



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

TESIS MANCOMUNADA

ESTUDIO DE LA FABRICACION DE COMPOSITOS
Al-SiC (p)-5% VOL POR EL METODO DE BURBUJEO
CON GAS INERTE (Ar)

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A N
MANUEL MANRIQUE ORTEGA
ROBERTO TRONCOSO CRESPO

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**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. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: PROF. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA

SECRETARIO: PROF. GERARDO ARAMBURO PÉREZ

1er. SUPLENTE: PROF. SERGIO GARCÍA GALÁN

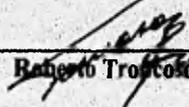
2do. SUPLENTE: PROF. ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO

**Sitio donde se desarrollo el tema: Laboratorio de Fundición, Departamento de
Ingeniería Química Metalúrgica.
Facultad de Química, Edificio D, UNAM**

Asesor del tema: 
I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

Supervisor Técnico: 
M. en C. José Antonio García Hinojosa

Sustentantes: 
Manuel Manrique Ortega


Roberto Troscoso Crespo

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I	4
ANTECEDENTES	4
A. MATERIAL COMPÓSITO	4
1.1 DEFINICIÓN E HISTORIA	4
1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS COMPÓSITOS	5
1.1.2 MATRICES	6
1.1.3 CLASIFICACIÓN DE COMPÓSITOS DE ACUERDO AL TIPO DE MATRIZ	7
1.1.4 COMPÓSITO CON MATRIZ DE ALUMINIO	8
1.2 TIPOS DE CONSTITUYENTES REFORZANTES	9
1.2.1 FIBRAS ORGÁNICAS	9
1.2.2 FIBRAS INORGÁNICAS	9
1.2.3 FACTORES QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DE LAS FIBRAS	10
1.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN EN LOS MMC's	10
1.3.1 PROCESOS DE FUNDICIÓN	12
1.3.2 PROCESO DE MANUFACTURA (PULVIMETALURGIA)	15
1.4 DEGRADACIÓN DE LOS CONSTITUYENTES CERÁMICOS Y METÁLICOS POR SU USO Y FABRICACIÓN	16
1.5 LA HUMECTACIÓN EN LOS MMC's	17
1.5.1 MECANISMOS QUE CONTROLAN LA HUMECTABILIDAD	19
1.5.2 FACTORES QUE AYUDAN A LA HUMECTACIÓN	20
1.6 APLICACIONES DE LOS MMC's	20
1.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS AL FABRICAR MMC's	21
B. MÉTODO DE BURBUJEO CON GAS INERTE	23
1.8 METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE COMPÓSITOS POR EL MÉTODO DE BURBUJEO CON GAS INERTE	23
1.9 EL ARGÓN COMO AGENTE DE DEGASIFICACIÓN EN LA REMOCIÓN DE HIDROGENO E IMPUREZAS EN EL ALUMINIO Ó SUS ALEACIONES	25
1.10 MECANISMOS DE LA DEGASIFICACIÓN CON GAS INERTE	25
CAPÍTULO II	27
DESARROLLO EXPERIMENTAL Y CONTROL DE VARIABLES	27
2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
2.2 DISEÑO, PREPARACIÓN Y SELECCIÓN DE EQUIPO	28
2.3 OBTENCIÓN DEL COMPÓSITO	32
2.4 EVALUACIÓN DEL COMPÓSITO	33

CAPÍTULO III.....	35
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
CAPÍTULO IV.....	37
CONCLUSIONES	37
CAPÍTULO V.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	38
APÉNDICE A	40
APÉNDICE B.....	51
APÉNDICE C.....	62

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES

Roberto Troncoso Gómez y Laura Otilia Crespo García.
Por la confianza, paciencia y la fe que siempre me han tenido, para que llegara a ser un hombre íntegro.

A MIS HERMANAS

María del Carmen Paullan, Laura Alejandra y María del Rosario Virginala.
Acada una de ellas, porque siempre he contado con su ayuda y apoyo.

A MIS SOBRINOS

Humberto Carlos, Alejandro, Ana Laura, Carmen María y Aracely.
Por el cariño y amor que siempre les he tenido.

A MIS MAESTROS

Al IQM. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco.

Por su confianza y ayuda para la realización de éste trabajo.

Al M. en C. Carlos González Rivera.

Al IQM. Gerardo Aramburo Pérez.

Al M. en C. José Alejandro García Hinojosa.

Por sus valiosos comentarios.

Al IQM. Ignacio Beltrán Piña.

Por su amistad y ayuda siempre incondicional.

Al IQM. Adrián Amaro Villeda.

Por su amistad y por la contribución para la realización de éste trabajo.

A MIS AMIGOS

**Ricardo Vilchis G., José Antonio Torres O.,
Miguel Ángel Gasca G., Juan Elías Ramírez G.,
Alejandro López S., Alejandro Segura Z.,
José Eleazar Abad C., Adán Hernández T.,
Manuel Manrique O., Erick Manuel Oseguera P.,
Carlos Cuevas A., Juan Díaz,
Arturo Cervantes T., Alberto Flores F.**
Por los grandes momentos y experiencias que pasamos juntos.

Con dedicación especial a Laura Carrillo L. quién ocupa un lugar en mi corazón.

Para mi mejor amigo Constantino D'Santiago S. quién le tengo un aprecio muy especial.

A la Universidad Nacional Autónoma de México cuya existencia ha contribuido al desarrollo profesional y tecnológico de nuestro país.

A todos los maestros de la Facultad de Química que contribuyeron para mi formación.

A los futuros Ingenieros Químicos Metalúrgicos.

PRÓLOGO

El "Estudio de la fabricación de compósitos Al-SiC(p)/5%vol. por el método de burbujeo con gas inerte (Ar)", es el trabajo que a continuación se presenta y tiene como objetivo primordial ofrecer una ruta alternativa para obtener compósitos de matriz metálica.

Para la realización del compósito por éste método se incorporan partículas de SiC a la aleación de Aluminio comercial (A356). Como medio de remoción de impurezas se utilizó gas inerte y que a su vez actuará como agente de desgasificación. Para la incorporación del SiC se utilizaron diferentes tamaños de malla, malla 240, malla 320, malla 360 y malla 500. En pruebas posteriores se estudió el parámetro de la humectabilidad adicionando Mg (3% y 5% respectivamente).

El parámetro de la humectabilidad no es el único a estudiar, también hay otros parámetros que son incluidos en el proceso y también son estudiados y desarrollados: la temperatura de trabajo, la temperatura de vaciado, la forma de la adición de las partículas reforzantes. El control del tamaño de la burbujas del gas Argón en el metal líquido no fue posible controlarlo, debido a los medios de que se dispone.

En lo referente a la caracterización del compósito de matriz metálica (MMC's) obtenido por éste método, los resultados que se evalúan son: la distribución y el porcentaje de la incorporación de las partículas de SiC en la matriz de Aluminio.

De los resultados obtenidos se observa una notable incorporación de partículas de SiC cuando se adiciona un humectante (Mg), aunque no se logra incorporar el 5% en volumen requerido de las partículas reforzantes en la matriz de Aluminio.

INTRODUCCIÓN

El estudio de compósitos de matriz metálica (MMC's) abre una nueva área de investigación en todos los ámbitos de la aplicación de nuevos materiales. Debido a que los compósitos son usados como un medio alternativo y como el sustituto de algunos materiales convencionales, esto es debido a las propiedades mecánicas y físicas que se logran obtener. La incorporación de partículas reforzantes a la matriz metálica da como resultado estas propiedades.

El uso de este material llamado compuesto ha crecido en años recientes, solo por citar algunos ejemplos éste material tiende a abarcar la industria automotriz, a la industria aeroespacial, a la industria marítima, la industria aérea, los deportes y también en la medicina.

En la fabricación de compósitos existen diferentes rutas de obtención, el compuesto en éste trabajo se obtiene por la ruta de la fundición, dónde el objetivo principal es incorporar partículas de SiC a la matriz de la aleación de Aluminio, utilizando la técnica de burbujeo con gas inerte (Ar).

Fabricar compósitos de matriz metálica (MMC's) por el proceso de fundición resulta de gran ventaja ya que se obtienen piezas de diferentes tamaños y de secciones complejas. El método utilizado en éste trabajo es relevante debido a que no hay información existente y tampoco un enfoque dirigido hacia el método. De ahí la importancia para aplicar esta técnica de obtención.

El capítulo I en este trabajo introduce los conceptos más importantes de los materiales compósitos, tratando de abarcar y englobar las características de éstos. Es decir desde su historia hasta la aplicación de estos materiales y se explica brevemente los procesos

de obtención actuales y que hoy en día son utilizados para fabricar compósitos de matriz metálica.

Se analiza e introduce algunos conceptos que son importantes y de gran utilidad para fabricar compósitos de matriz metálica por el método de burbujeo con gas inerte, sin olvidar que éstos conceptos se escogieron con el fin de reunir la información necesaria para que sirvan como marco de referencia ya que no existe ningún antecedente de éste método.

El capítulo II muestra el desarrollo experimental llevado a cabo en el cual se divide en cuatro etapas y el manejo de los parámetros que se consideraron, ya que los parámetros o variables son los que caracterizan y diferencian a éste método nuevo de obtención.

En el capítulo III se dan los resultados obtenidos y se analizan con amplio detalle. El análisis en éste capítulo es con el objetivo de poner a discusión los resultados y lograr profundizar con esto la explicación lo más acertada acerca del método.

En el capítulo IV se recopilan las conclusiones mas importantes del análisis hecho en el capítulo anterior y la conclusión acerca de la funcionalidad del método y de otros aspectos que también son de gran importancia.

La bibliografía dada en el capítulo V es la que proporciona y reúne la información necesaria para que éste método sea una alternativa viable de obtención de compósitos de matriz metálica.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

A. MATERIAL COMPÓSITO

1.1 DEFINICIÓN E HISTORIA.

En la actualidad no existe una definición universal para el término de "material compósito" o simplemente "compósito". Pero hoy en día debido a su creciente aplicación y al aumento en el interés de estos materiales existen varias definiciones, como ejemplo citaremos solo algunas:

- "Un material compuesto o compósito puede ser definido como una combinación macroscópica de dos o más materiales distintos que tienen una interfase reconocible entre ellos, es decir que se observa que son mutuamente insolubles."(Referencia 1)
- "Cualquier material que contenga dos ó más constituyentes identificables."(Referencia 2)

De cualquier modo, los compósitos se han utilizado hace miles de años. La historia reporta que los arqueros Mongoles hacían los arcos para flechas a partir de tendón de ganado vacuno, madera y una unión de seda ligada, todos estos materiales se juntaban utilizando adhesivos. Otros ejemplos incluyen que en el ceremonial Japonés de espadas, éstas las hacían de hierro y laminados de acero. En Damasco (Ciudad de Siria) los cañones de los rifles también eran fabricados de hierro y laminados de acero. Un ejemplo más sencillo es el adobe hecho de lodo y reforzado con paja, hasta donde se sabe estos han sido fabricados cientos de años antes de Cristo.

Los compósitos más recientes datan principalmente después de la segunda guerra mundial, los compósitos contemporáneos son clasificados a partir de fibras reforzantes contenidas en una matriz, como las partículas de SiC que sirven como reforzantes en el

Aluminio y hoy en día se hacen piezas de peso ligero para uso espacial y también para aplicaciones militares.

Por otra parte retomando estos hechos, la definición de compuesto puede resumirse de la siguiente manera:

"CUALQUIER MATERIAL (MATRIZ) QUE SEA CAPAZ DE CONTENER, UNO O MAS CONSTITUYENTES REFORZANTES YA SEA EN FORMA DE PARTÍCULAS O FIBRAS SE DEFINE COMO COMPÓSITO."

1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS COMPÓSITOS.

El compuesto puede clasificarse de acuerdo a la forma del elemento reforzante y se tiene la siguiente clasificación:

- a) Compósito con fibras reforzantes
- b) Compósito con partículas reforzantes
- c) Compósito laminares
- d) Compósito con hojuelas reforzantes
- e) Compósito compacto (mezcla de polvo mineral y metálico)

La Figura 1 (Apéndice A) muestra el esquema de esta clasificación.

Los elementos reforzantes pueden tener diferentes formas y tamaños. La Figura 2 (Apéndice A) muestra la forma de algunos elementos ó constituyentes reforzantes comúnmente usados para la fabricación de compósitos.

De forma general los compósitos son utilizados por sus propiedades estructurales y como ya se mencionó los compósitos típicos son compuestos de un constituyente aditivo tal como partículas o fibras reforzantes contenidas en un constituyente de soporte llamado matriz. Cabe señalar que algunos compósitos no tienen matriz y son compuestos de uno ó más constituyentes consistiendo de dos ó más materiales diferentes.

