

01127
9



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

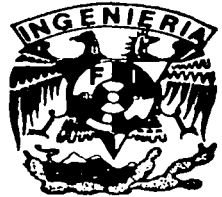
APLICACIONES DE CUASICRISTALES
EN SISTEMAS DE BAJA FRICCION

T E S I S

QUE PRESENTA PARA
OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO

LUIS ISMAEL FLORES CHAVEZ



ASESORES: DR. ROBERTO ESCUDERO DERAT
DR. RICARDO RANGEL SEGURA

MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ENERO DEL 2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

A mi padre Luis Flores, por darme la llave que me ha abierto infinidad de puertas.

A mi madre Olga Chávez, si ella ni mi vida ni lo que soy seria realidad.

A mi hermana, familiares, maestros y amigos que en el devenir han dejado vida y esfuerzo por hacerme cada día mejor.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi profundo agradecimiento al Dr. Roberto Escudero Derat por su apoyo e invaluable ayuda y por brindarme la oportunidad de compartir su experiencia y amistad.

De igual manera deseo expresar mi gratitud al Dr. Ricardo Rangel Segura por su paciencia en la realización de este trabajo.

Al proyecto CONACYT G0017-E por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

Así mismo quiero agradecer a la QFB. Araceli Ordóñez Medrano y al M.C. Filiberto Ribera Torres del Laboratorio de fenómenos de superficie del Departamento de polímeros por la capacitación en la medición del ángulo de contacto.

A la I.Q. Leticia Baños López por el apoyo técnico en la difracción de rayos X.

Al técnico Carlos Flores Morales del Laboratorio de microscopía electrónica de transmisión por el apoyo técnico.

A la secretaria del Departamento de Materia Condensada y Criogenia, Marcela Cortés Santiago por el apoyo secretarial.

Este trabajo se realizó gracias al apoyo brindado por el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

PRÓLOGO

En esta tesis se muestran los resultados de un proyecto para la producción de materiales cuasicristalinos, ya que en la actualidad son de gran interés las propiedades de estas aleaciones desde el punto de vista de sus aplicaciones en ingeniería, además del gran potencial de desarrollo en diversas ramas de la ciencia.

La motivación que nos llevó a seleccionar este tema de tesis, es el hecho de que en años recientes países industrializados como Francia, Estados Unidos y Japón, han generado muchas aplicaciones en base a estos materiales, las cuales consideramos que deben desarrollarse en México. Estas se basan en sus características antiadherentes y en el comportamiento aislante que aunado a las buenas propiedades mecánicas, en comparación con los materiales convencionales empleados para fricción en seco, dan excelentes aleaciones para ser utilizadas como recubrimientos. Es deseable además incrementar los rangos de trabajo de estos materiales, en cuanto a dureza, esfuerzo de tracción, temperatura de trabajo y resistencia a la corrosión.

Los objetivos son: el estudio, la producción y la caracterización de sistemas cuasicristalinos usando técnicas de difracción de electrones y microscopía de transmisión. La medición de las propiedades eléctricas y antiadherentes, con el fin de definir las aleaciones con la menor energía superficial e inferir algunas posibles aplicaciones.

El plan a desarrollar en la presente tesis es el siguiente:

- Realizar un estudio bibliográfico sobre aleaciones cuasicristalinas y sus aplicaciones.
- Seleccionar las aleaciones cuasicristalinas más apropiadas para aplicaciones como recubrimientos metálicos e iniciar su elaboración en un horno de radiofrecuencia.
- Realizar tratamientos térmicos a las aleaciones con diferentes horas de recocido y realizar análisis para encontrar las condiciones óptimas, en la que se estabiliza y crece la fase cuasicristalina.
- Caracterizar estructuralmente las muestras obtenidas con técnicas de difracción de rayos x y microscopía electrónica de transmisión.

- Medir la energía superficial y compararla con materiales como teflón, aluminio y cobre.
- Medir la resistividad eléctrica en función de la temperatura para conocer el comportamiento del material.

A fin de dar claridad a la presente exposición deseo establecer que a lo largo de esta tesis utilizaré el nombre comercial de teflón[®] en lugar del nombre científico que se le da a los fluorocarbonos, que son polímeros con un radical de flúor.

El presente trabajo se ha organizado de la siguiente forma: en el Capítulo I se hace una introducción al tema. El Capítulo II “Desarrollo y Aplicaciones de Cuasicristales”, consta de cuatro partes. La primera proporciona la definición de los sistemas cuasicristalinos de acuerdo a la base teórica de las Redes de Penrose, explicando la simetría de los mismos. La segunda parte contiene el estado del arte hasta fechas recientes, enunciándose brevemente las propiedades para posibles aplicaciones tecnológicas. La tercera parte expone al sistema AlCuFe, así como el por qué se seleccionó éste sistema. En la cuarta parte se describen aspectos generales del sistema AlMgZn. El Capítulo III “Descripción de Técnicas Experimentales”, se hace un recuento de las técnicas utilizadas para caracterizar a los materiales, así como las condiciones de análisis de los equipos empleados en el desarrollo de la presente tesis. El Capítulo IV “Análisis de Resultados” consta de cuatro partes en las cuales se presentan los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas. Por último el Capítulo V, presenta el análisis y discusión global de resultados, así como las conclusiones derivadas de la presente tesis.

Este trabajo tiene la finalidad de establecer un precedente en cuanto al estudio, producción y caracterización de sistemas cuasicristalinos, de crear una base para facilitar la inmensa posibilidad de aplicaciones que se puede generar a partir de estos materiales y los resultados derivados del presente estudio servirán para el mejor desarrollo de futuras investigaciones.

ÍNDICE

Prólogo	i
Índice general	iii
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
I. Introducción	1
II. Desarrollo y aplicación de cuasicristales	6
1. Definición	7
II.1.1 Introducción	7
II.1.2 Redes de Penrose	7
II.1.3 Simetrías	8
II.1.4 Perspectivas	11
2. Sistemas cuasicristalinos	11
II.2.1 Tipos de sistemas	11
II.2.2 Propiedades mecánicas	13
II.2.3 Energía superficial y mojado	14
II.2.4 Propiedades tribológicas	15
II.2.5 Selección de aleaciones	17
3. Sistema AlCuFe	19
II.3.1 Antecedentes	19
II.3.2 Descripción de propiedades experimentales	20
4. Sistema AlMgZn	21
II.4.1 Antecedentes	21
II.4.2 Descripción del sistema	21
II.4.3 Perspectivas	22

III. Descripción de técnicas experimentales.	23
1. Difracción de rayos-x	24
III.1.1 Descripción	24
III.1.2 Ley de Bragg	25
III.1.3 Índices de Miller	26
III.1.4 Medición de rayos x	27
2. Horno de radio frecuencia	28
III.2.1 Descripción	28
III.2.2 Equipo de laboratorio	29
III.2.3 Condiciones de preparación	30
3. Tratamiento térmico	31
III.3.1 Recocido	31
4. Resistencia eléctrica	33
III.4.1 Método de medición	33
5. Energía superficial	34
III.5.1 Definición de energía superficial	34
III.5.2 Medición del ángulo de contacto	35
6. Microscopia electrónica de trasmisión	36
III.6.1 Descripción	36
III.6.2 Preparación de muestras	38
IV. Análisis de resultados	39
1. Difracción de rayos-x	40
2. Resistencia eléctrica vs. Temperatura	42
3. Energía superficial	44
4. Microscopia electrónica de trasmisión	49
V. Conclusiones y recomendaciones	53
Referencias y Bibliografía	54

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Rombo delgado y grueso en apilamiento bidimensional	7
Figura 2.2	Relación de ángulos entre los rombos	8
Figura 2.3	Red de Penrose	9
Figura 2.4	Diferentes vistas de un icosaedro	10
Figura 2.5	Diagrama de esfuerzo - deformación para el sistema AlCuFe	20
Figura 2.6	Diagrama de fase para el AlCuFe	21
Figura 2.7	Diagrama de fase para el sistema AlMgZn	22
Figura 3.1	Espectro electromagnético	24
Figura 3.2	Representación de la Ley de Bragg	25
Figura 3.3	Ángulo de Bragg	26
Figura 3.4	Generalización de la red de Penrose a dos rombos	27
Figura 3.5	Difractómetro	27
Figura 3.6	Bobina	29
Figura 3.7	Horno Stanelco	29
Figura 3.8	Método de las cuatro puntas	33
Figura 3.9	Tipos de Microscopios	36
Figura 3.10	Difracción de electrones	37
Figura 4.1	Gráficas de rayos x para el sistema AlCuFe	40
Figura 4.2	Gráficas de rayos x para el sistema AlMgZn	41
Figura 4.3	Gráficas de R-T para el sistema AlCuFe	42

Figura 4.4	Gráficas de R-T para el sistema AlMgZn	43
Figura 4.5	Superficie de Aluminio	44
Figura 4.6	Superficie de Cobre	45
Figura 4.7	Superficie de Hierro	45
Figura 4.8	Superficie de Teflón	46
Figura 4.9	Superficie de AlCuFe	46
Figura 4.10	Superficie de AlMgZn	47
Figura 4.11	Caída de ángulos de contacto	48
Figura 4.12	Imagen de TEM para el sistema AlCuFe	49
Figura 4.13	Imagen de TEM para el sistema AlCuFe	50
Figura 4.14	Imagen de TEM para el sistema AlCuFe	50
Figura 4.15	Imagen de TEM para el sistema AlCuFe	51
Figura 4.16	Imagen de TEM para el sistema AlMgZn	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Aplicaciones de cuasicristales	12
Tabla 2.2	Propiedades mecánicas	13
Tabla 2.3	Energías superficiales	14
Tabla 3.1	Reglas para la difracción	26
Tabla 3.2	Parámetros del horno	30
Tabla 4.1	Relación de ángulos de contacto	47

PAGINACIÓN DISCONTINUA

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de estructuras cuasicristalinas con simetría icosaedra, por D. Schechtman en 1984⁽¹⁾ causó un gran impacto en la comunidad científica mundial, principalmente en la cristalografía. Una de las razones es que, en principio, se violan las reglas fundamentales de la cristalografía convencional, las cuales indican que estructuras con simetría cinco no pueden existir. Al respecto basta leer en algún libro de texto elemental de física del estado sólido para corroborar que las simetrías prohibidas son la icosaedra y la decagonal. La razón; es que estas no podrían llenar completamente el espacio tridimensional, lo cual implica que algunas regiones del espacio quedarían sin ser llenadas por los átomos. Otro aspecto interesante que obviamente se pensó, es que las propiedades químicas y físicas de estos sistemas podrían ser diferentes a las de las estructuras cristalinas.

