

14
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

COMPARACION DE PROPIEDADES MECANICAS
EN ALEACIONES Mg-5Zn, Al-5Zn Y 70Cu-30Zn
BAJO EL EFECTO DE REFINACION DE GRANO
POR LOS METODOS MECANICO Y QUIMICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

GERARDO PACHECO HERNANDEZ



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente:	Prof. Noguez Amaya María Eugenia
Vocal :	Prof. Salas Banuet Guillermo F.
Secretario:	Prof. Robert Nuñez Teresita del Niño Jesús
1er. Suplente:	Prof. García Galán Sergio
2do. Suplente:	Prof. Ramirez Vieyra José Guadalupe

Sitio donde se desarrolló el tema:

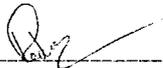
Laboratorios de Fusión y Solidificación, Metalografía y Ensayos Mecánicos del Departamento de Ingeniería Metalúrgica del edificio D de la Facultad de Química

Asesor del tema



M. en C. María Eugenia Noguez Amaya

Sustentante



Gerardo Pacheco Hernández

*(héroe de qué esperanzas,
luz de qué silencio).*
**Los que puedan oír, que escuchen
las palabras remotas de su corazón.**

Blanca Luz Pulido.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

*Porque les debo la vida.
Por su eterno cariño y apoyo
que me han impulsado a seguir
adelante y porque gracias a Uds.
ha sido posible este triunfo.*

A Ma. DEL SOCORRO CAMARGO S.

COQUITO:

*Porque me has sabido comprender y
escuchar y has reído y llorado conmigo.
Porque siempre me apoyas.
Porque con tu sinceridad, ternura y cariño
me has enseñado lo que de veras importa.*

AGRADECIMIENTOS

**A la Profra. Ma. Eugenia Noguez Amaya
*por su paciencia y por darme la oportunidad
de adentrarme en la investigación.***

**A la IQM Guadalupe Contreras Ordaz
*Por haber creído en mí y por haberme
enseñado a trabajar con disciplina y orden.***

**Al Dr. Jorge Salcedo
*Quien me sigue ofreciendo
la oportunidad de ver el mundo.***

Al IQM José G. Ramírez Vieyra
*Por sus valiosos consejos
y ayuda desinteresada.*

A Balby y Toño
*por su sencillez al aguantarme
y brindarme su amistad.*

Al Ing. Agustín H. Q.
*Por confiar en mí y por
su contribución a
mi desarrollo académico.*

Por su ayuda durante la realización de esta tesis:
Coco, Rubén, José Enrique, Tenorio, Hugo A., Luis Gonzaga.

y por facilitarme sus datos experimentales a:
Abad Cruz, Hernández et al, Balby Ojeda y Toño Díaz, Dra. Teresita Robert, IQM Guillermo Salas y M. en C. Ma Eugenia Noguez.

A mis eternas amigas de Ciencias:

*Juana Hernández, por tu confianza en mí.
Teresa Rodríguez, porque pase lo que pase estás de buen humor.
Beatriz Zúñiga, por tu sencillez.*

A mis amigos

desde la prepa:

*A Sandra Zavala
por su increíble amistad durante tantos años.*

Miguel Ángel Rocha, Arturo Tapia, Verónica, Carlos Velázquez, Carlos Chavarría, Hilda, Saúl, Bonaparte, Paucho, Jorge Soto y Vianey.

y a los amigos que en uno u otro momento me han brindado un poco de ellos mismos:

Enrique Aaron Tirado, Perfecto, Ricardo, David, Sergio Yabre, Carlos Poblano, Noel Méneru, Oscar Rubí, Armando Solís, Rodrigo, Maribel Rojas, Maribel Villanueva, Rosa Romero, Sofía Rojas, Yadira Torres, Clara Islas, Horacio, Natvi, Mariana, Moisés, Israel, Marco, Ruperto, Oscar Tejeda, Angélica, Leticia Solís, Mummy, Francisco, Mayte.

	Página
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS EN EL TEXTO	1
PROTOCOLO	2
RESUMEN	3
I. OBJETIVO	4
II. INTRODUCCIÓN	4
III. ANTECEDENTES	6
Refinamiento de grano y refinamiento de dendrita	7
Técnicas de refinamiento de grano	9
Refinación Térmica	9
Enfriamiento rápido	10
Denucleación	10
Refinación Química	11
Adición de agentes nucleantes	11
Adición de bloqueadores de crecimiento	13
Refinación Mecánica	13
Rotación del molde	14
Aleaciones de aluminio	15
Aleaciones de magnesio	16
Aleaciones de cobre	17
IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL	19
Material y equipo comunes a todos los experimentos	21
Procedimiento empleado para la refinación mecánica de Mg-5Zn	23
Material y equipo	23

Técnica de fusión	23	
Técnica de refinación mecánica por rotación	24	
Procedimiento empleado para la refinación química del Mg-5Zn	24	
Refinador	24	
Técnica de refinación química por adición de agentes nucleantes	25	
Procedimiento empleado para la refinación química del Al-5Zn	25	
Material y equipo	25	
Refinador	26	
Técnica de fusión	26	
Procedimiento empleado para la refinación mecánica del latón 70/30	27	
Material y equipo	27	
Técnica de fusión	27	
Técnica de refinación mecánica por rotación	28	
ENSAYOS REALIZADOS	28	
Metalografía	28	
Técnica empleada para el Al-5Zn	29	
Técnica empleada para el Mg-5Zn	29	
Técnica empleada para el latón 70/30	29	
Ensayo de tracción	30	
Ensayo de dureza	30	
Porosidad	31	
V. RESULTADOS	32	
Al-5Zn colado en molde de arena.	Refinación química	36
Al-5Zn colado en molde metálico frío.	Refinación química	43
Mg-5Zn colado en molde metálico frío.	Refinación química	52
Mg-5Zn colado en molde metálico frío.	Refinación mecánica	60

Latón 70/30 colado en molde metálico frío. Refinación mecánica	68
VI. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
Al-5Zn colado en molde de arena. Refinación química	76
Al-5Zn colado en molde metálico frío. Refinación química	77
Mg-5Zn colado en molde metálico frío. Refinación química	78
Mg-5Zn colado en molde metálico frío. Refinación mecánica	80
Latón 70/30 colado en molde metálico frío. Refinación mecánica	80
VII. CONCLUSIONES	82
Generales	83
Particulares	83
Comparativas	85
VIII. BIBLIOGRAFÍA	86
IX. APÉNDICES	89
APÉNDICE A	90
APÉNDICE B	91
APÉNDICE C	93
APÉNDICE D	94
I	95
II	96
III	97
IV	98
APÉNDICE E	99

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS EN EL TEXTO

α	Alfa	HP	Horse Power
Al	Aluminio	in	Pulgada
AISI	American Iron and Steel Institute	lb	Libra
ANSI	American National Standards Institute	Kg	Kilogramo
ASTM	American Society for Testing and Materials	Mg	Magnesio
		μm	Micrómetro
$^{\circ}\text{C}$	Grado centigrado	mm	Milímetro
$^{\circ}\text{C}/\text{s}$	Grado centigrado por segundo	mm/min	Milímetro por minuto
EDS	Espaciamiento dendrítico secundario	Mpa	Megapascal
EF	Esfuerzo de Fluencia	MTS	Material Testing System
g	Gramo	nm	Nanómetro
GBS	Grosor del Brazo dendrítico Secundario	oz	Onza
HB	Hardness Brinell	PG	Partícula grande
HG	High Grade	r.p.m.	Revoluciones por minuto
		RT	Resistencia a la tracción
		TG	Tamaño de grano
		Zn	Zinc
		%	Porcentaje

PROTOCOLO

Este trabajo de tesis conforma la parte final del proyecto de investigación 32101-A "ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS MICROESTRUCTURALES OBTENIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE REFINACIÓN DE GRANO, DE COLADA Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES TENSILES Y DE CORROSIÓN EN ALEACIONES DE COBRE, ALUMINIO Y MAGNESIO" patrocinado por CONACYT el cual consta de los siguientes objetivos generales:

- Evaluar los efectos de la microestructura de colada usando métodos de refinación de grano, sobre las propiedades mecánicas y de corrosión.
- Evaluar el efecto que el tipo de aleación no ferrosa pudiera tener en el estudio anterior.
- Desarrollar las posibles relaciones entre parámetros microestructurales y las propiedades mecánicas obtenidas en aleaciones de colada.
- Iniciar y motivar a los alumnos hacia la investigación en materiales metálicos.
- Complementar la infraestructura existente en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM.

RESUMEN

La refinación de grano mediante los métodos mecánico y químico se estudian en aleaciones ligeras base aluminio y base magnesio así como también en latón α 70/30 con el fin de correlacionar estadísticamente las propiedades mecánicas de colada: esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y dureza con los parámetros microestructurales: tamaño de grano, espaciamiento dendrítico secundario (EDS) y grosor del brazo dendrítico (GBS) con el objetivo de verificar que estos dos últimos, en algunos casos, son los responsables junto con la disminución del tamaño de grano, del aumento de las propiedades mecánicas producidas durante los métodos de refinación de grano.

La aleación Al-5Zn se refina por el método de adición de agentes nucleantes utilizando molde de arena y molde metálico frío. Para la aleación Mg-5Zn se realiza la refinación de grano por los métodos de rotación del molde y de adición de agentes nucleantes utilizando molde metálico frío, y para el latón 70/30 se refina el grano por rotación del molde colando en molde metálico frío.

El desarrollo experimental comprende la fabricación, fusión, tratamiento de refinación de grano y ensayos mecánicos de las aleaciones mencionadas y por último la obtención de correlaciones estadísticas funcionales entre los parámetros microestructurales y las propiedades mecánicas.

I. OBJETIVO

En este trabajo de tesis, muy específicamente, se tiene como objetivo:

- Determinar y comparar las posibles correlaciones estadísticas funcionales entre los parámetros microestructurales, con las propiedades mecánicas de colada de aleaciones Al-5Zn, Mg-5Zn y latón 70/30 con refinamiento de grano efectuado por distintos métodos.

II. INTRODUCCIÓN

Los métodos de refinación de grano tienen como objetivo una elevación de las propiedades mecánicas de las aleaciones no ferrosas, entendiéndose tradicionalmente este aumento como una "mejora" en las propiedades. Para refinar el grano existen los métodos térmico, mecánico y químico dependiendo de si se utiliza un gradiente de temperatura, la agitación del metal líquido o el uso de sustancias químicas, respectivamente.

La importancia de este trabajo radica en el hecho de que, como lo enuncia Brody (1), el comportamiento de aleaciones no ferrosas no se puede generalizar, presentando cada aleación un comportamiento diferente dependiendo de la composición y del método de refinación utilizado. Además, en la mayoría de las investigaciones realizadas se afirma que el refinamiento de grano es el responsable de la elevación de las propiedades mecánicas y en general no se habla del efecto de la refinación de la dendrita sobre estas ni cómo el método de refinación y la composición de la aleación afecta el tamaño de la dendrita.

El estudio aquí realizado tiene la limitante de realizarse en condiciones de laboratorio, donde es relativamente fácil la fusión y la implementación de los métodos de refinación de grano. Otro aspecto que se debe recalcar es que la variable porosidad no se controló de ningún modo por dos razones: impedir que la presencia de fundentes afectara los resultados y reproducir de alguna manera las condiciones en las cuales estas aleaciones son coladas normalmente en las pequeñas industrias donde el control de la porosidad significa un gasto considerable para el fundidor. Cabe hacer notar que se utilizó en todos los casos un modelo estadístico lineal, por la sencillez y facilidad de comparación que presenta.

REFINAMIENTO DE GRANO Y REFINAMIENTO DE DENDRITA**

Es conocido desde hace muchos años que una estructura de grano fino es más deseable en aleaciones ligeras (2) como son las de aluminio y las de magnesio así como en aleaciones base cobre, influyendo esto en las propiedades mecánicas y de colada.

En las aleaciones no ferrosas en general, el refinamiento de grano tiene efectos benéficos importantes sobre algunas propiedades de colada como son: mejora en la alimentación a sistemas de colada, mejor distribución de porosidad, reduce la tendencia al agrietamiento por calor, y alta fluidez durante su paso a través del sistema de colada. Otros beneficios incluyen mejora en la maquinabilidad y mejor apariencia después del anodizado (2).

En algunos estudios con aleaciones de aluminio llevados a cabo por Mondolfo (3) se intentó relacionar el EDS con las propiedades mecánicas, sugiriendo que las propiedades se relacionan con este parámetro microestructural más que con el tamaño de grano. Flemings (4), por otro lado, ha estudiado el efecto que tiene el tiempo de solidificación sobre el EDS relacionando a éste con las propiedades mecánicas esfuerzo máximo, esfuerzo de cedencia y porcentaje de elongación.

Hall y Petch (5) han encontrado una relación entre tamaño de grano y algunas propiedades mecánicas, y establecen que el esfuerzo de fluencia de un policristal es una función del tamaño de grano a valores constantes de esfuerzo y a relativamente baja temperatura (6). La expresión de Hall y Petch es:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

** Del griego *dendron*, árbol. Estructura ramificada de brazos primarios, secundarios, terciarios y, eventualmente, de un orden superior.

donde σ_0 y k son constantes experimentales. A este respecto, Caln (7) dice que para aleaciones no ferrosas el exponente no necesariamente es igual a -0.5.

Esta relación ha dado lugar a una extrapolación generalizada de propiedades mecánicas en metales y aleaciones, y cuando no se cumple, los datos tienden a ser omitidos o se consideran erróneos (7).

Amstrong (6) sugirió una relación del mismo tipo para la dureza y fue comprobada por Hu & Cline (3) sobre un amplio rango de tamaños de grano recristalizado.

La observación de que la disminución del tamaño de grano no en todos los casos determina el incremento de las propiedades mecánicas ya ha sido reportado también por T. Robert *et al* ' (7), que enuncia que existen parámetros microestructurales diferentes al tamaño de grano, tales como son el tamaño de dendritas, segundas fases, porosidad e inclusiones que determinan el comportamiento mecánico de aleaciones de colada no ferrosas. Asimismo, Flemings (8) afirma que la velocidad de enfriamiento ejerce un fuerte efecto sobre el EDS y que su importancia radica en que las propiedades mecánicas y de colada dependen de él.

De Ross y Mondolfo (9) aseveran que el refinamiento de grano en aleaciones de aluminio puede resultar en una disminución de las propiedades mecánicas en lugar de un incremento, debido a la porosidad y a la distribución de eutéctico alrededor de las dendritas. A este respecto, Verhoeven (10) dice que la refinación de grano incrementará las propiedades mecánicas sólo si conjuntamente con la disminución del tamaño de grano:

- no se incrementa la porosidad,
- se distribuye la porosidad en forma homogénea,
- no se incrementa la cantidad de segundas fases presentes, y
- no se incrementa el espaciamiento dendrítico secundario.

* Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

TÉCNICAS DE REFINAMIENTO DE GRANO

Las técnicas de refinamiento de grano las agrupa Mondolfo (3) bajo las siguientes categorías: enfriamiento rápido, métodos dinámicos, adición de bloqueadores de crecimiento, adición de agentes nucleantes y denucleación. En forma más general, los métodos para refinar el grano en las piezas de colada se pueden agrupar en tres categorías:

1. control de gradientes de temperatura o refinación térmica,
2. adición de refinadores de grano o refinación química, y
3. agitación mecánica o refinación mecánica.

REFINACIÓN TÉRMICA

La velocidad a la cual solidifica un metal se refleja en las características microestructurales puesto que al incrementar la velocidad de solidificación el tamaño de las dendritas y su espaciamiento disminuye y se traduce en una menor cantidad y mejor distribución de las segundas fases. y por ejemplo, las partículas de silicio en aleaciones de aluminio resultan más finas. El tamaño de grano tiende a disminuir con el incremento de la velocidad de solidificación aunque este no es un criterio absoluto del efecto térmico pues también es fuertemente afectado por la adición de refinadores de grano o agentes nucleantes . La velocidad de solidificación puede afectar la forma, el tamaño y el espaciamiento de las partículas que integran la segunda fase.

Se han llevado a cabo algunos estudios sobre refinación de grano utilizando el método térmico, como el efectuado por *Noguez et al* * (11) para un latón 70/30 y el realizado por *Hernández et al* * (12) para una aleación Mg-2Zn donde se obtiene un refinamiento de grano y del EDS.