En este trabajo se realizó un compuesto con matriz metálica. La importancia de tener un constituyente de soporte, es decir una matriz, da una serie de ventajas características importantes.

1.1.2 MATRICES.

En los compósitos estructurales, la matriz juega un papel importante ya que tiene varias funciones importantes que se enlistan a continuación:

1. El contener y/o retener la fase reforzante en el mismo lugar.
2. Bajo una fuerza aplicada la matriz se deforma distribuyendo los esfuerzos o tensiones a los constituyentes reforzantes.
3. Algunas veces la matriz incrementa por sí misma su resistencia y solo ocurre en ciertos compósitos de matriz metálica.
4. La matriz en otros casos puede mantener el calor o el frío, puede ser conductora de la electricidad o servir como aislante, impedir la humedad y también como protector contra la corrosión.

Muchos constituyentes han sido utilizados como matrices, específicamente materiales orgánicos y materiales inorgánicos como, carbón, yeso, cemento, etc. Todos los métodos de fabricación dependen en gran parte de las propiedades de las matrices. Y en cuanto a los efectos matriciales, estos también influyen en las propiedades de los reforzantes.

1.1.3 CLASIFICACIÓN DE COMPÓSITOS DE ACUERDO AL TIPO DE MATRIZ.

Los compósitos también pueden clasificarse de acuerdo al tipo de matriz:

a) Compósito de matriz metálica (MMC's):

Los compósitos de matriz metálica, no son muy utilizados como los plásticos, comúnmente son un tema de gran interés. Las matrices metálicas ofrecen una mayor resistencia y rigidez que las matrices poliméricas. La resistencia a la fractura es superior y los MMC's ofrecen una anisotropía menos pronunciada y una mayor resistencia a altas temperaturas que su contraparte polimérica. Aunque muchos metales y aleaciones pueden servir como matrices, en la práctica la preferencia para la aplicación a bajas temperaturas están limitadas a los metales ligeros debido a los riesgos en el peso, que resultaría al utilizar metales pesados. Los metales mas utilizados como matrices son el aluminio, el titanio y el magnesio.

b) Compósito de matriz polimérica:

Los polímeros son materiales que son usados como matrices, por su relativa facilidad de elaboración, baja densidad y buenas propiedades mecánicas y dieléctricas. Hay dos tipos principales de polímeros: los termoplásticos y los termosets. Como ejemplos de polímeros termoplásticos son el polietileno, poliestireno, poli propileno, poliamidas y el nylon. Como ejemplo de polímeros termosets se tienen los epóxicos, el poliéster y las resinas poliamidas fenólicas.

c) Compósito de matriz Cerámica / matriz Vitrea:

El compósito de matriz cerámica son caracterizados por sus puntos de fusión altos, alta resistencia a la compresión, buena resistencia a altas temperaturas y una resistencia

excelente a la oxidación. Estas propiedades son muy deseables desde el punto de vista para seleccionar un material estructural que pueda operar a 1650 °C ó más.

El compuesto de matriz vítrea es un material conveniente porque es relativamente inerte y termoplástico inorgánico. En algunos casos, los compósitos de matriz vítrea pueden ser producidos con alta resistencia y un alto módulo elástico que se mantienen a temperaturas tan altas como 600 °C . Los compósitos resultantes pueden ser dimensionalmente superiores a las resinas y los metálicos, debido a que la matriz vítrea presenta una baja expansión térmica. Las matrices vítreas permiten la fabricación de un amplio rango de artículos de formas complejas tales como tubos y también ofrecen características únicas al desgaste.

d) **Compósito de matriz Carbón / Grafito:**

El carbón y el grafito son materiales que mantienen sus propiedades de resistencia y rigidez a temperaturas superiores a los 2227 °C. El compuesto que se obtiene cuando se utilizan fibras de carbón o grafito dentro de la matriz de éstos mismos materiales, dan como resultado piezas de alta resistencia.

1.1.4 COMPÓSITO CON MATRIZ DE ALUMINIO.

Casi la mayor parte de las piezas que son hechas de material compuesto y que se usan industrialmente están fabricadas con una matriz metálica. Uno de los materiales que comúnmente se utiliza como matriz es el Aluminio, donde se le da un enfoque muy especial, debido a que el Aluminio por su misma naturaleza tiene una media resistencia a la tracción y un bajo módulo de elasticidad, pero la combinación de su peso ligero, la resistencia al medio ambiente hacen de las aleaciones de Aluminio un metal muy popular y común, estas propiedades hacen que el aluminio sea adaptable para usarse como matriz metálica. Las propiedades físicas y mecánicas del Aluminio y sus aleaciones pueden incrementarse con solo adicionar un constituyente reforzante.

El Magnesio es utilizado como un material de soporte y se le mejoran sus propiedades con solo adicionar o incorporar pequeñas cantidades de constituyentes reforzantes. Por otra parte la condición es que tanto al Mg como el Al mientras se mantengan el valor original de las densidades aproximadas a las originales se pueden mejorar sus propiedades mecánicas. La variedad de constituyentes reforzantes incluyen el Al_2O_3 , SiC, las fibras de grafito, fibras cortas y también varios tipos de otras partículas.

1.2 TIPOS DE CONSTITUYENTES REFORZANTES.

Existen dos tipos de constituyentes reforzantes y que son clasificados como fibras orgánicas y fibras inorgánicas.

1.2.1 FIBRAS ORGÁNICAS.

Éstas están constituidas por materiales como el propileno, nylon y grafito, generalmente éstas tienen características tales como el tener propiedades de flexibilidad, elasticidad, peso ligero y sensibles al calor (exceptuando al grafito).

1.2.2 FIBRAS INORGÁNICAS.

Están constituidas por materiales como los aceros, materiales vítreos, tungsteno y cerámicos en general, tienen características de tener resistencia al calor y de ser más rígidas que las fibras orgánicas, valores muy altos en cuanto a sus resistencias mecánicas. Pero por otra parte tienen valores bajos en la absorción de la energía y baja tenacidad.

Muchas de las fibras orgánicas satisfacen ambas propiedades de resistencia y elasticidad para algunos compósitos estructurales. Las fibras vítreas son producidas en grandes cantidades, dónde necesariamente la alta resistencia y rigidez son requeridas. El grafito, el SiC y el Boro reciben también mucha atención, pero para aplicaciones severas tal como el uso a altas temperaturas, aceros y superaleaciones, metales refractarios y algunos cerámicos son objetos de profunda investigación para obtener su aplicación máxima.

1.2.3 FACTORES QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DE LAS FIBRAS.

El funcionamiento de las fibras en un compósito se da por diferentes factores y son los siguientes:

- * La orientación, la longitud, la forma y la composición de las fibras.
- * Las propiedades de la matriz.
- * La integridad de la unión entre fibras y matriz.
- * La orientación de las fibras determina la resistencia mecánica del compósito y en cuanto a la dirección ésta resistencia puede aumentar. Hay caminos en los cuáles se piensa acerca de la orientación de las fibras y que ésta orientación afecta la resistencia de un compósito. Cuando aplicamos una carga en dirección de las fibras y éstas están orientadas unidireccionalmente suministran al compósito una máxima resistencia. Cuando las cargas son aplicadas a ángulos muy pequeños o casi iguales a la dirección de las fibras, la resistencia de los compósitos disminuye drásticamente. La Figura 3 (Apéndice A) muestra algunos tipos de orientaciones posibles.

1.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN EN LOS MMC's.

El proceso de fabricación de los MMC's se dividen de manera general en dos procesos: El proceso primario y el proceso secundario.

- El proceso primario consiste en reunir dos materiales cuyo producto sea el compósito, es decir, incorporar el constituyente ó los constituyentes reforzantes dentro de la matriz, realizando ésta incorporación por cualquier proceso de fabricación tomando el más conveniente.
- El proceso secundario consiste de todos los pasos adicionales necesarios para que el compósito realizado en el proceso primario sirva como un elemento de servicio.

La tecnología que se tiene para fabricar MMC's requiere de características muy específicas. La variedad existente de los métodos para fabricar MMC's incluyen técnicas de fundición, éstas técnicas exigen hoy en día una manera sencilla para fabricar compósitos para que resulten costeables en su fabricación y que el manejo del material sea en grandes volúmenes de producción.

Pero la tecnología moderna ofrece caminos baratos de fabricación y al mismo tiempo el mejoramiento en las propiedades. La combinación resultante de los constituyentes aleación-reforzante por cualquier método de obtención y el proceso de manufactura subsecuente son complejos. Por otra parte la exigencia industrial necesita del manejo de grandes volúmenes de material y de la producción de piezas en masa, ésta necesidad obliga a que el Ingeniero Químico Metalúrgico deba encontrar:

- * La excelente reproducción de propiedades mecánicas y físicas.
- * Los materiales reciclables conserven dichas propiedades.
- * Disponibilidad de datos en cuanto a:
 1. La corrosión de los materiales en diferentes medios ambientales.
 2. Propiedades mecánicas a bajas y a altas temperaturas (fatiga, dureza, resistencia).
 3. Tratamiento metalúrgico apropiado.
- * Los compósitos deben de soportar el trabajado con cualquier tipo de herramientas.
- * Bajos costos.
- * Procesos de manufactura flexibles y controlables.

Existen dos rutas principales para fabricar MMC's:

- 1.- La ruta que utiliza metales líquidos fundidos. (FUNDICIÓN).
- 2.- La ruta que utiliza materiales en estado sólido. (PULVIMETALURGIA).

1.3.1 PROCESOS DE FUNDICIÓN.

Todos los procesos de fabricación requieren de un requisito básico y es el de que entren en contacto el constituyente reforzante y el constituyente matricial. En la mayoría de los procesos actuales son propicios, pero queda a consideración del Ingeniero la aplicación de algún método para la obtención de MMC's.

Los procesos de fundición y las técnicas de obtención deben responder a exigencias tales como: fáciles de producir y que sus costos de producción sean lo más bajos posibles. Es probable que en la próxima década muchos de los métodos mencionados a continuación; se vuelvan populares y produzcan grandes volúmenes de MMC's a nivel mundial.

MÉTODO VORTEX

Este método es probablemente el más sencillo y el más representativo para fabricar MMC's. El método consiste de una agitación vigorosa de la aleación, manteniendo ésta en estado líquido, mientras se adiciona el constituyente reforzante. La velocidad de adición del constituyente reforzante es controlado para evitar la aglomeración en el metal fundido. El método ha sido usado para la fabricación de compósitos resistentes al desgaste.

COLADA CENTRÍFUGA

Este método consiste de la aceleración centrífuga de rotación para fabricar MMC's. La colada centrífuga de compósitos fundidos contiene partículas repartidas formando dos zonas distintas en la solidificación del material: una zona rica y una zona pobre en constituyentes reforzantes. Si las partículas reforzantes tienen una densidad menor que la del metal fundido (por ejemplo; grafito, mica o carbón incorporado en el Aluminio), las partículas se alojan en la zona interna de solidificación. Pero si la densidad de las partículas reforzantes tienen una densidad mayor que la del metal fundido (por ejemplo; Zirconio o SiC incorporado en el aluminio), las partículas se alojan en la zona externa de solidificación. Las concentraciones de constituyentes reforzantes en las zonas internas o externas de

solidificación producen materiales con alta resistencias al desgaste ó superficies de auto lubricación para disminuir la fricción.

COMPOCASTING

Éste método consiste de una agitación vigorosa en una aleación semi-sólida mientras se adiciona los constituyentes reforzantes en la superficie. Una de las ventajas principales de la agitación vigorosa del metal líquido y de que éste se encuentre entre liquidus y solidus, es que la estructura parcial solidificada arrastra las partículas reforzantes a lo largo del interior del mismo líquido. Los constituyentes reforzantes son forzados dentro de la matriz a humectarse, se debe continuar con el mezclado después que la adición sea completada.

Este proceso es hasta cierto punto ventajoso para fabricar MMC's, pero tiene dificultades particulares para la homogeneización de los constituyentes reforzantes en el metal semi-sólido tal como fibras cortas o whiskers. Sin embargo debido al atrapamiento mecánico de los constituyentes reforzantes, también las impurezas flotantes y gases son arrastrados dentro del compuesto. Otra desventaja son las porosidades y las inclusiones, además de que se requiere de un control estricto de la temperatura.

PROCESO DURALCAN

El proceso Duralcan consiste de un reactor adaptado para fundir el metal y un agitador especial. Cuando la mezcla de partículas reforzantes de SiC y el Aluminio son realizadas bajo vacío. De acuerdo a la patente la mezcla se hace evitando la creación de un vortex, después de un tiempo total de mezclado alrededor de una hora, la mezcla está lista para ser fundida llegando a una temperatura de trabajo suficiente para lograr una homogeneidad máxima y una porosidad mínima. Los detalles adicionales acerca del parámetro exacto en el proceso usado para lograr la humectación, todavía no están disponibles.