Antes de seguir con la descripción de los sistemas cuasicristalinos es importante comentar, que previo a este descubrimiento, sólo se concebían materiales sólidos formados por cristales y materiales amorfos. En los cuasicristales se encuentra que existe un cierto ordenamiento de largo alcance, lo que da lugar a características físicas particulares del sistema que se estudie. Un buen ejemplo que ilustra los cambios en propiedades tanto físicas como químicas sería el carbono: De las tres formas alotrópicas conocidas del carbono, se encuentra que el diamante, debe su dureza a las características compactas de su estructura cristalina, el grafito a sus características laminares y el fullereno a su estructura en forma cerrada, tipo esférica. Además, desde el punto de vista de su descripción teórica, resulta mucho más simple estudiar cristales, ya que la periodicidad permite reproducir todas las características de una celda unitaria, simplemente usando el teorema de Bloch, el cual asume que al definir la función de onda de una celda unitaria, la función de toda la estructura cristalina estará dada por esa primera función de onda, multiplicada por un factor de fase constante que tiene que ver con la periodicidad del cristal que se trate.

Continuando con los cuasicristales, la simetría cuasicristalina produce patrones de difracción similares a los de la simetría cristalina, ya que ambos generan picos de difracción, indicativo de la existencia de periodicidad, contrario a los materiales no cristalinos donde no se presentan picos definidos sino una especie de monte, característico de la falta de periodicidad en el apilamiento de los átomos, aún más, en un gas no hay difracción debido a la ausencia total de periodicidad. Sin embargo los cuasicristales tienen patrones de difracción debido a un orden aperiódico pero con simetría de largo alcance. Se debe de hacer notar que la característica estructural, a escala atómica, de los materiales cristalinos es que los átomos que lo forman están apilados, unidos por una distribución regular y periódica contrario a la estructura no cristalina en donde los átomos están apilados en conjuntos irregulares y aleatorios.

Se deduce que la estructura cuasicristalina posee un orden periódico, con simetría traslacional de largo alcance, totalmente diferente a los otros dos tipos de simetrías encontradas hasta el momento en estructuras sólidas tales como la cristalina y la no-cristalina.

Por lo anterior, la estructura atómica de los cuasicristales puede ser estudiada por técnicas de difracción como los rayos x y difracción de electrones. Así mismo, los cuasicristales pueden crecer de acuerdo al diagrama de fases en el equilibrio como grandes granos y sus patrones de difracción muestran claridad.

Algunas de las propiedades atractivas de los cuasicristales son su baja fricción y sus características antiadherentes, que muestran fenómenos superficiales interesantes, encontrándose algunas aplicaciones posibles:

- Recubrimientos
- Películas delgadas
- Precipitados
- Compuestos

Además, desde el punto de vista mecánico, la relación área-volumen es muy grande, teniendo en cuenta que las propiedades interfaciales y la preparación del área son cruciales para el éxito de las aplicaciones.

Las propiedades de transporte también son interesantes y se enuncian a continuación:

1. En comparación con otras aleaciones metálicas muestran menor conductividad eléctrica [σ]
2. Una notable dependencia de la resistividad en función de la temperatura.
3. Sensibilidad extrema de las propiedades de transporte con respecto a los cambios en la composición.
4. Menor calor específico en comparación con los metales, lo cual indica una reducción en la densidad de estados.
5. En comparación con otras aleaciones metálicas muestran menor conductividad térmica.

Estas propiedades motivan estudios fundamentales de estructura, composición y reactividad térmica en la superficie de los cuasicristales.

Los cuasicristales han llamado la atención de los científicos, no solo por las propiedades antes mencionadas, sino por la pregunta que surge al observar la forma estructural que presentan, ¿por qué la naturaleza prefiere la cuasi-periodicidad al orden periódico perfecto?. En este sentido, se han hecho algunas consideraciones para explicar tal fenómeno⁽²⁾, aunque todavía no han sido demostradas con certeza:

- a) La formación de una banda prohibida de energía de algunas decenas de eV que se generan en las aleaciones icosaédricas.
- b) La estabilidad energética en la fase cuasicristalina se concibe por la formación de una estructura inducida por la menor densidad electrónica de estados.

la discusión sobre tales consideraciones queda fuera del alcance de la presente tesis y es por ello que solamente se mencionan.

Por otro lado, dado que se pretende enfocar el presente trabajo hacia el desarrollo de materiales con características antiadherentes, es necesario hacer una breve explicación de los fenómenos relacionados con este concepto.

Los fenómenos de fricción y adhesión se dan por el contacto entre dos superficies, lo que, de manera macroscópica, depende de la rugosidad de las superficies en cuestión, pero a nivel microscópico, se sabe que se deben a los enlaces que se dan entre las superficies en contacto. Estos dependen de los elementos que están presentes en estas superficies, así que pueden formarse desde simples y débiles atracciones polares (fuerzas de Van der Waals) como consecuencia de las cargas opuestas de los átomos de las superficies, hasta fuerzas de atracción mas fuertes, debido que en las superficies se generan enlaces de tipo iónico o covalente. Se sabe también que los enlaces atómicos se dan por cuestiones estrictamente de la estructura electrónica de los átomos que intervienen en el fenómeno. Así, un átomo con mayor afinidad electrónica tiende a atraer a otro átomo solo cuando sus orbitales no están llenos o sea su estructura atómica esté en su menor estado energético, entonces ya no podrá atraer mas átomos. Como conclusión, la estructura electrónica de los cuasicristales es la razón de su menor energía superficial. De forma análoga se explica el fenómeno del comportamiento aislante ya que hay menos electrones libres y se necesita mayor energía para poder mover un electrón de un lugar a otro, lo cual da lugar a los fenómenos de conductividad electrónica y térmica.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CUSICRISTALES

II.1 DEFINICIÓN

II.1.1 Introducción

D. Schechtman en 1984⁽¹⁾, hizo un descubrimiento al que denominó cuasicristal, debido a la presencia de una estructura intermedia entre los cristales y los materiales amorfos, este correspondió al patrón de difracción de electrones producido por un cristal de Al_2Mn ⁽³⁾ que sometió a enfriamiento rápido y presentó simetría cinco, lo cual se creía imposible en la naturaleza. Como se describirá en la sección correspondiente, los electrones pueden ser difractados para conocer la estructura de los cristales. El patrón de difracción de electrones es una manifestación de orden en una estructura cristalina, tal como la resolución de la Ley de Bragg para la radiación x es indicativo de la existencia de una periodicidad.

II.1.2 Redes de Penrose

La red de Penrose proporciona una posible explicación acerca de la estructura de los cuasicristales que presentan patrones bidimensionales como los que se ilustran a continuación. Estas redes fueron desarrolladas como alternativa a la tarea imposible de llenar un espacio bidimensional con pentágonos. El uso de rombos, uno delgado y uno grueso, permiten formar en un espacio bidimensional una red con un patrón de simetría cinco, como se ilustra en la figura 2.1.

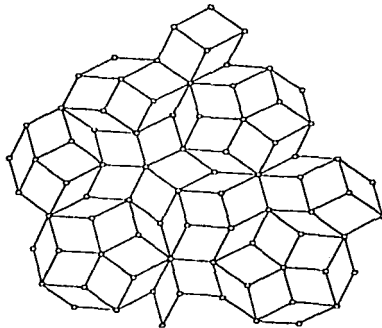


Figura 2.1 Rombos delgado y grueso en un apilamiento bidimensional generando una simetría cinco

II.1.3 Simetrías

La relación que presenta la red de Penrose permite observar que se puede llenar un espacio bidimensional, contrario al pentágono regular que no puede abarcar todo el espacio, como se muestra en la figura 2.2. También es posible ver que el rombo delgado (a) está directamente relacionado con las dimensiones del pentágono, su lado y su diagonal.

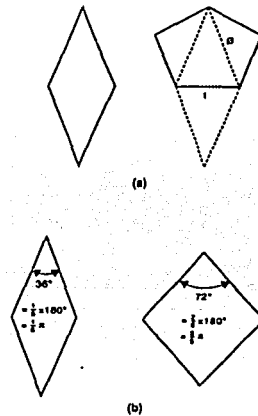


Figura 2.2. a) Relación entre el rombo “delgado” y la geometría del pentágono regular. La longitud del lado del rombo es igual al diagonal del pentágono siendo ϕ la razón dorada. b) El ángulo agudo del rombo “delgado” es $\pi/5$ y la del rombo “grosso” es $2\pi/5$.

Nótese que la razón entre la longitud de la diagonal y el lado del pentágono es ϕ , el cual es un número irracional igual a $(\sqrt{5} + 1)/2 = 1.618$. El número ϕ se denomina en la literatura “razón dorada” debido a su papel fundamental en numerosas formas del mundo natural, así como en las proporciones arquitectónicas de muchas construcciones del mundo antiguo. Se muestra también que la razón entre el número de rombos gruesos y el número de rombos delgados es también ϕ .

La relación directa de los rombos con simetría cinco se ilustra con mayor detalle en la figura "b" anterior, en la cual se aprecia que el ángulo agudo en el rombo delgado es $\pi/5$ y el rombo grueso es de $2\pi/5$. Esto garantiza que la simetría cinco será producida en las uniones formadas cuando tres o más rombos compartan vértices comunes.

Para ilustrar esto se muestra la red de Penrose de la figura 2.3, decorada con pentágonos localizados en cada una de las uniones. Cada pentágono está orientado de tal manera que el mayor número de posibles vértices queden en la frontera entre dos rombos adyacentes. Una observación cuidadosa revela el notable hecho de que la base de todos los pentágonos es paralela. Algunos pentágonos "apuntan hacia arriba" mientras otros apuntan hacia abajo, pero todos tienen una orientación común. El orden de orientación se combina con la carencia de un espaciamiento regular del plano. La combinación de orientación regular con espaciamiento irregular es precisamente lo que se necesita para justificar el patrón de difracción "prohibido ante la cristalografía tradicional" de la figura 2.3.

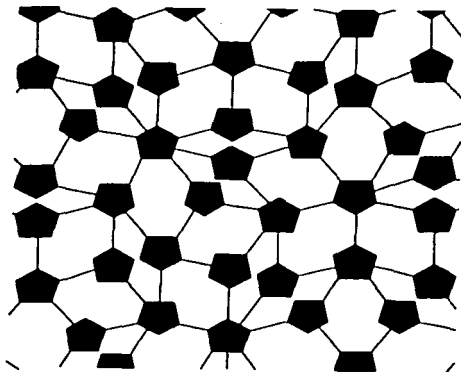


Figura 2.3 La red de Penrose de la figura 1 decorada con pentágonos para ilustrar la simetría cinco de todo el patrón.

La red de Penrose es un apilamiento de romboedros alargados (delgados) y achatados (gruesos) que llenan el espacio tridimensional, con lo cual, la red de Penrose iguala el resultado de la figura 2.1. En resumen la red de Penrose bidimensional produce la simetría cinco del pentágono y la red de Penrose tridimensional la simetría cinco del icosaedro.

Como se muestra en la figura 2.4, el icosaedro formado por 20 caras triangulares equiláteras idénticas tienen simetría cinco, pues cinco triángulos se unen en un vértice. De la misma manera se forman las simetrías dos y tres. En las tres simetrías se observan los patrones de difracción del AlMn y las de otros materiales cuasicristalinos, por lo que se les denomina fases icosaédricas.