En el método térmico se incluyen el enfriamiento rápido y la denucleación.

ENFRIAMIENTO RÁPIDO

En el caso del enfriamiento rápido con velocidades de enfriamiento del orden de 10^4 y 10^6 °C/s, se han reportado tamaños de grano de 3 nm de diámetro utilizando moldes permanentes (13). En este método la refinación de grano se produce debido a que el subenfriamiento del metal líquido se incrementa con la velocidad de enfriamiento lo cual provoca que el tamaño crítico del núcleo formado por nucleación heterogénea u homogénea sea más pequeño y, por tanto, al aumentar la velocidad de enfriamiento este núcleo sea estable a un tamaño más pequeño que el formado a velocidades de enfriamiento bajas, y entonces podrá crecer y formar cristales (2); otro efecto importante es la activación de nucleantes, cuando los hay..

DENUCLEACIÓN

La denucleación se diferencia del enfriamiento rápido en que las velocidades de enfriamiento son algunos órdenes de magnitud menor. En la denucleación los nucleantes primarios son removidos y así la nucleación depende de uno o a lo más dos tipos de nucleantes. Hogan (14) explica que se produce una súbita recalentamiento

* Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

que a su vez da lugar a la fusión de las ramificaciones de algunas dendritas formadas sobre los núcleos existentes y los fragmentos así formados actúan como núcleos, produciendo un grano fino.

REFINACIÓN QUÍMICA

Dentro del método químico se incluyen la adición de agentes nucleantes y la adición de bloqueadores de crecimiento.

ADICIÓN DE AGENTES NUCLEANTES

Se utiliza la adición de agentes nucleantes o refinadores de grano en el caso de las aleaciones de aluminio y de magnesio en donde se obtienen efectos pronunciados en las propiedades con el uso de cantidades menores a 0.20% (3). Mondolfo (3) señala que en este método no se produce un efecto apreciable en el espaciamiento dendrítico y, si lo hay, es en el sentido de aumentarlo pero se produce una disminución en la direccionalidad de las propiedades. Además hay poca influencia en el tamaño y distribución de los constituyentes, sin embargo, puede haber cambios drásticos en la estructura refinada con respecto a la de colada. Mondolfo al parecer es el primero que reporta el efecto que tiene la adición de agentes nucleantes sobre el espaciamiento interdendrítico.

Para el aluminio y sus aleaciones se utilizan como refinadores de grano el titanio, el boro y una combinación de ambos; siendo esta mezcla la más utilizada industrialmente ya que ha resultado ser la más efectiva para refinar el grano (15); ocasionalmente se ha utilizado niobio (2). Industrialmente se utilizan adiciones de 0.01-0.05% de titanio más 0.003-0.02% de boro siendo la relación 5:1 la más efectiva

según se ha visto (16). La mezcla titanio-boro tiene ventajas sobre el uso del titanio y el boro usados por separado ya que presenta menos efecto de decaimiento, se elimina la presencia de porosidades debido a la reacción molde-metal ya que el boro se encuentra en baja concentración y por lo mismo se presentan menos pérdidas de este elemento (3). Otra ventaja es que se reduce el asentamiento de cristales en la pieza durante la solidificación.

Para aleaciones base aluminio se utilizan los refinadores de grano en la presentación de mezclas de sales, aleaciones maestras y polvos metálicos compactados.

Para aleaciones de magnesio que contienen aluminio se utiliza la inoculación con carbono la que se realiza usualmente mediante la adición de compuestos orgánicos tales como hexacloroetano o hexaclorobenceno, aunque otros materiales carbonosos, como el negro de humo son algunas veces utilizados . Dichos refinadores de grano son utilizados en cantidades de alrededor de una onza por cien libras de metal (17).

El latón 70/30 ha sido refinado por *Noguez et al* * (11) utilizando B-Mn y fluorotitanato de potasio mientras que *Abad Cruz* * (18) reporta refinamiento de grano de latón α mediante la utilización de bismuto y bismuto más desoxidante. Cabe mencionar que en ambos estudios se ha observado un refinamiento de la dendrita además del refinamiento esperado del tamaño de grano.

El fundamento de la refinación por adición de agentes nucleantes se basa en el hecho de que en ausencia de éstos hay pocos núcleos en el metal líquido capaces de iniciar la solidificación y ocurre el subenfriamiento mientras que con la adición de ciertos elementos se incrementa el número de núcleos efectivos, favoreciéndose la nucleación heterogénea y desaparece o disminuye el subenfriamiento.

* Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

Para explicar este fenómeno de refinación se han propuesto las teorías del carburo-boruro y de la reacción peritética, las que no se detallan por no pertenecer directamente al tema que nos ocupa..

ADICION DE BLOQUEADORES DE CRECIMIENTO

La adición de bloqueadores de crecimiento halla su fundamento en que las aleaciones donde el líquido tiene una composición diferente de la del sólido, la velocidad de crecimiento del sólido se reduce. Si se produce enfriamiento constitucional el resultado es el incremento de la nucleación y la disminución del tamaño de grano. El grano obtenido por este método no es muy grande en comparación con el obtenido por los métodos mecánicos y adición de agentes nucleantes.

REFINACIÓN MECÁNICA

Los métodos dinámicos son aquellos donde se produce movimiento del metal líquido durante su solidificación y enfriamiento. Se incluyen en estos métodos la agitación provocada por corrientes térmicas o evolución de gas, agitación mecánica o rheocasting, el uso de vibración sónica y ultrasónica y agitación electromagnética. La vibración puede llevarse a cabo en el molde, en el líquido, en el corredor, en la colada y aunque la más favorable es en el molde, su eficiencia está limitada a frecuencias bajas y amplitudes grandes y normalmente sólo han sido utilizados moldes metálicos para la vibración (19).

El fenómeno ha sido explicado por Campbell (19) en forma satisfactoria al decir que se produce reorientación del cuerpo de la dendrita, que por posterior recristalización forma nuevos granos de alto ángulo. También se han proporcionado evidencias de que ocurre fragmentación de la dendrita en crecimiento lo cual produce nuevos núcleos. Este rompimiento de los brazos dendríticos es el mecanismo más probable para el rheocasting y procesos similares. también es conocido que un largo tratamiento dinámico produce una mejora de propiedades en la mayoría de los materiales (3).

ROTACIÓN DEL MOLDE

La colada rotacional es la introducción del metal líquido dentro de un molde rotado durante la solidificación y cuyo eje de rotación puede ser horizontal, vertical o inclinado (20). no es considerada en la clasificación de Campbell (19).

Una ventaja de este método es la remoción de gases y la subsecuente disminución de la porosidad. Otra ventaja es el mojado y mezclado de partículas inmiscibles (3). Siebers y Bullian (21) reportan que en aleaciones Al-Mg la estructura eutéctica cambia de separada a acoplada.

Noguez *et al* * (12), por otro lado, reporta la obtención de grano equiaxial fino utilizando el método de rotación del molde para un latón 70/30.

Ojeda y Díaz * (22) han realizado estudios acerca del efecto de la rotación como refinador sobre una aleación de Al-6%Zn encontrándose que las propiedades estuvieron influidas en gran medida por la porosidad.

* Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

ALEACIONES DE ALUMINIO

Los granos de las aleaciones coladas de aluminio en lo referente al tamaño, forma, arreglo y características estructurales dentro del grano, dependen fuertemente de las velocidades de enfriamiento y de los gradientes térmicos desarrollados durante la misma solidificación. En condiciones de altos gradientes térmicos las aleaciones del grupo 1XX (99% Al) y las aleaciones que son soluciones diluidas como el grupo 5XX (Al-Mg) forman granos columnares pero los productos de colada son en la mayoría de los casos estructuras equiaxiales con propiedades isotrópicas.

En piezas coladas en molde de arena el diámetro promedio se encuentra en el rango 0.25-5 mm (0.01-0.2 in) que corresponde a tamaños de grano ASTM de M14-M5.5 respectivamente de acuerdo a la norma ANSI/ASTM E112. Para moldes de tipo permanente el rango varía de 0.13 a 1.3 mm (0.005-0.05 in). El tamaño de grano es afectado fuertemente por la velocidad de solidificación y los gradientes de temperatura que son determinados por el espesor de la sección y el material de molde pero también se ve afectado el tamaño de grano por la fusión y la temperatura de colada y la presencia y efectividad de agentes nucleantes que refinan el grano y por los procedimientos utilizados con tal fin. Así, el tamaño de grano obtenido en piezas de colada de aleaciones de aluminio es mucho más pequeño en moldes permanentes que el obtenido de moldes de arena y mucho más pequeño todavía es el tamaño de grano obtenido en piezas por fundición a presión.

El refinamiento de grano se considera benéfico ya que reduce la tendencia a la fractura en caliente, mejora las condiciones de alimentación y puede mejorar la resistencia y ductilidad. Las secciones macroatacadas dentro del análisis metalográfico son utilizadas para corroborar la efectividad de los refinadores de grano desde el punto de vista control de calidad y análisis de fallas.

Pueden presentarse gran variedad de tipos y tamaños de discontinuidades en las aleaciones de aluminio y de diferentes grados de severidad. Entre estos figuran los huecos o porosidades que pueden ser causados por atrapamiento de aire, sobre todo en piezas coladas a presión; por gas hidrógeno el cual evoluciona durante la solidificación o por contracción. Los huecos originados por aire atrapado normalmente son aislados, discretos y aproximadamente esféricos. La porosidad originada por gas también puede ser esférica cuando se presenta en cantidades relativas altas pero normalmente es fina y homogéneamente distribuida y se considera como un patrón dendrítico ya que se forma después de haberse iniciado la solidificación de la aleación. Puede ser difícil diferenciarla de la porosidad producida por contracción que presenta normalmente apariencia interdendrítica. La contracción que ocurre en eutécticos y aleaciones puras no es dendrítica y se presenta en formas redondeadas y alargadas como en el caso de aleaciones TXX.

ALEACIONES DE MAGNESIO

Aunque las aleaciones de magnesio no sean tan resistentes como las de aluminio, sus relaciones resistencia-peso son comparables, sin embargo, el magnesio tiene bajo módulo de elasticidad y escasa resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste abrasivo (23). El magnesio y sus aleaciones presentan riesgo durante la fundición y el maquinado ya que arden al combinarse fácilmente con el oxígeno.

Para aleaciones de magnesio conteniendo aluminio los dos métodos de refinamiento de grano más comúnmente utilizados son sobrecalentamiento e inoculación con carbón (17). En el sobrecalentamiento, que es el método más comúnmente empleado, el metal líquido es calentado hasta 900-925°C y mantenido ahí por un período de

alrededor de 15 minutos (determinado en cada caso de la experiencia) y entonces enfriado a la temperatura de colada rápidamente. Si el metal líquido es enfriado lentamente de la temperatura de sobrecalentamiento, la refinación de grano puede perderse.

El segundo método de refinamiento de grano de estas aleaciones es la inoculación con carbono. Ésta se realiza usualmente por la adición de compuestos orgánicos tales como hexacloroetano o hexaclorobenceno. Las tabletas, hechas por compresión de estos compuestos, son sumergidas en el baño líquido hasta que la descomposición es completa. Los compuestos en forma de polvo pueden ser envueltos en papel aluminio y después sumergirlos en el metal líquido. El baño debe estar entre 760-815°C para un tratamiento efectivo, y cuando la reacción es completa no debe permanecer arriba de 760°C porque parte del efecto refinante se pierde. Además, los compuestos orgánicos refinantes tienen un efecto desgasificante al mismo tiempo por la liberación de cloro. Los compuestos son utilizados en cantidades de alrededor de una onza por 100 libras de metal (17).

ALEACIONES DE COBRE

La refinación de aleaciones de cobre fue llevada a cabo por R.E. Trevison y N.L. Cupini (24) utilizando niobio, cobalto y hierro en el cobre fundido y demostraron que se llevan a cabo reacciones peritéticas con el cobre. Sus resultados indican que por debajo del 1% el titanio adicionado causa un pequeño subenfriamiento, pero no es suficiente para producir gran nucleación.

Hasta ahora se ha visto que sólo zirconio y boro han sido sugeridos como potenciales refinadores de grano para latones, sin embargo, si existe hierro en el metal líquido, no se produce efecto refinante, y si hay exceso de éste, se producen puntos duros por aglomeración de boruros.

A.J.J. Cowell y R.C.C. Nixon (25), al refinar el latón 70/30 con zirconio y magnesio no hallaron un aumento significativo de propiedades mecánicas y observaron que la utilización de zirconio y magnesio juntos produce estructuras más finas en la refinación, por prevenir el magnesio al zirconio de la oxidación.

M.E. Noguez* (11) reporta con el uso de fluorotitanato de potasio una disminución en propiedades mecánicas y un incremento en el EDS y el tamaño de grano, y el efecto contrario con el uso de la refinación por rotación del molde en latón 70/30. El refinador CUFINE fue desarrollado por A.J.J. Cowell y R.C.C. Nixon (25), está libre de boro y proporciona una fina estructura isotrópica. No tuvo aceptación. O. Bustos y W. Reif (26) observaron que los elementos boro, bromo, azufre, selenio y telurio tienen efecto refinante fuerte en cobre, obteniéndose granos de 208 μm de diámetro , un notable aumento de la fracción de grano equiaxial, una dureza invariante y una disminución en la conductividad eléctrica, proponiendo que el mecanismo que actúa es el subenfriamiento.

Con base en los estudios anteriores, *Abad Cruz* (18) * realiza estudios sobre la refinación química de un latón 70/30 utilizando bismuto y encuentra que éste si refina el grano pero también se aglomera formando partículas duras en el metal.

* Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El proyecto global del cual este trabajo forma parte, comprende la comparación de propiedades mecánicas y parámetros microestructurales entre las aleaciones Mg-5Zn, Al-5Zn y 70Cu-30Zn (latón α 70/30) sometidas a los métodos de refinación química, térmica y mecánica. Este trabajo está enfocado solamente a la parte que comprende la refinación química del Al-5Zn y Mg-5Zn y a la refinación mecánica del Mg-5Zn y del latón 70/30, por lo cual se eligieron para ser fabricadas las aleaciones de composición nominal Al-5Zn, Mg-5Zn y latón 70/30 sometiendo a éstas a los métodos de refinamiento de grano descritos. La información se resume en la tabla siguiente:

TABLA 1

Condiciones de las técnicas de refinamiento de grano manejadas.

ALEACIÓN	TEMPERATURA DE COLADA (°C)	TIPO DE REFINACIÓN	REFINADOR COMERCIAL	TIPO DE MOLDE	CANTIDAD RECOMENDADA	RANGO MANEJADO
Al-5Zn	720	QUÍMICA	NUCLEANT 200	METÁLICO	125g/50Kg (0.25%)	0.00-0.30 %
Al-5Zn	720	QUÍMICA	NUCLEANT 2	ARENA		0.00-0.50 %
Mg-5Zn	720	QUÍMICA	DEGASER	METÁLICO	1oz/100 lb (0.0625%)	0.00-0.12 %
Mg-5Zn	720	MECÁNICA		METÁLICO		0-565 r.p.m.
Latón 70/30	1100	MECÁNICA		METÁLICO		0-542 r.p.m.

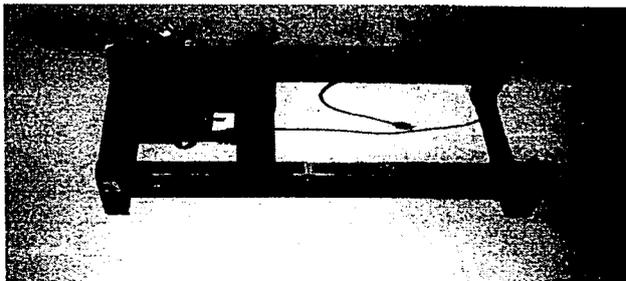
Cada experimento se realizó por duplicado y en las mismas condiciones. En todos los casos sólo se reportan valores promedio de mediciones.

