



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“Comportamiento de las Variables: Velocidad de Agitación  
y Tiempo de Agitación en la manufactura  
de una pieza prototipo de compuesto Al-7Mg-10% Vol.  
SiC<sub>p</sub> por proceso de fundición.”**

**Tesis**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**Ingeniero Químico Metalúrgico**

**PRESENTA:**

**JUAN CARLOS HIDALGO JUÁREZ**

**CDMX.**

**2018**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Jurado Asignado:

Presidente	Prof.: José Alejandro García Hinojosa
Vocal	Prof.: Adrián Manuel Amaro Villeda
Secretario	Prof.: Luis Darío Escobar Mejía
1 er. Suplente	Prof.: Víctor Antonio Aranda Villada
2 do. Suplente	Prof.: Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Facultad de Química, UNAM, Edificio "D", Departamento de Metalurgia

Asesor: \_\_\_\_\_

Dr. José Alejandro García Hinojosa

Supervisor Técnico: \_\_\_\_\_

M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

Sustentante: \_\_\_\_\_

Juan Carlos Hidalgo Juárez

## Dedicatorias

A mis padres por toda la paciencia que me han tenido, su dedicación hacia nosotros sus hijos, así como a las nuevas generaciones de nietos que están consintiendo.

A mis compañeros de seminarios, salones, aulas y laboratorios, que, aunque fue fugas en ocasiones nuestra relación, fue parte de mi convivencia con ustedes en la universidad.

A mis amigos que a lo largo de todos estos años han podido aguantarme y sobrellevarme, malditos, se les aprecia.

A mis profesores, que sin su guía no podría haber adquirido los conocimientos que ahora plasmo, en especial, al área de fundición y Agustín, por siempre dar con una sonrisa la respuesta que necesitaba a cada una de mis dudas.

En especial para ti Angélica, que sin ti esto no sería posible, porque cada día me has recordado que termine este ciclo, para continuar con otros a tu lado.

Gracias también a ti lector, por darte una pausa en tu vida y mirar un pedazo de la mía.

Introducción	6
Hipótesis	8
Objetivo	8
Capítulo I Antecedentes y definición de los materiales compuestos	9
1.1 Materiales compuestos	9
1.2 Compuesto de matriz metálica	10
1.2.1 Matrices Utilizadas para la Fabricación de Materiales Compuestos de Matriz Metálica	11
1.2.2 Refuerzos empleados en Materiales Compuestos de Matriz Metálica	13
1.2.2.1 Fibras Continuas	15
1.2.2.2 Partículas	16
1.2.2.3 Fibras Discontinuas	16
1.2.3 Interface Matriz-Refuerzo	16
1.3 Materiales compuestos con matriz de aluminio y sus aleaciones (Al-Ms)	18
1.3.1 Aluminio reforzado con partículas	19
1.4 Propiedades de los materiales compuestos	20
1.5 Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica	21
1.6 Métodos de fabricación	22
1.6.1 Fabricación por método de Vórtice.	24
Capitulo II Fundamentos Teóricos	27
2.1 Proceso de fundición de compositos colados de matriz metálica	27
2.1.1 Modelo de la pieza y fabricación del molde de arena	28
2.1.2 Proceso de moldeo en verde y mezcla de moldeo	29
2.2 Diseño de sistema de colada	30
2.3 Sistemas de colada para MMC's	36
2.4 Fluidez	37
2.5 Humectabilidad	38
2.6 Procesos de solidificación	40
2.7 Flotación y asentamiento de partículas	41
2.8 Resistencia al desgaste	42
2.9 Evaluación de compositos	47

2.10 Diseño de experimentos	49
2.10.1 Planificación de un experimento	51
2.10.3 Condiciones de repetitividad y condiciones de reproducibilidad	54
Capítulo III Desarrollo experimental	55
3.1 Selección de la pieza prototipo	55
3.2 Material original de la pieza a remplazar	56
3.3 Clasificación de la materia prima	58
3.4 Fabricación de la pieza de fundición	60
3.4.1 Mezcla de moldeo	60
3.4.2 Diseño de sistemas de colada	61
3.4.3 Modelo y placa modelo	62
3.4.4 Equipo	64
3.5 Diseño experimental	65
3.6 Fabricación del composito Al-7%Mg-10% Vol SiC <sub>p</sub>	65
Capítulo IV Resultados y discusión	67
4.1 Evaluación visual	67
4.2 Conteo de partículas en las piezas	68
Capítulo V Conclusiones	75
Bibliografía	77
Anexos	78

