, la cual también tiene la libertad de desplazarse y sujetarse en la posición deseada. Al otro extremo, la barra se acopla a otro dispositivo horizontalmente, el cual tiene adaptado un tubo con cuerdas en donde se sujetan los crisoles (figura IV.4).

El diseño de este dispositivo de soporte y sujeción, permite variar la altura y el ángulo de inclinación de los crisoles, siendo esto necesario, debido a la diversidad de tamaños de los crisoles y a la necesidad de modificar el ángulo de inclinación.

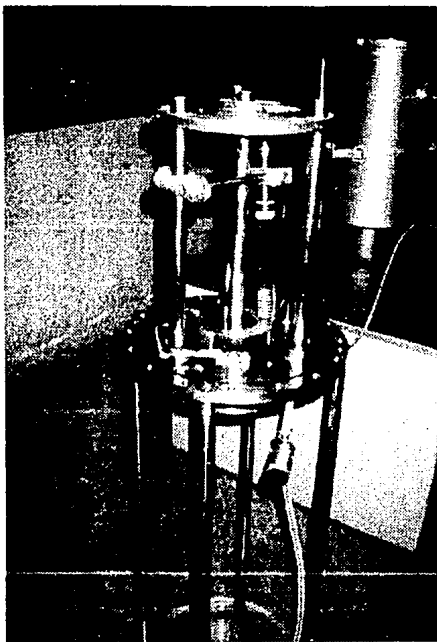


FIGURA IV.4. - Fotografía en la que se muestra el crisol y su soporte colocado en el equipo.

IV.5.- EL SISTEMA DE PRESION DE INYECCION

El sistema de presión de inyección cuenta con un cilindro de argón a alta presión que tiene a la salida un manómetro, y está conectado a la cámara de vacío por medio de una manguera que llega a un tubo de cobre de 3/16" de diámetro exterior que atraviesa la cámara (figura IV.1). La manguera tiene colocada una válvula que nos permite regular mejor el flujo de argón. Como se mencionó anteriormente, el tubo de cobre está sujeto a la cámara de vacío mediante un sello de teflón, una caja y cuerda.

El tubo de cobre sube por dentro de la cámara, y mediante un trozo de manguera reforzada se conecta al tubo del soporte del crisol.

El argón tiene en este proceso dos funciones: llenar de gas la línea y el crisol, previamente y durante el calentamiento del crisol de cuarzo; y presurizar el espacio sobre la columna de aleación fundida y expulsar el fundido en forma de chorro a través del orificio en la parte inferior del crisol de cuarzo.

IV.6.- EL GENERADOR DE RADIOFRECUENCIA

Dentro del calentamiento por radiofrecuencia (RF) existen dos variantes: el inductivo y el dieléctrico. El primero se emplea para materiales conductores y se basa en la aplicación de un campo magnético intenso de alta frecuencia. El calor se genera mediante corrientes parásitas en el material o por histéresis en el caso de materiales ferromagnéticos. De esta manera se pueden calentar objetos metálicos aún cuando se encuentren encapsulados en ampolletas aislantes, como los electrodos de un bulbo al vacío [31].

Para los materiales aislantes ó semi-aislantes se emplea el calentamiento dieléctrico o capacitivo. En este proceso, el material se coloca como dieléctrico de un capacitor al que se le aplica una fuente de tensión de RF y el calor se genera por fricción molecular [31].

Para calentar y fundir la aleación se utilizó un generador de radiofrecuencia trifásico de 1 MHz y 7.5 kW de potencia (figura IV.5). La energía de éste se lleva al interior de la cámara mediante un transformador de RF y una línea de transmisión que termina en el inductor enrollado alrededor del crisol. Al energizarse el generador, ese inductor actúa como primario de un

transformador, en el que el secundario es el propio metal a fundir.

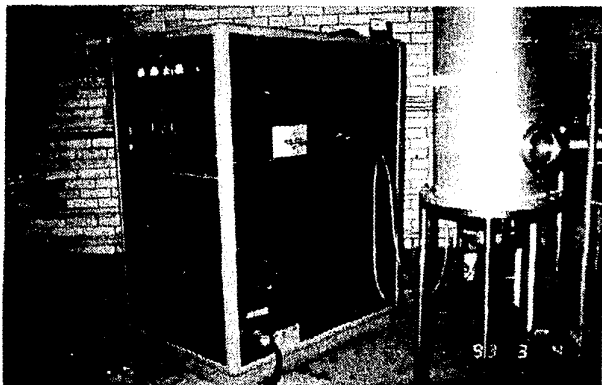


FIGURA IV.5.- Fotografía del Generador de Radiofrecuencia acoplado al sistema.

Para formar la bobina de inducción se utilizó tubería de cobre con un diámetro de $3/16''$. Esta bobina se monta a través de la parte inferior de la cámara de vacío y se orienta con su eje a 75° aproximadamente, respecto a la base. En el interior de la tubería se hace circular agua de enfriamiento, la cual es indispensable para poder trabajar con el horno.