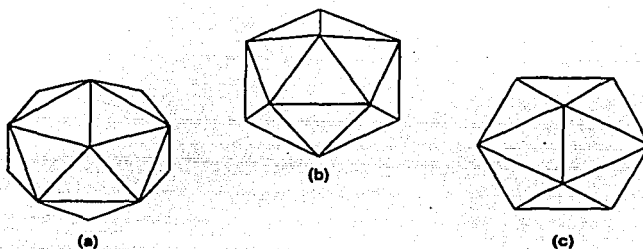


Figura 2.4. Tres vistas de un icosaedro mostrado. a) Simetría cinco, b) Simetría tres, c) Simetría dos.

La red de Penrose es reconocida como modelo para los cuasicristales, otra alternativa es la descripción del vidrio icosaédrico, donde las estructuras están enlazadas una con otra de manera aleatoria, con la diferencia de que los icosaedros conservan su orientación. El modelo de Penrose como el del vidrio proporcionan descripciones razonables de la difracción pero es necesario un estudio más amplio de estas estructuras, ya que es posible que mediciones en muestras de alta pureza nos den un modelo de estructura depurado y aceptado universalmente, es también probable que a través de diferentes investigaciones se refinen los conceptos actualmente aceptados de cristal y vidrio.

II.1.4 Perspectivas

Los ingenieros de materiales suponen que las novedosas estructuras asociadas con estos materiales podrían conducir a nuevas propiedades mecánicas y eléctricas. A la fecha, numerosos sistemas de aleaciones han exhibido una estructura cuasicristalina, algunos base aluminio, que son lo suficiente estables como para permitir el crecimiento lento de los monocristales para estudios más profundos. La continuación de las investigaciones sobre estos materiales puede originar una idea ampliada de la estructura de estos materiales

II.2 SISTEMAS CUASICRISTALINOS

II.2.1 Tipos de sistemas

La primera aleación de $Al_6Mn^{(3)}$, seguida del estudio de sistemas binarios, continuando con sistemas ternarios, han permitido observar como cambian las propiedades metalográficas y físicas entre la fase cristalina y la cuasicristalina, debido a la diferencia en sus configuraciones internas, ofreciendo nuevas perspectivas tecnológicas desconocidas hasta hace pocos años. La mayoría de estos nuevos materiales son base Aluminio, Titanio o (TiZr) y se encuentran con capas delgadas de óxidos que previenen la oxidación. Contienen metales de transición, elementos intermetálicos, teniendo como particularidad ser duros y brillantes. Entre los sistemas cristalinos convencionales y los nuevos sistemas cuasicristalinos existen grandes diferencias entre sus propiedades electrónicas y termodinámicas, lo cual ha revolucionado el estudio de los materiales.

Los materiales cuasicristalinos, como se explicó anteriormente, tienen importantes propiedades que los hacen buenos candidatos para ser usados como recubrimientos, son resistentes al desgaste, con alta temperatura de oxidación, y resistentes a la corrosión, etc. También estos recubrimientos se pueden utilizar como barreras térmicas, ya que reducen la conducción de calor entre el ambiente y el sustrato que proteja. Descubrimientos recientes de materiales cuasicristalinos son aleaciones metálicas, encontrándose muy atractivas para un gran número de aplicaciones tecnológicas.

Los recubrimientos deben tener como principales características: proveer una buena resistencia a la oxidación, resistencia a la corrosión a alta temperatura, buena estabilidad microestructural a altas temperaturas, buena adherencia al sustrato y un coeficiente de expansión térmica compatible con el sustrato.

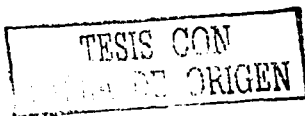
Estos materiales muestran 5, 8, 10 lados y algunas otras simetrías que no son propias de la simetría tradicional. En general, los materiales cuasicristalinos contienen en su gran mayoría Al, combinándose con otros metales como Cu, Pd, Cr, Fe, Mn, Co etc., mostrando propiedades muy diferentes a las fases cristalinas.

Los materiales conocidos como aproximantes cuasicristalinos, contienen fases cristalinas y cuasicristalinas mezcladas, exhibiendo propiedades similares a las cien por ciento puras. Los cuasicristales y sus aproximantes son extremadamente duros y frágiles a temperatura ambiente como resultado de la complejidad de las largas celdas unitarias donde el movimiento de dislocaciones llega a ser muy difícil. Esta situación cambia a altas temperaturas cuando el movimiento de dislocaciones es consecuencia de la difusión atómica. Estos materiales muestran una baja energía superficial.

El uso de cuasicristales en el ámbito industrial (maquinado) es difícil debido a su gran fragilidad, por lo que se le ha considerado para otro tipo de aplicaciones, entre ellas:

Propiedades	Aplicaciones	Aleaciones
Baja conductividad térmica	Barreras térmicas, turbinas en la generación de potencia, motores diesel, e industria automotriz.	AlCoCrFe
Resistencia a la corrosión, alta dureza, baja energía superficial (adherencia)	Barreras antiadherentes para sartenes para freír, utensilios de cocina, reactores químicos, moldes poliméricos.	AlCuFeCr
Actividad catalítica	Catálisis (partículas ultrafinas) para oxidación con metanol.	AlPd, AlPdB, AlPdCo, AlCuFe
Dureza y propiedades mecánicas	Herramientas quirúrgicas, prótesis médicas.	AlCrCu
Resistencia al desgaste y bajo coeficiente de fricción	Dados y herramientas con recubrimientos	AlBCuFe, AlPdMn

Tabla 2.1 Aplicaciones de cuasicristales^[4]



II.2.2 Propiedades mecánicas

Muchas publicaciones establecen comparaciones entre propiedades mecánicas; al comparar los materiales cuasicristalinos⁽⁵⁾, sobre todo la aleación Al-Cu-Fe, se observa una alta dureza, alcanzando valores entre 800-1000 Kg/mm², mientras que para las fases cristalinas⁽⁶⁾ de la misma aleación, el valor oscila entre 615 a 908 Kg/mm².

Dubois⁽⁷⁾, en recientes investigaciones del sistema i-Al-Cu-Fe, reporta haber encontrado que la adición de boro para producir el sistema Al₅₉B₃Cu_{25,5}Fe_{12,5} produce un material con una resistencia a la tracción tres veces mayor al sistema predecesor. Su dureza se incrementa aunque solo ligeramente. Algunas propiedades mecánicas se especifican en la tabla 2.2.

	Módulo de Young, 10 ⁶ psi.	Módulo de Corte, 10 ⁶ psi.	Módulo de Poisson
Aluminio	10.2	3.8	0.345
Cobre	18.8	7.01	0.343
Acero Inoxidable 2Ni-18Cr.	31.2	12.2	0.283
i-Al-Cu-Fe	8.7-9.4		
i-Al-Cu-Fe-B	14.5		
i-Al-Pd-Mn (monocristal) ⁽⁸⁾	29		0.38

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de sistemas cristalinos⁽⁶⁾ y cuasicristalinos⁽⁸⁾.

Las estructuras superficiales de cuasicristales libres de óxidos han sido estudiadas en condiciones de fricción dando resultados valiosos. Estos trabajos han mostrado que algunos cuasicristales⁽⁷⁾ tienen un bajo coeficiente de fricción estática (<0.02), cuando están limpios y una fricción alta cuando se oxidan dando valores entre (0.05,0.15).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.2.3 Energía superficial y mojado

Una de las propiedades más importantes es el comportamiento superficial. Esta propiedad será objeto de estudio en el presente trabajo, considerando la posibilidad de una aplicación industrial.

Rivier⁽¹⁰⁾ ha considerado la propiedad de antiadherencia de los líquidos y los cuasicristales desde tres puntos de vista:

- 1) Termodinámico.- Posibles efectos de la energía superficial.
- 2) Electrónico.- Explorando la relación entre la densidad de estado, energía de Fermi y adhesión. Partiendo de resultados experimentales y teóricos que sugieren la existencia de una "banda prohibida de energía" en sistemas icosaédricos a bajas temperaturas.
- 3) Rugosidad.- El movimiento de un líquido y su histéresis.

La energía interfacial, como evidencia indirecta de la relación entre un líquido y un sistema cuasicristalino⁽¹¹⁾, ha servido para explicar el mojado, midiendo los ángulos de contacto de pequeñas gotas de líquido en la superficie, tomando como referencia materiales como el teflón, alúmina y metales cristalinos. Estimaciones experimentales han mostrando la existencia de ángulos obtusos, indicando la antiadherencia entre un líquido y un cuasicristal.

A continuación se presenta la tabla 2.3 con datos reportados quedando pendiente para capítulos posteriores, la descripción de la metodología empleada para la medición de esta propiedad.

Material	Energía Superficial (mJ/m ²)
PTFE (similar al teflón)	17-18
Alúmina	50
Agua	72
i-Al-Pd-Mn	24-25

Tabla 2.3 Energías Superficiales⁽¹¹⁾.

II.2.4 Propiedades tribológicas

Las máquinas herramientas transmiten potencia entre sus componentes en movimiento, lo cual ocasiona fricción y desgaste entre ellos. La tribología se ocupa, en esencia, del estudio de las condiciones que permitan reducir al mínimo esta fricción y desgaste.

La fricción que ocurre en los contactos de aspereza suele ser atribuible a dos causas:

- Abrasión, en la cual, una superficie dura labra la contra cara suave, producto de la rugosidad.
- Adhesión, donde el contacto entre las partes genera enlaces locales que se rompen solo cuando se inicia el movimiento.

El desgaste ocurre a través de la adhesión, abrasión, rozamiento, corrosión o fatiga. En ocasiones, los dos primeros se conocen como desgaste por deslizamiento. El desgaste adhesivo es consecuencia de la ruptura de los enlaces que se forman cuando las asperezas entran en contacto y se deforman. El desgaste abrasivo ocurre cuando las asperezas duras labran una contra cara suave.

Existen literalmente cientos de materiales que son adecuados para el deslizamiento sin lubricación. El principal criterio de selección es el nivel máximo aceptable de fricción y desgaste que se puede tolerar en un contacto de apoyo así como la resistencia a la compresión. Resulta importante para el desarrollo de este trabajo mencionar algunos materiales que se utilizan en el deslizamiento sin lubricación para poder comparar sus propiedades con las de los cuasicristales, después se realizará un análisis para ver si es viable su sustitución por cuasicristales.

La aplicación de materiales bajo condiciones de lubricación en seco, se justifica teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:



- Cuando los fluidos son afectados de manera adversa por el entorno (alta o baja temperatura, vacío, radiación o disolventes).
- Para evitar la contaminación de productos (por ejemplo en alimentos o productos ópticos).
- Cuando el mantenimiento y la relubricación no son posibles (ubicaciones remotas).
- Cuando se presenta una combinación de baja velocidad y carga alta la cual tiende a deshacer la película fluida.

El material además debe de soportar la carga aplicada sin deformación significativa en las condiciones de operación para que la superficie no sufra daños graves durante el deslizamiento.

Hasta el momento se pueden identificar cuatro grupos de materiales con características de baja fricción y desgaste en condiciones de deslizamiento no lubricado.