## INTRODUCCIÓN

La industria de hoy en día exige ciertas características específicas de las piezas y productos para un uso particular. Un ejemplo de lo anterior es la industria Aeroespacial donde se busca reducir el peso de las aeronaves para un menor consumo de turbosina, generando así un ahorro del combustible y elevando la vida útil de las aeronaves, más en particular de las turbinas, haciendo que estas resistan mayores temperaturas de trabajo.

Unas de las aleaciones más utilizadas son de aluminio-litio y la aluminio-magnesio-escandio, esta última resistente a la corrosión, maleabilidad y baja densidad.

Los MMC's (Materiales Compuestos de Matriz Metálica) forman un grupo de materiales de los más estudiados en las tres últimas décadas. Una de las causas por la que se desarrollaron los materiales compuestos es la obtención de propiedades imposibles de conseguir con un material monolítico. El diseño óptimo de un componente demanda un conjunto de propiedades como, por ejemplo, una alta rigidez o resistencia con mínimo peso o mínimo coste; o bien en el diseño de propiedades termo-mecánicas una máxima transferencia de calor junto con una mínima distorsión térmica, o todas estas propiedades juntas. Por ello, el mejor material es el que posee el perfil de propiedades que más se acerca a las definidas por el diseño.

Matrices base Al-Si de composición hipo eutéctica han sido ampliamente estudiadas, encontrándose una fuerte relación entre el contenido de silicio en la matriz y la reacción interfacial de refuerzo con SiC para evitar la formación carburo de aluminio. Debido a la reacción interfacial se evita utilizar contenidos de Si mayores al 8 % o agentes que mejoran la humectabilidad y reducen la reacción interfacial, como lo son el Sr y el Mg, este último en niveles máximos del 3 %. Matrices de más reciente estudio son las de la serie 5xx.x que contienen altos porcentajes de Mg y son reforzadas con SiC. Dentro de esta serie una de las aleaciones Al-Mg que está teniendo amplia aplicación en la A535 o Almag 35, la cual contiene en promedio 7 % Mg. Una de sus características más importantes es la elevada reactividad asociada al contenido de Mg, perderse por oxidación y generar un alto nivel de inclusiones. Esta característica se ve magnificada cuando se utiliza como matriz en el proceso del vórtice en hornos abiertos al medio ambiente para fabricar composites por colada, por lo que se prefieren los procesos de manufactura en estado semi-sólido. Algunos autores mencionan mejoras en la

compatibilidad matriz-cerámico asociadas a la mejora en humectabilidad y mayor adhesión matriz-cerámico, sin embargo, el uso de técnicas de fabricación que son de menor costo han sido poco exploradas.

Considerando lo anterior, esta tesis está encaminado a evaluar la respuesta de una aleación comercial A535 o Almag 35 como matriz y reforzada con 10 % en volumen de SiC<sub>p</sub>, sobre la distribución e incorporación del reforzante cuando se producen piezas coladas en molde de arena en verde aplicando el método del vórtice.



## Hipótesis

- El empleo del método de vórtice para la fabricación del composito, permitirá una homogenización de las partículas en la pieza.
- Se espera obtener la composición química ansiada.
- Se encontrarán los parámetros correctos de velocidad de agitación, como de tiempo de agitación para la óptima fabricación del composito.

## Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo:

- Evaluar la respuesta que presenta una aleación comercial A535 o conocida también como Almag 35, como matriz y reforzada con 10 % en volumen de SiC<sub>p</sub>, sobre la distribución e incorporación del reforzante en una pieza prototipo colada en molde de arena en verde, usando el método del vórtice para la fabricación del composito.