CAPITULO V
DESARROLLO EXPERIMENTAL

V.1.- ALEACIONES

Siendo que la preparación de aleaciones no era el objetivo de éste trabajo, nos limitamos a utilizar aleaciones sencillas hechas en el Instituto de Física, y otras que nos proporcionaron por parte de la Facultad de Química de la U.N.A.M.

Las aleaciones fueron formadas introduciendo la mezcla de elementos en la proporción requerida en un crisol de grafito de alta pureza, introduciendo éste dentro de otro crisol de cuarzo, y formando vacío de por lo menos 5×10^{-5} torr. El tubo de cuarzo, se sella y se introduce en una bobina de calentamiento por inducción, figura V.1. El grafito se calienta lentamente a aproximadamente 1000 - 2000 °C y se mantiene a ésta temperatura durante unos 30 segundos para asegurar la fundición total de los elementos de la aleación.

Las aleaciones que se prepararon en el laboratorio del Instituto de Física de esta manera, fueron principalmente binarias, y tuvieron como componentes algunos de los siguientes elementos: aluminio, plomo, silicio, indio, estaño, hierro, boro y cobre.

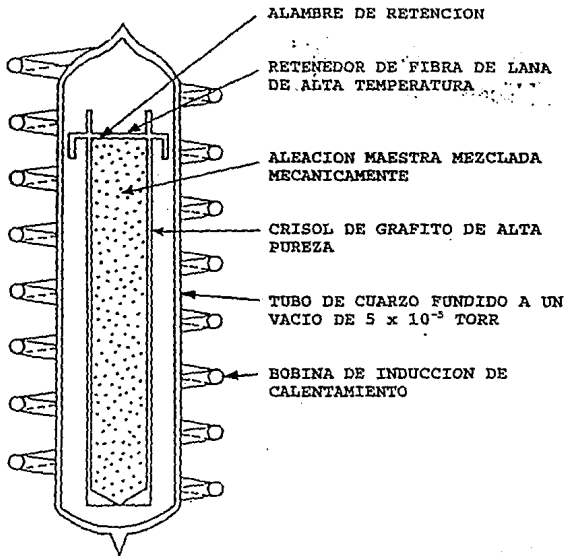


FIGURA V.1.- Sistema de preparación de las aleaciones.

Las aleaciones preparadas y seleccionadas para los experimentos fueron las siguientes:

Al, $Pb_{94}In_6$, $Pi_{50}Si_{50}$, Sn, $Cu_{30}Si_{30}$, $Fe_{73}B_{16}Si_5$

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

V.2.- DESCRIPCION DE LOS EXPERIMENTOS

Para poder realizar cada uno de los experimentos en el equipo de laminación por rotación, se deben seguir los pasos que a continuación se describen:

Primero se debe limpiar perfectamente todo el interior de la cámara de vacío con gasas y acetona; cuidando de no dejar rastros de aceite o grasa, ya que ello provocaría la contaminación de las muestras y ocasionaría algunos problemas para lograr el vacío deseado. También se deben limpiar los tubos de cuarzo con ácidos, acetona y/o ultra sonido, para no dejar rastros de aleaciones utilizadas anteriormente. Las aleaciones se deben tener perfectamente identificadas en diferentes frascos o recipientes, y después de pesarlas y limpiarlas con acetona y lija, se pueden utilizar en las distintas pruebas.

Ya teniendo todo el equipo limpio, se debe proceder a colocar la aleación dentro del crisol y éste en el soporte correspondiente, dándole en ese momento, la inclinación deseada al tubo de cuarzo (de 4° a 15°). Debe existir una separación de 1 a 2 mm entre el tubo de cuarzo y el disco de rotación.

Después de esto, se debe colocar la tapa de la cámara de vacío, poniéndole un poco de grasa para vacío en el o-ring que tiene para que selle mejor. A continuación se debe encender la bomba de vacío hasta alcanzar la presión de vacío deseada (de 10^{-3} a 10^{-4} torr). Cabe mencionar, que también se debe hacer vacío a la manguera que conecta el tanque de argón con la cámara de vacío.

Una vez alcanzado el vacío deseado dentro de la cámara, se debe encender el motor de inducción magnética para que éste haga girar al disco de rotación; teniendo que esperar de 20 a 40 minutos aproximadamente para que el disco alcance la velocidad deseada (2000 a 8000 rpm).

Después de alcanzar la velocidad deseada por el disco, se debe poner en funcionamiento el horno de radiofrecuencia de la siguiente manera:

Primero se debe abrir la válvula del suministro de agua de enfriamiento del horno, después se debe encender éste, y posteriormente se debe subir la potencia de éste poco a poco desde cero hasta 30, debiendo esperar aproximadamente 30 segundos para volver a subir la potencia hasta aproximadamente 40. Cabe notar que la potencia no debe pasar más de 50 por recomendación del fabricante.

Una vez que se enciende el horno de radiofrecuencia, se

comienza a calentar la muestra que se encuentra colocada dentro del crisol, y para poder conocer su temperatura, utilizamos un pirómetro óptico. Este aparato debe quedar colocado enfrente de la ventana de la cámara de vacío, para poder así, observar los cambios de color de la muestra. Debiendo tener el mismo tono el color de la muestra y el color del filamento.