SQUEZZE CASTING

La forja de líquidos para la fabricación de MMC's es un desarrollo reciente, dónde implica la acción de la infiltración por medio de una presión mecánica unidireccional. El método consiste en colocar una cama de constituyentes reforzantes en la cavidad del dado inferior, encima de la cama de los constituyentes reforzantes se adiciona el metal líquido y por acción mecánica se cierra el dado superior y se aplica una presión unidireccional provocando la infiltración, es decir, el metal líquido pasa a través de los intersticios del sólido.

Las partículas o las fibras reforzantes ejercen una influencia considerable sobre el tamaño de grano y la microsegregación en la aleación matricial. Los fenómenos implicados para la fabricación de MMC's por éste método es la termodinámica de superficie, la química superficial, dinámica de fluidos, el transporte de calor y el transporte de masa.

Las variables de éste método que influyen en la microestructura en la forja de líquidos se dan a continuación en orden decreciente:

- *Temperatura de precalentamiento de la fibra.
- *Espaciamiento interfibras.
- *Presión de infiltración.
- *Rapidez de infiltración.
- *Temperatura del metal líquido.

MÉTODO DE DEPOSICIÓN POR ATOMIZADO

Éste método consiste en depositar metal líquido atomizado con la combinación de un constituyente reforzante y gas argón, los cuales son proyectados a una base (la base puede tener la forma de un lingote, tubo o placa). La proyección de las gotas parcialmente solidificadas debido a la alta velocidad conduce a estructuras muy finas libres de la macrosegregación. El control de los parámetros realizados por éste método son: la

velocidad de depositación, el sobrecalentamiento del metal fundido, el calentamiento del gas inerte y la velocidad de flujo, son variables que se deben de controlar de manera estricta.

Los lingotes, placas o tubos fabricados por este proceso contienen generalmente porosidades en un nivel muy alto, por otro lado el tiempo de contacto entre el constituyente reforzante y la aleación líquida son completamente rápidos, provocando que la unión interfacial sea menor que la requerida, por esta razón los lingotes, los tubos y las placas requieren de un tratamiento posterior como un trabajado en caliente y el material obtenido por éste método se considera como semi-terminado.

1.3.2 PROCESO DE MANUFACTURA (PULVIMETALURGIA).

La metalurgia de polvos es uno de los procesos que permanece presente y una de las más adecuadas tecnologías para la fabricación de MMC's. Con la metalurgia de polvos es posible obtener compósitos desarrollando varias etapas que abarcan desde la obtención de polvos metálicos hasta la terminación de piezas.

Este método consiste principalmente de la combinación de constituyentes (polvo cerámico y polvo metálico), a estos dos constituyentes se le adiciona un lubricante, éstos se mezclan y después se compactan, formada la compactación sigue el proceso hasta un sinterizado y si es necesario la pieza pasa por un tratamiento térmico para obtenerse finalmente el producto terminado.

La desventaja principal de la pulvimetalurgia es un proceso de manufactura costoso, la metalurgia de polvos es limitada a manejar grandes volúmenes de material, pero como ventaja principal se menciona su alto funcionamiento de aplicación para piezas muy pequeñas y de gran precisión.

1.4 DEGRADACIÓN DE LOS CONSTITUYENTES CERÁMICOS Y METÁLICOS POR SU USO Y FABRICACIÓN.

En los compósitos de fibra / matriz metálica ó fibra / matriz cerámica pueden sufrir un mecanismo sencillo que se conoce como degradación, es decir un cambio en la composición química del material que puede transformar las propiedades físicas o la apariencia del mismo, éste mecanismo tiene la posibilidad de existir tanto en los constituyentes reforzantes como en los metálicos por la fabricación o el uso de éstos. Este mecanismo puede existir o no de manera natural, pero puede ser previsto en muchos casos o en su mayoría si se toman las debidas precauciones y es causado por factores que muchas veces no se toman en cuenta para la fabricación de compósitos. La degradación puede ocurrir y debemos tomar en cuenta las causas que posiblemente la producen. A continuación se enlistan algunas recomendaciones y prevenciones que pueden ayudar a solucionar este problema.

- a) El cuidado y el control de las reacciones en la interfase fibra/metal es totalmente requerido para mejorar la humectabilidad y la unión de los dos, para no causar una degradación excesiva en la superficie de la fibra.
- b) La formación de compuestos intermetálicos frágiles en la interfase fibra/metal (por ejemplo, formación de carburos en los compósitos grafito/Aluminio y SiC/Aluminio) durante el proceso de fabricación pueden causar degradación en las fibras y la pérdida de la resistencia mecánica en la dirección longitudinal.
- c) Si las propiedades de las fibras o matrices son sometidos a procesos mecánicos o a tratamientos térmicos y estos dos factores causan reacciones metalúrgicas, las propiedades de los constituyentes individuales son afectados directamente causando

degradación. Es por eso que se deben tomar en cuenta dos factores; corregir el proceso o escoger otro camino que sea más viable.

- d) Los métodos que existen para revestir ó cubrir los constituyentes reforzantes haciéndolos pasar a través de soluciones organometálicas y usando los proceso de pirólisis o hidrólisis para formar una capa de revestimiento en éstos, provoca una disminución de reacciones metalúrgicas con la matriz, evitando la degradación.
- e) La pérdida de las propiedades en la matriz puede ocurrir por diferentes mecanismos y principalmente por la condición inicial de la composición química del metal. Un exceso de algún elemento en la composición química de la aleación, puede provocar degradación. Por otra parte la adición excesiva ó sin control de agentes humectantes (por ejemplo, Mg , Ca , Li o Na por solo mencionar algunos), también puede provocar un aumento en la degradación en la matriz.
- f) Si se manejan altas temperaturas, la reacción térmica excesiva de la interfase fibra/metal puede ocasionar la degradación en las propiedades finales del MMC's.

1.5 LA HUMECTACIÓN EN LOS MMC's.

Los dos principales problemas que se presentan al momento de fabricar MMC's son:

1. Las partículas son no humectadas por el metal líquido.
2. Las partículas tienden a sedimentarse ó flotar dependiendo de su densidad relativa con respecto al líquido.

Como se mencionó anteriormente la humectación de las partículas es un grave problema, sin embargo los problemas en el contacto entre partículas y el metal fundido

todavía no han sido evaluados con precisión, se sabe que la mayoría de los líquidos a diferencia de los sólidos y gases, humectan. Se sabe que la capacidad de un fluido para extenderse o adherirse a una superficie depende de las características físicas y químicas de los sistemas en contacto. El teflón, el polietileno, el grafito y el poliestireno son algunos de los materiales que no se humectan fácilmente.

Para saber si un líquido es capaz de humectar ó mojar a un sólido, estando el sistema a ciertas condiciones determinadas, se tienen tres reglas que implican al ángulo de contacto y siguiendo la teoría de superficies tenemos que:

- a) Si el ángulo de contacto es nulo ($\theta = 0^\circ$) y la gota se extiende perfectamente a lo largo de cualquier superficie, se dice que la humectabilidad es total. Figura 4a (Apéndice A).
- b) Si el ángulo se encuentra ($0^\circ < \theta < 180^\circ$) la humectabilidad es solo parcial. Figura 4b (Apéndice A).
- c) Y por último si la condición limite ($\theta = 180^\circ$) se alcanza un régimen de humectabilidad nula. Figura 4c (Apéndice A).

Por otra parte Thomas Young estableció que en ausencia de gravedad, el ángulo de contacto está completamente determinado por las tensiones superficiales que corresponden a las tres interfases que se encuentran en la línea de contacto entre la gota y el sustrato.

$$\gamma_{lg} \cos \theta = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \dots\dots\dots \text{ecuación (1)}$$

1.5.1 MECANISMOS QUE CONTROLAN LA HUMECTABILIDAD.

Las propiedades de la humectación entre constituyentes reforzantes y constituyentes líquidos metálicos se rigen por los siguientes mecanismos:

CALOR DE FORMACIÓN

El trabajo de adhesión entre reforzantes y metal fundido, disminuye con el incremento del calor de formación de los carburos.

TEMPERATURA Y TIEMPO DE CONTACTO

Altas temperaturas y tiempos de contacto largos promueven la humectabilidad en el compuesto de matriz metálica debido a las reacciones en la interfase reforzante/metal resultando un ángulo de contacto reducido.

ÁNGULO DE CONTACTO.

En el sistema SiC/Al se ha encontrado que a bajos ángulos de contacto hay una mejoría en la humectación y asociado con la formación de una capa de carburo de Aluminio, pero éste proceso puede tomar algunas horas. A partir de la ecuación 1 establecida por Thomas Young, se deduce que el Mg reduce el ángulo de contacto y favorece la humectabilidad de los constituyentes reforzantes.

TENSIÓN SUPERFICIAL.

En otros estudios se mide la tensión superficial y se ha encontrado que el Mg reduce la tensión superficial y por lo tanto aumenta la humectabilidad. La naturaleza de la humectabilidad puede modificarse en la medida que seamos capaces de alterar o variar una o varias de las tensiones superficiales involucradas.

1.5.2 FACTORES QUE AYUDAN A LA HUMECTACIÓN

Los factores que pueden ayudar a aumentar y mejorar la humectabilidad en la fabricación de los MMC's han sido conocidos y llevados a cabo a lo largo de los procesos de elaboración. A continuación se establecen esta serie de factores:

* La adición de agentes humectantes como Magnesio, Calcio, Sodio son los más comunes, pero como se dijo anteriormente si no se establece un control en la cantidad de adición, puede ocasionar degradación de las partículas y/o fibras y modificación en la composición química de la matriz.

* Cubiertas metálicas adherentes continuas (por ejemplo, Cobre y Níquel) sobre partículas no-humectantes tal como grafito, mica y cáscara de carbón, mejoran la humectabilidad en la interfase reforzante / metal.

1.6 APLICACIONES DE LOS MMC's.

Los compósitos de matriz metálica por sus propiedades estructurales son empleados en muchas aplicaciones. La Tabla 1 muestra algunas de las aplicaciones de los MMC's. En la Tabla 2 (Apéndice B) se muestran las aplicaciones de los MMC's detalladamente.

APLICACIONES	MATRIZ	REFORZANTE
Como autolubricantes	Al, Mg, Pb-Sn	Grafito, Mica
Resistencia al desgaste en medio severo	Al	Al_2O_3 , SiC, TiC, SiO_2 , B_4C , ZrO_2
Para severidad alta	Fe, Cu	Diamante, WC, Co
Estructurales	Mg, Al	Al_2O_3 , SiC
Para altas temperaturas	Ti	Carbón, Al_2O_3 , SiC
Contactos eléctricos autolubricantes	Cu	Grafito, mica
Como amortiguantes	Al	Grafito, mica

Tabla 1. Algunas aplicaciones de los MMC's.

1.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS AL FABRICAR MMC's.

VENTAJAS.

- * Mejoramiento en las propiedades tribológicas (fricción, desgaste y abrasión).
- * La adición de un ligero porcentaje de constituyentes reforzantes en las aleaciones convencionales incrementan significativamente el funcionamiento efectivo contra la abrasión y la erosión. Por lo tanto los MMC's tienen:
 - Propiedades autolubricantes en las piezas.
 - Buenas conductividades eléctrica y térmica.
 - La adición de partículas reforzantes puede mejorar la propiedad de amortiguación.
 - Resistencia a elevadas temperaturas así como mejor resistencia a la fatiga y adecuado coeficiente de expansión térmica.

DESVENTAJAS.

- * Rechazo del constituyente reforzante por la fase líquida, es decir hay una incompatibilidad entre la interfase reforzante / metal líquido y esto trae como consecuencia la baja humectación.
- * La humectación depende de diferentes parámetros como el calor de formación de las partículas reforzantes, temperatura de formación y tiempo de contacto, ángulo de contacto y la tensión superficial entre la partícula reforzante y la matriz como ya se indicó anteriormente y esto complica la fabricación.
- * La diferencia de densidades provocan el asentamiento o la flotación de los constituyentes reforzantes en el metal líquido.
- * La viscosidad del metal líquido puede o no permitir el movimiento de los constituyentes reforzantes en el metal líquido.

* La velocidad de enfriamiento durante la solidificación, si es alta los constituyentes reforzantes no tienen tiempo para distribuirse de manera homogénea y si es baja los constituyentes reforzantes tienden a un asentamiento o a la flotación.