Las variables a tratar su respuesta son:

- 1) Velocidad de agitación
- 2) Tiempo de agitación

La respuesta se observará primero visualmente y luego al cuantificar las partículas y homogeneidad que presente cada pieza, a través del análisis de imágenes de las microestructuras.

# Capítulo 1

## 1. Antecedentes y definición de materiales compuestos

En esta parte del trabajo se da una breve explicación sobre que “son” y donde se originaron, así como aplicaciones y métodos de fabricación.

### 1.1 Materiales Compuestos

Definición:

Se entiende por materiales compuestos aquellos formados por dos o más materiales con diferentes propiedades físicas, químicas y mecánicas, sin que se produzca reacción química entre ellos. En todo material compuesto se distinguen dos componentes:

- ✓ La *matriz*, componente que se presenta en fase continua, actuando como ligante.
- ✓ El *refuerzo*, en fase discontinua, que es el material con alta dureza y/o alta resistencia.

Ejemplos sencillos y conocidos por todos de materiales compuestos son el hormigón que es cemento + acero y los neumáticos, que son polímero + alambre de acero.

Clasificación

Una clasificación en base al tipo de matriz, es el siguiente:

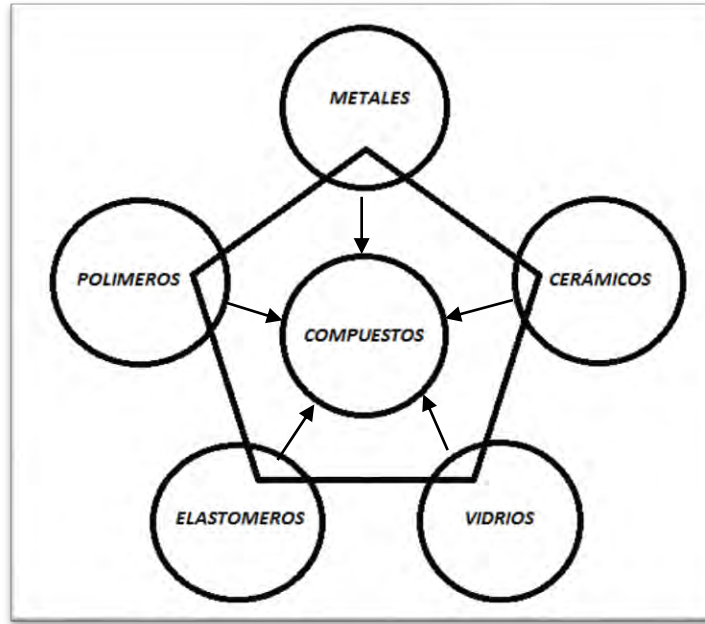
- Materiales compuestos de matriz metálica o MMC (*metal matrix composites*).
- Materiales compuestos de matriz cerámica o CMC (*ceramic matrix composites*).
- Materiales compuestos de matriz de carbón.
- Materiales compuestos de matriz orgánica o RP (*reinforced plastics*) y dentro de estos, son los más utilizados:

- Los CFRP (*carbon fiber reinforced plastics*) o materiales compuestos de fibra de carbono con matriz polimérica,
- Los GFRP (*glass fiber reinforced plastics*) o materiales compuestos de fibra de vidrio con matriz polimérica. (1)

## 1.2. Compuestos de Matriz Metálica

Bajo el epígrafe “material compuesto de matriz metálica (MMC)”, podrían incluirse dos grandes familias de materiales: aquellos materiales destinados para aplicaciones de corte y desgaste (carburos cementados, aceros reforzados con carburos, etc.) y aquellos materiales de alta rigidez, resistencia y modulo específico, normalmente destinados para aplicaciones estructurales en la industria automotriz o aeronáutica. El primer grupo de materiales se basa en matrices de metales de transición (Co, Fe, Ni) y el segundo en aleaciones ligeras (base Al, Ti, Mg). Pese a que, en buena ortodoxia, ambas familias caen bajo la etiqueta de los MMC’s en la mayoría de tratados y revisiones únicamente se considera como tales los pertenecientes a esta última familia, considerando a casi todos los materiales del primer grupo bajo la definición de “metal duro”.