Según los componentes de la aleación, se debe estimar el punto de fusión de la misma para estar preparados al momento que ocurra la fundición de la muestra. Poco antes de que esto ocurra, se debe de abrir un poco a la válvula que permite el paso de argón, para proporcionar una pequeña fuerza de empuje sobre la aleación. Provocando con esto, que la aleación salga al momento de fundirse por el orificio del crisol, y choque con el disco de rotación, enfriándose repentinamente.

Una vez terminado cada experimento, se deben de apagar cada uno de los aparatos mencionados en esta descripción, y se debe de esperar a que el disco de rotación se haya detenido, para entonces proceder a destapar la cámara de vacío y recolectar el producto obtenido (cintas, filamentos, polvos o una combinación de éstos).

En cada uno de los experimentos realizados se alteraron las variables a optimizar, para cada composición, llevando un registro de los valores de los parámetros y de las condiciones de operación del proceso. Al finalizar cada experimento se deben

registrar también las características físicas de la cinta, su apariencia, su ancho, su espesor, etc. Posteriormente se procedía a someter a la cinta a diferentes pruebas, que se describen en el siguiente capítulo.

En seguida se presenta una lista de los valores de las variables e intervalos manejados en estos experimentos:

VARIABLES:	INTERVALOS:
Velocidad del disco	1500 - 8000 rpm
Diámetro exterior del crisol	14, 18, 19 mm
Diámetro interior del crisol	12, 16, 17 mm
Diámetro del orificio	0.7 - 1.5 mm
Distancia entre crisol y disco	1 - 2 mm
Masa de la carga	4 - 10 g
Presión de inyección	5 - 15 psi
Presión de vacío	10^{-3} - 10^{-4} torr
Atmósfera	Vacío, Argón o Aire
Angulo de inclinación crisol	4 - 15 °

V.3.- OBSERVACIONES Y CUIDADOS

Como en la realización de este trabajo se utilizaron crisoles de cuarzo de diferentes diámetros de orificio, notamos que el aumento en éste da como resultado una cinta más ancha. Sin embargo, el límite superior del tamaño del orificio depende de la tensión superficial de la aleación fundida, y por lo tanto de la composición de ésta.

Ya que el tamaño del orificio es de primordial importancia en el control del ancho del filamento, y el diámetro del orificio está limitado por la tensión superficial, está reportado en investigaciones anteriores que puede usarse un orificio en forma de rendija para la fabricación de cintas más anchas [28]. La restricción por la tensión superficial puede afrontarse manteniendo el ancho máximo de la hendidura menor o igual al diámetro máximo que se tendría si se utilizara un orificio redondo para la composición dada. Se encuentra reportado que se han producido con éste método cintas hasta de 7 mm de ancho [3]. Sin embargo, en éste trabajo únicamente se utilizaron crisoles con orificio circular.

Otra observación experimental es que al incrementar la presión del gas, manteniendo constante la velocidad del disco y el diámetro del orificio, se aumentaba tanto el ancho como el espesor de la cinta.

Se debe tener mucho cuidado con los ácidos utilizados para limpiar los tubos de cuarzo, ya que algunos de ellos atacan al cuarzo, provocando que éste se desgaste y adelgace demasiado, o que se quiebre. En el uso de ultrasonido, también es importante tomar en cuenta que una exposición prolongada de los tubos de cuarzo, puede provocar que éstos se rompan, sobre todo en las partes más desgastadas.

Es importante señalar que al cargar el tubo de cuarzo con la aleación, ésta llene el crisol hasta la altura en la que termina la espira de inducción, de tal forma que exista mayor acoplamiento y el metal se funda totalmente con mayor facilidad.

No es conveniente que el crisol esté demasiado cerca del disco de rotación, para evitar una excesiva dispersión de líquido. Por otro lado, si el tubo de cuarzo se encuentra muy cerca del disco, podría ocasionar un choque entre ambos debido a la vibración del disco.

Otro factor a tomarse en cuenta, es la forma de llevar a cabo el calentamiento de la aleación. Este debe hacerse muy lentamente y en forma gradual, de tal forma que la aleación se

funda homogéneamente; evitando además, la posible formación de plasma debido a los campos magnéticos existentes, que ionizan al gas argón que se encuentra dentro de la cámara.

CAPITULO VI

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

VI.1.- RESULTADOS

Se llevó a cabo una recopilación de información acerca de las características, fabricación y propiedades de las cintas metálicas amorfas, particularmente por el método de laminación por rotación.

Debido a que existen muy pocas publicaciones en español sobre este tipo de materiales, resulta especialmente valiosa toda la información recopilada en éste trabajo, para todas aquellas personas que se interesen en este tema, pudiendo ser para ellos una buena referencia para el estudio de estos interesantes metales.

La información recopilada aquí es muy diversa y variada, ya que se investigaron los antecedentes históricos, las diversas propiedades y características de éstos metales, sin olvidarnos de algunas aplicaciones y métodos de fabricación. Además se consultaron varias fuentes como libros, revistas, boletines, etc. de diferentes autores.

Por otro lado, se optimizaron las variables del proceso en el sentido de mejorar la calidad de las cintas partiendo de los

valores de estas variables reportados en la literatura.