- a) Polímeros y sus derivados.
- b) Grafito y sus derivados.
- c) Lubricantes sólidos.
- d) Aleaciones, compuestos metálicos y bronce auto-lubricados.

a) Polímeros y sus derivados

Las ventajas principales de los polímeros sobre los metales son sus características de fricción y desgaste inherentemente bajas en ausencia de lubricación externa, en comparación con el acero con bajo contenido de carbono, su resistencia a la tracción es diez veces menor, su coeficiente de expansión térmica es diez veces mas alto, su rango de trabajo es de (-200, 200)°C ya que antes de salir de este rango comienzan a degradarse. Estas propiedades imponen graves limitaciones a su uso.

b) Grafito y sus derivados

El grafito tiene una alta conductividad térmica lo cual favorece la disipación de calor por deslizamiento, pero a 500°C su resistencia a la oxidación en la superficie de deslizamiento o contacto se degrada.

c) Lubricantes sólidos

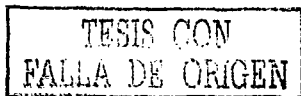
- Disulfuro de molibdeno: su temperatura máxima de operación es de 350°C lo cual define sus aplicaciones.
- PTFE con plomo, plata, oro o grafito: tienen las mismas desventajas que los polímeros.

d) Aleaciones y compuestos metálicos

- Aleaciones en base cobre: los bronce varían en cuanto a la dureza, desde el más suave, bronce al plomo, pasando por el bronce fosforado, hasta los más duros como los bronce al aluminio. Su resistencia a la compresión alcanzan valores de 300 MPa y su temperatura de operación puede llegar a ser de 500°C.
- Bronces lubricados en seco: su presión máxima de apoyo es de alrededor de 100 MPa y su temperatura máxima de operación es de alrededor de 200°C.

II.2.5 Selección de las aleaciones

En el presente estudio se seleccionaron aquellas aleaciones cuyos métodos de preparación no fuesen complejos, con el fin de que las posibles aplicaciones que se generen a partir de este trabajo sean rentables. Para ello, se tomaron en cuenta los tiempos de recocido. Así mismo, se escogieron materiales que formasen la fase por métodos convencionales como fundición y recocido, ya que algunos se obtienen por pulverización catódica o por molienda mecánica. El método escogido en este caso fue la fabricación



inicial de la fase en un horno de inducción, seguido por un recocido en un horno tubular bajo atmósfera inerte.

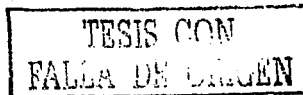
También se ha pensado utilizar este tipo de recubrimientos en aplicaciones ingenieriles, con el objetivo de sustituir a los materiales anteriormente descritos en la parte de propiedades tribológicas, por lo que se seleccionaron aleaciones que no contengan elementos muy caros tales como el platino, la plata o el oro.

Como estos recubrimientos se pueden utilizar para fines domésticos y/o sanitarios se omitieron las aleaciones que contienen plomo y tierras raras ya que estos materiales, en su fase pura, se reportan como venenosos.

Para que resultase factible el desarrollo del proyecto y con base en los antecedentes expuestos se ha elegido, por conveniencia, el estudio del sistema AlCuFe, que muestra las mejores propiedades mecánicas y tribológicas en comparación a otros sistemas. Las cuales incluyen su alta estabilidad termodinámica, la cual implica un rango de temperatura de trabajo muy amplio así como el método de síntesis.

Las ventajas de las aleaciones metálicas para ser utilizadas en fricción en seco son grandes, pues tienen valores superiores en cuanto a resistencia a la penetración y alta capacidad de carga.

Otra posibilidad de desarrollo la representa el sistema AlMgZn, ya que no ha sido ampliamente estudiado⁽¹⁶⁾ lo cual da una oportunidad de investigación interesante.



II.3 SISTEMA AlCuFe

II.3.1 Antecedentes

El sistema AlCuFe fué reportado por primera vez en el año de 1987⁽¹²⁾. En el artículo referido se reportan los índices de Miller para ese sistema. Para entonces ya se habían obtenido un gran número de aleaciones que presentaban simetría icosaedral propia de los cuasicristales por lo que ya se conocía la representación de la indexación de los cuasicristales. Esta fase se obtuvo por medio de solidificación rápida después de un recocido.

Más tarde en el año 1993⁽¹³⁾ se reportaron una serie de propiedades mecánicas a las que se hará referencia más adelante. En el mismo año⁽²⁾ se realizaron una serie de estudios tribológicos y se reportaron las mediciones para diferentes sistemas, las cuales resultaban prometedoras para aplicaciones tecnológicas. Estos estudios consistieron en fabricar recubrimientos, con diferentes espesores, a los cuales se les realizaron ensayos de dureza y se les midió el coeficiente de fricción en función del espesor del recubrimiento, entre otros estudios.

En las publicaciones (2) y (7) se hace referencia a los cambios que se presentan en las diferentes propiedades según la adición de algún elemento cuaternario tal como silicio, boro, o cromo.

El rango estequiométrico en el que se forma la fase $Al_2Cu_xFe_y$, oscila para el Cu entre 24.4 y 26 % atómico, mientras que para el Fe la fracción deberá encontrarse dentro del rango del 12 al 13% atómico. En este caso, z, representa la fracción de aluminio presente ($z = 100 - x - y$).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.3.2 Descripción de propiedades mecánicas

La dureza Vickers⁽¹⁴⁾ del sistema AlCuFe es de 700 unidades. Se observa que la temperatura de transición dúctil a frágil es de alrededor de $0.7 T_m$, donde T_m es la temperatura de fusión del material, para este caso es de 750 K. A continuación se presenta una gráfica de esfuerzo-deformación para este sistema a fin de ilustrar el comportamiento de este material al inducir un esfuerzo en condiciones de un espécimen virgen y con un 5% de predeformación.

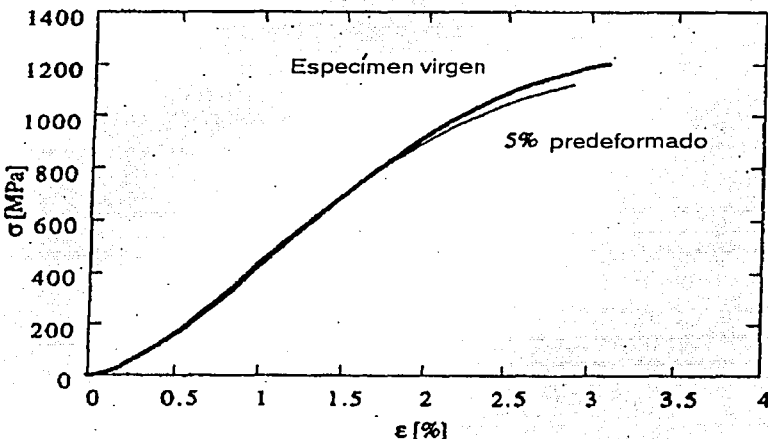


Figura 2.5 Diagrama esfuerzo-deformación para el sistema $Al_{63}Cu_{23}Fe_{12}$ ⁽¹⁴⁾.

De la misma manera, mostramos en la figura 2.6 el diagrama de fases para el sistema AlCuFe en el que se puede observar que la fase icosaedral se encuentra en la región ψ y se forma en un rango de temperaturas de 695°C a 860°C con los porcentajes atómicos antes mencionados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

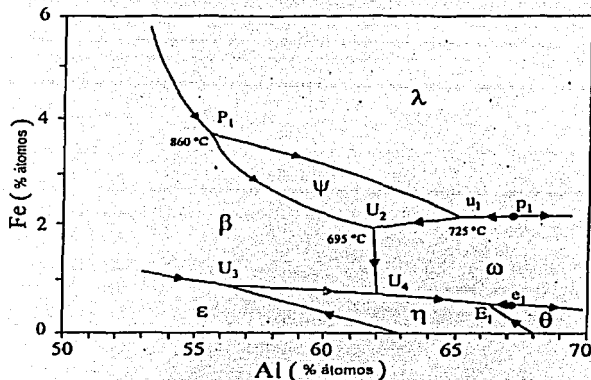


Figura 2.6 Diagrama de fases para el sistema AlCuFe⁽¹³⁾.

11.4 SISTEMA AlMgZn

11.4.1 Antecedentes

El sistema AlMgZn fué reportado en el año de 1993⁽¹⁵⁾. En ese trabajo se reportan los resultados concernientes a los estudios de difracción de rayos x de este sistema así como algunas de sus propiedades estructurales. Además se muestra por primera vez el diagrama de fases de este sistema. Para el año 2001⁽¹⁶⁾, no se habían estudiado todas sus propiedades por lo que este sistema presenta una buena oportunidad de investigación.

11.4.2 Descripción del sistema

El diagrama de fases para este material se muestra en la figura 2.7. En este diagrama podemos observar las regiones de estabilización de la fase cuasicristalina así como fases binarias de este sistema. La fase cuasicristalina es señalada mediante una flecha.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

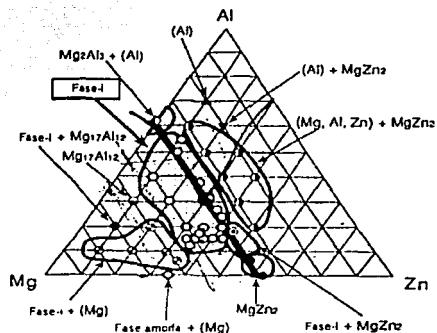


Figura 2.7 Diagrama de fases para el sistema AlMgZn^[15].

II.4.3 Perspectivas

Tal como se explicó en la sección correspondiente a la selección de las aleaciones, este sistema no ha sido ampliamente investigado hasta ahora, por lo que se sintetizará para poder ser estudiado en el presente trabajo con las mismas técnicas escogidas para fabricar el sistema AlCuFe, pensando en poder encontrar alguna aplicación tecnológica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS "X"

La herramienta mas conocida para la identificación de fases es la difracción de rayos x por lo que en el presente trabajo se utilizará para la caracterización de las muestras que obtengamos de la fundición y posteriormente para encontrar las condiciones óptimas en la estabilización de la fase cuasicristalina por medio del tratamiento térmico.

III.1.1 Descripción

La difracción es resultado de la dispersión de radiación producida por un arreglo regular de centros dispersores cuyo espaciamento es aproximadamente el mismo que la longitud de onda de la radiación. Por ejemplo, los puntos espaciados aproximadamente a una micra de separación, provocan una difracción de luz visible (radiación electromagnética con longitud de onda justo por debajo de una micra). Esta red de difracción causa que la luz sea dispersada con una intensidad en direcciones específicas.

La dirección de la dispersión observada es función del espaciamento exacto entre los puntos de la red de difracción. Se tiene conocimiento que los átomos y los iones tienen un tamaño del orden de nanómetros, de manera que podemos pensar que las estructuras de los cristales son como las redes de difracción en escala subnanométrica. En la figura 3.1 se muestra la parte del espectro electromagnético con longitud de onda en el rango de la radiación x. Como resultado, la difracción de rayos x es un monitor directo de la estructura cristalina y se considera una herramienta para la identificación de estructuras.

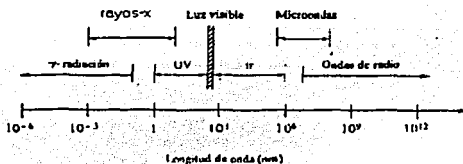


Figura 3.1 Espectro electromagnético.