En principio, se pueden combinar dos materiales cualesquiera para formar un compuesto (metales, cerámicas, polímeros, etc.), la **Figura 1** muestra las diferentes clases de materiales que pueden formar un material compuesto. La fabricación se determina en función de lo atractivas que sean las propiedades que presenta.



*Figura 1 Las diferentes clases de materiales que pueden formar un material compuesto (2)*

A la hora de fabricar un material compuesto se debe trabajar, de forma simultánea, en tres planos distintos el índice de funcionamiento, que determina que combinación de propiedades del material puede maximizar sus prestaciones mecánicas; los gráficos de selección de materiales, en los que las propiedades de distintos materiales junto a sus índices de funcionamiento se pueden seleccionar y, por último, el uso de límites para definir el entorno de propiedades accesibles por un sistema compuesto.

### **1.2.1. Matrices Utilizadas para la Fabricación de Materiales Compuestos de Matriz Metálica**

Las funciones que tiene la matriz metálica en los materiales compuestos son las siguientes:

- Proteger las fibras o partículas del ambiente exterior (aire, humedad, etc.).
- Propiciar la adherencia de los elementos que constituyen el refuerzo: unir las fibras entre ellas, pero separarlas para evitar la transmisión de grietas a través del compuesto, sobre todo en el caso de un refuerzo con fibras continuas, porque el esfuerzo recorrería a toda la fibra.

- Distribuir y transmitir las cargas, de los elementos de refuerzo, en general, para que la transmisión sea óptima, la matriz debe deformarse plásticamente para tensiones netamente inferiores a las que está sometido el compuesto, y que su deformación sea inferior a la correspondiente a la rotura. La matriz no deberá tener un módulo de elasticidad demasiado elevado.
- Por último, las condiciones de utilización particulares del compuesto pueden exigir que la matriz presente buena resistencia a la corrosión o a la oxidación, o a una buena resistencia mecánica en caliente.

Es prácticamente imposible nombrar todos los metales o aleaciones que se emplean en la fabricación de MMC's, bien en estado de desarrollo o bien industrialmente. Así, las aleaciones más comúnmente empleadas en materiales compuestos de matriz metálica son las ligeras: del aluminio (principalmente de las series 2XX.X, 3XX.X, 4XX.X y 5XX.X). El titanio y sus aleaciones (aunque en algunos casos presentan el problema de reacción química con el refuerzo durante el procesado a temperaturas elevadas, lo que deteriora las propiedades del compuesto obtenido) y el magnesio y sus aleaciones (que presentan graves problemas de oxidación). Destacar que, en los últimos años, la posible utilización de inter-metálicos y súper aleaciones como matrices está siendo objeto de intensas investigaciones. El mayor inconveniente que presentan estos materiales para su uso es la baja ductilidad.

En la **Tabla 1** se muestran propiedades relativas entre distintos metales ligeros empleados habitualmente, como matrices en MMC's.

**Tabla 1** Propiedades relativas entre diferentes materiales ligeros, empleados como matriz de materiales compuestos. (2)

	Al	Mg	Ti		
Número Atómico	13	12	22		
Estructura Cristalina	CFC	HC	HC ↓ 882°C CC		
<b>Propiedades Físicas</b>					
Punto de Ebullición (°C)	2467	1090	3287		
Punto de -fusión (°C)	650	650	1660		
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.7	1.7	4.5		
<b>Propiedades Eléctricas</b>					
Conductividad Eléctrica (% IACS)	64	38	4		
Resistividad Eléctrica (μΩ*cm)	2.67	4.2	42		
<b>Propiedades Térmicas</b>					
Calor Latente de Fusión (J g <sup>-1</sup> )	388	362	365		
Coefficiente de Expansión Lineal (x10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup> )	23.5	26	8.9		
Calor Especifico a 25° C (J K <sup>-1</sup> Kg <sup>-1</sup> )	900	1020	523		
Conductividad Térmica 0--->100 °C	237	156	21.9		
<b>Propiedades Mecánicas</b>					
Tipo de Material	Blando	Duro	Blando	Duro	Recocido
Dureza (HV)	21	35-48	30-35	35-45	60
Coefficiente de Poisson	0.345		0.291		0.361
Resistencia a la Tracción (MPa)	50-90	130-195	185	232	230-460
Limite Elástico (MPa)	10-35	110-170	69	100	140-250
Módulo Elástico (GPa)	70.6		44.7		120.2