Algunas de las variables optimizadas fueron:

- Angulo de inclinación del crisol
- Características de la carga
- Atmósfera

En la literatura es difícil encontrar reportados datos referentes al ángulo de inclinación del crisol; en las representaciones gráficas de algunas publicaciones, parecería que el crisol se encuentra posicionado en forma casi vertical. Se encontró que tomando en cuenta la presión que se aplica para la expulsión, la posición del disco, el diseño del soporte del crisol, los resultados eran notablemente mejores cuando se le daba al crisol una pequeña inclinación (de aproximadamente 6 grados) respecto a la vertical.

Se realizaron pruebas colocando la carga de aleación en diferentes formas como son: trozos grandes, pedacera, granulada, en polvo, comprimida en forma de pastilla e incluso en forma de cinta enrollada. Siendo la forma granular la más eficiente, ya que se lograba un mayor acoplamiento de la aleación con la bobina de inducción.

Se llevaron a cabo experimentos tanto al aire como al vacío; también, purgando la cámara con gas inerte (argón), en estas últimas condiciones fue que se obtuvieron cintas de mejor

calidad; la superficie era uniforme, mientras que la superficie de las cintas producidas al aire era rugosa; las orillas eran lisas, y las otras presentaban defectos y ondulaciones; la superficie de las cintas producidas al vacío era brillante por la parte superior, y la de aquellas producidas al aire era opaca.

Las cintas obtenidas en cada experimento se sometieron a algunas pruebas para conocer su estructura atómica.

VI.1.1.- ANALISIS DE RAYOS X

La difracción de rayos X es un fenómeno en el cual interviene un gran número de átomos. Ya que éstos se encuentran arreglados periódicamente sobre la red cristalográfica, los rayos X que son dispersados por la red, tienen relaciones de fase definidas entre ellos. Estas relaciones de fase son tales que para la mayoría de las direcciones ocurre interferencia destructiva, pero en algunas direcciones de la dispersión sucede la interferencia constructiva, que ocurre de tal manera que se forman los haces por difracción de rayos X. Se puede considerar que en el cristal se definen familias de planos paralelos en la red puntual espacial, teniendo cada grupo de planos una separación característica. Esta idea fue sugerida por W. L. Bragg en 1913 y a los planos se les conoce como planos de Bragg [33].

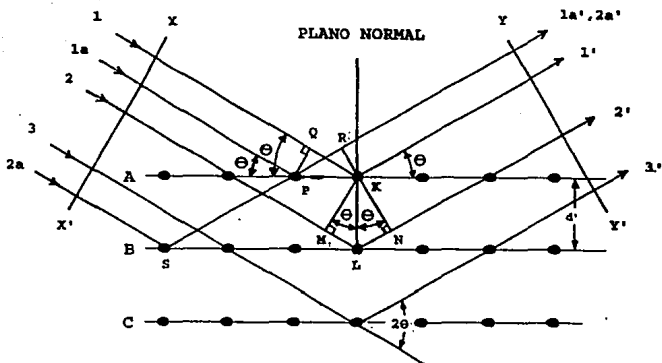


FIGURA VI.1.- Condición para la Difracción de Rayos X según Bragg.

Supongamos que el haz de rayos X de longitud λ incide formando un ángulo θ con un cristal que contiene a las familias de planos de Bragg separados entre sí por una distancia d . El haz llega al punto de red A en el primer plano y al punto B en el siguiente. Cada uno de ellos dispersa al haz incidente en todas las direcciones del espacio. La interferencia constructiva tendrá lugar solamente entre aquellos rayos dispersados que sean paralelos y cuyos recorridos difieren exactamente en λ , 2λ , 3λ , 4λ , etc. La diferencia debe ser $n\lambda$, siendo n un número entero.

La primera condición que deben seguir las trayectorias, es que los rayos X que chocan con los puntos de red A y B es que el ángulo común de dispersión sea igual al ángulo de incidencia θ del haz horizontal. La segunda condición es que:

$$2 d \text{ sen } \theta = n \lambda$$

con $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

ya que la trayectoria que un rayo X que rebota en el punto de red B debe recorrer la distancia $2 d \text{ sen } \theta$ más que el rayo X que choca en el punto de red A. A esta condición se le llama Ley de Bragg [33].

Esta relación entre interferencias constructivas y la periodicidad de la red es fundamental al momento de comparar la dispersión de rayos X por sólidos [33].

La difracción de rayos X nos permite deducir a partir de las gráficas que se obtienen, la distribución de los átomos en una sustancia. Estas gráficas representan la intensidad de emisión en función del ángulo de incidencia.

Las curvas que se obtienen en el caso de los líquidos y sólidos amorfos, presentan una modulación muy acusada, esto sugiere la existencia de una correlación entre las posiciones de los átomos próximos, aun cuando no exista una correlación de largo alcance. En el caso de los cristales, la curva de

intensidad reducida presenta una serie de máximos bien definidos, lo cual esta relacionado con una ordenación regular de los átomos correspondientes para grandes distancias (figura VI.2).