III.1.2 Ley de Bragg

Para los rayos x, los electrones son los centros de dispersión cuyo mecanismo específico de dispersión es la interacción de un fotón de la radiación electromagnética con un electrón orbital del átomo.

El apilamiento repetido de planos del cristal tiene la misma función que las líneas paralelas de la figura 3.2. Para un retículo simple del cristal, la condición para la difracción se muestra en la misma figura. Para que la difracción ocurra los haces de rayos x dispersados por planos adyacentes del cristal deben de estar en fase, de otra manera, ocurre una interferencia destructiva de las ondas y no se observa prácticamente la intensidad dispersada.

La geometría precisa para la interferencia constructiva (ondas dispersadas en fase), la diferencia en la longitud de la trayectoria entre los haces de rayos x adyacentes debe de ser algún número entero (n) de longitudes de onda (λ) de radiación. La relación que demuestra esta condición es la ecuación de Bragg: $n\lambda = 2d \sin \theta$ donde d es el espacio entre los planos adyacentes del cristal, se define θ de acuerdo a la figura 3.2.

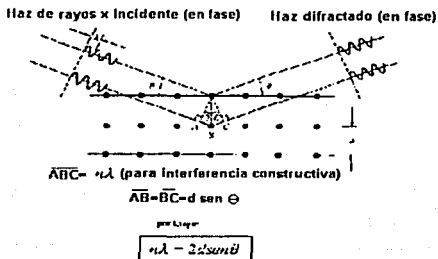


Figura 3.2 Representación de la Ley de Bragg.

El ángulo θ es comúnmente conocido como el ángulo de Bragg y el ángulo 2θ es conocido como el ángulo de difracción porque es este el ángulo medido experimentalmente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

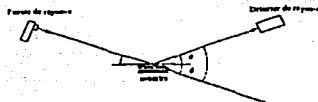


Figura 3.3 Ángulo de Bragg.

La magnitud del espaciamiento interplanar d es una función directa de los índices de Miller para plano. Para un sistema cúbico, la relación es mas o menos simple.

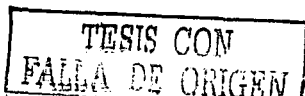
III. 1.3 Índices de Miller

La ley de Bragg es una condición suficiente pero no necesaria para la difracción. Define la condición de difracción para celdas unitarias primitivas, esto es aquellas redes de Bravais con puntos reticulares situados únicamente en las esquinas de la celda unitaria, tal como una cúbica simple y tetragonal simple. Las estructuras del cristal no primitivas tienen átomos en sitios reticulares adicionales localizados a lo largo de la arista, dentro de una cara, o en el interior de la celda unitaria. Los centros de dispersión adicionales pueden causar que ocurra dispersión fuera de fase en ciertos ángulos de Bragg. El resultado es que no ocurre parte de la difracción que produce la primera ecuación.

Un ejemplo de este efecto se da en la tabla 3.1, en la cual se presentan las reglas de reflexión para las estructuras de metal comunes. Esta tabla muestra cuales conjuntos de índices de Miller no producen difracción tal como lo predice la Ley de Bragg.

Estructura del cristal	La difracción no ocurre cuando:	La difracción ocurre cuando
Cúbica centrada en el cuerpo (bcc)	$h + k + l = \text{número impar}$	$h + k + l = \text{número par}$
Cúbica centrada en la cara (fcc)	h, k, l mezclado (es decir, números par e impar).	h, k, l no mezclados (es decir, todos son números pares o todos son números impares)
Hexagonal de empaquetado compacto (hcp)	$(h + 2k) = 3n, l$ impar (n es un número entero)	Todos los casos
Cuasicristalina		Se puede hacer la proyección al espacio tridimensional de la red de Penrose usando dos rombos.

Tabla 3.1. Condiciones para que ocurra la difracción de acuerdo a los sistemas cristalinos.



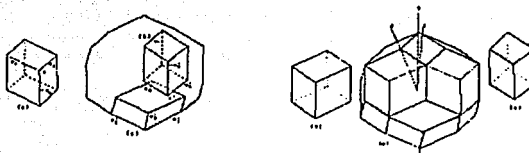


Figura 3.4 Representación grafica de la generalización de la red de Penrose con 5 ejes, a dos rhombos, uno delgado y otro grueso^[19].

III.1.4 Medición de rayos x

La medición consiste en montar una muestra con una cara completamente plana y limpia a la cual se le harán incidir los rayos-x dentro del rango considerado para que ocurra la difracción.

La medición se llevó a cabo con un Difractómetro D8 ADVANCE con un voltaje de 35 kV y una corriente de 30 mA.

D8 ADVANCE

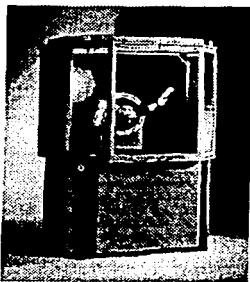


Figura 3.5 Difractómetro

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.2 HORNO DE RADIO FRECUENCIA POR INDUCCIÓN

Un cambio en la corriente eléctrica que circula por un alambre produce un cambio en las condiciones magnéticas que rodea al alambre. El cambio puede ser usado para producir una corriente eléctrica parásita en un objeto colocado adecuadamente y que se calienta por dicha corriente. El equipo convencional para el calentamiento por inducción consta de una bobina de hilo conductor por el cual circula corriente alterna. La bobina conductora rodea el objeto que se quiere calentar, que debe tener una sección redonda o rectangular. La distribución de temperatura en el cuerpo calentado es profundamente afectado por la frecuencia del oscilador (Hertz). El calentamiento por inducción es limpio, rápido y flexible, y la aplicación del calor puede ser controlada con precisión para obtener resultados consistentes. Para obtener el máximo beneficio en el uso del calentamiento por inducción se debe tener un buen diseño de las espiras del solenoide. Por estas características se seleccionó este método para realizar la fundición de los elementos con las proporciones estequiométricas que corresponden para cada sistema.

III.2.1 Descripción

La inductancia L es un elemento que se define mediante una relación como la siguiente:

$$\varepsilon_L = L \frac{di}{dt}$$

en esta ecuación se afirma que una corriente variable en el tiempo por el inductor genera una fem ε_L a través del inductor, en que la fem ε_L es proporcional a la velocidad de variación de corriente. La constante de proporcionalidad L da la inductancia, donde las unidades en el SI son [$\text{volt} \cdot \frac{\text{segunda}}{\text{ampere}}$], al cual se le denomina henry [H].

Si podemos generar una fem, basados en este principio, esta a su vez produce un flujo magnético en el centro de una bobina como se muestra en la figura siguiente:





Figura 3.6 Bobina que se le hace pasar una corriente y produce un campo magnético.

Cuando el flujo magnético pasa a través de un trozo grande de material conductor, aparecen corrientes inducidas en el material. Estas corrientes se llaman corrientes Foucault o corrientes parásitas.

III.2.2 Equipo del laboratorio

El dispositivo utilizado en este caso es un Horno de Inducción Stanelco, las aplicaciones de este tipo de hornos pueden ser muy diversas, algunos ejemplos son: en el endurecimiento superficial de herramientas e instrumentos de desgaste, recocidos, crecimiento de cristales y fundiciones de varios componentes, donde la velocidad y proporción del calentamiento debe ser localizado, y se debe de tener una buena calidad en la calidad del proceso.

El equipo que se utilizó se muestra a continuación:



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.7 Horno de Inducción Stanelco.

Algunos datos técnicos del horno de radiofrecuencia se enuncian a continuación:

Potencia de salida	Fuente eléctrica	Corriente trifásica	Parámetros CD	Circuito de la válvula del filamento
30 [kW].	380-440[V] 3 fases – 3 hilos a 50 [Hz].	440 [V], 70 [A].	Corriente máxima en el ánodo: 7.5 [A]	Voltaje: medido a la válvula 9.5 [V] ± 5%. Corriente: 21[A]
			Voltaje en el ánodo: 7.5 [kV]	
			Corriente en la rejilla : 75-120 [mA]	
			Potencia: 52.5 [kW]	

Tabla 3.2 Parámetros de operación del horno empleado.

III.2.3. Condiciones de preparación

En este trabajo se prepararon cinco diferentes composiciones estequiométricas para cada uno de los sistemas que se seleccionaron, con el fin de encontrar en cual de ellas se formaba la fase que buscamos.

Se fundieron en un horno con control de atmósfera, la cual era una mezcla de argón-hidrógeno, esto con el fin de que las pocas moléculas de oxígeno que quedaran después del vacío se combinaran con el hidrógeno para formar agua, así no existía la posibilidad de que el material se oxidara.

TESIS CON
FALLA DE GISEN

III.3 TRATAMIENTO TÉRMICO

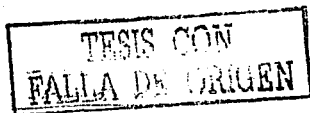
Con el objetivo de estabilizar la fase cuasicristalina y de activar el proceso de nucleación y crecimiento, se realizaron una serie de tratamientos térmicos para las muestras que se fundieron de los dos sistemas.

III.3.1 Recocido

Como es conocido, muchos aspectos de los procesos de las transformaciones de fases son comunes para los diferentes tipos de transformaciones. Desde un punto de vista termodinámico en las transformaciones de primer orden, dos fases pueden coexistir en el equilibrio, separadas por una interfase. La nucleación de una nueva fase involucra un proceso de nucleación seguido por un evento de crecimiento. La relación estructural entre las dos fases, es controlada por la naturaleza de la interfase, esta reacción va en dirección de la nueva fase que crece.

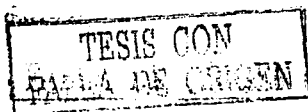
Para activar las transformaciones térmicamente se requiere una difusión desde algún sitio o una estructura mineral a otra. La difusión de átomos resulta del cambio térmico el cual debe ser suficiente para causar el salto de un átomo a otro sitio. A temperaturas altas las fluctuaciones de grupos de átomos pueden existir a lo largo de toda la estructura, pero si no existe energía asociada con estos grupos estas fluctuaciones no perduran. Tan pronto como algunas fases más estables existan (en ciertas configuraciones atómicas o grupales) pueden llegar a ser más estables que otras y se pueden crear gradientes potenciales que se activan y emergen, por tanto se crea una gran tendencia para que los átomos salten en cierta dirección preferencial.

El resultado neto del flujo macroscópico de átomos propicia que el gradiente decrezca. Este tipo de cambios se rigen por la ley de Fick que modela el flujo atómico y la difusión.



El proceso de recocido se llevó a cabo en el laboratorio con un dispositivo que construimos en el taller del instituto con el fin de tener una atmósfera inerte, este consta de un flujometro para controlar el paso del flujo que se hace por un tubo de cuarzo el cual esta sellado en ambos extremos, una trampa de líquido para que no regrese el aire con oxígeno, y un tanque de gas, en este caso una mezcla argón – hidrógeno que alimentaba el sistema. Las temperaturas del recocido fueron de 815°C para el sistema AlCuFe y de 300°C para el sistema AlMgZn, basados en los diagramas de fases para estos sistemas que se muestran en el capítulo anterior.