MATERIAL Y EQUIPO COMUNES A TODOS LOS EXPERIMENTOS

- Balanza granataria para el pesado de los trozos de metal y balanza analítica para el pesado del refinador.
- Para el vaciado de la aleación se utilizó molde metálico fabricado de acero grado herramienta AISI H13 de forma cilíndrica y que cuenta con un ángulo de salida que permite retirar la pieza solidificada del molde.
- Para la fusión de la aleación se utilizó un horno eléctrico de piso Lindberg/Bluem, General Signal con un rango de temperatura de 0-1200°C con registrador de temperatura integrado y con una sensibilidad de $\pm 0.05^\circ\text{C}$.
- Para el control de la temperatura se contó con un registrador digital de temperatura conectado a un termopar de cromel-alumel (NiCr-NiAl) con cubierta cerámica segmentada. Dicho registrador tiene un rango de temperatura de 0-999°C y una sensibilidad de $\pm 0.05^\circ\text{C}$.
- Varilla de acero pintada con grafito como agitador.
- Cucharilla de acero para desescorificar.

- Para la refinación mecánica por rotación se utilizó un aparato de rotación previamente fabricado por *Ojeda y Díaz* * (22) y al cual se le realizaron modificaciones. El aparato se muestra en la figura 1 y un mayor detalle se muestra en el Apéndice E, y consiste de una flecha unida a un motor de 1/4 HP de potencia de corriente alterna montado sobre una base metálica. Todo el conjunto se encuentra a su vez sostenido por una base de madera recubierta con pintura de grafito de tal modo que el motor se encuentra separado del suelo y bajo una placa metálica que lo protege de proyecciones de metal. El modelo adolecía del hecho de producir rotación con vibración de tipo oscilatorio. La modificación efectuada consistió en soldar una guía a la placa metálica para impedir el movimiento oscilatorio del molde y aunque la fricción producida restó velocidad en la rotación también eliminó la vibración.

FIGURA 1. Aparato de rotación modificado.



* Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA REFINACIÓN MECÁNICA DEL Mg-5Zn

MATERIAL Y EQUIPO

Como materia prima se utilizó magnesio electrolítico comercial en presentación de lingotes, este lingote fue cortado en trozos más pequeños con el fin de preparar de forma adecuada el balance de carga en el crisol. Como elemento de aleación se utilizó zinc electrolítico grado HG en presentación de hemiesferas.

Para la fusión se utilizó crisol de grafito para evitar pérdidas y contaminación del metal líquido por la reacción que presenta con un molde común de alúmina. Para el termopar se utilizó cubierta cerámica de alta alúmina. Para la medición de las revoluciones por minuto se utilizó un tacómetro marca Tachoprobe con un rango de medición de 100-60000 r.p.m.

TÉCNICA DE FUSIÓN.

1. Cálculo del balance de carga de acuerdo al algoritmo mostrado en el Apéndice B.
2. Pesado de las cantidades requeridas de magnesio y zinc.
3. Pre calentamiento a 250°C de la carga de magnesio.
4. Introducción del magnesio al crisol de grafito e introducción de éste al horno el cual se tapa para evitar la ignición del magnesio.
5. Pre calentamiento de zinc dentro de un crisol cerámico en mufla a 400°C para evitar el choque térmico y favorecer la rápida disolución del zinc en el magnesio evitando pérdidas por evaporación.
6. Fusión de magnesio a una temperatura de 730°C.
7. Adición rápida de zinc agitando el baño líquido hasta asegurar que se haya incorporado completamente al baño.
8. La aleación se deja en el horno hasta alcanzar la temperatura inicial.

9. Desescorificación del metal fuera del horno.
10. Verificación de la temperatura.
11. Colada del metal directamente al molde hasta llenarlo totalmente

TÉCNICA DE REFINACIÓN MECÁNICA POR ROTACIÓN

1. Una vez lleno el molde metálico se conecta el motor previamente calibrado y fijado en las revoluciones por minuto requeridas.
2. Se deja girar el molde diez minutos como mínimo con el fin de asegurar la completa solidificación del metal.
3. El molde se desmonta del motor y se separa el cilindro de metal obtenido de éste.
4. Corte de muestra para ensayo metalográfico de la parte superior del cilindro, en la parte correspondiente al rechupe.

PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA REFINACIÓN QUÍMICA DEL Mg-Zn

REFINADOR

Se utilizó como refinador de grano hexacloroetano, contenido en el producto comercial de FOSECO denominado DEGASER. El producto, utilizado para la degasificación de aleaciones de aluminio, en el magnesio produce refinación por inoculación de carbono. La cantidad recomendada por el proveedor se muestra en la Tabla 1.

TÉCNICA DE REFINACIÓN QUÍMICA POR ADICIÓN DE AGENTES NUCLEANTES

1. Cálculo de la cantidad de refinador eligiendo puntos por arriba y por debajo de la cantidad recomendada por el fabricante.
2. Pesado de las cantidades requeridas.
3. Fabricación y fusión de la aleación como en el caso de la refinación mecánica.
4. Adición del refinador envuelto en papel aluminio y mediante inmersión en el metal líquido, colocado en la punta de una varilla y se agita con ésta el metal líquido hasta la total detención de la reacción química.
5. La aleación permanece en el horno hasta recuperar la temperatura inicial.
6. Verificación de la temperatura.
7. Desescorificación.
8. Vaciado de la aleación al molde estático.
9. Retiro del cilindro solidificado y corte de la muestra citada.

PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA REFINACIÓN QUÍMICA DEL Al-5Zn.

MATERIAL Y EQUIPO

Se utilizó aluminio electrolítico con pureza del 99.99% en presentación de lingote y zinc comercial electrolítico en presentación de granalla.

El aparato de rotación sirvió únicamente de soporte al molde durante la solidificación y enfriamiento.

Se utilizó para la fusión un crisol de alúmina.

REFINADOR

Se utilizó el producto comercial de FOSECO denominado NUCLEANT 200 consistente en sales de titanio-boro en relación 6:1 mezcladas con hexacloroetano en polvo compactado en forma de tableta. La cantidad recomendada por el proveedor se muestra en la Tabla 1.

TÉCNICA DE FUSIÓN

1. Cálculo del balance de carga y de las cantidades de refinador.
2. Pesado de las materias primas.
3. Pre calentamiento de la carga de aluminio hasta 250°C en mufla para acelerar la fusión.
4. Calentamiento y fusión del aluminio en el horno de piso.
5. Pre calentamiento del zinc en crisol cerámico dentro de la mufla hasta una temperatura de 400°C, para evitar el choque térmico.
6. Adición del zinc al aluminio fundido con agitación del baño líquido hasta que ya no se verifique la presencia de trozos sólidos en el baño.
7. Se deja la aleación dentro del horno hasta alcanzar la temperatura de 730°C.
8. Se agrega el refinador envuelto en papel aluminio y mediante inmersión en el baño fijado a la punta de una varilla con la cual se agita el metal líquido hasta el término de la reacción química.
9. Desescorificación.
10. Vaciado al molde hasta llenado completo.
11. Retiro del cilindro solidificado y corte de muestra para ensayo metalográfico.

PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA REFINACIÓN MECÁNICA DEL LATÓN 70/30

MATERIAL Y EQUIPO

Como materias primas se utilizaron cobre electrolítico en presentación de lámina con pureza del 99.999% y zinc de 99.98% de pureza en presentación de granalla.

Para la fusión se usó un horno de inducción. Para la refusión de la aleación se utilizó el horno de piso ya descrito.

Técnica de fusión

1. Cálculo del balance de carga para 5 Kg de aleación.
2. Pesado de las cantidades requeridas.
3. Empaquetado del zinc en láminas de cobre para minimizar la violencia de la reacción química al contacto del zinc con el cobre líquido.
4. Fusión del cobre y calentamiento hasta la temperatura de 1100°C.
5. Adición del zinc introduciéndolo dentro del baño con una lanza.
6. Agitación del metal líquido hasta completa homogeneización.
7. Vaciado de la aleación en lingoteras de hierro colado.
8. Desmoldeo de lingotes.
9. Refusión de lingotes de latón en horno de piso hasta la temperatura de 1100°C utilizando crisol de alúmina.
10. Verificación de temperatura.

TÉCNICA DE REFINACIÓN MECÁNICA POR ROTACIÓN

1. Calibración de las revoluciones por minuto y ajuste para girar a las revoluciones requeridas al conectar el aparato.
2. Una vez lleno el molde se conecta el motor del aparato de rotación.
3. Se deja al molde girar hasta asegurar total solidificación del metal.
4. Retiro del cilindro solidificado y corte de muestra para ensayo metalográfico.

ENSAYOS REALIZADOS

Para las tres aleaciones se realizó un estudio metalográfico con el fin de determinar los parámetros microestructurales de cada una de ellas. Asimismo, se llevaron a cabo las pruebas mecánicas de medición de dureza Brinell y ensayo de tracción. Junto a estas pruebas se realizó la medición cualitativa de porosidad. A continuación se resumen brevemente las características de cada una de ellas.

METALOGRAFÍA

Para todas las muestras se siguió el ensayo normal de metalografía que consiste en los siguientes pasos: Montaje, desbaste grueso, desbaste fino, pulido grueso, pulido fino, ataque químico superficial y observación al microscopio metalúrgico. Las variaciones del método en cada aleación son descritas a continuación:

Técnica empleada para el Al-5Zn

Las muestras se montaron en resina epóxica con el fin de no alterar el metal por temperatura. Se realizaron en cada muestra veinte mediciones de los siguientes parámetros: espaciamiento dendrítico secundario (EDS), el grosor del brazo secundario (GBS) y el tamaño de grano. Para los dos primeros parámetros se utilizó el ocular micrométrico y la regla micrométrica y para el tamaño de grano se utilizó una lupa de durómetro Brinell graduada. Se realizó un solo ataque con reactivo Keller.

Técnica empleada para el Mg-5Zn

Las muestras se montaron en resina para evitar alteración por temperatura. Se realizaron veinte mediciones por muestra de los siguientes parámetros: EDS, GBS, tamaño de grano, porcentaje y diámetro de rosetas. Se utilizó en todas las mediciones el ocular micrométrico y la regla micrométrica. Se utilizaron dos tipos de ataque. El reactivo 11 (cuya composición aparece en el Apéndice C) reveló todos los parámetros microestructurales excepto el tamaño de grano, que fue revelado con NITAL 5, reactivo utilizado en ataque de aleaciones ferrosas, por lo cual su utilización como reactivo de ataque de aleaciones de magnesio para revelar el grano marca un precedente en la técnica de metalografía para estas aleaciones.

Técnica empleada para el latón 70/30

Las muestras se montaron en baquelita y se observó y midió al microscopio el EDS y con la lupa graduada se midió el tamaño de grano columnar y equiaxial así como su porcentaje en cada muestra. Se utilizaron dos reactivos de ataque como se indica en el Apéndice C.

ENSAYO DE TRACCIÓN

Se maquinaron probetas lisas de 9 mm de diámetro y se realizaron ensayos de tracción para todas las muestras de las tres aleaciones utilizadas. Se utilizó para dicho ensayo la Máquina Universal de Ensayos MTS 810 y se utilizó la norma ASTM E8 (27) que marca como condiciones del ensayo temperatura ambiente y una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min.

Mediante el ensayo de tracción se determinaron los parámetros esfuerzo de fluencia y resistencia a la tracción.

ENSAYO DE DUREZA

En todos los casos se obtuvo en número de dureza Brinell (HB), que es la razón de la carga en Kg al área en mm² de la impresión. Se utilizó un durómetro Brinell con una bola de acero de 5 mm de diámetro y un microscopio de mano de diez aumentos con reglilla graduada para realizar la medición del diámetro promedio de la impresión. En aluminio se aplicó la carga durante un tiempo de 15 segundos y para el magnesio de 30 segundos. Para el cálculo de la carga aplicada y del número de dureza Brinell se emplearon las siguientes expresiones:

Determinación de la carga aplicada:

$$Q = P/D^2$$

Determinación del número de dureza Brinell (HB)

$$HB = P/S = D/\{(n-D/2) \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})\}$$

- Donde:
- P Carga aplicada (Kg)
 - Q Constante
 - D Diámetro de la bola (mm)
 - S Superficie de la impresión (mm²)
 - d Diámetro de la impresión (mm)

La información se resume en la tabla 2.

TABLA 2. Condiciones para el ensayo de dureza.

METAL BASE	CONSTANTE Q (Kg/mm ²)	CARGA APLICADA (Kg)	TIEMPO DE APLICACIÓN (s)	DIÁMETRO DE LA BOLA (mm)
MAGNESIO	2.5	62.5	30	5
ALUMINIO	5	125	15	5
COBRE	10	250	15	5

El número de dureza Brinell se reporta:

$$\text{No. HB} = \frac{\text{Diámetro de la bola}^2}{\text{Carga aplicada} / \text{Tiempo de aplicación}}$$

cuando el ensayo no es estándar (HB 10/500/30) como en este caso (28).

POROSIDAD

La porosidad en cada muestra fue medida en forma cualitativa de la siguiente manera:

- * poca
- ** regular
- *** mucha

V. RESULTADOS

A los resultados obtenidos de la experimentación anterior se les ha aplicado un análisis estadístico descriptivo y, de esta forma, se presenta una tabla de datos para cada aleación y técnica de refinación; en seguida se presentan una serie de gráficas donde en la mayoría de ellas, se muestra la curva de tendencia -donde se ha adoptado, por facilidad de análisis y de comparación, el modelo lineal- sobre el diagrama de dispersión. En algunos casos, cuando se observa un comportamiento que se aleja del modelo lineal propuesto, se ha dejado una curva suave uniendo los puntos o una curva de tendencia con un modelo distinto del lineal sobre el diagrama de dispersión, aunque, para fines de estadística inferencial se ha seguido un modelo lineal en todos los casos. De este modo, para cada aleación y, dentro de éstas, para cada tratamiento y/o condiciones de tratamiento se presenta la tabulación correspondiente de los valores experimentales, situando en la primera columna la variable controlada, que fue el porcentaje de refinador en el caso de la refinación química, y el grado de agitación, medido como r.p.m. para el caso de la refinación mecánica. En las columnas siguientes se encuentran tabulados los valores medidos en los ensayos descritos y así tenemos los parámetros microestructurales EDS, GBS y tamaño de grano y las propiedades mecánicas esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y dureza; en el caso del magnesio también se reporta el diámetro de roseta y el porcentaje de éstas en la muestra ya que, al ser abundantes, resultan un parámetro dendrítico que hay que tomar en consideración. A continuación de la tabla de valores se presenta una serie de gráficas donde se observa el efecto producido por el cambio de la variable controlada, como lo es el porcentaje de refinador o el cambio en r.p.m., sobre los parámetros microestructurales EDS, GBS, tamaño de grano, o sobre las propiedades mecánicas esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y dureza. Donde se desea observar la disminución de algún parámetro microestructural con el aumento de refinador o de r.p.m., se ha invertido en la gráfica el orden de la variable independiente. Al final de la serie de gráficas se

encuentran los parámetros del modelo lineal aplicado, esto es, la pendiente (m), la ordenada al origen o intercepto (b) y el coeficiente de correlación (r) según el modelo lineal:

$$Y = mX + B$$

El modelo lineal fue obtenido por el método de cuadrados mínimos y fue aplicado a cada pareja de valores X y Y de los cuales se deseaba observar el comportamiento. Para el caso de la refinación química del Al-5Zn colado en molde metálico frío no se tomó en cuenta el primer valor de la resistencia a la tracción y el esfuerzo de fluencia para la obtención de los parámetros del modelo lineal puesto que estos datos tienen un valor extremo con respecto a los demás y los parámetros obtenidos estarían desplazados del comportamiento real si se tomaran en cuenta.

En la tabla siguiente se encuentra un resumen de las mediciones efectuadas en cada caso, en el orden que aparecen en el texto.

TABLA 3: RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN.