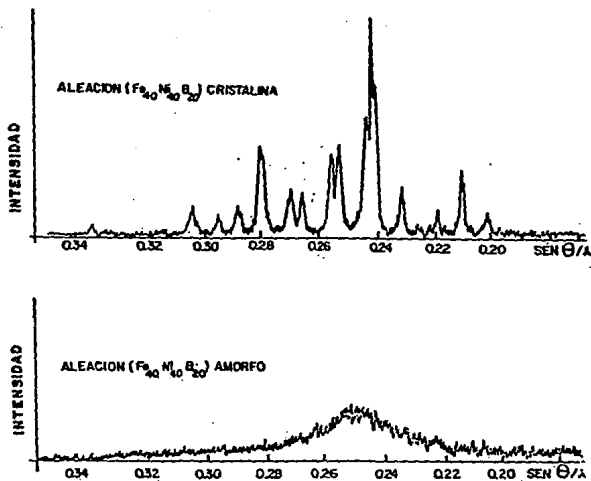


FIGURA VI.2.- Patrones de difracción de rayos X para una muestra cristalina y una amorfa.

En la literatura se encuentran identificados los patrones de difracción de muestras metálicas cristalinas con una gran variedad de composiciones. En el Instituto de Física se cuenta con un equipo de difracción de rayos X en el cual es posible,

además de obtener el patrón de difracción de la muestra de interés, analizarlo detalladamente y compararlo con muestras conocidas, entre las que se incluyen todos los elementos de la tabla periódica así como un gran número de aleaciones y compuestos, por medio de un programa de computadora integrado al equipo.

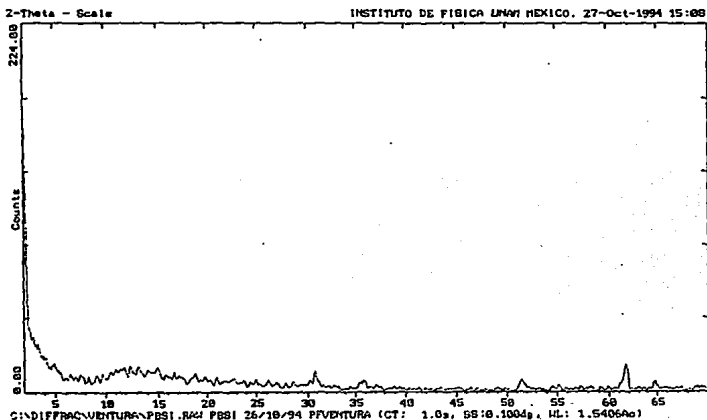


FIGURA VI.3.- Patrones de difracción de rayos X para una muestra semi-amorfa de $Pb_{50}Si_{50}$

En la figura VI.3 se observan los resultados de una prueba de rayos X, realizada a una de las cintas de plomo-silicio obtenida en éstos experimentos.

VI.1.2.- MICROSCOPIA ELECTRONICA

Una de las armas más poderosas con que cuenta el microscopista electrónico es la difracción de electrones. En el campo de la ciencia de materiales, la difracción es usada como una arma estándar y su uso ha brindado enorme cantidad de información acerca de la estructura de los materiales [34]. En este método se hace incidir un haz de electrones sobre un material, logrando algunos de ellos atravesar la muestra estudiada, y llevando información sobre la estructura interna de la misma. La formación de una imagen a partir de estos electrones es lo que constituye la microscopía electrónica de transmisión, y es tan variada e importante la información extraída con este instrumento que actualmente se utiliza extensivamente [35].

VI.1.2.1.- FORMACION DEL PATRON DE DIFRACCION

Un patrón de difracción básicamente contiene dos tipos de información:

1) El arreglo espacial, definido en función de los valores de las distancias R que existen entre el punto central y cada uno de los otros puntos de difracción, y los ángulos que se forman entre las líneas que van de dicho centro a cada uno de tales puntos.

2) Las intensidades, dadas en valores comparativos a la correspondiente al punto central, y los otros máximos que ocurran en la difracción [34].

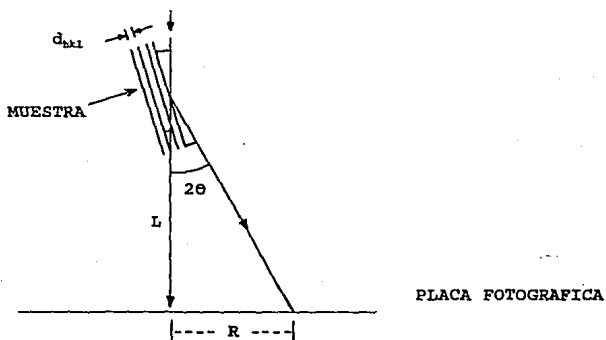


FIGURA VI.4.- Formación de un patrón de difracción

Para explicar la formación de un patrón de difracción, consideremos al microscopio electrónico, como una simple cámara de difracción de electrones, en la cual estos últimos inciden sobre una muestra, para después ser difractados y formar un

patrón de puntos sobre la placa fotográfica, la cual se encuentra a una distancia R del centro del patrón de difracción. La distancia entre la muestra y la placa, a la que se le denomina "longitud de cámara", se denota por la letra L, y de la geometría de la figura VI.4 se observa que cumple con la relación:

$$\tan 2 \theta = R / L$$

Ahora bien, de acuerdo con la ley de Bragg, tenemos que:

$$\lambda = 2 d \sin \theta$$

Sin embargo, como los ángulos θ a través de los cuales son difractados los electrones son muy pequeños (de 1 a 2 grados), podemos aproximar a la tangente de 2θ como 2 veces el seno de θ , con un error mínimo, y entonces,

$$\tan 2 \theta = \sin \theta = R / L$$

$$\lambda = 2 d \sin \theta = d 2 \sin \theta = d R / L$$

$$d = \lambda L / R$$

siendo d precisamente el espaciamento.