Los tiempos de recocido se variaron con el fin de poder encontrar las condiciones óptimas para la estabilización de la fase. A continuación de cada recocido se realizó un análisis de rayos x para determinar la fase que obteníamos.



III.4 RESISTENCIA ELÉCTRICA

Algunas sustancias no pueden ser clasificadas fácilmente como conductores o como aislantes. Los plásticos tienen generalmente resistividades grandes que nos conducirán a calificarlos como aislantes. Por ejemplo, en el alumbrado eléctrico doméstico se emplea normalmente plástico como aislante. Con el fin de conocer las propiedades electrónicas y de transporte de los cuasicristales se medirá su resistencia en función de la temperatura. Esta técnica también es un método indirecto para saber si se formó la fase icosaedral, ya que un comportamiento aislante es indicativo de la presencia de los cuasicristales y un comportamiento conductor es indicativo de la presencia de un material metálico.

III.4.1 Método de medición

Para determinar el comportamiento de la resistencia a bajas temperaturas se realizaron medidas de la resistencia eléctrica R en función de la temperatura T . Para tal efecto se cortaron secciones, de todas las muestras (ver figura 3.8). A continuación, se les depositó una delgada capa de pintura de plata en determinadas posiciones. Posteriormente, mediante un adhesivo de buena conductancia base plata, se fijaron cuatro contactos eléctricos hechos de cobre de alta pureza 99.999% de pureza y 0.0762 mm de diámetro y se permitió el endurecimiento de los contactos. La pintura de plata aplicada previamente permite mejorar de manera sustancial el contacto entre los alambres y la aleación cuasicristalina. El diámetro de los alambres fue escogido de tal manera que sus efectos por calentamiento no afectarían las mediciones. La medición se realiza haciendo pasar una corriente eléctrica a través de los dos alambres externos, mientras que por los dos interiores se mide la diferencia de potencial. El equipo empleado para estas mediciones fue un puente marca Hewlett Packard operando a una frecuencia de 16 Hz.



Figura 3.8 Diagrama esquemático del arreglo empleado para la medición de la resistividad por medio del método de las cuatro puntas.

III.5 ENERGÍA SUPERFICIAL

Un método indirecto para conocer si es menor la energía superficial de los cuasicristales es comparando el ángulo de contacto que forman entre la superficie de estos y una gota de un líquido conocido que se deposita. Así también se mide el ángulo de otros materiales como el teflón, metales puros y algunos óxidos.

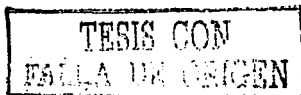
III.5.1 Definición de energía superficial

El mojado termodinámico es función de cuatro parámetros dada por la ecuación de Young⁽¹⁷⁾: $\cos\theta\gamma_{lv} = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} - \pi_0$ donde $\gamma_{lv}, \gamma_{sv}, \gamma_{sl}$ son las energías libres del líquido-vapor, sólido-vapor, sólido-líquido cuando están en condiciones de saturación con el vapor en la interfase entre el líquido y el sólido respectivamente, y π_0 es la presión de equilibrio del vapor adsorbido del líquido en el sólido.

Es evidente que el mojado es favorecido por la energía interfacial, la elevada energía superficial en la superficie sólida y la poca energía libre en el líquido. Desafortunadamente, solo γ_{sl} y θ son susceptibles de determinar directamente por experimentación. Para comprender y predecir la adhesión, es necesario conocer algo de γ_{sv} y γ_{lv} .

Se puede graficar $\cos\theta$ contra γ_{lv} para series homólogas de líquidos en un sólido dado y se produce una línea casi recta, de ahí se introduce el concepto de tensión crítica superficial de mojado γ_c . Esta cantidad empírica es difundida como el valor de γ_c donde se introduce la gráfica de $\cos\theta$ contra γ_{lv} con la línea horizontal $\cos\theta=1$. Líquido γ_{lv} es menor que γ_c , y se puede esperar que se derrame sobre la superficie líquida.

Para la ecuación : $\cos\theta\gamma_{lv} = 1\gamma_c = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} - \pi_0$



Fowkes en una consideración teórica de fuerzas de atracción en interfases ha sugerido que la energía libre total en la superficie es la suma de las contribuciones por las diferentes fuerzas intermoleculares en la superficie. Así que la energía libre de superficie en agua esta dada por: $\gamma_w = \gamma_i^d + \gamma_i^h$ donde los subíndices "h" y "d" se refieren a los enlaces de puente de hidrógeno y la dispersión de los componentes de las fuerzas.

III.5.2 Medición del ángulo de contacto

El método empleado es descrito en la referencia⁽¹⁸⁾. La cámara consiste en un caja delgada de dimensiones 15X15X15 [cm], y fué construida para permitir en control del ambiente que rodea la gota durante la medición. Varios filamentos con medidores de humedad fueron puestos dentro de la cámara para mantener una atmósfera saturada y prevenir la evaporación. La temperatura dentro de la cámara cerca de la gota se mantiene a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ con agua circulando a través de un tubo de cobre. Un volumen conocido de agua líquida es adherido o removido cuando un arreglo de jeringa, situado con una cabeza de micrómetro. El ángulo de avance y retroceso en la muestra de la gota es medido de la siguiente manera: La aguja de la jeringa es puesta en la superficie y la gota cuidadosamente puesta. La aguja deja el contacto con la gota, así se puede poner o quitar al gusto cualquier cantidad de agua.

La gota se vera a través de una ventana de vidrio usando un goniómetro-telescopio. El ángulo de contacto se mide con una proximidad a la gota de 0.1° , se deja pasar un minuto para que se alcance el equilibrio de la gota y el etínel-glicol, se hacen varias lecturas sobre la misma gota y se obtiene un promedio.

TESIS CON
FALLA DE CERRAR

III.6 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Esta herramienta sirve para caracterizar los rasgos microestructurales de los materiales. Existen una gran variedad de microscopios electrónicos, entre ellos, el de transmisión y el de barrido. Esta técnica arroja pruebas contundentes acerca de la obtención de la fase cuasicristalina, ya que por este método se pueden observar los patrones de difracción.

III.6.1 Descripción

El diseño de un microscopio electrónico de transmisión (MET) es similar al de un microscopio convencional.

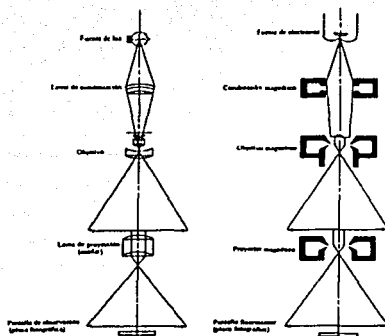


Figura 3.9 El primero es un microscopio óptico, el segundo es el microscopio electrónico de transmisión

Esto es posible gracias a la naturaleza ondulatoria del electrón. Para un MET que funciona a un voltaje constante de 100 keV, el haz de electrones tiene la longitud de onda monocromática de $\lambda = 3.7 \times 10^{-3} \text{ nm}$, lo cual es cinco ordenes de magnitud más pequeña que la longitud de onda de luz visible, que va de 400 a 700 nm, la cual se ocupa para microscopía óptica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El resultado es que algunos detalles estructurales significativamente más pequeños pueden ser observados por el MET en comparación con el microscopio óptico. Amplificaciones prácticas de aproximadamente 2000X son posibles en la microscopía óptica, lo cual comprende a la resolución de dimensiones estructurales del orden de $0.25 \mu\text{m}$, mientras que las ampliaciones de 100,000X se obtienen rutinariamente con el MET, correspondiendo a las resoluciones de +/- 1nm.

En la microscopía electrónica por transmisión de electrones la imagen es el resultado del contraste de difracción. La muestra se orienta de manera que parte del haz es transmitido y parte difractado. Cualquier variación local de la regularidad cristalina causará que una fracción diferente de la intensidad de haz incidente sea "difractada hacia afuera" provocando una variación en la oscuridad de la imagen proyectada sobre la pantalla de visualización situada en la base del microscopio. Aunque no es posible identificar defectos puntuales solos, el campo de deformaciones que se presenta alrededor de un circuito de dislocaciones, formado por la condensación de defectos puntuales (átomos intersticiales o vacantes) es fácilmente visible.

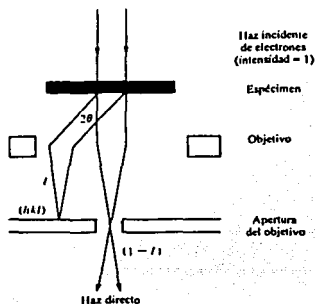


Figura 3.10 Difracción de electrones.

Una aplicación muy frecuente de MET es la identificación de diversas estructuras de dislocación, siendo posible también, obtener imágenes de estructuras de fronteras de grano.

III.6.2 Preparación de las muestras

La preparación de una muestra para ser observada en un microscopio de transmisión consta de varios pasos. En primera instancia se obtuvieron discos a partir de los materiales de 3mm de diámetro, posteriormente se pulen a espejo hasta un espesor aproximado de 80 a 90 micras. A continuación, son sometidas a un proceso de electro-pulido hasta un espesor de unas cuantas micras en el centro de la muestra el cual es un espesor adecuado como para ser atravesado por un electrón y obtener así la imagen de transmisión.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS "X"

En el presente capítulo presentaremos los resultados correspondientes a los análisis por difracción de rayos x, los cuales permitieron identificar la formación de la fase cuasicristalina.

Las gráficas corresponden a materiales recocidos bajo flujo de Ar-H₂ durante distintos periodos de tiempo, las composiciones se muestran en el recuadro de la figura 4.1.

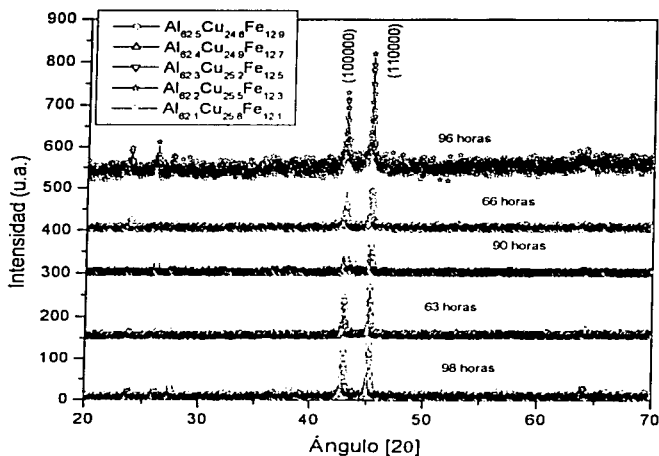


Figura 4.1 Gráficas de difracción de rayos x para el sistema AlCuFe.

Todas las mediciones fueron realizadas en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Los índices citados se relacionan con la tarjeta de difracción número 42-1043, que se basan en la referencia (12), con lo que se puede concluir que se obtuvo la fase icosaedral para todas las muestras de este sistema. Se puede observar que se estabilizó la fase para algunas muestras que se recocieron a 66 horas, para otras fue necesario recocerlas por más tiempo, lográndose la estabilización a 98 horas de tratamiento térmico.