REFINACIÓN	ALEACIÓN	PARAMETROS MICROESTRUCTURALES	PROPIEDADES MECÁNICAS	OTRAS MEDICIONES
QUÍMICA	Al-5Zn Molde de Arena	<ul style="list-style-type: none"> • EDS • GBS • TAMAÑO DE GRANO 	<ul style="list-style-type: none"> • ESFUERZO DE FLUENCIA • RESISTENCIA A LA TRACCIÓN • HB 	<ul style="list-style-type: none"> • % REFINADOR • POROSIDAD CUALITATIVA
	Al-5Zn Molde Metálico	<ul style="list-style-type: none"> • EDS • GBS • TAMAÑO DE GRANO 	<ul style="list-style-type: none"> • ESFUERZO DE FLUENCIA • RESISTENCIA A LA TRACCIÓN • HB 	<ul style="list-style-type: none"> • % REFINADOR • POROSIDAD CUALITATIVA
	Mg-5Zn Molde Metálico	<ul style="list-style-type: none"> • EDS • GBS • TAMAÑO DE GRANO • % ROSETA • DIAMETRO DE ROSETA 	<ul style="list-style-type: none"> • ESFUERZO DE FLUENCIA • RESISTENCIA A LA TRACCIÓN • HB 	<ul style="list-style-type: none"> • % REFINADOR • POROSIDAD CUALITATIVA
MECÁNICA	Mg-5Zn Molde Metálico	<ul style="list-style-type: none"> • EDS • GBS • TAMAÑO DE GRANO • % ROSETA • DIAMETRO DE ROSETA 	<ul style="list-style-type: none"> • ESFUERZO DE FLUENCIA • RESISTENCIA A LA TRACCIÓN • HB 	<ul style="list-style-type: none"> • R.P.M. • POROSIDAD CUALITATIVA
	LATÓN 70/30 Molde Metálico	<ul style="list-style-type: none"> • EDS • GBS • TAMAÑO DE GRANO 	<ul style="list-style-type: none"> • ESFUERZO DE FLUENCIA • RESISTENCIA A LA TRACCIÓN • HB 	<ul style="list-style-type: none"> • R.P.M. • POROSIDAD CUALITATIVA

Al-5Zn COLADO EN MOLDE DE ARENA

REFINACIÓN QUÍMICA

REFINADOR	EDS	GBS	TAMAÑO DE GRANO	ESFUERZO DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCION	HB 5/125/15	POROSIDAD CUALITATIVA
(%)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(Kg/mm ²)	
0.0	0.031	0.030	0.563	30.4	80.2	36.2	*
0.1	0.034	0.032	0.354	54.5	81.6	35.3	**
0.2	0.039	0.035	0.562	26.9	81.5	31.6	**
0.4	0.040	0.038	0.417	34.8	69.2	26.2	**
0.5	0.045	0.042	0.368	40.5	67.0	30.5	**

Gráfico 1

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-Si₂ COLADO EN MOLDE DE ARENA

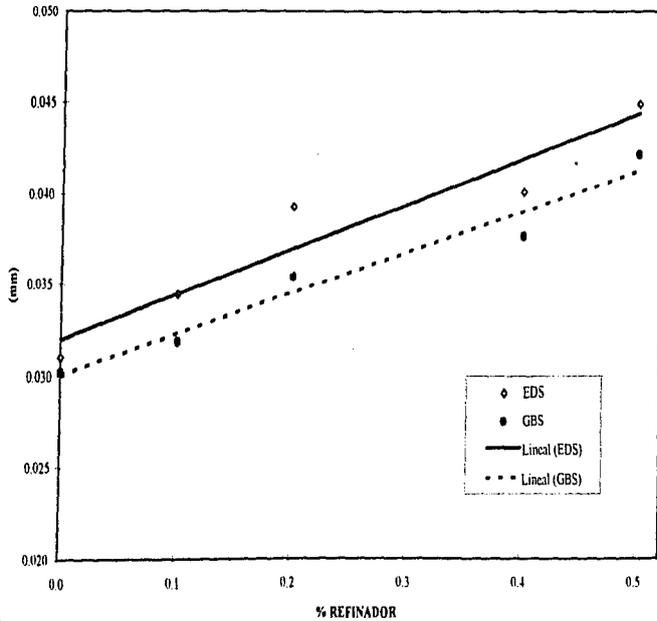


Gráfico 2

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-5Zn COLADO EN MOLDE DE ARENA

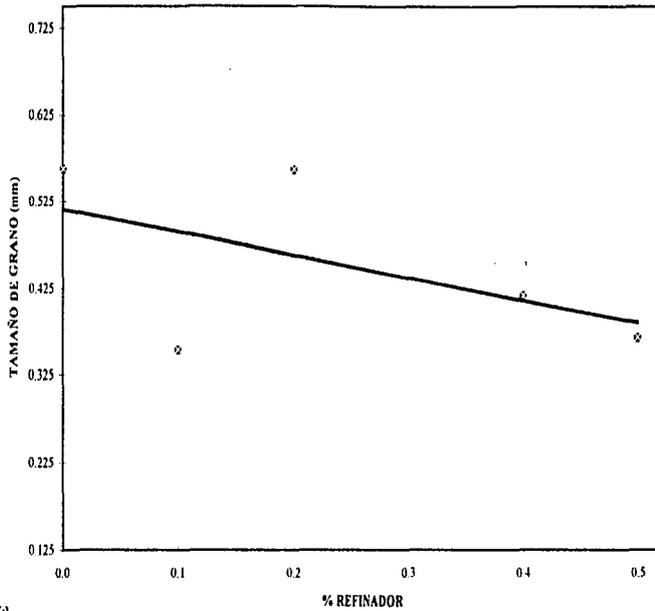


Gráfico 3

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-5Zn COLADO EN MOLDE DE ARENA

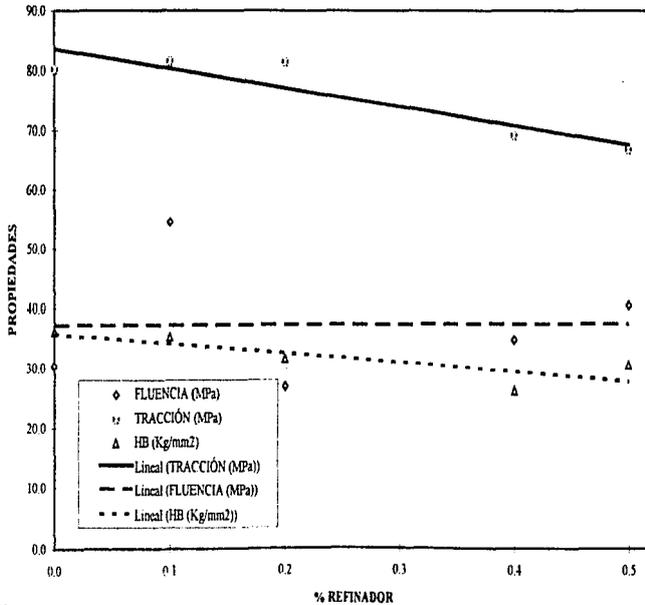


Gráfico 4

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-Si₂ COLADO EN MOLDE DE ARENA

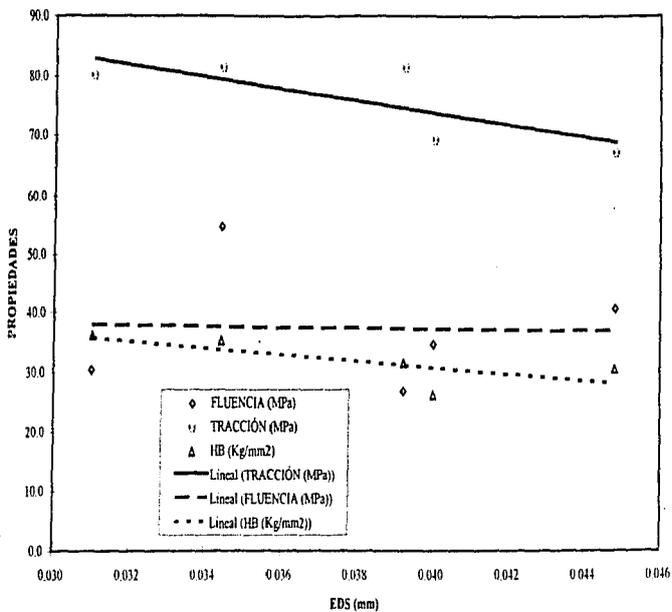
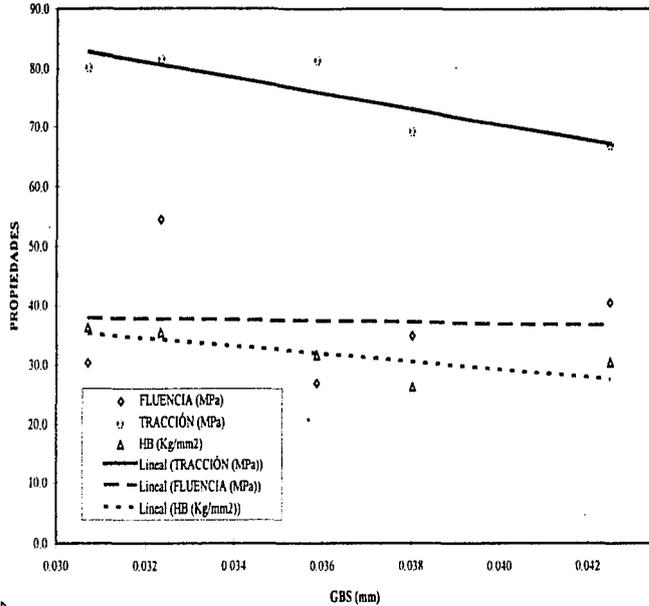
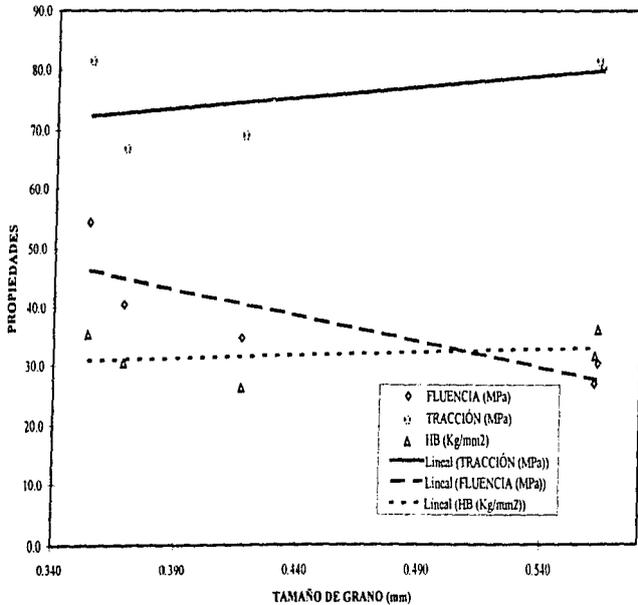


Gráfico 5

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-SZn COLADO EN MOLDE DE ARENA



REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-5Zn COLADO EN MOLDE DE ARENA



Al-5Zn colado en molde de arena. Refinación Química.

	PENDIENTE	ORDENADA AL ORIGEN	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
EDS vs % REFINADOR	0.025	0.031	0.960
GBS vs % REFINADOR	0.022	0.029	0.989
TG vs % REFINADOR	-0.260	0.515	-0.524
RT vs % REFINADOR	-31.627	83.490	-0.912
EF vs % REFINADOR	0.558	37.286	0.010
HB vs % REFINADOR	-16.116	35.827	-0.831
RT vs EDS	-1035.353	115.036	-0.785
EF vs EDS	-112.626	41.677	-0.056
HB vs EDS	-548.316	52.686	-0.743
RT vs GBS	-1326.754	122.867	-0.881
EF vs GBS	-26.754	38.367	-0.011
HB vs GBS	-643.859	54.752	-0.765
RT vs TG	35.855	59.664	0.513
EF vs TG	-89.291	77.851	-0.848
HB vs TG	10.116	27.379	0.258

Al-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRIO

REFINACIÓN QUÍMICA

REFINADOR	EDS	GBS	TAMAÑO DE GRANO	ESFUERZO DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	HB 5/125/15	POROSIDAD CUALITATIVA
%	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(Kg/mm ²)	
0.00	0.391	0.372	0.505	131.2	218.9	43.0	**
0.05	0.331	0.331	0.310	41.3	109.4	33.6	**
0.10	0.250	0.221	0.237			25.3	**
0.15	0.328	0.310	0.210	43.4	111.3	33.6	**
0.20	0.241	0.247	0.200	40.8	107.8	31.2	**
0.25	0.230	0.187	0.225			36.2	**
0.30	0.217	0.227	0.263	45.0	101.7	38.6	**

Gráfico 7

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-Si₂ COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

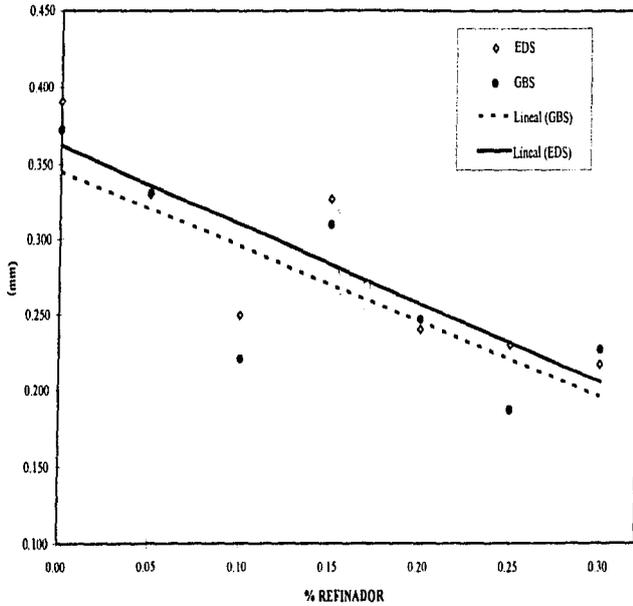


Gráfico 8

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

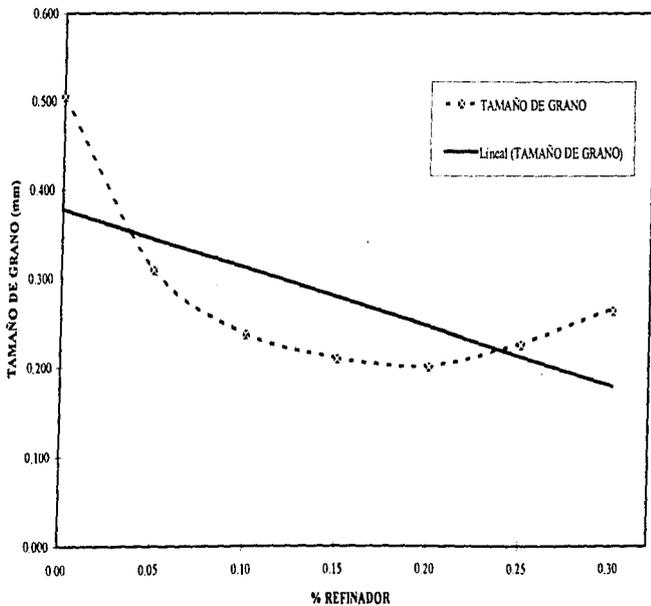


Gráfico 9

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-SZn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

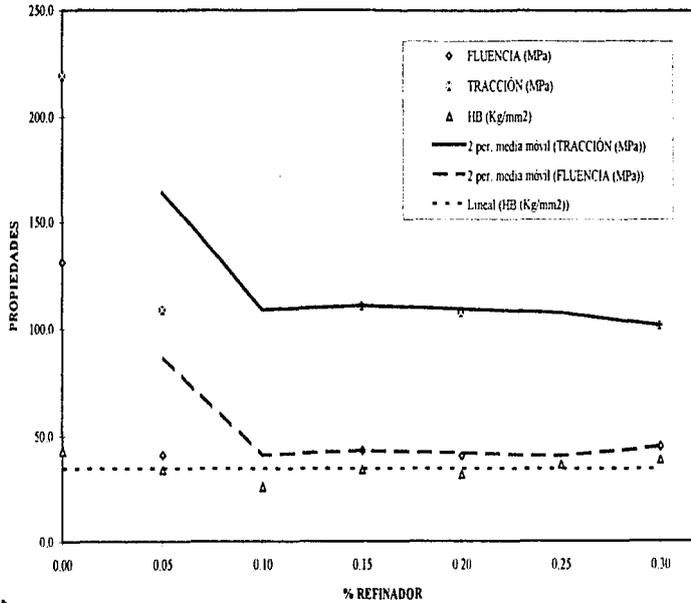


Gráfico 10

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-Sn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