De tal manera que si es posible conocer los valores de R, L y para cada punto de algún patrón de difracción en particular,

será posible determinar los espaciamientos de aquellos conjuntos de planos en la red que hayan dado lugar a cada punto [34].



(a)

(b)

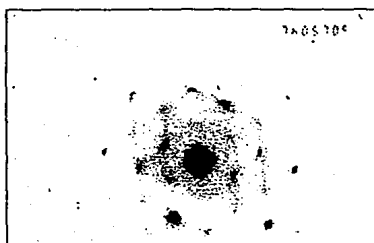
FIGURA VI.5.- Microscopía electrónica de transmisión para una muestra amorfa (a) y una cristalina (b).

En la figura VI.5 se observa la comparación entre dos muestras: una amorfa y otra cristalina:

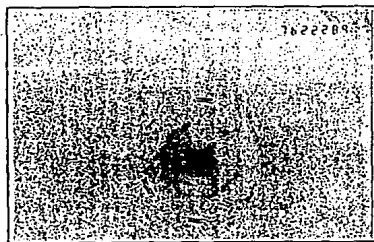
a) Microfotografía de un material amorfo donde puede verse claramente la ausencia de puntos de difracción, observándose sólo un punto intenso correspondiente al haz transmitido, y un círculo difuso alrededor característico de los amorfos.

b) Se observa el patrón típico de difracción de la aleación cristalina, donde el punto más intenso corresponde al haz transmitido y los puntos que lo rodean corresponden a puntos de difracción provocados por un arreglo cristalino.

En la figura VI.6 se observan los resultados obtenidos después de realizar un estudio de microscopía electrónica de transmisión, en una cinta de $Pb_{94}In_6$ y en otra de $Pb_{50}Si_{50}$



(a)



(b)

FIGURA VI.6.- Microscopía electrónica de transmisión para una muestra de (a) $Pb_{94}In_6$ y otra de (b) $Pb_{50}Si_{50}$

VI.2.- CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones para mejorar los resultados obtenidos en éste trabajo:

Debemos mejorar la transferencia de calor entre la aleación fundida y el disco de rotación, para ello recomendamos que el disco esté hecho de cobre. Ya que éste elemento tiene una alta capacidad de transferencia de calor, definida como difusividad térmica.

Se comprobó que el crisol de cuarzo dio buenos resultados por varias razones; entre otras su no reactividad, su transparencia, la relativa facilidad con que se fabrica y su alta temperatura de fusión. Se recomienda que el calentamiento de los crisoles se haga muy lentamente, debido a que éstos tienen alto riesgo de fractura.

Con respecto al orificio, concluimos que de la forma y tamaño de éste dependen en gran parte las magnitudes de la cinta. Si el orificio es pequeño y circular, obtendremos una cinta

angosta. Al aumentar el diámetro del orificio, se obtienen cintas más anchas, pero siempre con un límite, ya que al trabajar con orificios de diámetro mayor 1.5 milímetros, se presentan problemas de disipación de calor entre otros, y resulta difícil lograr cintas. Recomendamos orificios de 0.7 a 1.0 mm de diámetro.

A pesar de que sólo se lograron obtener cintas metálicas parcialmente amorfas, pensamos que la realización de éste trabajo fue muy provechosa, ya que promovió la investigación tecnológica en diferentes áreas o especialidades. Además, es importante hacer notar que el equipo utilizado en éste trabajo fue construido en México, en el Instituto de Física de la U.N.A.M.

Finalmente diremos que éste equipo puede utilizarse en el desarrollo de algunos otros trabajos relacionados con este tema; contribuyendo así al desarrollo tecnológico en el campo de estos materiales tan interesantes.

GLOSARIO:

Anisotropía.- Característica de tener propiedades distintas (radiación, transmisión, etc.) en direcciones diferentes (cristalinos).

Catalizador.- Es una sustancia que incrementa la velocidad de una reacción química sin ser consumida en la misma.

Celdas unitaria.- Es un pequeño segmento de un cristal que presenta el modelo geométrico característico de la estructura reticular del cristal.

Coefficiente de temperatura de la resistividad.- Magnitud que relaciona el efecto de la temperatura con la resistividad.

Coercitividad.- Medida de la dificultad para desmagnetizar a un imán hecho con ese material.

Conductividad térmica.- Cantidad que mide la intensidad a la cual el calor se transmite a través de un material.

Corrientes parásitas.- Corrientes inducidas en un material por la aplicación de un campo eléctrico.