* La existencia de floculación de constituyentes reforzantes conduce a una distribución heterogénea debido a la aglomeración de los mismos.

B. MÉTODO DE BURBUJEO CON GAS INERTE

1.8 METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE COMPÓSITOS POR EL MÉTODO DE BURBUJEO CON GAS INERTE.

Varios son los objetivos primordiales que se plantean para obtener MMC's y son:

- * Obtener y fabricar fácilmente MMC's.
- * Implantar una nueva técnica para producir MMC's aparte de los ya existentes.
- * Producir grandes volúmenes de material compuesto.
- * Probar ésta técnica de fabricación.

Por otra parte los métodos que hasta ahora se utilizan y se aplican ofrecen varias ventajas, pero no producen grandes cantidades de material, es decir no abarcan grandes volúmenes en la producción, existiendo dos alternativas para que estos produzcan industrialmente dichos volúmenes, las dos alternativas posibles son: modificar los métodos ya existentes o implantar nuevos métodos de obtención. Este nuevo método de fabricación que se implanta en éste trabajo trata de seguir las condiciones normales y sencillas de operación, sin introducir equipos costosos ó el fabricar un equipo especial, que resultan ser sofisticados y también costosos.

Éste método probablemente será uno de los más sencillos para fabricar compósitos de matriz metálica. El método consiste en la inyección de gas inerte (Ar), el cuál trae como consecuencia dos mecanismos importantes al metal líquido:

*El primer mecanismo es la desgasificación del baño metálico, (la remoción de hidrogeno).

*El segundo mecanismo es la remoción de impurezas para fabricar compósitos por éste método. La constante inyección de gas Argón remueve las impurezas en el baño metálico esto trae como consecuencia la disminución en la tensión superficial y favorece la disminución en el ángulo de contacto, aumentando así la humectabilidad de las partículas.

Es importante que el flujo del gas inerte sea uniforme y lo más lento posible en todo el baño metálico para lograr una incorporación homogénea y evitar así las pérdidas de las partículas.

Para fabricar MMC's por éste método se requiere:

- * Un horno de crisol.
- * Una lanza de inyección de gas inerte (Ar).
- * Gas inerte (Ar).
- * Partículas reforzantes.
- * Aleación a utilizar.

Como se observa, Figura 5 (Apéndice A), el equipo no es costoso y es el que se utiliza comúnmente en cualquier fundición. Señalando otro aspecto importante, para éste no existe información bibliográfica de la fabricación de compósitos y debido a esto es más compleja su obtención. Para realizar éste método y no habiendo información se revisaron y se tomaron en cuenta los parámetros más importantes que rigen a los otros procesos existentes. Los parámetros que se tomaron en cuenta son: la humectabilidad, la tensión superficial, el ángulo de contacto y la temperatura de trabajo, éstos parámetros son la única información que se tuvo para fabricar compósitos de matriz metálica por éste nuevo método. Sin embargo considerando que éste método es diferente a los demás se tuvo que complementar con otros parámetros como son: flujo de gas Argón, tamaño de las burbujas, la posibilidad de adicionar un agente humectante y las temperaturas tanto la de trabajo como la de vaciado.

Las pruebas se realizaron inicialmente sin agente humectante y se observó la funcionalidad del método. Se hizo necesaria la adición de un agente humectante manejándose a diferentes porcentajes, verificando si era el adecuado y aplicable al método.

Se utiliza un flujo de Argón que ayuda a incorporar las partículas de SiC en el metal líquido, el funcionamiento de éste durante la desgasificación para eliminar el hidrógeno del Al ó sus aleaciones.

1.9 EL ARGÓN COMO AGENTE DE DESGASIFICACIÓN EN LA REMOCIÓN DE HIDROGENO E IMPUREZAS EN EL ALUMINIO Ó SUS ALEACIONES.

Existen varios métodos para desgasificar Aluminio en estado líquido, uno de ellos es la inyección de gas inerte, para desgasificar con éxito será necesario saber hasta que límite es conveniente desgasificar.

Durante la desgasificación no solo el hidrógeno es removido, sino también influye en la remoción de las impurezas y en las diferentes partículas suspendidas en el metal líquido como óxidos, nitratos, etc.

1.10 MECANISMOS DE LA DESGASIFICACIÓN CON GAS INERTE.

Hay tres tipos de mecanismos relativos y son los que se presentan a continuación para la remoción del hidrógeno en el Aluminio por medio de la inyección con gas inerte; estos mecanismos son el termodinámico, el químico y el cinético:

MECANISMO QUÍMICO

* Cuando el argón se inyecta y forma burbujas que ascienden a través del metal fundido, la unión de átomos de hidrógeno sobre la superficie de las burbujas de gas inerte se lleva a cabo para formar H₂. La velocidad de ésta unión es controlada por la reacción química sobre la superficie, entre las burbujas de gas inerte y el gas hidrógeno y la transferencia de masa del hidrógeno hacia la superficie del baño líquido. (Referencia 4)

MECANISMO CINÉTICO

El hidrógeno es removido por los siguientes pasos dados a continuación:

- * Transporte de hidrógeno en el baño hacia la vecindad de una burbuja de gas inerte, por una combinación de convección y difusión.
- * Transporte difusivo a través de una delgada capa estancada de fluido, llamada capa límite, alrededor de la burbuja.
- * La adsorción química y la subsecuente desorción en la superficie de la burbuja hacia su interior.
- * Difusión del hidrógeno como una especie gaseosa dentro de la burbuja de gas inerte.

(Referencia 7)

MECANISMO TERMODINÁMICO

El mecanismo de desgasificación del metal líquido por medio de la inyección con gas inerte es el siguiente:

- * La presión parcial del hidrógeno en el interior de las burbujas de gas inerte es cero, cuando éstas entran primeramente al metal líquido, pero como las presiones parciales de los gases tienden al equilibrio, el hidrógeno disuelto en el metal es transferido dentro de las burbujas de gas inerte y ellas juntas ascienden hacia la superficie del metal y posteriormente escapan a la atmósfera. (Referencia 9)

En vista de lo explicado anteriormente se puede suponer que al introducir Ar al metal líquido se elimina principalmente al hidrógeno y secundariamente a partículas suspendidas, en otras palabras nuestro metal burbujeadado con gas inerte (Ar) queda limpio. Debido a la eliminación de las impurezas disminuye la tensión superficial del metal líquido y por lo tanto es favorecida la humectabilidad.

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y CONTROL DE VARIABLES

Para la obtención del compósito por éste método se dividió en cuatro etapas:

- 2.1) Desarrollo experimental.
- 2.2) Diseño, preparación y selección de equipo.
- 2.3) Obtención del compósito (técnica de fusión y control de variables).
- 2.4) Evaluación del compósito.

2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En el presente trabajo se obtuvieron compósitos de matriz metálica con diferentes características:

- a) Compósito sin la adición de un agente humectante.
 - La fabricación y la caracterización del compósito (Al (A356) / SiC(p) 5% vol.) por el método de burbujeo con gas inerte (Argón), es el realizado en éste trabajo, utilizando diferentes tamaños de malla como constituyente reforzante, malla 240, malla 320, malla 360 y malla 500.
- b) Compósito con la adición de un agente humectante.
 - Siguiendo el mismo método de fabricación y utilizando los mismos tamaños de partículas reforzantes mencionados anteriormente, se introdujo Magnesio como agente humectante, adicionándose en diferentes porcentajes.

El compósito obtenido con o sin humectante son evaluados, tratando de incorporar en ambos casos el 5% en volumen de las partículas reforzantes de SiC.

2.2 DISEÑO, PREPARACIÓN Y SELECCIÓN DE EQUIPO.

TIPO DE HORNO

Para la fabricación del compósito se utilizó un horno de crisol, en el cuál utiliza gas LP como combustible. La selección de éste tipo de horno se debió a ciertas ventajas como:

- La alimentación con gas LP se realiza fácilmente.
- Fácil regulación.
- Mantenimiento del metal a cierta temperatura.
- Rapidez en la fusión.
- Desventaja: El gas LP es costoso para la fusión.

COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CARGA DEL ALUMINIO

La aleación de Aluminio (A356 norma ASTM) utilizada es una aleación comercial cuya composición química se muestra en la Tabla 3.

Elemento	Fe	Mg	Cu	Ti	Mn	Zn	Si
°/W	0.2	0.25-0.45	0.2	0.2	0.1	0.1	6.5-7.5

Tabla 3. Composición química del Aluminio comercial A356.

Para las condiciones experimentales requeridas para la obtención del compósito por éste método se requirió de dos diferentes cargas. La Tabla 4 muestra la cantidad de carga utilizada.

CARGA Al (Kg)	SIN HUMECTANTE	CON HUMECTANTE (3%Mg)	CON HUMECTANTE (5%Mg)
1.5	*	*	
1.0			*

Tabla 4 . Cantidad de carga utilizadas para cada ensayo.

Para cada corrida se utilizan todos los tamaños de malla, la disminución de la cantidad de carga se debe a las siguientes razones:

- * La fusión de poco material, ahorra combustible y energía.
- * Cuando se utiliza poco material los tiempos de fusión se reducen considerablemente.

TIPO DE CRISOL

El crisol utilizado es un crisol de SiC (A-12) con una capacidad de 4.8 Kg de Aluminio lleno al 100%. Las razones por las cuáles se escogió éste tipo de crisol son por sus propiedades físicas y químicas, como lo son:

- Alta conductividad térmica.
- Resistencia mecánica.
- Baja reactividad con los metales líquidos.
- Paredes lisas (es decir baja porosidad).
- Baja expansión térmica.
- Resistencia al choque térmico.
- Baja reactividad con los gases.
- Una de las desventajas principales es su alto costo.

DISEÑO DE LA LANZA

Se hizo necesario el diseño de una lanza apropiada al tamaño del crisol utilizado para la inyección de gas argón. El diseño de la lanza de inyección tenía que reunir varios objetivos:

- El material con que se fabricó la lanza es de hierro. Por otra parte el recubrimiento de la lanza se realizó con un material refractario para no permitir la disolución de hierro y no contaminar el metal líquido. Figura 6 (Apéndice A).

- El diámetro de los orificios de la lanza son lo mas pequeños posibles (0.4 mm), para que la salida de las burbujas de gas sean lo mas dispersas y homogéneamente posibles. Figura 7 (Apéndice A).
- Mientras más pequeña sea la burbuja de gas y mayor sea su tiempo de recorrido a través del metal líquido, mayor es la eficiencia de desgasificación y de remoción de impurezas.
- Se desea obtener un flujo laminar y la inyección de gas sea lo más lento posible, ya que un flujo turbulento producirá un arrastre severo de las partículas reforzantes de SiC en el baño a la superficie del mismo.

EMPAQUETAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DEL SiC

- Para la fabricación de MMC's por éste método es necesario el empaquetamiento de partículas reforzantes de SiC, para sumergirlas dentro del metal líquido.
- Las partículas reforzantes de SiC se empacaron en papel Aluminio.
- El 5% en volumen de las partículas reforzantes de cada malla utilizada y la cantidad en gramos va en función de la cantidad de carga de la aleación de Al. La Tabla 5 muestra la cantidad en gramos que se tendrán que añadir, así como el número de paquetes utilizados.
- Los paquetes para realizar las pruebas se precalentaron antes de introducirlas al metal líquido.

CARGA Al (Kg)	% VOL. SiC (p)	SiC NECESARIO (g)	NUMERO DE PAQUETES AGREGADOS, C/U CON 10 g.
1.5	5	99.85	10
1.0	5	66.46	7

Tabla 5. Cantidad de partículas reforzantes adicionadas en los ensayos, así como el número de paquetes utilizados

GAS INERTE

El uso de gas inerte (Ar), es empleado en el método y tiene varias funciones importantes:

- Como agente de desgasificación.
- Como removedor de impurezas.
- Por sus propiedades químicas es un gas insoluble en el Aluminio cuando éste está en estado líquido sin provocar ningún efecto a las propiedades en el metal líquido.
- No produce gases tóxicos.

AGENTE DE HUMECTACIÓN

En éste caso se utilizó al Magnesio como agente humectante y la adición se llevo a cabo manejando dos diferentes porcentajes. El manejo y la adición de este humectante se verá en la técnica de fusión.

La cantidad de los porcentajes están en función de la cantidad de carga de la aleación de Aluminio. La Tabla 6 muestra la cantidad de adición en gramos y los porcentajes utilizados en éste trabajo.

CARGA DEL ALUMINIO (Kg)	% MAGNESIO	ADICIÓN DE Mg (g)
1.5	3	45
1.0	5	50

Tabla 6. Cantidad de Mg adicionado en los ensayos.