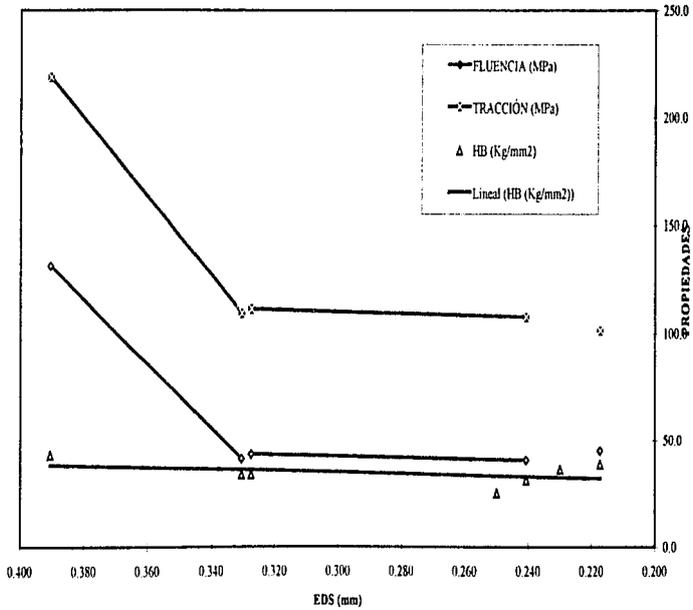


Gráfico 11

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

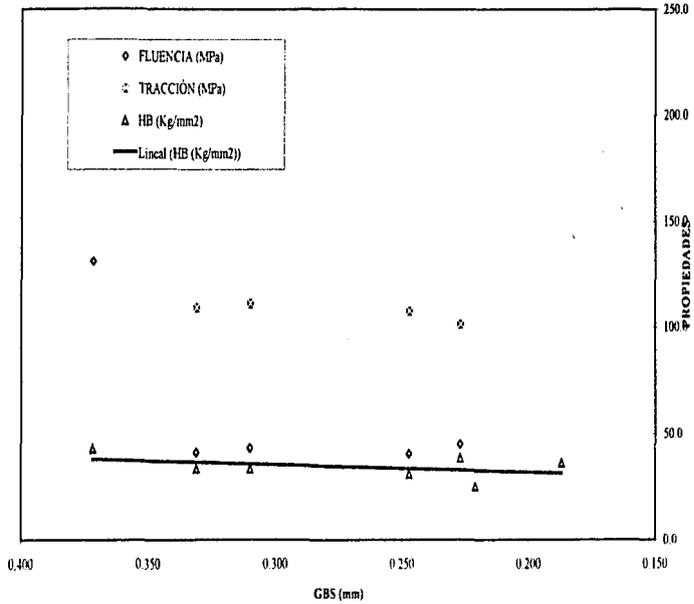
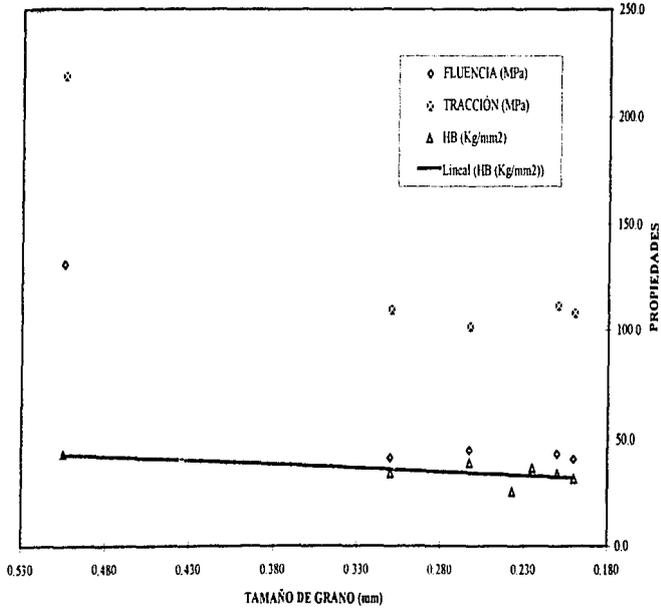


Gráfico 12

REFINACIÓN QUÍMICA DE Al-Si_n COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO



Al-5Zn colado en molde metálico frío. Refinación Química.

	PENDIENTE	ORDENADA AL ORIGEN	COEFICIENTE DE CORRELACION
EDS vs % REFINADOR	-0.523	0.362	0.859
GBS vs % REFINADOR	-0.497	0.345	-0.795
TG vs % REFINADOR	-0.666	0.378	-0.676
RT vs % REFINADOR	-32.367	113.303	-0.809
EF vs % REFINADOR	12.230	40.484	0.655
HB vs % REFINADOR	-1.500	37.725	-0.028
RT vs EDS	60.922	90.537	0.863
EF vs EDS	-10.471	45.549	-0.317
HB vs EDS	35.217	24.498	0.412
RT vs GBS	68.803	88.370	0.822
EF vs GBS	-14.876	46.771	-0.380
HB vs GBS	35.977	24.760	0.432
RT vs TG	-16.359	111.570	-0.200
EF vs TG	1.491	42.258	0.039
HB vs TG	35.968	24.480	0.681

Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

REFINACIÓN QUÍMICA

REFINADOR	ROSETA	DIÁMETRO DE ROSETA	EDS	GBS	TAMAÑO DE GRANO	ESFUERZO DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	HB 562,530	POROSIDAD CUALITATIVA
%	%	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(Kg/mm ²)	
0.00	40.0	1.352	0.151	0.087	1.652	79.0	151.2	45.0	**
0.03	35.0	1.004	0.172	0.059	0.902	66.6	133.7	46.9	*** PG
0.06	22.5	1.900	0.184	0.092	0.742	59.0	113.5	58.2	** PG
0.09	10.0	1.826	0.203	0.103	0.886	67.4	177.4	59.8	**
0.12	38.8	0.864	0.214	0.105	0.861	68.9	167.5	55.3	*** PG

Gráfico 13

REFINACIÓN QUÍMICA DEL Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

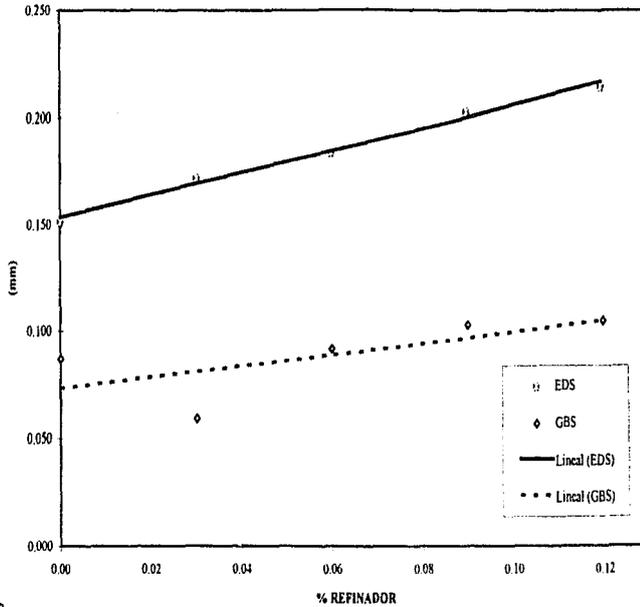


Gráfico 14

REFINACIÓN QUÍMICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

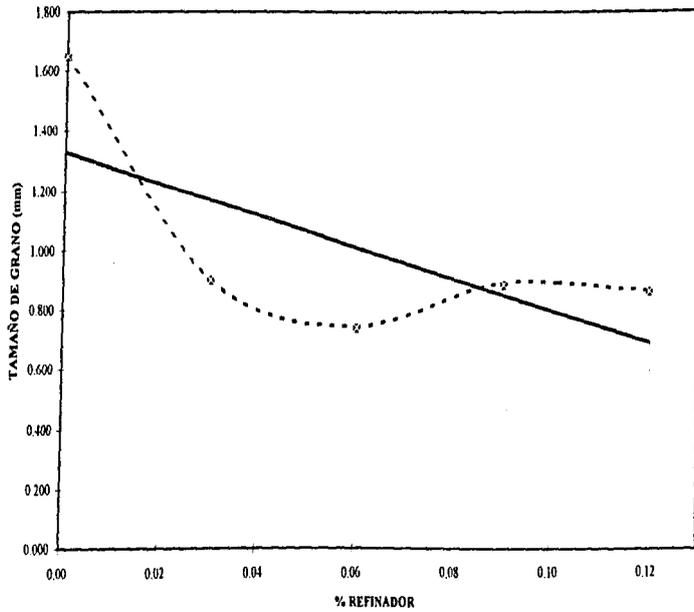
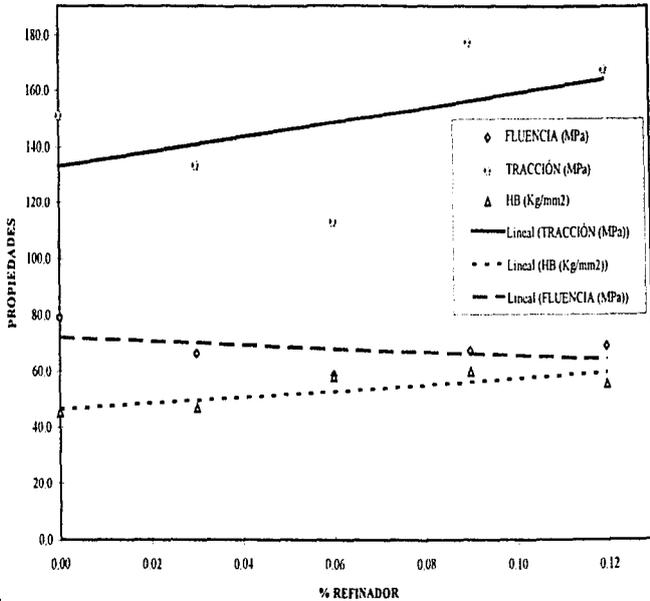


Gráfico 15

REFINACIÓN QUÍMICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO



REFINACIÓN QUÍMICA DE ME-SZA COLADO EN NODULO METÁLICO FRIO

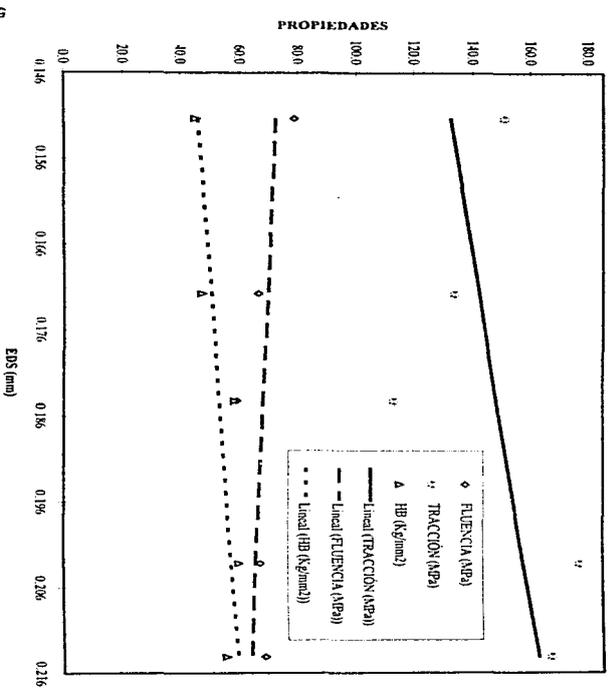


Gráfico 17

REFINACIÓN QUÍMICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

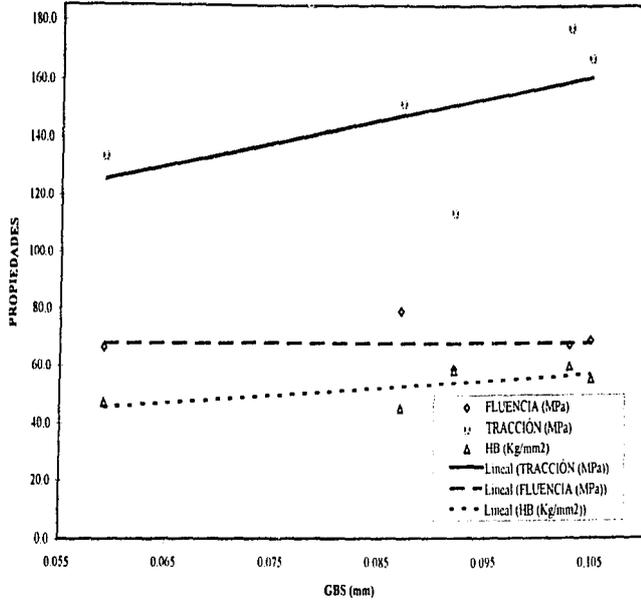
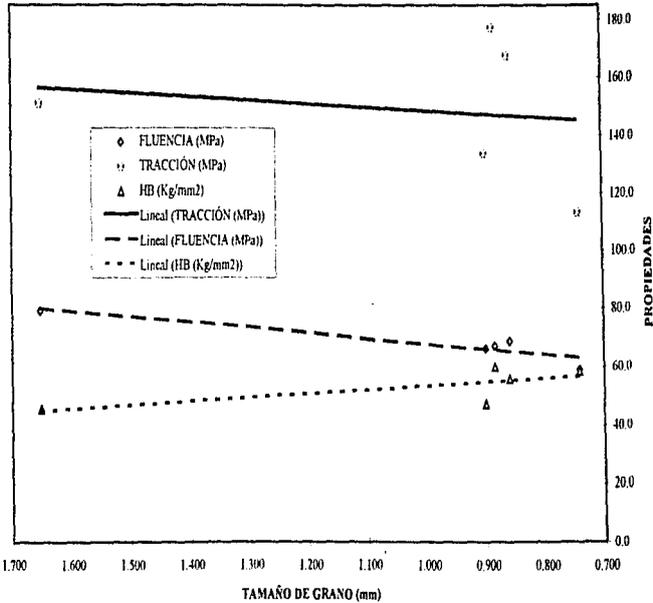


Gráfico 18

REFINACIÓN QUÍMICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO



Mg-5Zn colado en molde metálico frío. Refinación Química.