Deformación elástica.- Deformación del material que desaparece cuando se anula o retira la carga.

Deformación plástica.- Alteración permanente de la longitud del material cuando se aplica una carga y después se retira.

Diagrama de fases.- Diagrama que muestra las fases y sus composiciones para cada combinación de temperatura y composición en general.

Diagrama Tiempo-Temperatura-Transformación.- También llamado diagrama de transformación isotérmica, nos permite predecir la estructura, las propiedades y el tratamiento térmico requerido en los aceros.

Dieléctrico.- Material que tiene la propiedad de ofrecer resistencia elevada al paso de la corriente eléctrica.

Dislocación.- Imperfección lineal en la red de un material cristalino. El movimiento de las dislocaciones sirve para explicar cómo se deforman los materiales.

Ductilidad.- Capacidad de un material de ser deformado permanentemente sin que ocurra ruptura cuando se le aplica una fuerza.

Dureza.- Propiedad que poseen los distintos materiales, en

mayor o menor grado, que les permite practicar incisiones sobre otros y desgarrarlos o rayarlos.

Electrodeposición.- Precipitación de iones en el cátodo de una celda electroquímica.

Electrólisis.- Proceso en el que se consume energía eléctrica para inducir una reacción química.

Enlaces químicos covalentes.- Unión entre dos átomos cuando éstos comparten sus electrones de valencia.

Eutético.- Reacción de tres fases en la cual una fase líquida se transforma en dos fases sólidas diferentes.

Extrusión.- Operación consistente en forzar el paso de un bloque de material a través de un orificio, saliendo una barra de sección constante.

Fase.- Material que tiene la misma composición, estructura y propiedades en su totalidad en condiciones de equilibrio.

Ferrimagnetismo.- Comportamiento magnético obtenido cuando dos tipos de dipolos, con diferentes intensidades o momentos, se oponen entre sí pero subsiste una magnetización neta.

Ferromagnéticos.- Materiales cuyo comportamiento magnético

es semejante al del hierro o al del acero.

Fractura dúctil.- Fractura por ductilidad de un material; se da después de presentarse una deformación plástica muy marcada.

Fractura frágil.- Fractura por fragilidad de un material, con poca o ninguna deformación plástica previa a la ruptura.

Galvanoplastia.- Técnica de la deposición por electrólisis de capas metálicas sobre objetos no metálicos revestidos de capas conductoras.

Gas inerte.- Gas noble o gas raro estable en sus niveles electrónicos periféricos, con alto potencial de ionización.

Inducción magnética.- Densidad de flujo magnético producida por un campo magnético.

Ionización.- Es el proceso que se refiere a la formación de iones a partir de átomos o moléculas que transfieren electrones.

Isoterma.- Línea horizontal trazada en una región bifásica en el diagrama de fases utilizada para determinar la composición de ambas fases.

Isotropía.- Característica de tener las mismas propiedades en todas direcciones (amorfos).

Ley de Bragg.- Relación que describe el ángulo en el cual un haz de rayos X con cierta longitud de onda se difracta de los planos cristalográficos de una distancia interplanar determinada.

Límite de grano.- Defecto superficial que representa la delimitación entre dos granos. La red tiene una orientación diferente a cada lado del borde o frontera de grano.

Módulo de elasticidad.- Se determina por la pendiente de la gráfica esfuerzo-deformación en la región elástica. Se denomina también Módulo de Young.

Número de Prandtl.- Medida de que tan rápidamente se disipa el momento, comparado con la razón de difusión de calor a través del fluido.

Orden de largo alcance.- Un ordenamiento regular, repetitivo, de los átomos de un sólido, el cual se extiende a una gran distancia.

Permeabilidad magnética.- Relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético ($\mu = B / H$).

Rayos X.- Radiación electromagnética producida por cambios en la estructura electrónica de los átomos.

Rigidez.- Medida cualitativa de la deformación elástica

producida en un material. Un material rígido tiene un alto módulo de elasticidad.

Silicatos.- Constituyen el grupo más importante de todos los minerales, de los que representan casi el 30% de las especies conocidas.

Solución sólida supersaturada.- Solución sólida formada cuando un material se enfría rápidamente de una región de una sola fase a alta temperatura a una región de dos fases a baja temperatura, sin que la segunda fase se precipite. Debido a que la fase templada contiene más elemento de aleación que el límite de solubilidad, se encuentra supersaturada en ese elemento.

Temperatura de Curie.- Temperatura por encima de la cual se pierde el comportamiento ferromagnético.

Temperatura de solidificación.- Temperatura por debajo de la cual todo el líquido se ha solidificado completamente.

Temperatura de transición vítrea.- Temperatura por debajo de la cual el polímero amorfo adopta una estructura vítrea rígida.

Tensión superficial.- Fuerza resultante que aparece sobre las moléculas de la superficie libre de un líquido como resultado de la acción de las fuerzas intermoleculares.

Tierras raras.- Oxidos básicos de un grupo de elementos con propiedades químicas muy similares, poco abundantes en la naturaleza.