2.3 OBTENCIÓN DEL COMPÓSITO.

Es importante seguir la secuencia en la técnica de fusión, debido a que para este método de obtención no existe. Como referencia se tomó como base la técnica normal de fusión del Aluminio, como en esta técnica no se incluyen los parámetros principales para la obtención del compuesto, se tuvo que modificar y estructurar la técnica de fusión, donde se introdujeron los siguientes parámetros:

- Temperatura de trabajo adecuada.
- La adición de Magnesio como agente humectante.
- La adición de las partículas reforzantes de SiC empaquetadas.
- Tiempo óptimo de gaseado.
- Temperatura de vaciado.

TÉCNICA DE FUSIÓN.

La técnica de fusión usada para este método, tomando en cuenta al obtener un compuesto libre de gases, escorias, de impurezas y además un compuesto con buen rendimiento y calidad en sus propiedades mecánicas.

1) BALANCE DE CARGA.

Tipo de materias primas:

- Aleación de Aluminio (A356 norma ASTM)
- Partículas reforzantes de SiC en paquetes de 10 g cada uno por cada ensayo.

2) PREPARACIÓN DEL MATERIAL.

Carga:

- No se hizo ninguna preparación especial a la carga de Aluminio

3) TIPO DE HORNO.

- Horno de crisol (precalentado entre 650 °C y 700 °C).

4) TEMPERATURA DE TRABAJO.

- La temperatura de trabajo máxima fue de 800 °C.

5) ADICIÓN DEL AGENTE DE HUMECTACIÓN.

- Se agregó la mitad de la cantidad total de Mg al metal líquido.
- 6) Inyección del gas Argón solo un burbujeo por 10 s para homogeneizar la aleación.
 - 7) Inmersión de los paquetes de SiC. (Solo 2 paquetes cada uno de 10 g)
 - 8) Inyección de gas Argón durante 4 min.
 - 9) Adición de la mitad restante de Mg al metal líquido.
 - 10) Inmersión de los paquetes restantes de SiC. (Solo se adicionaron 2 paquetes como máximo).
 - 11) Inyección de gas Argón durante 4 min.

12) TEMPERATURA DE VACIADO.

- La temperatura de vaciado mínima fue de 650 °C.
- 13) Remoción de escoria de la superficie de metal líquido.
 - 14) Vaciado en lingoteras.

Se aplicó la misma técnica de fusión a las pruebas para obtener compósitos sin la adición del agente humectante, no considerando los pasos 5 y 9.

2.4 EVALUACIÓN DEL COMPÓSITO.

OBTENCIÓN DE LA MUESTRA.

La obtención de la muestra de compósito se obtuvo en lingoteras metálicas en la cuál para cada corrida se obtuvieron 8 lingotes, Figura 8 (Apéndice A), y para su análisis solo se tomaron en cuenta el primer y último lingote debido a dos razones:

- Se analiza la distribución y la homogeneización de las partículas reforzantes en la matriz de Aluminio.
- Se observa si hay asentamiento de partículas reforzantes en las muestras analizadas.

CORTE DE LA MUESTRA Y METALOGRAFÍA.

Para cada ensayo los lingotes considerados se cortan por la mitad en sección transversal para obtener una muestra representativa . Figura 8 (Apéndice A).

Las muestras obtenidas se preparan para un análisis metalográfico convencional (puliéndose solo una de las caras de la muestra).

DISTRIBUCIÓN DE LA PARTÍCULA.

Con el analizador de imágenes (previamente calibrado), se obtienen las mediciones del número de partículas incorporadas por la diferencia de grises. En cada muestra se tienen 3 zonas perfectamente definidas, zona baja, zona media y zona alta ,Figura 9 (Apéndice A). El nivel de detección utilizado fue de 175 manteniéndose constante para todas las muestras.

Las lecturas obtenidas en el analizador de imágenes para las 3 zonas seleccionadas son las siguientes:

- Determinación del número de partículas presentes en la zona visualizada.
- El área de partículas.
- El % de área de las partículas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en el Apéndice B, la tabla 8 muestra las lecturas sin agente humectante, la tabla 9 con un contenido de 3% de Mg y la tabla 10 cuando se adiciona 5% de Mg. Estos resultados son valores promedio por tamaño de malla y zona evaluada.

Para cada tamaño de malla se registran las lecturas del número de partículas incorporadas del primer y último lingote, se construyen gráficas en función de tamaño de malla de la zona; gráfica 1 (Apéndice C) zona superior, gráfica 2 (Apéndice C) zona media y gráfica 3 (Apéndice C) zona baja, sin agente humectante.

El mismo procedimiento se realiza cuando se agrega el agente humectante al 3%, gráficas 4,5,6 (Apéndice C) y 5% de Mg, gráficas 7,8,9 (Apéndice C).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 7 (Apéndice B), muestra que no fue posible introducir los paquetes previstos en cada corrida, debido a:

1. No se presenta pérdida de partículas de SiC al introducir los 2 primeros paquetes, sin embargo cuando al introducir los siguientes paquetes (2 máximo) esta pérdida es considerable, durante la inyección del gas inerte.
2. El intervalo de tiempo del cuál se dispone antes de alcanzar la temperatura de vaciado durante las pruebas es de 8 minutos máximo, debido al rápido enfriamiento del metal líquido, por la inyección del gas inerte.
3. No es posible encender el horno para recuperar la temperatura, debido al asentamiento de las partículas de SiC en el crisol.

Las gráficas de la 1 a la 9 se compara el número de partículas incorporadas en las tres zonas evaluadas para cada lingote y por tamaño de malla, sin agente humectante, con el 3% de Mg y 5% de Mg. Con éstos datos se determina la distribución de las partículas en las piezas, los resultados se resumen en la tabla 11 (Apéndice B). Ésta muestra que en la mayor parte de las piezas analizadas no existe una distribución homogénea. Éste comportamiento se debe a la rápida velocidad de enfriamiento.

Para determinar el asentamiento de las partículas en el metal líquido durante cada corrida, se grafican los valores promedio del primer lingote y último lingote en función del tamaño de malla. Las gráficas 10, 11 y 12 se muestran en el Apéndice C.

En los tamaños de malla 320 y 500 sin la presencia del agente humectante (gráfica 10) y en la malla 360 con 3% de Mg (gráfica 11), el número de partículas en ambos lingotes es el mismo mostrando una distribución uniforme en el metal.

En los tamaños de malla 240 sin agente humectante (gráfica 10), 240 con 3% de Mg (gráfica 11) y 360 con 5% de Mg (gráfica 12), se observa un mayor número de partículas en el último lingote mostrando asentamiento en el metal.

En las pruebas restantes el primer lingote presenta mayor número de partículas, debido a que la fuerza de arrastre del gas inerte mantiene a las partículas cerca de la superficie del baño metálico.

Las tablas 10, 11 y 12 (Apéndice B), muestran que a mayor número de partículas incorporadas se incrementa el área que éstas ocupan.

Las figuras 10 y 11 (Apéndice A), corresponde al compuesto, cuando se adiciona 3% de Mg. Las figuras 12 y 13 (Apéndice A) muestran el compuesto obtenido cuando se adiciona 5% de Mg. Comparando la figura 10 con la 13 muestra que un aumento en la cantidad de agente humectante, incrementa la incorporación de partículas reforzantes. Las zonas oscuras que se observan en las fotografías indican huecos de partículas desprendidas, durante la preparación metalográfica.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

1. Es posible fabricar compósitos de matriz metálica a partir del método de inyección de un gas inerte (Argón).
2. Se puede obtener compósitos de matriz metálica sin la adición de un agente humectante, pero en el nivel de incorporación de partículas es bajo.
3. La adición de magnesio como agente humectante incrementa la incorporación de partículas reforzantes.
4. Los mayores niveles de incorporación de partículas se tienen en el tamaño de malla 500 y con el 5% de Mg.
5. En el 25% de las corridas que se llevan a cabo se presenta el asentamiento de las partículas reforzantes.
6. La figura 14 (Apéndice A), muestra una excelente adhesión entre la partícula y la matriz.
7. La inyección de gas inerte remueve las impurezas en el metal y probablemente disminuye el ángulo de contacto mejorando la humectabilidad.

SUGERENCIAS

1. Disponibilidad de un horno de resistencias para que la temperatura del baño metálico se mantenga constante durante mayor tiempo y con esto incrementar el tiempo de inyección de gas inerte para lograr una mayor incorporación de partículas reforzantes.
2. Disponer de un regulador para medir el flujo de gas inerte.
3. Pre calentamiento del gas inerte para disminuir el enfriamiento del baño metálico.

CAPÍTULO V.

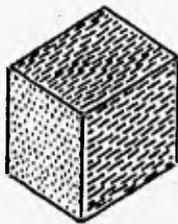
BIBLIOGRAFÍA

1. ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK
Volumen 1. Composites.
ASM International.
2. John W. Weeton., Dean M. Peters, Karin L. Thomas.
ENGINEERS' GUIDE TO COMPOSITE MATERIALS.
American Society for Metals.
3. Masounave, and F. G. Hamel.
FABRICATION OF PARTICULATES REINFORCED METAL COMPOSITES.
Proceedings of an international conference Montréal, Québec, Canada.
ASM International, 1990.
4. METALS HANDBOOK
Cast. metal - matrix composites.
Volumen 15, 9 th.
ASM International, U.S.A. 1988.
5. John V. Folts, Charles M. Blackmon.
METALS HANDBOOK, " Properties and selection: nonferrous alloys and special -
purpose materials ".
Metal - Matrix composites
Volumen 2, 10th. edition.
ASM. International, U.S.A. 1990.
6. REVISTA EDUCACIÓN QUÍMICA.
Volumen 3, Número 3, Julio 1992.
Pags. 214 y 215.
7. Soriano Martínez, Rafael Ricardo.
DESGASIFICACIÓN DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.
Tesis U.N.A.M., Facultad de Química, México, 1986.
Pags. 1 - 31.
8. Pierre Barrand, Robert Gadean. (Ingenieros del grupo Pechiney)
ENCICLOPEDIA DEL ALUMINIO.
El Aluminio.
Volumen 4, ediciones URMO, S.A. 1974.

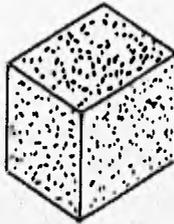
9. Sokol'skaya.
GASES IN LIGHT METALS.
Pergamon press, 1961.

10. Frank King.
Carlos Alberto García Ferrer.(versión en español)
EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.
Editorial. Limusa.

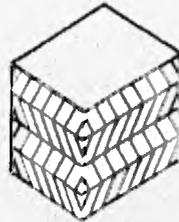
APÉNDICE A



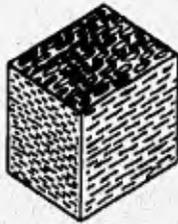
COMPÓSITO REFORZADO
CON FIBRAS



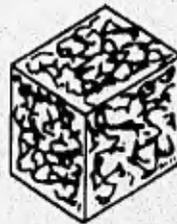
COMPÓSITO REFORZADO
CON PARTÍCULAS



COMPÓSITO LAMINAR



COMPÓSITO CON HOJUELAS



COMPÓSITO COMPACTO

FIG.1 ALGUNAS CLASES DE COMPÓSITOS

APÉNDICE A

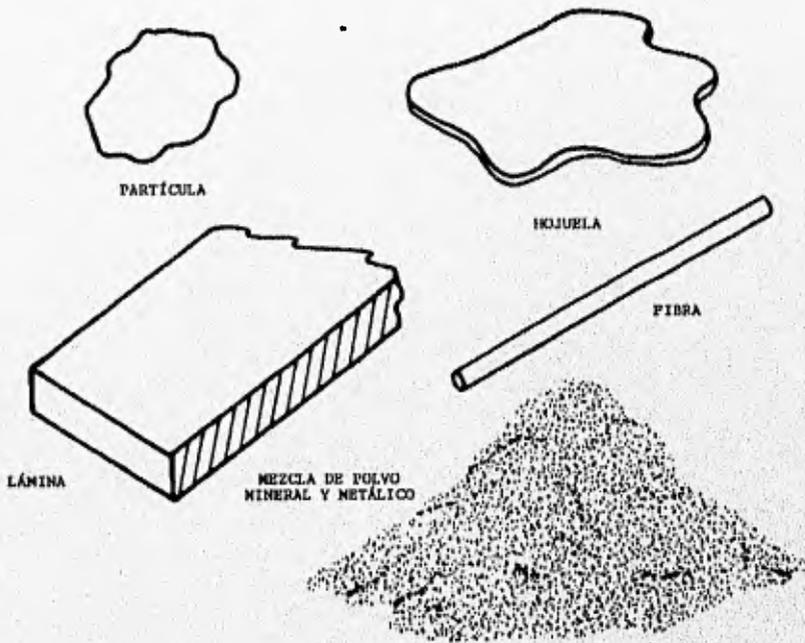


FIG.2. ALGUNAS FORMAS DE REFORZANTES UTILIZADOS EN COMPÓSITOS.