	PENDIENTE	ORDENADA AL ORIGEN	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
EDS vs % REFINADOR	0.523	0.153	0.994
GBS vs % REFINADOR	0.266	0.073	0.684
TG vs % REFINADOR	-5.326	1.328	-0.692
RT vs % REFINADOR	254.333	133.400	0.468
EF vs % REFINADOR	-64.666	72.060	-0.428
HB vs % REFINADOR	111.666	46.340	0.790
RT vs EDS	484.567	59.111	0.470
EF vs EDS	-133.017	92.761	-0.463
HB vs EDS	214.886	13.328	0.799
RT vs GBS	763.511	80.554	0.548
EF vs GBS	-86.459	68.257	-2.231E-3
HB vs GBS	253.927	30.389	0.699
RT vs TG	11.811	136.746	0.167
EF vs TG	17.941	50.084	0.915
HB vs TG	-13.233	66.387	-0.720

Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

REFINACIÓN MECÁNICA

RPM	ROSETA (%)	DIÁMETRO DE ROSETA (mm)	EDS (mm)	GBS (mm)	TAMAÑO DE GRANO (mm)	ESFUERZO DE FLUENCIA (MPa)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	HB 562,5/30 (Kg/mm ²)	POROSIDAD CUALITATIVA
0	4.0	2.472	0.228	0.097	1.648	50.8	128.8	39.1	*** PG
100	4.0	2.781	0.172	0.077	1.685	53.7	136.6	49.7	***
200	3.5	3.508	0.208	0.092	1.902	53.5	133.4	56.0	***
300	7.5	2.828	0.200	0.078	1.595	54.0	151.0	49.4	***
380	25.0	2.302	0.187	0.065	1.356	57.7	149.6	45.9	***
480	9.3	2.774	0.173	0.072	1.503	56.9	161.6	36.0	***
565	1.5	2.084	0.163	0.066	1.469	56.1	125.5	55.5	*** PG

Gráfico 19

REFINACIÓN MECÁNICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

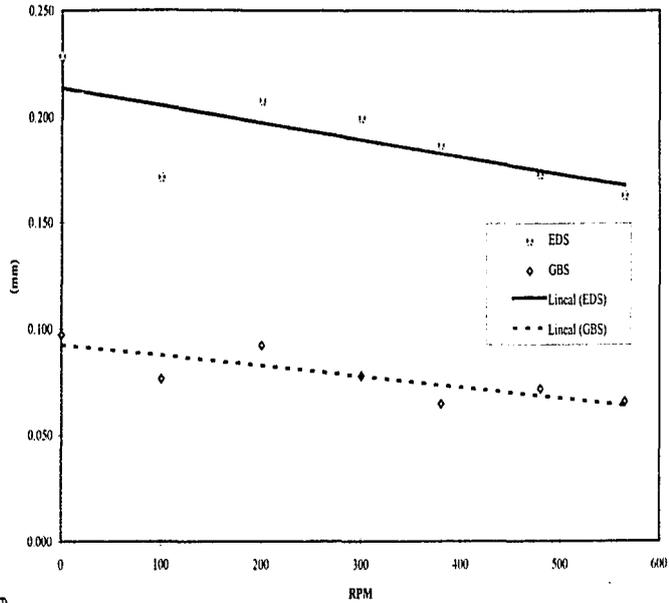


Gráfico 20

REFINACIÓN MECÁNICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

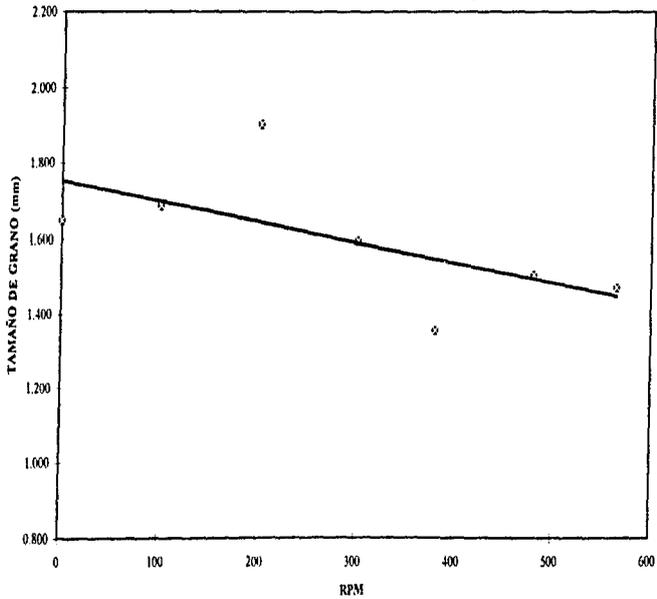


Gráfico 21

REFINACIÓN MECÁNICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

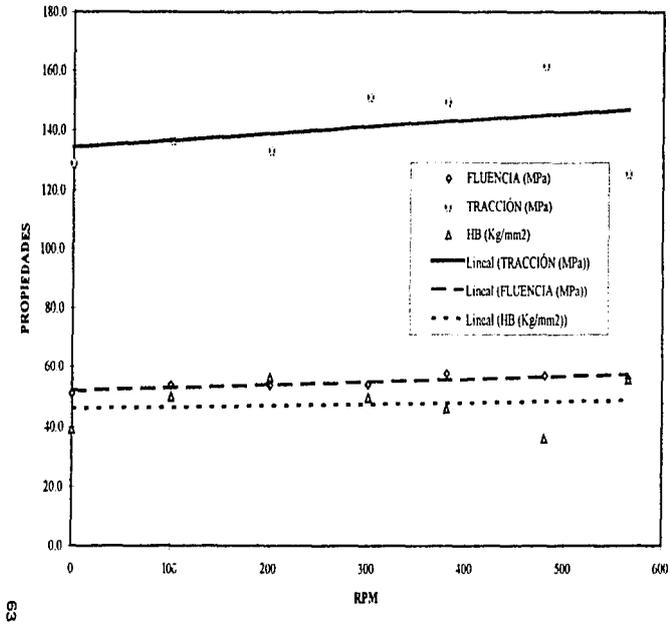


Gráfico 22

REFINACIÓN MECÁNICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

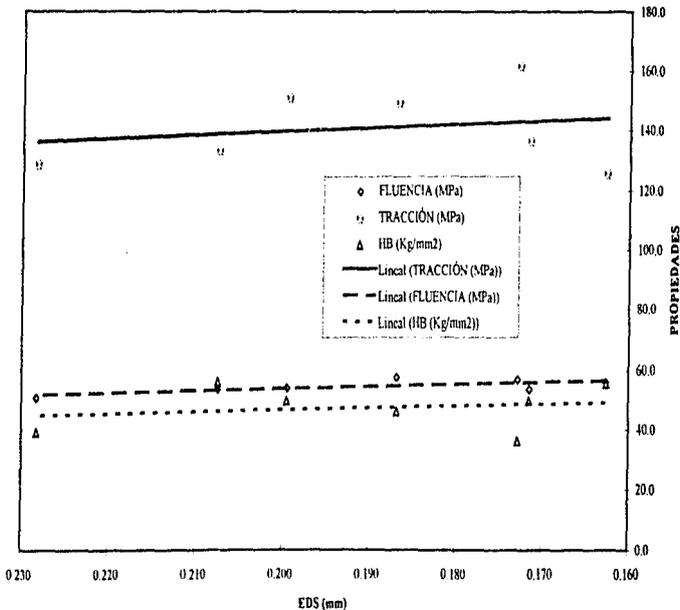


Gráfico 23

REFINACIÓN MECÁNICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

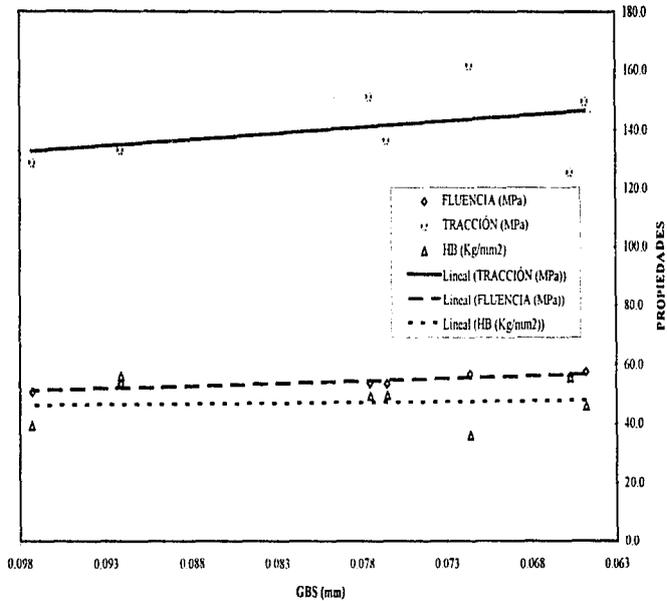
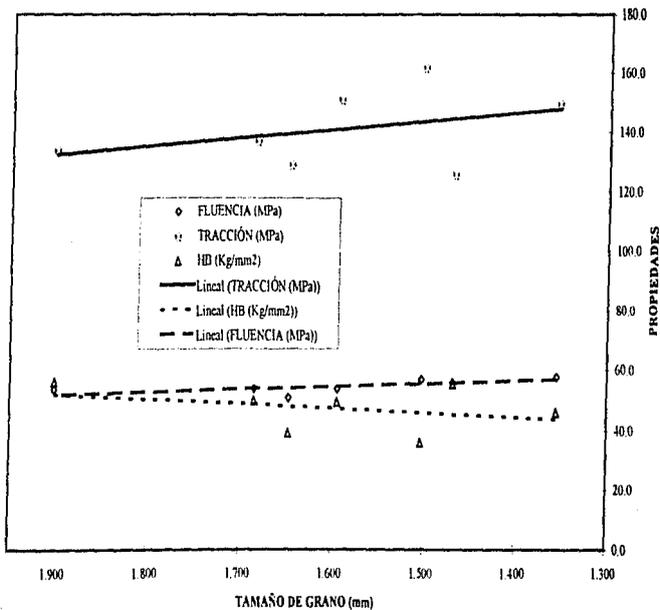


Gráfico 24

REFINACIÓN MECÁNICA DE Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO



Mg-5Zn colado en molde metálico frío. Refinación Mecánica.

	PENDIENTE	ORDENADA AL ORIGEN	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
EDS vs R.P.M.	-8.075E-5	0.213	-0.709
GBS vs R.P.M.	-4.910E-5	0.092	-0.812
TG vs R.P.M.	-5.388E-4	1.749	-0.621
RT vs R.P.M.	0.022	134.421	0.343
EF vs R.P.M.	0.010	51.763	0.859
HB vs R.P.M.	4.602E-3	46.040	0.122
RT vs EDS	-159.217	169.262	-0.288
EF vs EDS	-75.483	69.024	-0.735
HB vs EDS	-62.870	59.325	-0.190
RT vs GBS	-422.479	173.942	-0.389
EF vs GBS	-175.189	68.361	-0.905
HB vs GBS	-53.890	51.582	-0.086
RT vs TG	-28.797	186.831	-0.381
EF vs TG	-9.437	69.714	-0.699
HB vs TG	-117.285	249.138	-0.526

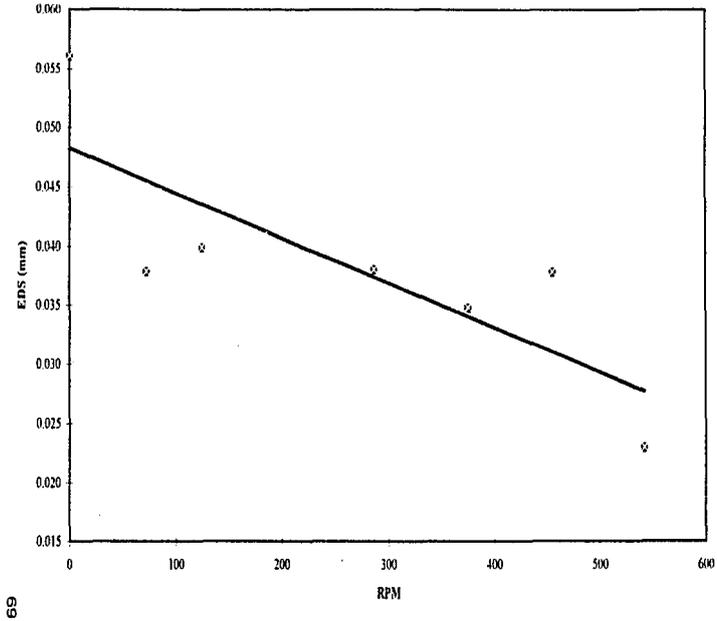
LATÓN 70/30 COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

REFINACIÓN MECÁNICA

RPM	EDS (mm)	GRANO COLUMNAR (ANCHO) (mm)	GRANO COLUMNAR (LARGO) (mm)	DIÁMETRO DE GRANO ECUILATERAL (mm)	GRANO COLUMNAR (%)	ESFUERZO DE FLUENCIA (MPa)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	HB 5750/15 (Kg/mm ²)	POROSIDAD CUALITATIVA
0	0.056				100	71.0	164.0	42.2	* PG
72	0.038	0.470	2.410		100	63.9	141.9	49.6	*
124	0.040	0.450	2.140		100	79.1	189.9	53.8	*
286	0.038	0.300	1.930		100	83.3	209.3	47.5	* PG
375	0.035	0.183	1.660	2.600	25	83.8	211.2	62.4	* PG
455	0.038	0.257	2.270	1.800	30	94.5	220.9	66.2	* PG
542	0.023	0.330	1.950	1.050	0	110.0	237.0	68.8	* PG

Gráfico 25

REFINACIÓN MECÁNICA DE LATÓN 70/30 COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO



REFINACIÓN MECÁNICA DE LATÓN 70/30 COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

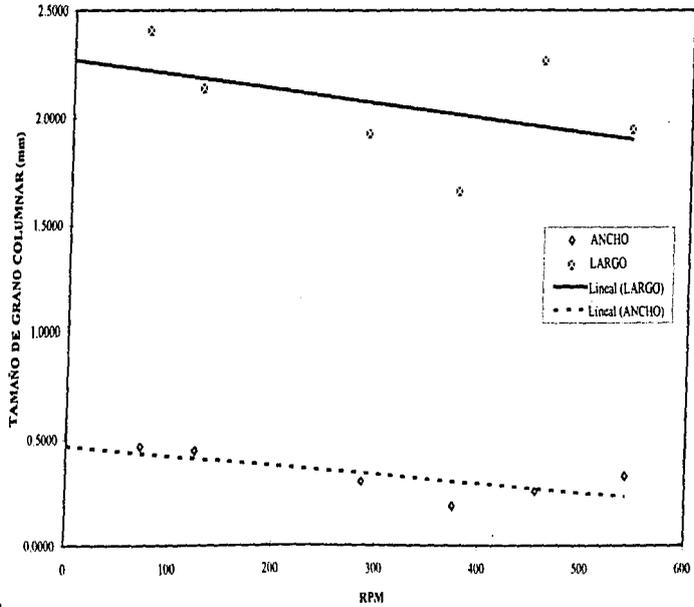


Gráfico 27

REFINACIÓN MECÁNICA DE LATÓN 70/30 COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO

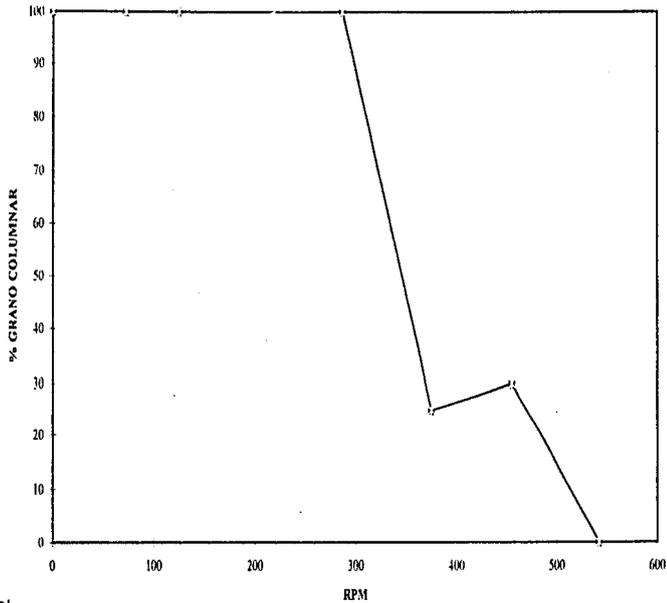
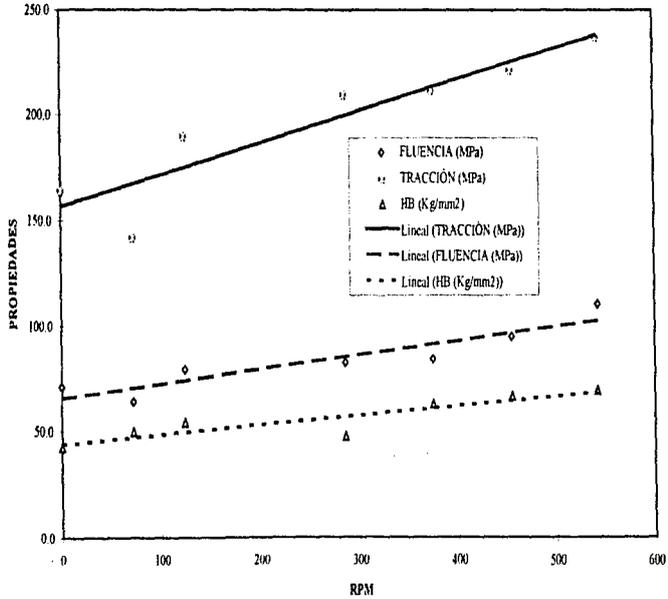
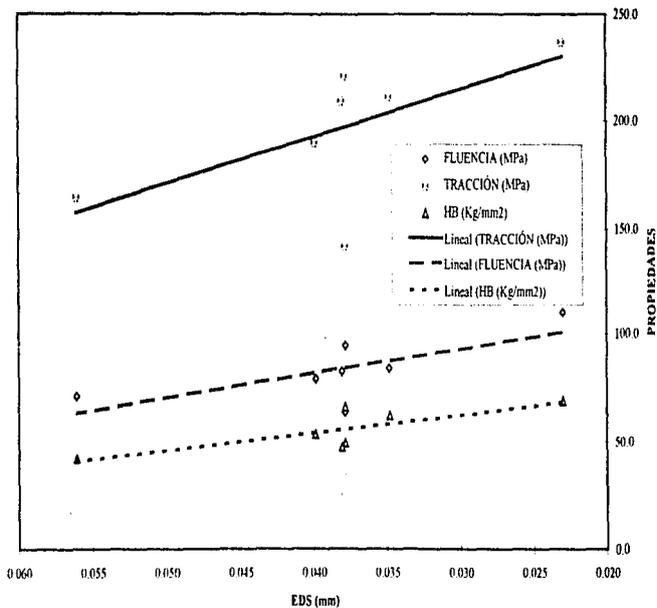


Gráfico 28

REFINACIÓN MECÁNICA DE LATÓN 70/30 COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO



REFINACIÓN MECÁNICA DE LATÓN 70/30 COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO



Latón 70/30 colado en molde metálico frío. Refinación Mecánica.