BIBLIOGRAFIA:

- 1.- Papers presented at a Seminar of the American Society for Metals
Metallic Glasses, Caps. 1, 2 y 3, pp. 1-93
American Society for Metals, 1978
- 2.- Praveen Chaudhari, Bill C. Giessen, David Turnbull
Metallic Glasses, Vol. 242, pp. 84-96
Scientific American, 1980
- 3.- H.H. Liebermann, C.D. Graham, Jr.
I.E.E.E. Trans. Mag-12, No. 6, pp. 921, 1976
- 4.- T.R. Anantharaman, C. Suryanarayana
Rapidly Solidified Metals, Caps. I y III, pp. 1-19 y 99-118
Trans Tech Publications, 1987
- 5.- F.E. Luborsky
Amorphous Metallic Alloys, Cap. I, pp. 1-7
Butterworths, London, 1983
- 6.- B.G. Lewis, I.W. Donald, and H.A. Davies
Formation of Filamentary Metallic Glasses by Ultra-Rapid
Quenching from the Melt
- 7.- F. Spaepen and D. Turnbull
Proc. Second International Conference on Rapidly
Quenched Metals, Section I, pp. 205
Ed. N.J. Grant and B.C. Giessen, M.I.T. Press, 1976
- 8.- F.E. Luborsky
Enciclopedia of Chemical Technology
3rd. ed., John Wiley, N.Y., 1980
- 9.- L. Kaufman and H. Nesor
Proc. Second International Conference on Rapidly Quenched
Metals, Section II, pp. 119
Ed. N.J. Grant and B.C. Giessen, Elsevier Sequoia S.A.,
Lausanne, 1976
- 10.- P. Ramachandrarao and T.R. Anantharaman
Trans. Indian Inst. Met., Vol. 23, No. 2, pp. 58
1970
- 11.- M.H. Cohen, D. Turnbull
Nature, pp. 203
London, 1964

- 12.- G.S. Cargill III
Structure of Metallic Alloy Glasses
Solid State Physics, No. 30, pp. 236
Academic Press, N.Y., 1975
- 13.- F.E. Luborsky
Mat. Sci. and Engineering
Academic Press, N.Y., 1977
- 14.- P.H. Singu, K. Shimomura, K. Kobayashi, and R.A. Ozaki
Proc. Second Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals,
Section I, pp. 45
Ed. N.J. Grant and B.C. Giessen, M.I.T. Press, 1976
- 15.- V. Rivera, P. Anaszkievicz, J.R. de la Herrán, R.
Reséndiz, E. Vargas
Prototipo para Fabricar Metales Amorfos, Vol. 2, No. 9
Instrumentación y Desarrollo, 1989
- 16.- S. Takayama
Amorphous Structures and Their Formation and Stability
J. Mater. Sci., Vol. 11, No. 164
1976
- 17.- H. Jones
Splat Cooling and Metastable Phases
Rep. Prog. Phys., 36, pp. 1425-1497, 1973
- 18.- D.E. Polk, J.R. Bedell
Allied Chemical, 1979
- 19.- H.H. Liebermann
Rapidly Quenched Metals III, vol. I, No. 34
The Metals Society, 1978
- 20.- E.A. Strange and G. Moritz
Z. Metallk., Vol. 27, No. 114, 1975
- 21.- F.E. Luborsky
Proc. Second Int. Symposium on Amorphous Magnetism
Ed. R.A. Levy and R. Hasegawa, Plenum Press, N.Y., 1976
- 22.- S. Kavesh
Mat. Sci. Seminar, A.S.M. Conference
Niagara Falls, N.Y., 1976
- 23.- H. Schlichting
Boundary Layer Theory, Chapter XIV, p. 301
Mc Graw-Hill, New York, 1960
- 24.- R.B. Pond and J.M. Winter
69th Annual A.I.Ch.E. Conference
Chicago, Illinois, 1976

- 25.- M. Prates and H. Biloni
Met. Trans. 3, pp. 1501, 1972
- 26.- T. Masumoto, R. Madin
International Conference Metastable Metallic Alloys
1970
- 27.- C. Chi, H.S. Chen, C.E. Miller
Journal of Applied Physics, pp. 1715, 1978
- 28.- S.Z. Beer, Ed.
Liquid Metals Chemistry and Physics, Ch. 4 and 10
Marcel Dekker, New York, 1972
- 29.- R.C. Ruhl
Mat. Sci. and Eng., Vol. 1, pp. 313
1967
- 30.- Varan Vacuum Products
1991 Catalog
Lexington, Mas., 1991
- 31.- APESA-Boletín de Electrónica
Calentamiento por Radiofrecuencia
México, D.F., 1962
- 32.- B.V. Karlekar
Transferencia de Calor
Mc Graw-Hill, México, 1985
- 33.- B.D. Cullity
Elements of X-Ray Diffraction
Addison-Wesley Publishing Co. Inc.
Reading, Massachusetts, 1978
- 34.- M.J. Yacamán, A. Gómez, D. Romeu, R. Rioja
Notas de Física, Vol. 4, No. 4
Notas de Microscopía Electrónica
Instituto de Física, U.N.A.M., 1981
- 35.- R.A. Barrio
D.G.P.
U.N.A.M., México, D.F., 1982