APÉNDICE A

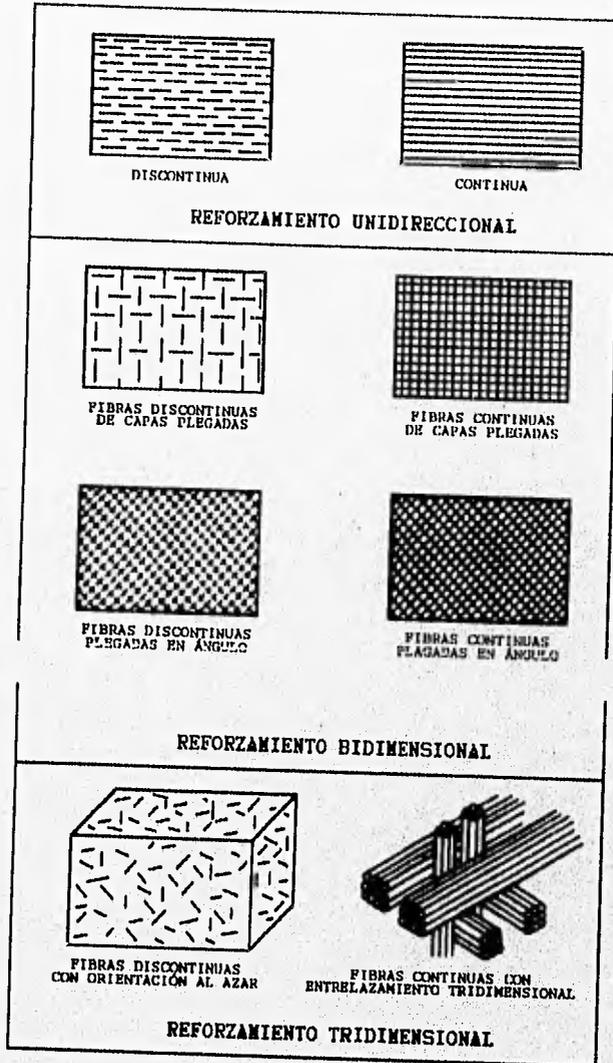


FIG. 3. POSIBLES ORIENTACIONES DE CONSTITUYENTES REFORZANTES

APÉNDICE A

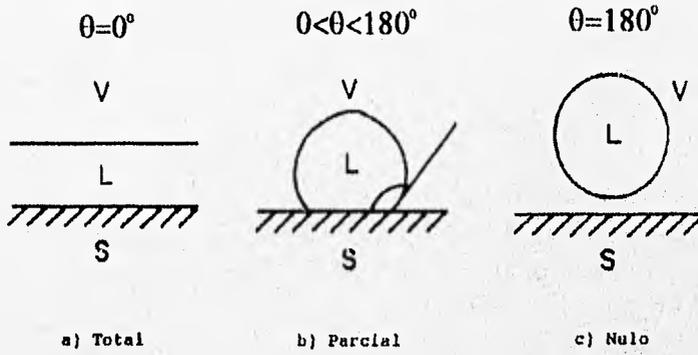


FIG. 4. HUMECTABILIDAD EN UN SISTEMA SÓLIDO, LÍQUIDO Y VAPOR.

APÉNDICE A

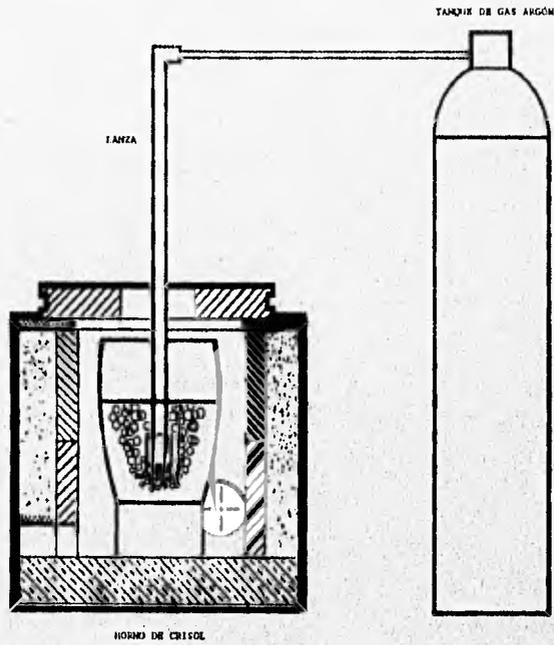


FIGURA 5. ESQUEMA DEL EQUIPO UTILIZADO.

APÉNDICE A

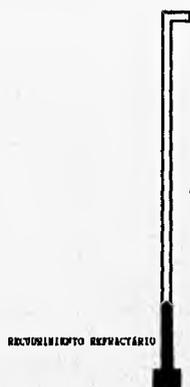


FIGURA 6. DISEÑO DE LA LANZA.



FIGURA 7. SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA LANZA INDICANDO EL DIÁMETRO DE LOS ORIFICIOS.

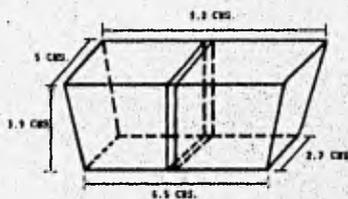


FIGURA 8. FORMA Y DIMENSIONES DE LOS LINGOTES OBTENIDOS, INDICANDO EL CORTE DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.

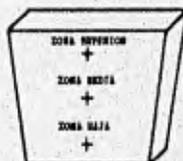


FIGURA 9. CORTE DE LA MUESTRA PRESENTANDO LAS TRES ZONAS DE ANÁLISIS.

APÉNDICE A

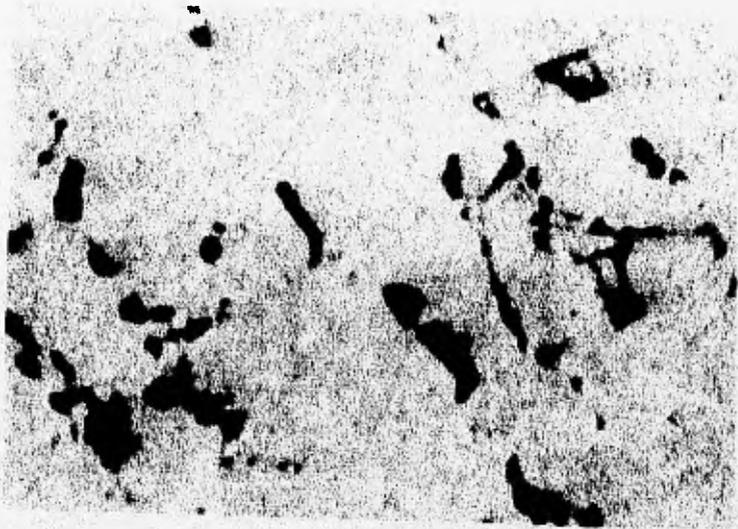


FIGURA 10. COMPÓSITO DE Al(A356)/ SiC(P) MALLA 500 CON 3% DE Mg A 300x.

APÉNDICE A



FIGURA 11. COMPOSITO DE Al(A356)/ SiC(P) MALLA 500 CON 3% DE Mg A 600x.

APÉNDICE A

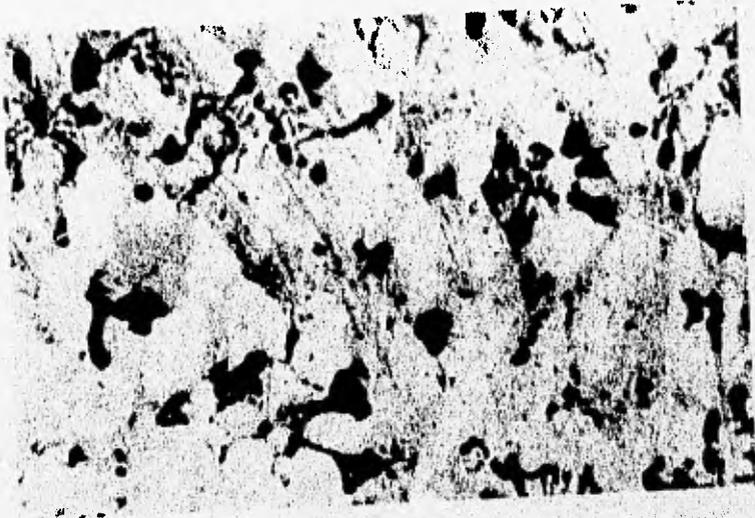


FIGURA 12. COMPÓSITO DE Al(A356)/ SiC(P) MALLA 500 CON 5% DE Mg A 150x.

APÉNDICE A

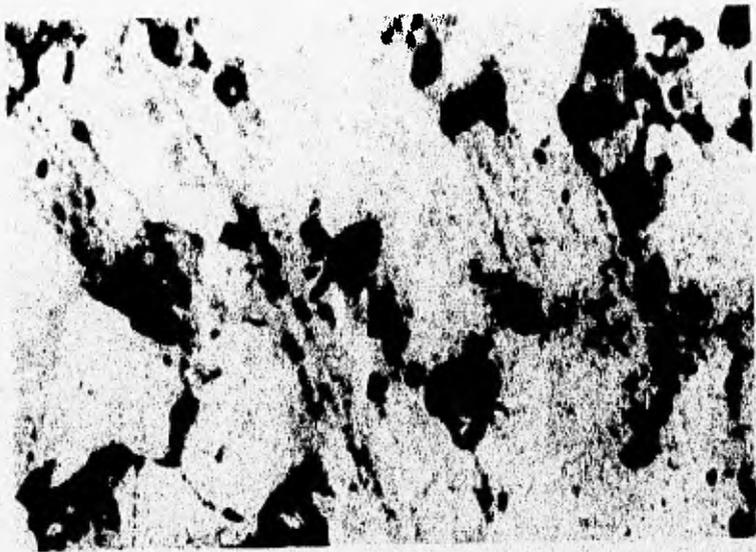


FIGURA 13. COMPÓSITO DE Al(A356)/ SiC(P) MALLA 500 CON 5% DE Mg A 300x.

APÉNDICE A

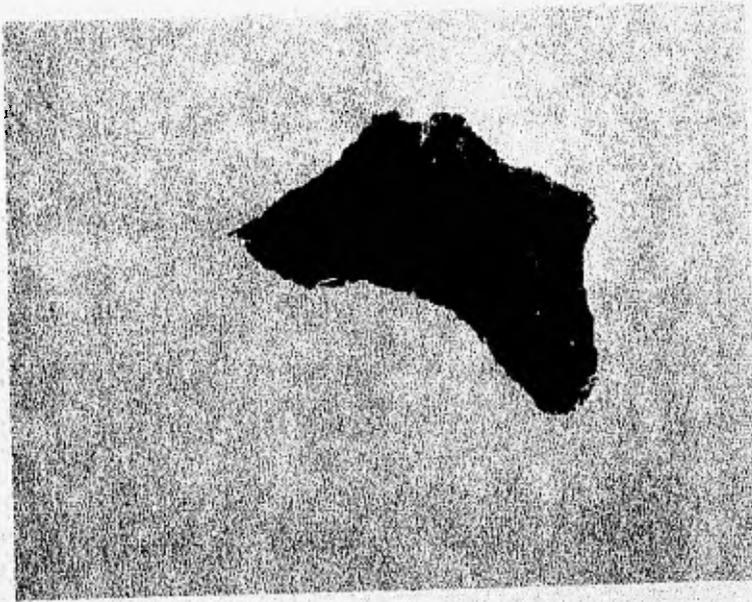


FIGURA 14. COMPÓSITO DE Al(A356)/ SiC(P) CON 3% DE Mg A 3000x.