	PENDIENTE	ORDENADA AL ORIGEN	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
EDS vs R.P.M.	-3.773E-5	0.048	-0.800
TG (ancho) vs R.P.M.	-4.384E-4	0.467	-0.732
TG (largo) vs R.P.M.	-6.795E-4	2.269	-0.466
RT vs R.P.M.	0.149	156.677	0.919
EF vs R.P.M.	0.067	65.536	0.917
HB vs R.P.M.	0.044	44.036	0.897
RT vs EDS	-2225.445	281.517	-0.644
EF vs EDS	-1126.106	126.628	-0.717
HB vs EDS	-825.699	87.398	-0.787

VI. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al-SZn COLADO EN MOLDE DE ARENA. REFINACIÓN QUÍMICA

Conforme aumenta el porcentaje de refinador adicionado se observa un incremento del EDS y el GBS (Gráfico 1) mientras que el tamaño de grano muestra un comportamiento decreciente (Gráfico 2). Estos parámetros microestructurales tienen el comportamiento señalado por Mondolfo (3) para aleaciones de aluminio refinadas por adición de agentes nucleantes, en el sentido de que en algunos casos el EDS aumenta con la refinación de grano. El incremento en el EDS y el GBS podría estar influido por la velocidad de enfriamiento conjuntamente con el efecto refinador puesto que el molde de arena permite una extracción de calor mucho más lenta y la velocidad de enfriamiento es, por lo tanto, baja en comparación con el uso de molde metálico en la refinación de esta misma aleación, que se analiza más adelante.

Las propiedades esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y dureza, al graficarse contra el porcentaje de refinador (Gráfico 3) señalan que estadísticamente el esfuerzo de fluencia se mantiene sin variación significativa y por otro lado, la resistencia a la tracción y la dureza disminuyen su valor con el incremento de refinador y esto podría deberse a que en este caso las propiedades citadas pueden estar influidas por la porosidad, tal como también lo reporta Mondolfo (3) y que en este caso se presenta a nivel microscópico, esto es, no hay porosidad aparente.

Al graficar las propiedades mecánicas ya citadas con respecto a los parámetros microestructurales EDS, GBS y tamaño de grano (Gráficos 4, 5 y 6) es notorio que el esfuerzo de fluencia, en función del GBS y el EDS, no presenta variación significativa mientras que como función del tamaño de grano tiene un comportamiento decreciente y así esta propiedad podría seguramente ser dependiente del tamaño de grano. La resistencia a la tracción y la dureza disminuyen al aumentar los parámetros EDS y GBS lo cual es el comportamiento esperado de acuerdo a la bibliografía para aleaciones de aluminio (3). Resulta sumamente interesante que, sin ajustarse al modelo de Hall y Petch, al disminuir el tamaño de grano la

resistencia a la tracción disminuye. Esto significa que la resistencia a la tracción decrece su valor conforme la dendrita se engrosa, a pesar de que el grano se refina, y esto sugiere entonces que en esta aleación la resistencia a la tracción se encuentra influida en mayor medida por los parámetros microestructurales EDS y GBS más que por el tamaño de grano que es el único que presenta el efecto refinante. Podría adelantarse la conclusión que el efecto decreciente de la resistencia a la tracción y de la dureza con el aumento del porcentaje de refinador y con la refinación del tamaño de grano se debe al efecto combinado del aumento del EDS y el GBS y a la presencia de porosidad.

Al-5Zn COLADO EN MOLDE DE METÁLICO FRÍO. REFINACIÓN QUÍMICA

En este caso, al aumentar el porcentaje de refinador adicionado disminuyen los parámetros microestructurales EDS, GBS y tamaño de grano (Gráficos 7 y 8) a diferencia de lo que sucede en el caso anterior cuando se refina esta aleación utilizando molde de arena donde únicamente se refina el grano. Esto indica que además del efecto producido por la adición de agentes nucleantes se presenta conjuntamente el efecto de una rápida velocidad de enfriamiento por la utilización del molde metálico frío y, por lo tanto, con una elevada capacidad de extracción de calor en comparación con el molde aislante de arena. Así el refinamiento del EDS y el GBS podría deberse a que la dendrita no tuvo tiempo para crecer debido a la rápida solidificación del metal y al mismo tiempo a la presencia y posterior activación de los agentes nucleantes producida por el gradiente térmico. Al comparar estos resultados con la refinación de esta misma aleación efectuada en molde de arena se puede afirmar que en este caso el efecto de la velocidad de

enfriamiento influyó en mayor medida sobre los parámetros microestructurales que el efecto del refinador observado anteriormente.

En las gráficas que muestran las propiedades mecánicas contra el porcentaje de refinador (Gráfico 9) y como función también de los parámetros EDS, GBS y tamaño de grano (Gráficos 10, 11 y 12) se observa que el blanco presenta los valores más altos de esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y dureza mientras que en las aleaciones que contenían refinador se mantienen sin variación significativa dichas propiedades en todo el rango de porcentaje de refinador utilizado. Así, aún cuando se presentó refinación de todos los parámetros microestructurales, las propiedades mecánicas no reflejan este efecto y podría deberse a la porosidad producida durante la solidificación puesto que al ser ésta muy rápida no permite la adecuada salida de gases del metal influyendo este hecho negativamente en las propiedades mecánicas; aún cuando cualitativamente la porosidad no se diferencia en forma significativa de la presentada por el Al-5Zn refinado y colado en molde de arena.

Mg-5Zn COLADO EN MOLDE DE METÁLICO FRÍO. REFINACIÓN QUÍMICA

Esta aleación de magnesio que fue refinada con hexacloroetano, a pesar de que para este compuesto sólo se ha reportado su uso en aleaciones de magnesio conteniendo aluminio, presenta un comportamiento similar al reportado por Mondolfo para la refinación por adición de agentes nucleantes de aleaciones de aluminio (3), esto es, el EDS y el GBS se incrementan al tiempo que el grano se refina en forma notoria con el incremento de refinador (Gráficos 13 y 14).

El esfuerzo de fluencia se mantiene constante al aumentar el porcentaje de refinador, pero aquí la resistencia a la tracción y la dureza se incrementan con el aumento de éste (Gráficos 15), lo cual sería el comportamiento esperado para aleaciones de aluminio sin el efecto ejercido por la porosidad. Esta elevación del valor de la resistencia a la tracción puede deberse al efecto combinado de la disminución del tamaño de grano y a la elevada velocidad de enfriamiento como método de refinación y producida por el molde metálico frío.

Se observa que las propiedades se incrementan con el incremento del EDS y el GBS (Gráficos 16 y 17). Este efecto es diferente al que presenta la aleación Al-5Zn ya analizada, y es contrario a lo esperado, esto es, al engrosar dos parámetros microestructurales como son el EDS y el GBS se esperaría que la resistencia a la tracción disminuyera, no que aumentara. Por otro lado, al disminuir el tamaño de grano el gráfico 18 parece reflejar una disminución de la resistencia a la tracción. Analizando cuidadosamente los datos y las muestras se tiene que las muestras con 0.06% de refinador son las que presentan el valor más bajo de resistencia a la tracción y que las probetas metalográficas muestran en su estructura, además de porosidad, la presencia de una segunda fase entre los brazos dendríticos. Si se ignora ese punto del gráfico de propiedades vs tamaño de grano, éste mostraría una tendencia diferente a cuando este punto es tomado en cuenta, esto es, a menor tamaño de grano, mayor resistencia, que sería el comportamiento lógico y esperado. Así, en este caso entonces, se podría concluir que la resistencia a la tracción y la dureza es dependiente del tamaño de grano y que el efecto del refinador y de la velocidad de enfriamiento es mayor al que pudiera tener la porosidad. El esfuerzo de fluencia, por otro lado, no presenta variación significativa, lo que indica que no parece ser afectado con el refinamiento.

Mg-5Zn COLADO EN MOLDE METÁLICO FRÍO. REFINACIÓN MECÁNICA

Para esta aleación puede notarse que con un aumento de las revoluciones por minuto del molde se obtiene una disminución en los parámetros microestructurales EDS, GBS y tamaño de grano (Gráficos 19 y 20) verificando en este caso que la agitación mecánica por rotación produce en el Mg-5Zn un refinamiento tanto del grano como de la dendrita tal como lo reportan *Ojeda y Díaz'* (22) para una aleación Al-6Zn bajo el mismo método de refinación con la diferencia de que ellos no tienen involucrado el efecto térmico. El refinamiento del EDS y el GBS contradice lo expuesto por Campbell (19) en su teoría de la fragmentación dendrítica.

Con respecto a las propiedades en función de las r.p.m. puede verse del gráfico 21 que éstas aumentan siendo esta tendencia poco marcada para el esfuerzo de fluencia y mucho más pronunciada para la resistencia a la tracción. Como función de los parámetros microestructurales se observa (Gráficos 22, 23 y 24) que las propiedades aumentan conforme disminuye el valor de todos ellos lo cual hace difícil identificar de cuál de ellos dependen en mayor grado las propiedades mecánicas, pudiéndose afirmar únicamente que las propiedades mecánicas reflejan un efecto conjunto de los valores de EDS, GBS y tamaño de grano y que este efecto es mayor al de la presencia de porosidad, incluso a nivel macroscópico, que presenta la aleación,

LATÓN 70/30 COLADO EN MOLDE DE METÁLICO FRÍO. REFINACIÓN MECÁNICA

El latón refinado por este método muestra una tendencia estadística decreciente del EDS al aumentar las revoluciones por minuto (Gráfico 25), y el mismo comportamiento se observa para el ancho y largo del grano columnar también en

* Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

función de las revoluciones del molde (Gráfico 26) y para el tamaño de grano equiaxial con el aumento de las revoluciones por minuto. Estos resultados corroboran los obtenidos por *Noguez et al*² (11) para el EDS y el tamaño de grano como función de las r.p.m. para un latón 70/30; el mismo comportamiento de estos parámetros lo reporta también *Abad Cruz*² (18) para un latón alfa utilizando Bi como refinador y *Noguez et al*² (11) para el latón 70/30 utilizando como refinadores B-Mn, fluorotitanato de potasio y el método de gradiente térmico. Cabe hacer notar que a partir de las 375 r.p.m. se detecta la presencia de grano equiaxial (Gráfico 27) lo que indica que a partir de estas revoluciones la refinación permitió eliminar gradualmente la presencia de grano columnar de la pieza y que a partir de este punto puede considerarse realmente refinado.

Las propiedades esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y dureza se incrementan conforme aumentan las r.p.m. (Gráfico 28) pudiéndose afirmar que la refinación mecánica de latón resultó en una mejora de las propiedades mecánicas aunque esto ya había sido observado para la dureza en latón 70/30 bajo el mismo método de refinación por *Noguez et al*² (11). Por otro lado, puede notarse (Gráfico 29) que las propiedades aumentan al disminuir el parámetro microestructural EDS, así como el largo y ancho de grano columnar y tamaño de grano equiaxial (como se observa de la tabla de datos) por lo cual no es posible inferir cuál de estos parámetros tiene mayor influencia sobre las propiedades y lo único que se puede aseverar es que seguramente el efecto conjunto de la refinación de todos ellos es el responsable del aumento en el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la tracción que presenta el latón bajo este método de refinación de grano.

² Investigadores que forman parte del mismo proyecto.

VII. CONCLUSIONES

GENERALES

- Cada aleación presenta un comportamiento particular y no se puede generalizar la relación entre los parámetros microestructurales EDS, GBS y tamaño de grano con las propiedades mecánicas.
- En todos los casos se presentaron los efectos combinados de la velocidad de enfriamiento y la refinación de grano.
- Hay influencia de porosidad, que fue un parámetro no controlado.
- Los parámetros microestructurales EDS y GBS presentan el mismo comportamiento dentro de cada parte del estudio, esto es, o ambos se engrosan, o ambos se refinan.

PARTICULARES

- *Refinación química del Al-5Zn colado en molde de arena.*

Conforme se incrementa la cantidad de refinador se obtuvo refinación del grano pero engrosamiento de la dendrita, y una disminución de propiedades casi seguramente por la porosidad.

- *Refinación química del Al-5Zn colado en molde metálico frío.*

Hay refinación de los parámetros microestructurales EDS, GBS y tamaño de grano al aumentar el porcentaje de refinador adicionado y las propiedades se mantienen constantes en todo el rango de porcentaje de refinador.

- *Refinación química de Mg-5Zn colado en molde metálico frío.*

Se obtiene refinamiento de grano con un aumento de la cantidad de refinador, un aumento en el valor del GBS y el EDS y un aumento de la resistencia a la tracción y la dureza por efecto conjunto de refinación térmica y química.

- *Refinación mecánica de Mg-5Zn colado en molde metálico frío.*

Se obtuvieron decrementos en el valor de todos los parámetros microestructurales conforme se aumentan las revoluciones por minuto y se obtiene un aumento de las propiedades mecánicas lo cual indica que los parámetros microestructurales contribuyeron conjuntamente en la elevación de las propiedades.

- *Refinación mecánica de latón 70/30 colado en molde metálico frío.*

Se obtiene una disminución del EDS y de los grano columnar y equiaxial mientras las propiedades se incrementan. Así la refinación de los parámetros microestructurales de latón incrementa las propiedades.

COMPARATIVAS

- Las aleaciones Al-5Zn y Mg-5Zn refinadas químicamente y coladas en molde de arena la primero y metálico frío la segunda muestran un comportamiento similar al señalado por Mondolfo (3) en lo referente al incremento de los parámetros microestructurales EDS y GBS con la refinación del tamaño de grano.
- La refinación mecánica del Mg-5Zn y del latón 70/30 produce el mismo comportamiento: refinación del EDS, GBS y tamaño y grano y un subsecuente aumento en las propiedades mecánicas.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Brody, A. D. Structure and Properties of Cast Nonferrous Alloys. Solidification Technology. Proceeding of the First Army Materials Technology Conference, held at the Wentworth by the Sea, Portsmouth, New Hampshire, USA, October 22-25, 1972. pp. 53-83.
2. Ruddle, R.W. Grain Refinement. Proceedings of the Conference on Thermal Analysis of Molten Aluminum. Cast Metals Inst. Des Plaines Illinois. pp. 77-147. 1983.
3. L.F. Mondolfo. Grain Refinement in the Casting of Nonferrous Alloys. Grain Refinement in Casting and Welds. (The Metallurgical Society of AIME). pp. 3-50. 1983.
4. Flemings. Solidification Processing. Metallurgical Transaction A. V. 5. pp. 2121-2134. October 1979.
5. Dieter. Mechanical Metallurgy. 3rd edn. pp. 189-193. McGraw-Hill. New York. 1986.
6. Armstrong, R. W. The influence of polycrystal grain size on several mechanical properties of materials. Met. Trans. V. 1. pp. 1169-1176. May 1970.
7. Robert, M. E. Noguez, G. Salas. Influence of Grain Refinement on some Mechanical Properties of non Ferrous Cast Alloys. Acta Metallurgica et Materials. V. 40. pp.771-777. 1992.
8. Flemings, T.Z. Kattomo and B.P. Bordes. Dendrite Arm Spacing in Aluminum Alloys. AFS Transaction 99. pp 501-506. 1991.
9. De Ross and L.F. Mondolfo. Metallurgical Aspects of Casting Aluminum Alloys. Aluminum Transaction Technology and Application. American Society for Metals. Ohio. pp. 74. 1989.
10. Verhooven, John D. Fundamentos de metalurgia física. Mexico. Limusa. pp. 237-327. 1987.
11. Noguez, G. Salas B., T. Robert N., J. Ramírez V. Evaluación de la resistencia mecánica de un latón alfa en función del espaciamento interdendrítico en la refinación de grano. Primer Simposium de Avances Profesionales y Académicos en las Ingenierías Química, Química Petrolera y Metalúrgica. ESQUIE-IPN. México D.F. Sept-Oct 1993.