De manera análoga se realizaron los análisis de difracción de rayos x para materiales del sistema AlMgZn. Los cuales se recocieron a distintos periodos de tiempo con un flujo de Ar-H₂. Las composiciones correspondientes se muestran en el recuadro de la figura 4.2.

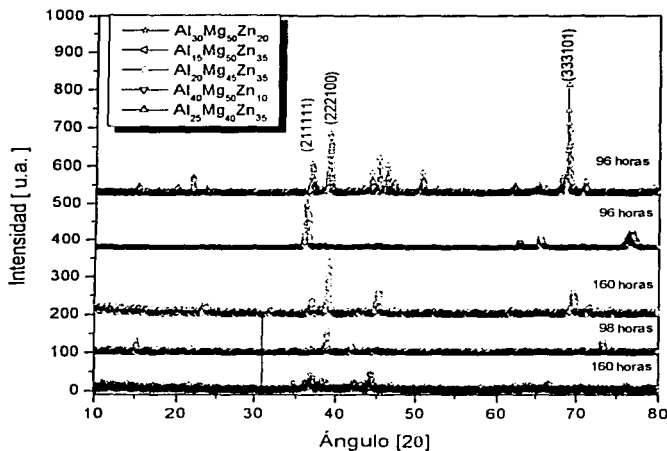


Figura 4.2 Gráficas de rayos x para el sistema AlMgZn

Al igual que para el sistema anterior todas las mediciones fueron realizadas en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Los índices que se presentan en la gráfica se basan en la referencia⁽¹⁵⁾, con lo que se puede concluir que se obtuvo la fase cuasicristalina para la muestra cuya composición es Al₂₅Mg₄₀Zn₃₅, para 96 horas de recocido. En el caso de las demás muestras se ensayaron periodos prolongados de recocido de hasta 160 horas pero sin lograr estabilizar la fase.

Las condiciones de operación, tal como se mencionó en el capítulo anterior, fueron de 30 kV y 35 mA con un tamaño de paso de 0.020 con un tiempo por paso de 5s.

IV.2 RESISTENCIA ELECTRICA

La figura 4.3 resume los resultados de la medición de resistencia eléctrica como función de la temperatura para el sistema AlCuFe.

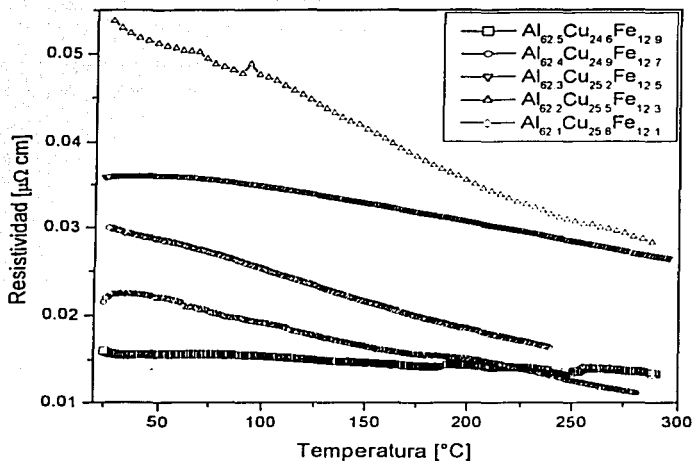


Figura 4.3 Gráficas de R-T para el sistema AlCuFe.

Todas las muestras de este sistema presentan un comportamiento aislante, ya que al bajar la temperatura la resistencia aumenta, característica de los cuasicristales, contrario a los metales cristalinos que al reducir la temperatura la resistencia baja, lo que da una posible aplicación de esta propiedad eléctrica de los cuasicristales ya sea como barrera térmica o bien como interruptor eléctrico. Lo interesante de este sistema es que aún conteniendo dos de los tres mejores conductores de la tabla periódica (Cu, Fe), se presenta un comportamiento aislante.

Las gráficas para el sistema AlMgZn se presentan a continuación, las composiciones correspondientes se muestran en el recuadro de la figura 4.4 y los tiempos de recocido oscilan entre 96 y 160 horas.

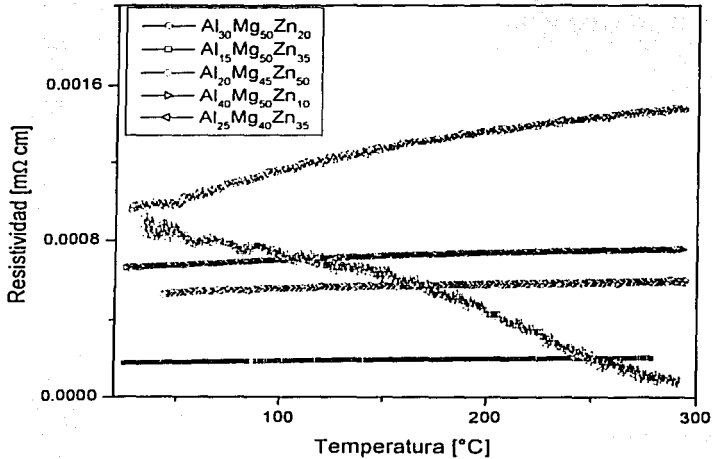


Figura 4.4 Gráficas de R-T para el sistema AlMgZn.

Para el caso de este sistema se tiene un comportamiento aislante para solo una de las muestras $Al_{15}Mg_{60}Zn_{25}$, que al igual que en el sistema anterior podrían adjudicarse aplicaciones similares tales como barrera térmica o como dispositivo electrónico. Al observar la gráfica podemos apreciar que la resistencia aumenta con el incremento del contenido en aluminio exceptuando la composición $Al_{25}Mg_{40}Zn_{35}$. En los demás casos se presentan comportamiento metálico, es decir, su resistencia decrece en función de la temperatura lo que es indicativo de la presencia de una fase cristalina.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.3 ENERGÍA SUPERFICIAL

Todas las mediciones fueron realizadas en el Laboratorio de medición de propiedades de superficie del Instituto de Investigaciones en Materiales. Las condiciones a las cuales se realizaron las mediciones fueron temperatura de 24°C, para la iluminación se empleó la luz verde, cuya intensidad se mide en tres niveles de acuerdo a la necesidad de iluminación de la muestra. El volumen empleado para la medición en todas las muestras fue de 5 μ l. El tiempo de exposición varía para cada medición a fin de obtener la mejor imagen. Previo a la medición de esta propiedad se cortaron muestras de 5 mm por lado y se sometieron a un lavado en un baño de ultrasonido con acetona a fin de eliminar cualquier traza de impureza superficial o de grasa, lo cual podría afectar el valor de la medición.



Figura 4.5 Superficie de aluminio, tiempo de exposición 4 [s] El cual muestra un ángulo de 51°.

Por el ángulo que muestra se puede deducir que es una superficie altamente hidrofílica, lo que significa que posee una elevada energía superficial lo cual ocasiona que se adhiera más la gota de agua que se le depositó.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

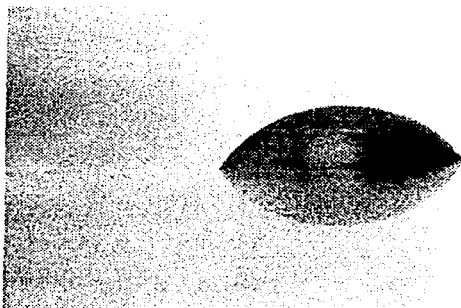


Figura 4.6 Superficie de cobre, tiempo de exposición 5 [s] Se puede observar un ángulo de 48° .

Por la observación de la figura 4.6 se deduce que la superficie altamente hidrofílica, con una considerable energía superficial. Lo cual ocasiona que se adhiera mas la gota de agua que se le depositó.

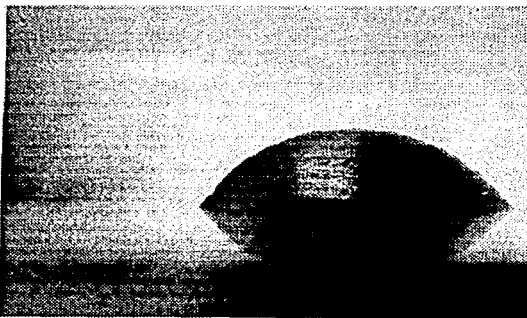


Figura 4.7 Superficie de hierro, tiempo de exposición 5 [s] Se puede observar un ángulo de 73° .

Al observar la imagen superior se deduce la superficie es altamente hidrofílica. Sin embargo, su valor es superior al obtenido para los materiales de Al y de Cu.

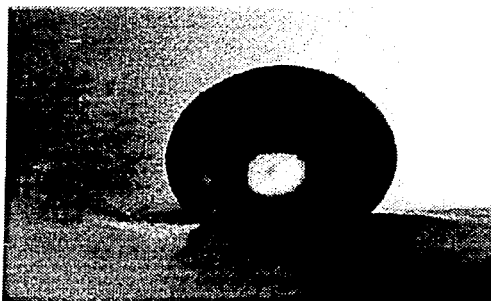


Figura 4.8 Superficie Teflón, tiempo de exposición 5 [s]. Se puede observar un ángulo de 117° .

El teflón, el cual es considerado uno de los mejores materiales antiadherentes fué medido como referencia para nuestros sistemas. Como era de esperarse, la medición muestra que se tiene una superficie hidrofóbica, con el mayor ángulo de contacto, de 117° . Esta característica de no-mojado es lo que hace de este material el elegido para muchas aplicaciones que se relacionen con la no adhesión de líquidos a su superficie.

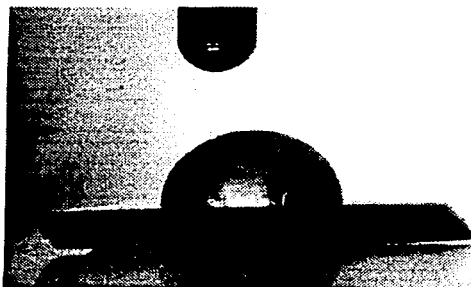


Figura 4.9 Superficie $Al_{52}Cu_{24}Fe_{12}O_3$, tiempo de exposición 6 [s]. Se puede observar un ángulo de 95° .

En este caso se tiene una superficie hidrofóbica, lo cual quiere decir que no deja que se adhiera la gota que se le depositó y muestra un ángulo de contacto mayor a los 90° .

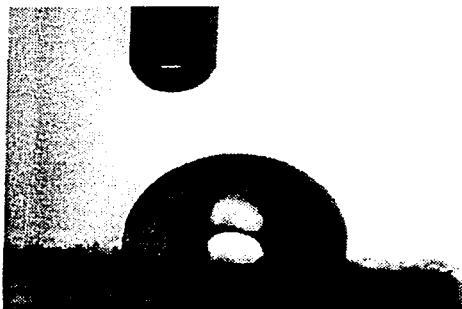


Figura 4.10 Superficie $Al_2Mg_{10}Zn_{10}$, tiempo de exposición 5 [s]. Se observa un ángulo de 98° .