APÉNDICE II

TABLA 2

APLICACIONES Y MÉTODOS DE FABRICACIÓN PARA COMPÓSITOS DE LOS SISTEMAS: CARBONO, BORO, FIBRAS DE CARBUROS / MATRICES METÁLICAS

APLICACIONES	MATRIZ	REFORZANTE	MÉTODO DE FABRICACIÓN
Aspas para turbinas.	Al	Borsic *	Metalurgia de polvos.
Componente resistente a altas temperaturas; partes aerospaciales.	Al-4.5Mn-0.6Mg-1.5Mg.	C recubierto con aleación de Ag - Al.	Metalurgia de polvos.
Componente resistente a altas temperaturas; partes aerospaciales.	Al.	Fibras continuas de B o Borsic * más fibras discontinuas de SiC β.	Prensado en caliente de la fase líquida.
Componente resistente a altas temperaturas; partes aerospaciales.	Aluminuros Ni/Co.	C (grafito, C amorfo).	Fibras de C recubiertas con Ni o Co; mezclándolas con polvo de Ni-Co-Al; prensadas en caliente.
Componente resistente a altas temperaturas; partes aerospaciales.	Al o aleación de Aluminio; Mg; Pb; Sn; Cu; Zn.	C recubierto con boruro de Ti, Zr, Hf.	Impregnación en fase líquida.
Componente resistente a altas temperaturas; partes aerospaciales.	Al.	C pretratada con aleación líquida de NaK.	Impregnación en fase líquida.
Componente resistente a altas temperaturas; partes aerospaciales.	Aleaciones de Al con elementos formadores de carburo, e.g., Ti, Zr, etc.	C.	Impregnación en fase líquida.
Componente resistente a altas temperaturas; partes aerospaciales.	Aleaciones Al-Cu.	SiC con alma de W.	Filamentos recubiertos con Cu; pasándolos a través de Al líquido.
Industria aerospacial.	Mg ó aleaciones de Mg.	C.	Prensado en caliente de placas alternantes de metal matriz y fibras; para promover la humectabilidad se agregan pequeñas cantidades de Ti, Cr, Ni, Zr, Hf o Si.
Hojas de turbina; recipientes a presión, placas de unión.	Mg ó aleaciones de Mg.	C.	Impregnación en fase líquida, la matriz de Mg contiene pequeñas cantidades de nitruro de Mg para aumentar la humectabilidad de las fibras.

* Boro-SiC.

APÉNDICE B

TABLA 2

(CONTINUACIÓN)

APLICACIONES	MATRIZ	REFORZANTE	MÉTODO DE FABRICACIÓN
Hojas de turbina; recipientes a presión, placas de unión.	Mg.	C recubierto con Ti.	Infiltración de la fase líquida; prensada en caliente de la fase líquida.
Industrias aeroespacial y nuclear.	Be o sus aleaciones con Ca, W, Mo, Fe, Co, Ni, Cr, Si, Cu, Mg, Zr.	SiC.	Impregnación al vacío con Be o Be líquido o plasma espedido de las fibras con Be y consolidación por procesos metalúrgicos.
Industria aeroespacial.	Al; Ti.	B más acero inoxidable; Borsic * más fibras de Mo.	Impregnación, espedido, etc.; combinación de fibras dúctiles y frágiles, que dan alta resistencia.
Aletas de compresor.	Ti o aleación de Ti-3Al-2.5V.	SiC.	Prensado en caliente de capas intercaladas de fibras y hojas de la matriz. Las fibras de SiC son previamente recubiertas con Zr para impedir la difusión.
Industria aeronáutica.	Aleaciones Ni-Co y Fe-Cr.	Carburos de Nb, Ta, W.	Solidificación unidireccional.
Materiales de alta resistencia y resistentes al calor, e.g., ductos de turbina, boquillas para cohetes.	Aleaciones base Cr.	SiC conteniendo 0.01-20% de carbono libre.	Metalurgia de polvos; el carbono libre reacciona con el Cr para formar carburo, aumentando la habilidad de unión.
Materiales de alta resistencia y resistentes al calor, e.g., ductos de turbina, boquillas para cohetes.	Co y sus aleaciones.	SiC conteniendo 0.01-30% de carbono libre.	Metalurgia de polvos o impregnación líquida; Formación de Carburos entre las fibras y la matriz de Co.
Materiales de alta resistencia y resistentes al calor, e.g., ductos de turbina, boquillas para cohetes.	Mo y sus aleaciones.	SiC conteniendo 0.01-20% de carbono libre.	Metalurgia de polvos.
Industria aeronáutica.	Ni y sus aleaciones.	C recubierto con carburos.	Impregnación líquida.

* Boro-SiC.

APÉNDICE B

TABLA 2

(CONTINUACIÓN)

APLICACIONES	MATRIZ	REFORZANTE	MÉTODO DE FABRICACIÓN
Materiales de alta resistencia y materiales de conductividad eléctrica.	Aleaciones de cobre.	C.	Metalurgia de polvos; las fibras son mezcladas con un lodo de polvo de cobre y 2% de un carburo (Ti, Cr, ...).
Industria aeronáutica.	Al, Cu, Sn, Pb, Ag, Zn, Mg.	C recubierto con boruro de Ti.	La matriz contiene elementos de aleación de Ti y B para prevenir el deterioro de la recubierta de Ti de las fibras.
Industria aeronáutica.	Metales con bajos puntos de fusión inferiores al del Ni.	C recubierto con Ni.	Impregnación líquida.
Industria aeronáutica.	Al, Mg, Ti, Ni.	C recubierto con SiO ₂ + SiC.	Impregnación líquida; Metalurgia de polvos.
Materiales resistentes a la abrasión.	Al, aleaciones Al-Si, Ag ó aleaciones de Ag, Cu y sus aleaciones.	Monocarburos de Ta, Ti, W.	Impregnación líquida.
Materiales resistentes a la abrasión.	Si.	SiC.	Impregnación líquida.
Conductores eléctricos, contactos, etc.	Ag o sus aleaciones.	SiC β.	Impregnación líquida.
Materiales abrasivos.	Si.	C.	Metalurgia de polvos.
Materiales abrasivos.	Ag	Whiskers de SiC.	Prensado en caliente (condiciones de gravedad cero).
Materiales abrasivos.	Mg, Pb, Sn, Cu, Al, Zn.	C recubierto con TiB.	Impregnación líquida.
Herramientas de corte.	Aleación de Cu-Ti-Sn.	B.	Sinterización de la fase líquida.
Materiales de soporte.	Bronce.	C.	Varios procesos.

APÉNDICE B

TABLA 7

NÚMERO DE PAQUETES Y SU EQUIVALENTE EN % VOLUMEN ADIACIONADO.

TAMAÑO DE MALLA	SIN HUMECTANTE		CON 3% DE Mg		CON 5% DE Mg	
	PAQUETES ADICIONADOS CON 10 gr. CU	% EN VOL.*	PAQUETES ADICIONADOS CON 10 gr. CU	% EN VOL.*	PAQUETES ADICIONADOS CON 10 gr. CU	% EN VOL.*
240	3	1.5	2	1.0	4	3.0
320	2	1.0	4	2.0	4	3.0
360	3	1.5	3	1.5	4	3.0
500	3	1.5	3	1.5	4	3.0

* Éstos valores muestran el porcentaje de adición de partículas al baño metálico, pero esta cantidad no indica la incorporación total de dichas partículas.

APÉNDICE B

TABLA 8

RESULTADOS OBTENIDOS SIN LA ADICIÓN DE UN HUMECTANTE.*

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²). x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	240	28	80	1.60	5.00	1.10	3.90
MEDIA	240	15	46	0.37	1.80	0.30	1.30
BAJA	240	24	43	1.82	3.04	1.30	2.30
	PROMEDIO	22.3	56.3	1.26	3.28	0.90	2.50
	(p.l.+u.l.)/2	39.33		2.27		3.4	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²). x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	320	15	16	0.25	0.58	0.20	0.40
MEDIA	320	22	11	0.81	0.23	0.60	0.17
BAJA	320	8.6	13.4	0.35	0.22	0.24	0.14
	PROMEDIO	15.2	13.46	0.47	0.34	0.34	0.23
	(p.l.+u.l.)/2	14.33		0.41		0.28	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²). x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	360	48	11.6	1.86	0.38	1.40	0.30
MEDIA	360	45	12.7	1.63	0.31	1.24	0.22
BAJA	360	30.5	16.3	1.15	0.38	0.85	3.00
	PROMEDIO	41.2	13.5	1.54	0.35	1.16	1.17
	(p.l.+u.l.)/2	27.3		0.95		1.16	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²), x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	500	56	49	2.02	1.71	1.3	1.30
MEDIA	500	46.2	57	1.01	1.24	0.70	0.90
BAJA	500	58.6	60.3	1.17	1.28	0.65	0.92
	PROMEDIO	53.6	55.4	2.10	1.41	0.88	1.04
	(p.l.+u.l.)/2	54.5		1.75		0.96	

p.l. = primer lingote.

u.l. = último lingote.

* Los resultados para todas las corridas se obtienen bajo las siguientes condiciones:

Temperatura de trabajo (800 °C).

Temperatura de vaciado (650 °C).

Tiempo de inyección con gas inerte (8 min.).

APÉNDICE B

TABLA 9

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ADICIÓN DE 3% DE Mg.*

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²). x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	240	20	75.5	0.29	1.92	0.21	1.56
MEDIA	240	38	43	1.03	1.50	0.83	1.10
BAJA	240	16	39	0.15	1.11	0.13	0.84
	PROMEDIO	24.7	52.5	0.49	1.51	0.39	1.16
	(p.l.+u.l)/2	38.6		1.00		0.78	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²). x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	320	119	90	2.92	1.31	2.40	1.00
MEDIA	320	142	90	3.72	1.53	2.62	1.10
BAJA	320	53	13	0.79	0.20	0.90	0.14
	PROMEDIO	104.7	64.3	2.47	1.01	5.92	0.74
	(p.l.+u.l)/2	84.5		1.74		3.33	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²). x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	360	168	46	4.61	2.18	3.70	1.74
MEDIA	360	165	152	4.60	5.44	3.50	3.80
BAJA	360	60	207	0.90	4.20	0.60	3.24
	PROMEDIO	131	135	3.37	3.94	2.60	2.92
	(p.l.+u.l)/2	133		3.65		2.76	

ZONA.	TAMANO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²), $\times 10^{-3}$		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	500	143	94	4.87	2.59	3.36	1.74
MEDIA	500	271	80	10.14	1.86	7.70	1.34
BAJA	500	215	62	6.33	9.93	5.00	0.80
	PROMEDIO	210	78.7	7.11	4.79	5.35	1.29
	(p.l.+u.l.)/2	144.2		6.0		3.32	

p.l. = primer lingote.

u.l. = último lingote.

* Los resultados para todas las corridas se obtienen bajo las siguientes condiciones:

Temperatura de trabajo (800 °C).

Temperatura de vaciado (650 °C).

Tiempo de inyección con gas inerte (8 min.).

APÉNDICE B

TABLA 10

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ADICIÓN DE 5% DE Mg.^a

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²), x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	240	117	85	2.34	1.61	1.40	1.20
MEDIA	240	134	36	2.75	0.54	1.97	0.35
BAJA	240	160	31	3.73	0.63	2.60	0.50
	PROMEDIO	137	50.6	2.94	0.92	1.99	0.68
	(p.l.+u.l.)/2	93.8		1.93		1.33	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²), x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	320	76	30	1.13	0.40	0.90	0.30
MEDIA	320	74	49	1.65	0.78	1.10	0.63
BAJA	320	67	78	1.00	1.27	0.70	1.14
	PROMEDIO	72.3	52.3	1.26	0.81	0.90	0.69
	(p.l.+u.l.)/2	62.3		1.04		0.80	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²), x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	360	76	80	1.34	1.78	0.91	1.70
MEDIA	360	83	183	1.74	4.33	1.26	3.30
BAJA	360	77	138	1.71	1.94	1.26	1.42
	PROMEDIO	78.6	133.6	1.59	2.68	1.14	2.14
	(p.l.+u.l.)/2	106.2		2.13		1.64	

ZONA.	TAMAÑO DE MALLA.	NÚMERO DE PARTÍCULAS INCORPORADAS.		ÁREA DE PARTÍCULAS (mm ²). x10 ⁻³		% ÁREA DE PARTÍCULAS.	
		p.l.	u.l.	p.l.	u.l.	p.l.	u.l.
SUPERIOR	500	28.3	110	10.02	2.29	7.4	1.87
MEDIA	500	184	136	5.48	2.67	4.16	2.16
BAJA	500	156	162	3.62	4.03	2.43	3.01
	PROMEDIO	207.6	136	6.37	2.99	4.66	2.34
	(p.l.+u.l.)/2	171.8		4.70		3.50	

p.l. = primer lingote.

u.l. = último lingote.

♦ Los resultados para todas las corridas se obtienen bajo las siguientes condiciones:

Temperatura de trabajo (800 °C).

Temperatura de vaciado (650 °C).