12. Hernández H., J.C. Osorio Q. y E.U. Díaz A. Modificación de la estructura mediante la rapidez de enfriamiento y su ascendente en las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-5%Zn y Mg-2%Zn. Tesis. Facultad de Química. UNAM. México. 1996.
13. Honeycombe. Rapidly Quenched Metals. 3. pp. 73. 1978.
14. Hogan. Proc. Conf. Physic of Materials, U of Melbourne. pp. 111. 1979.
15. Vass, Carl. The effect of grain size and physical properties of various Titanium/Boron ratios. KBI Alloys Inc., Tech. Bull. Ma-PD 2. pp. 101-106. 1980.
16. Pearson, M.E. J. Birch and D. Hadlet. Recent advances in aluminum grain refinement. Met. 31. (11). 27. 1979.
17. AFS Magnesium Casting Technology. American Foundrymen's Society Inc. 1986.
18. Abad C. Estudio del refinamiento de grano en un latón α utilizando Bi. México. Tesis. Facultad de Química. UNAM. 1995.
19. Campbell. Effects of vibration during solidification. International Metals Review. No. 2 pp. 71-103. 1981.
20. Grugel, Shinwoo Kim, T. Woodward and T. G. Wong. The Effect of Axial Crucible Rotation on Microstructural Uniformity during Horizontal Directional Solidification. Journal of Crystal Growth 12. 1992. pp. 599-607.
21. Siebers and W. Bullen. Metall forschung. VI. pp 138. 1946.
22. Ojeda R. B. y A. A. Díaz Arriaga. Solidificación por rotación de aleaciones Al-Zn. México. Tesis. Facultad de Química. UNAM. 1995.
23. Askoland, Donald P. La ciencia e ingeniería de los materiales. México. pp. 240-243. 1985.
24. Trevison and N.L. Cupini. Study of Grain Refining mechanisms in copper. Solidification Processing. Sheffield. pp. 188-190. 1987.

25. Cowell and R.C.C. Nixon. A new Grain Refinement System for Copper Alloys. Cu'96. Copper Tomorrow. Barga (Lucca). Italy-September 10-12. 1986.Conference Proceeding. pp. 41-47.
26. Bustos y W. Reif. Estudio de afinamiento de grano de cobre puro por medio de adiciones químicas. Primer Congreso Internacional de Metalurgia. Uaim de las Universidades de Lima-Perú. 23-25 Octubre. 1991.
27. Apraiz, Barreiro, José. Tratamientos térmicos de los aceros. 8a. de Madrid. 1974. pp. 483-486.
28. Norma ASTM E8-M. Manual de Normas ASTM. Vol. 3. 1988.

APÉNDICE A

Datos útiles de la materia prima y aleaciones fabricadas.

METAL O ALEACIÓN	DENSIDAD DEL SÓLIDO (g/cm ³)	DENSIDAD DEL LÍQUIDO (g/cm ³)	EFICIENCIA %	PUNTO DE FUSIÓN (°c)	PUREZA %
ALUMINIO	2.70	2.56	100	660.4	99
COBRE	8.90	8.78	95	1085.0	999
MAGNESIO	1.74		60	649.0	99.999
ZINC	7.10	6.86	97	419.6	99.99
Al-5Zn	2.92				99.98
Mg-5Zn	2.01				
LATÓN 70/30	8.53				

APÉNDICE B

BALANCE DE CARGA

Algoritmo de cálculo y ejemplo representativo

Aleación: Mg-5Zn

Densidad de la aleación:

$$\rho_{\text{Mg-5Zn}} = 0.95 \cdot \rho_{\text{Mg}} + 0.05 \cdot \rho_{\text{Zn}}$$

$$\rho_{\text{Mg-5Zn}} = 2.008 \text{ g/cm}^3$$

Volumen del molde;

$$V_{\text{MOLDE}} = \pi \cdot h \cdot (r^2 + rR + R^2)/3$$

$$V_{\text{MOLDE}} = 43.327 \text{ cm}^3$$

Masa de metal en el molde:

$$m_{\text{Mg-5Zn}} = V_{\text{MOLDE}} \cdot \rho_{\text{Mg-5Zn}}$$

$$m_{\text{Mg-5Zn}} = 87.00 \text{ g}$$

Peso de un cilindro obtenido en cada ensayo

Volumen del crisol:

$$V_{\text{CRISOL}} = 244.227 \text{ cm}^3 \text{ **}$$

Masa en el crisol:

$$m_{\text{CRISOL}} = V_{\text{CRISOL}} \cdot \rho_{\text{Mg-SZn}}$$

$$m_{\text{CRISOL}} = 490.709 \text{ g}$$

Masa de magnesio requerida con respecto a la masa total de aleación:

$$m_{\text{Mg}} = (m_{\text{TOTAL}} \cdot \% \text{Mg en la aleación}) / \text{Eficiencia}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Mg}} &= m_{\text{TOTAL}} \cdot (95/100) / (60/100) \\ &= 1.5833 \cdot m_{\text{TOTAL}} \quad \text{----- (1)} \end{aligned}$$

Masa de zinc requerida con respecto a la masa total de aleación

$$m_{\text{Zn}} = (m_{\text{TOTAL}} \cdot \% \text{Zn en la aleación}) / \text{Eficiencia}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Zn}} &= m_{\text{TOTAL}} \cdot (5/100) / (97/100) \\ &= 0.05155 \cdot m_{\text{TOTAL}} \quad \text{----- (2)} \end{aligned}$$

De la ecuación (1):

$$m_{\text{TOTAL}} = m_{\text{Mg}} / 1.5833 \quad \text{----- (3)}$$

Sustituyendo (3) en (2):

$$m_{\text{Zn}} = 0.03257 \cdot m_{\text{Mg}}$$

****Dato conocido de trabajos previos (22).**

APÉNDICE C

Reactivos de ataque utilizados

ALEACIÓN	REACTIVO	COMPOSICIÓN	ESTRUCTURAS REVELADAS	TÉCNICA DE USO
Al-5Zn	KELLER	5 ml HNO_3 (conc) 3 ml HCl (conc) 2 ml HF (48%) 90 ml H_2O (dest)	EDS GBS GRANO	Inmersión de 10-30 segundos. Lavado con agua y secado con aire.
Mg-5Zn	11	2ml HF (48%) 2ml HNO_3 (conc) 96 ml H_2O (dest)	EDS GBS ROSETA	Inmersión con agitación suave de 80-90 segundos. Lavado con agua y alcohol y secado con aire.
	NITAL 5	5 ml HNO_3 90 ml alcohol etílico (99.5%)	GRANO	Inmersión con agitación suave de 30-60 segundos hasta observar superficie oxidada color amarillo. Lavado con agua y alcohol y secado con aire.
LATÓN 70/30		2 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ 8 ml H_2SO_4 100ml H_2O (DEST) 4 ml NaCl (sol. sat)	EDS	Inmersión y lavado posterior.
		20ml NH_4OH (28%) 8-20 ml H_2O_2 (3%) 0-20ml H_2O (DEST)	GRANO EQUIAXIAL GRANO COLUMNAR	Inmersión 1 min. Lavado con agua.

APÉNDICE D

Datos obtenidos en trabajos previos sobre la refinación de grano.

Datos obtenidos por Ojeda Ramírez y Díaz Ariaga para la refinación de grano de una aleación Al-5Zn por el método de rotación, colando a 720°C en molde metálico precalentado a 800°C (22)

RPM	TAMARÑO DE GRANO (mm)	EDS CENTRO (mm)	EDS ORILLA (mm)	GHS CENTRO (mm)	GHS ORILLA (mm)	SEGUNDA FASE %	POROSIDAD PARTE SUPERIOR % AREA	POROSIDAD PARTE INTERIOR % AREA	ESFUERZO DE FLUENCIA MPa	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MPa	HB (Kg mm ²)
0	0.85800	0.12502	0.13801	0.12251	0.14185	1.3364	5.56	20.83	5.718	14.3	31.46
25	0.72466	0.08155	0.05770	0.08090	0.08774	1.3734	4.51	13.58	6.187	16.12	41.46
300	0.46766	0.06439	0.05559	0.06544	0.05782	1.3793	3.76	10.69	7.469	15.483	48.23
350	0.42500	0.05266	0.05914	0.05387	0.05171	1.3394	2.47	8.24	7.196	16.887	41.05
400	0.39233	0.04625	0.04763	0.04760	0.04742	1.3243	2.10	12.96	6.695	11.854	41.34
450	0.33533	0.04270	0.04501	0.04332	0.04448	1.3699	1.61	14.53	3.487	8.598	32.93

II

Datos obtenidos por Abad Cruz para latón 70/30 (18)

Refinamiento químico de grano de latón 70/30 utilizando bismuto

BISMUTO %	EDS (mm)	FORMA DEL GRANO	TAMAÑO DE GRANO (mm)	HB (kg/mm ²)	POROSIDAD %	PARTÍCULAS DE BISMUTO (%)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)
0,0	0,0561	COLUMNAR		33,6	1,24		166,96
0,1	0,0423	COLUMNAR		42,0	1,63	0,38	176,84
0,5	0,0413	EQUIANIAL	2,5500	41,0	2,15		191,13
2,0	0,0408	EQUIANIAL	0,0064	37,7	1,03	2,76	114,57
2,5	0,0387	EQUIANIAL	0,0003	36,6	2,25	3,68	93,75

Latón alfa con 0,5% de bismuto a diferentes tiempos de permanencia

TIEMPO DE PERMANENCIA (min)	EDS (mm)	FORMA DEL GRANO	TAMAÑO DE GRANO (mm)	HB (kg/mm ²)	POROSIDAD %	PARTÍCULAS DE BISMUTO (%)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)
3	0,0388	EQUIANIAL	1,1200	39,8	0,54	4,60	108,51
5	0,0449	EQUIANIAL	0,4259	41,1	0,68	2,47	59,15
7	0,0369	EQUIANIAL	0,3262	90,6	1,16		
9	0,0374	EQUIANIAL	0,1882	38,7	2,73	2,56	

Latón alfa con 0,5% de bismuto y desoxidante a diferentes tiempos de permanencia

TIEMPO DE PERMANENCIA (min)	EDS (mm)	FORMA DEL GRANO	TAMAÑO DE GRANO (mm)	HB (kg/mm ²)	POROSIDAD %	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)
5	0,0515	EQUIANIAL	0,2242	38,1	2,24	
7	0,0370	EQUIANIAL	0,1279	40,2	0,87	74,102

Latón alfa con diferentes cantidades de desoxidante

DESOXIDANTE %	EDS (mm)	FORMA DEL GRANO	TAMAÑO DE GRANO (mm)	HB (kg/mm ²)	POROSIDAD %	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)
0,5	0,04340	EQUIANIAL		34,2	1,62	141,62
2,0	0,04797	EQUIANIAL	0,9683	34,4	1,98	131,84

III

(11)

Datos obtenidos por Noguez et al para refinación de grano de latón 70/30 con desoxidante (H-Mn)

REFINADOR	EDS	TAMAÑO DE GRANO	HB	ESFUERZO DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	ELONGACIÓN
%	(mm)	(mm)	(kg/mm ²)	(MPa)	(MPa)	%
0.1	2.14E-02	1.00	59.5	77.0	156.0	22.0
0.2	1.51E-02	0.75	68.0	59.0	211.0	35.0
0.8	1.29E-02	0.36	99.0	107.5	222.5	21.0
1.0	9.47E-03	0.29	99.4	95.0	210.0	19.0

Datos obtenidos por Noguez et al para refinación de grano de latón 70/30 con fluorotitanato de potasio

REFINADOR	EDS	TAMAÑO DE GRANO	HB	ESFUERZO DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	ELONGACIÓN
%	(mm)	(mm)	(kg/mm ²)	(MPa)	(MPa)	%
0.1	1.95E-02	0.14	92.0	58.0	192.0	32.4
0.2	2.19E-02	0.37	85.5	59.0	188.0	32.8
0.4	2.52E-02	1.50	72.5	59.0	180.0	30.5

Datos obtenidos por Noguez et al para refinación de grano de latón 70/30 por el método de gradiente térmico

VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	EDS	TAMAÑO DE GRANO	HB	ESFUERZO DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	ELONGACIÓN
(°C/s)	(mm)	(mm)	(kg/mm ²)	(MPa)	(MPa)	%
3.1	3.53E-02	1.3	72.0	23.0	23.0	9.0
4.8	3.03E-02	1.3	74.0	55.0	73.0	14.0
10.1	2.63E-02	1.0	87.0	67.0	290.0	32.3

Datos obtenidos por Noguez et al para refinación de grano de latón 70/30 por el método mecánico de rotación del molde.

RPM	EDS	TAMAÑO DE GRANO	HB
	(mm)	(mm)	(kg/mm ²)
0	2.30E-02	1.07	43.0
93	1.90E-02	0.76	46.3
143	1.20E-02	0.57	47.7
239	1.10E-02	0.40	49.8
478	1.10E-02	0.30	48.6

IV

Datos obtenidos por Hernández et al (12) para la refinación de grano de Mg-2Zn mediante el método de variación de la velocidad de refinamiento

VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (°C/s)	DIÁMETRO DE CÉLULA (mm)	EIS (mm)	GRS (mm)	TAMAÑO DE GRANO DE GRANO (mm)	ESFUERZO DE FLENTA A LA TRACCIÓN MPa	RESISTENCIA MPa	IRE (kg/mm ²)	ELONGACIÓN %	POROSIDAD %	MEDO DE ENFRIAMIENTO	MEN-ESTRUCTURA	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (ppm)
1.25		0.09	0.250	0.376	68.09	107.66	86.25	10.17	80	MEDE CALIENTE	IDENTITICA	208.93
11.50	0.3528	0.043	0.240	107.22	129.48	116.00	8.50	20	MEDE AMBIENTE	CÉLULA IDENTITICA	400.52	
19.44	0.3170	0.031	0.151	34.96	57.98	95.50	2.67	10	AGUA	CÉLULA IDENTITICA	485.97	
35.50		0.04	0.025	0.303	54.78	99.17	106.60	6.17	5	MEDE	IDENTITICA	493.24
44.37	0.0677		0.151	64.84	103.11	107.17	3.16	2	MEDE MEDE + ACETONA	CÉLULA		
49.34	0.0500		0.090						MEDE MEDE + ACETONA	CÉLULA		

Datos obtenidos por Hernández et al para la refinación de grano de Al-3Zn mediante el método de variación de la velocidad de refinamiento

VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (°C/s)	DIÁMETRO DE CÉLULA (mm)	EIS (mm)	GRS (mm)	TAMAÑO DE GRANO DE GRANO (mm)	ESFUERZO DE FLENTA A LA TRACCIÓN MPa	RESISTENCIA MPa	IRE (kg/mm ²)	ELONGACIÓN %	POROSIDAD %	MEDO DE ENFRIAMIENTO	MEN-ESTRUCTURA	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (ppm)
2.31	0.0937	0.0950		0.5333	61.90	91.70	44.22	27.03	61.0	MEDE CALIENTE	IDENTITICA	
8.66	0.0440	0.0370		0.4667	64.84	94.15	46.18	17.64	75.5	MEDE AMBIENTE	IDENTITICA	
9.03	0.0275		0.1009	0.3250	91.33	121.00	65.83	31.94	95.5	AGUA	CÉLULA IDENTITICA	
16.00		0.1011	0.1500	0.1500	57.66	91.33	47.15	20.83	64.0	MEDE	CÉLULA	
37.91		0.1020	0.0783	0.0783	68.77	101.78	48.05	18.75	76.0	MEDE MEDE + ACETONA	CÉLULA	
50.00		0.1030	0.0400							MEDE MEDE + ACETONA	CÉLULA	

APÉNDICE E

Detalle del aparato de rotación.