En la fotografía mostrada en la imagen 4.10 se observa una superficie con un ángulo de contacto de 98° . En comparación con el sistema $AlCuFe$ este resultado indica que posee mejores valores de antiadherencia. Es una superficie hidrofóbica. Este resultado es inferior al obtenido para el teflón, sin embargo, debemos de recordar que esta medición para los cuasicristales fue efectuada en un material en volumen.

Compuesto	Angulo de Contacto	% Desviación con respecto al teflón
Al	51	56.41%
Cu	48	58.97%
Fe	73	37.61%
$AlCuFe$	95	18.80%
$AlMgZn$	98	16.24%
Teflón	117	0%

Tabla 4.1 Relación de ángulos de contacto y su desviación respecto al teflón.

La tabla 4.1 resume los resultados obtenidos para la medición del ángulo de contacto para cada sistema. Al comparar los resultados correspondientes a esta medición se observa que los dos sistemas analizados muestran mejores valores que los elementos originales (Al, Cu, Fe).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

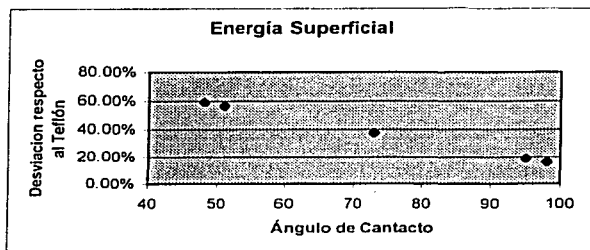


Figura 4.11 Caída del ángulo de contacto.

Con el afán de observar más claramente los resultados mencionados se ha elaborado la figura 4.11 en la cual se aprecia como el orden con respecto al ángulo de contacto es $Cu \Rightarrow Al \Rightarrow Fe \Rightarrow AlCuFe \Rightarrow AlMgZn \Rightarrow Teflón$.

Este valor obtenido en los cuasicristales promete una aplicación en sistemas industriales donde el fenómeno de fricción es importante. La elaboración adecuada de estos sistemas como una película podría igualar las propiedades antiadherentes del teflón tradicional sin las consecuencias de contaminación de este material y con una vida útil mayor. Aunado a lo anterior es útil mencionar que el rango de temperatura de trabajo de los cuasicristales es de aproximadamente tres veces con respecto al teflón. También algunas propiedades tribológicas, tales como las mencionadas en la sección 11.2.4, podrían ser mejoradas por estos sistemas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN

El presente capítulo pretende mostrar los resultados obtenidos a través de la aplicación de la técnica de microscopía electrónica de transmisión. Previo a su observación fue necesario preparar las muestras. Para ello fue necesario adelgazar la muestra hasta un espesor aproximado de $90\mu\text{m}$, posteriormente se ensayaron dos técnicas para su adelgazamiento: la erosión iónica y el electro-pulido. Finalmente se optó por emplear el electro-pulido el cual era un método más rápido para el adelgazamiento siendo ambas técnicas igualmente efectivas para la preparación del material.

En la figura 4.12 se presenta una imagen obtenida con el microscopio electrónico de transmisión, el cual se operó a un voltaje de aceleración de 100 [kV] . Este microscopio pertenece al Instituto de Investigaciones en Materiales. En la figura mencionada se presenta el patrón de difracción típico de los cuasicristales con simetría tres para el sistema AlCuFe. En la figura 4.13 se puede observar un pentágono bien definido para la muestra cuya composición es $\text{Al}_{62.5}\text{Cu}_{24.6}\text{Fe}_{12.9}$. Se concluye que tenemos la fase icosaedra para el sistema, lo cual es un prueba contundente de que obtuvimos la fase cuasicristalina.

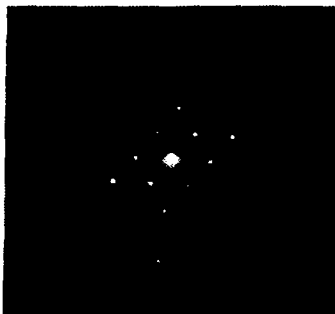


Figura 4.12 Patrón de difracción cuasicristalino con simetría tres para el sistema AlCuFe.



Figura 4.13 Pentágono en el sistema AlCuFe

A continuación se presenta otra fotografía para el mismo sistema en distinta área.

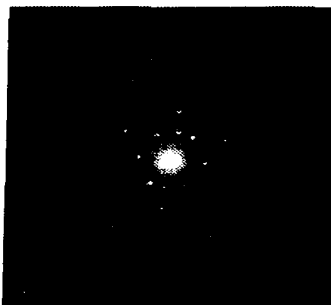


Figura 4.14 Patrón de difracción para el sistema cuasicristalino con simetría tres.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

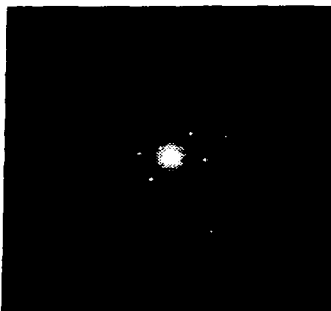


Figura 4.15 Imagen de microscopía de transmisión mostrando un pentágono característico de este sistema.

En ese caso los pentágonos están rotados. Hubo limitaciones en cuanto a obtener más imágenes dado que el equipo sólo permitía un grado de libertad en su movimiento y esto limitó de alguna manera la obtención de más imágenes. Otra limitante instrumental es el hecho de que el microscopio es de baja resolución, de 2.7 Å.

La siguiente fotografía es para el sistema $Al_{25}Mg_{40}Zn_{35}$, en la cual se puede observar una estructura octagonal.

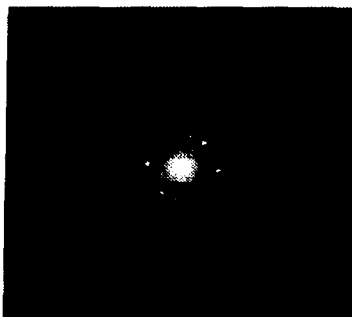


Figura 4.16 Patrón de difracción octagonal, característico de los cuasicristales, sistema $Al_{25}Mg_{40}Zn_{35}$.

De la observación de las imágenes anteriores es posible concluir que pudimos obtener la fase cuasicristalina en ambos sistemas AlCuFe y AlMgZn. También es necesario mencionar que el sistema AlMgZn presenta mayor dificultad para su preparación dado que un pequeño cambio en la composición estequiométrica puede afectar drásticamente la formación de la fase deseada.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 CONCLUSIONES

- Con base en la técnica aplicada fué factible realizar la síntesis de las fases cuasicristalinas de los sistemas Al-Cu-Fe y Al-Mg-Zn.
- Los análisis por difracción de rayos X muestran la estabilización de la fase cuasicristalina para el tiempo de recocido correspondiente.
- Las medidas de resistencia en función de la temperatura indican un comportamiento aislante para todas las muestras preparadas del sistema Al-Cu-Fe y para $Al_{25}Mg_{40}Zn_{35}$.
- Las imágenes de microscopía de transmisión para ambos sistemas revelan la formación de la fase icosaedra para los sistemas de Al-Cu-Fe con una mezcla de fases aproximantes y para el sistema Al-Mg-Zn se muestra la formación de la fase octaedra.
- Las mediciones del ángulo de contacto practicadas tanto a los cuasicristales como a los materiales de referencia arrojaron valores que nos indican las propiedades de antiadherencia adecuadas de los sistemas cuasicristalinos, siendo cercanos los valores obtenidos al del teflón aún y cuando la medición de los cuasicristales se realizó en muestras en volumen.

V.2 TRABAJOS FUTUROS

Se pretende la fabricación de películas delgadas de los sistemas cuasicristalinos, la evaluación de sus propiedades térmicas y eléctricas, así como la realización de pruebas de adherencia a fin de determinar su factibilidad como posibles sustitutos de teflón.

REFERENCIAS

1. D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J. W. Cahn, *Phys. Rev. Lett.* 53 (1984) 1951.
2. J. M. Dubois, S. S.Kang, J. Siebut, *J. Mater. Res.* Vol. 8 No. 10, (1993), 2471.
3. P. A. Bancel, P. A. Heiney, P. W. Stephens, A. J. Goldman, P. M. Harn, *Phys. Rev. Lett.*, (1985) Vol. 54, No. 22, 2422.
4. A. Sánchez, F. J. García, J. M. Algaba, J. Álvarez, P. Valléz, M. C. García-Paggio, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 553 (1993), 447.
5. D. Sordelet, (1994) Private Communications, Dureza Vickers con 100 [g] de carga.
6. H. E. Boyer, T. L. Gall, *Metals Handbook*, ASM, (1985), 2-16 a 2-22.
7. J. M. Dubois, *Mat. Science and Engineering*, 294-296 (2000), 4.
8. J. M. Dubois, P. Weinlons, European Patent EP. 0356287 A1, US Patent 5204191 (1993).
9. Y. Yokoyama, *Mat. Trans., JIM* 34 (1993), 135.
10. N. River, *J. Non-Cryst. Solids*, 153-154 (1993), 458.
11. J. M. Dubois, *World Scientific*, Singapore, (1997), 208.
12. P. Tsai, A. Inove, T. Masumoto, *J. J. A. P.*, Vol. 26, No.9, (1987), L1505.
13. T. A. Lograsst, A. R. Ross, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 553, (1999), 3.
14. E. Giacomett, N. Baluc, J. Bonneville, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 553, (1999), 295.
15. U. Mizutan, T. Takeuchi, T. Fukunaga, *Materials Transactions, TIM*, Vol. 34, No. 2 (1993), 102
16. N. Koshikama, S. Yoda, K. Edagawa, S. Takeuchi, *J.J.A.P.*, Vol. 40, (2001), L628.

17. D. K. Owens, R. C. Wendt, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 13 (1969) 1771.
18. G. Zograf, B. Jonson, *International Journal of Pharmaceutics*, 22 (1984) 159.
19. A. Katz, M. Duneau, *Journal de Physique*, Vol. 47, (1986), 181-196.

BIBLIOGRAFÍA

- Shackelford, *Introduction to Materials Science for Engineering*, 3rd Edition, Prentice may, 1992, USA.
- Senechal, *Quasicrystals and Geometry*, University of Cambridge, 1995, UK.
- Putnis, *Introduction to Mineral Science*, University of Cambridge, 1992, UK.
- Stadnik, *Physical Properties of Quasicrystals*, Springer, 1999, Germany.
- Dubois, Thiel, Tsai, Urban, *Quasicrystals*, Materials Research Society, Symposium Proceedings, V. 553, 1998, USA.
- Halliday, Resnick, Krane, *Física*, CECSA, 5^a Edición, Tomo II, 1998, México.
- Toral, *Fisicoquímica de superficies y sistemas dispersos*, Urmo, 1973, Bilbao.
- Smart, Moore, *Química del estado sólido*, Addison-Wesley, UK, 1992.
- Wake, *Adhesion and the formulation of Adhesives*, Applied Science Publishers, England, 1976.
- Smith, *Manual del Ingeniero Mecánico*, Prentice may, Tomo II, 1998, México.
- Stanelco Products, *Technical Manual Type, STA 30 [KW]*, UK.