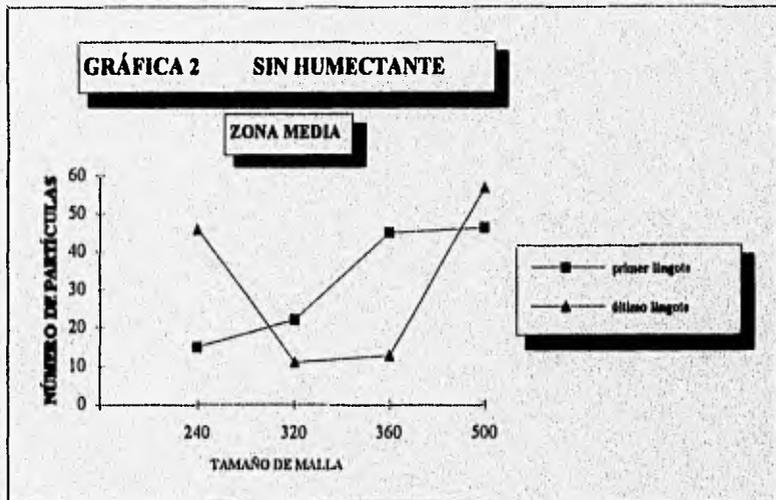
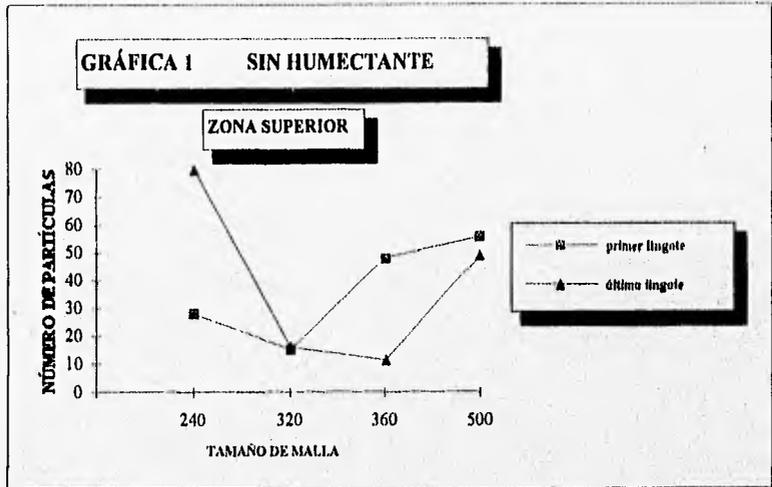
Tiempo de inyección con gas inerte (8 min.).

APÉNDICE B

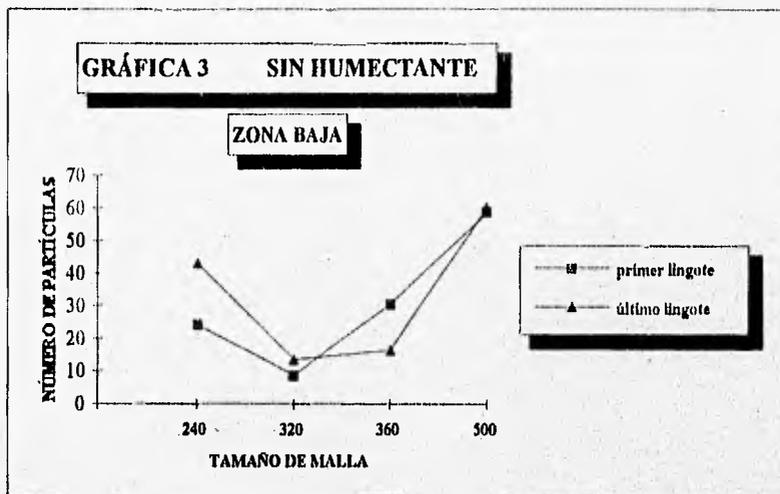
TABLA 11

TAMAÑO DE MALLA		DISTRIBUCIÓN HOMOGÉNEA POR PIEZA	DISTRIBUCIÓN NO HOMOGÉNEA POR PIEZA
SIN HUMECTANTE			
240	p.l.		X
	u.l.		X
320	p.l.		X
	u.l.	X	
360	p.l.		X
	u.l.	X	
500	u.l.	X	
	p.l.	X	
CON 3% DE Mg.			
240	p.l.		X
	u.l.		X
320	p.l.		X
	u.l.		X
360	p.l.		X
	u.l.		X
500	u.l.		X
	p.l.		X
CON 5% DE Mg.			
240	p.l.		X
	u.l.		X
320	p.l.		X
	u.l.		X
360	p.l.	X	
	u.l.		X
500	u.l.		X
	p.l.		X

APÉNDICE C



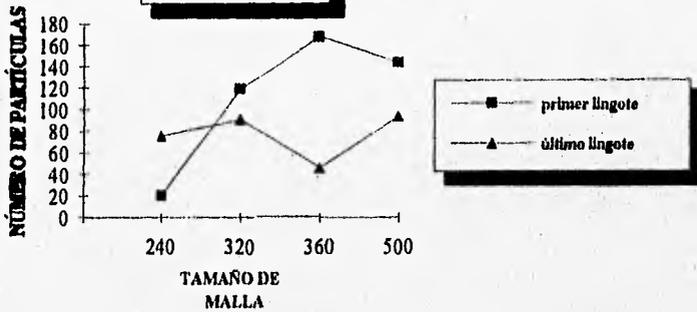
APÉNDICE C



APÉNDICE C

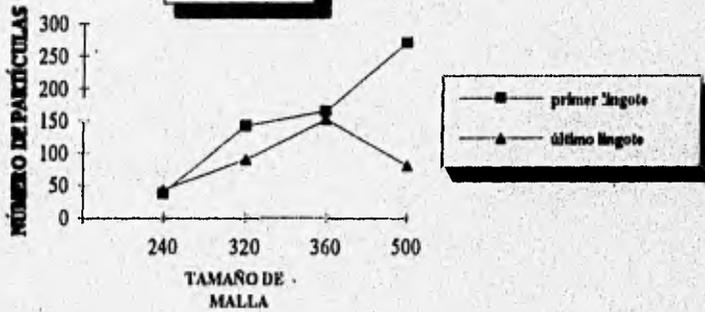
GRÁFICA 4 CON 3% DE Mg

ZONA SUPERIOR

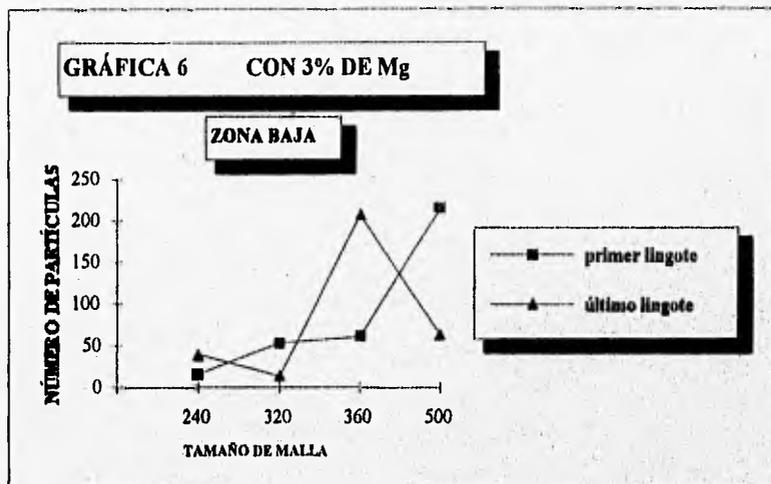


GRÁFICA 5 CON 3% DE Mg

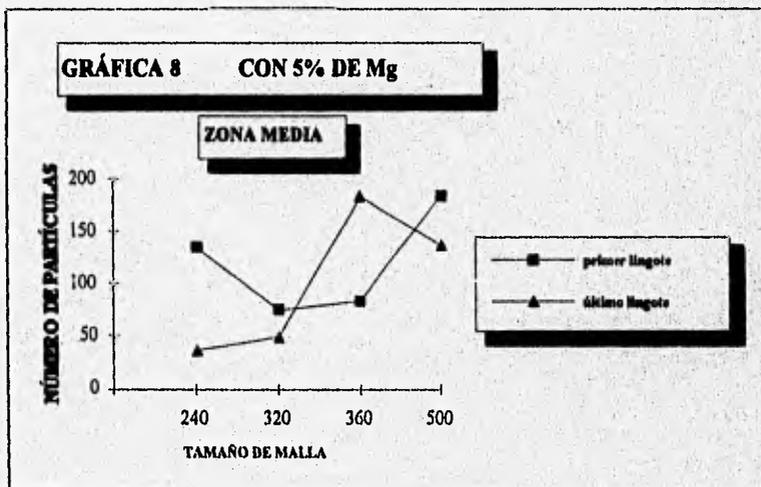
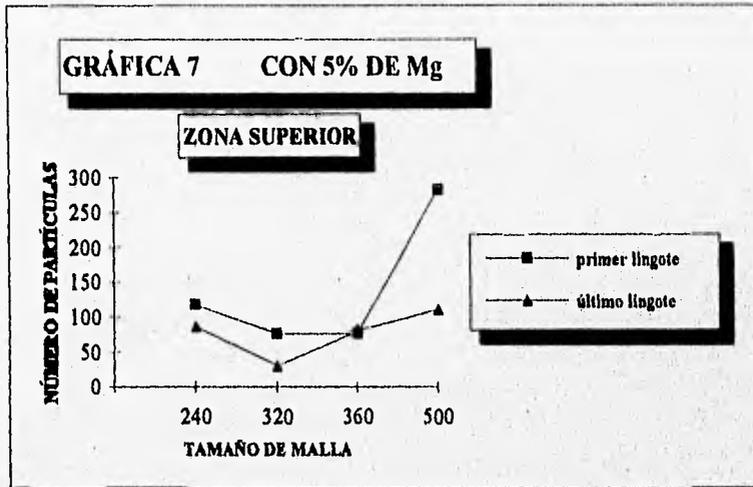
ZONA MEDIA



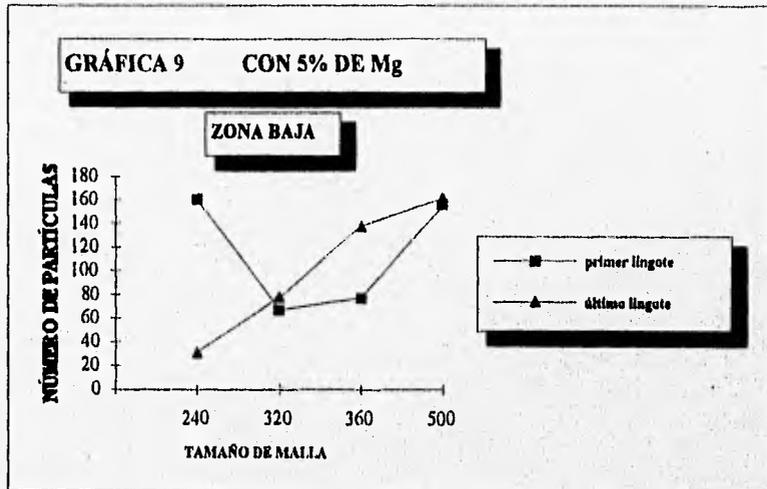
APÉNDICE C



APÉNDICE C

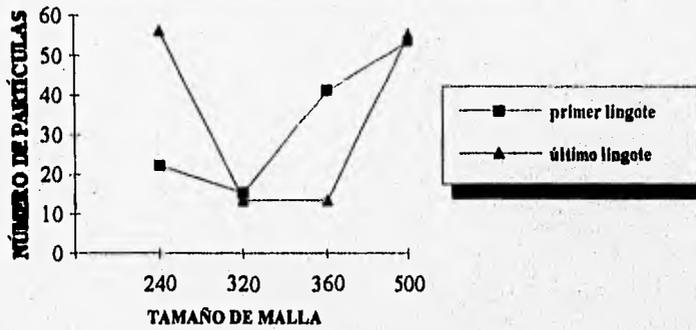


APÉNDICE C

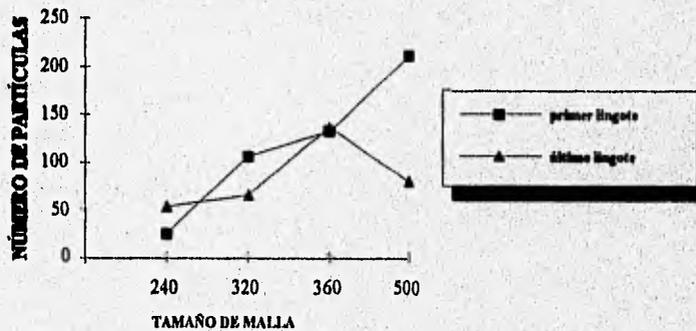


APÉNDICE C

GRÁFICA 10 SIN HUMECTANTE



GRÁFICA 11 CON 3% DE Mg



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

GRÁFICA 12 CON 5% DE Mg