### 1.2.2. Refuerzos empleados en Materiales Compuestos de Matriz Metálica

Las funciones que tiene un material de refuerzo en MMC's son las siguientes:

- Soportar las tensiones que se ejercen sobre el compuesto.
- Aumentar las características mecánicas de la matriz, su dureza y resistencia al desgaste (sobre todo en el caso del refuerzo con partículas).
- Mitigar los fallos de estas características con el aumento de temperaturas.
- Frenar o detener la propagación de grietas a través del compuesto y el desarrollo de las fisuras.

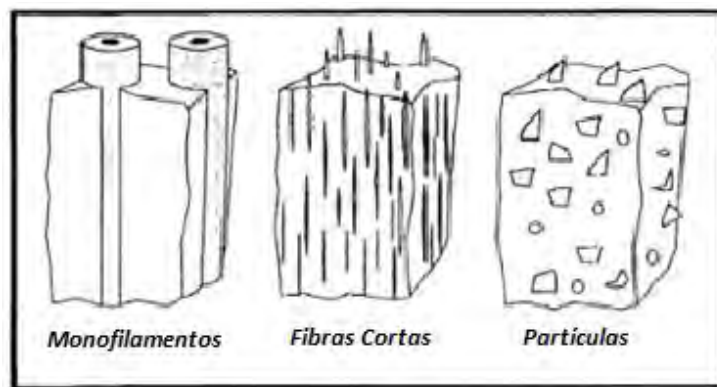
Las fases de refuerzo se pueden clasificar en tres categorías; fibras continuas, fibras cortas y partículas. Generalmente, se habla de la gran mejora que, desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, pueden obtenerse mediante fibras continuas, reforzando en la dirección de la tensión aplicada, mientras que con whiskers (fibras discontinuas) y partículas, se experimenta una disminución de resistencia, pero se tiene una gran isotropía en el material.

En la **Tabla 2** podemos comparar el efecto que tiene sobre las propiedades de una misma matriz distintos tipos de refuerzo.

**Tabla 2** Propiedades de Materiales compuestos de diferentes matrices con refuerzos continuos y discontinuos. (2)

Matriz	Tipo de refuerzo	Fración (% vol.)	Resistencia a la tracción longitudinal (Mpa)	Módulo Elástico longitudinal (GPa)
Al-7Zn	Fibra de grafito	40	90	190
Al 2024	Fibra de boro	60	1500	270
Al 6061	Fibra de SiC	50	1500	205
Al 2024	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50	450	175	
Al 6061	Whiskers de SiC	15	480	100
Al 6061	Partícula de SiC	15	370	100
Ti-6Al-4V	BORSIC 40	900	205	
Ti-6Al-4V	SCSC-635	1600	240	
Ti-6Al-4V	Sigma SM1240	35	1550	230
Mg	Fibra de grafito	40	560	230
Mg	Fibra de SiC	50	1300	230

En la **Figura 2** se muestra un esquema de diferentes tipos de refuerzo utilizados en materiales compuestos de matriz metálica.



**Figura 2** Esquema de varios tipos de materiales compuestos de matriz metálica, reforzados con fibras continuas, whiskers y partículas. (2)

Como es el material de refuerzo el que soporta las tensiones principales, las investigaciones suelen centrarse en fibras o partículas de excelentes características mecánicas (en particular elevada resistencia a la tracción y/o alto módulo de elasticidad), y que conservan las propiedades mecánicas, junto con la estabilidad química y la compatibilidad con la matriz a temperatura elevada.

#### **1.2.2.1. Fibras Continuas**

Las fibras metálicas se emplean poco a causa de su posible ataque químico por parte de la matriz, los cambios estructurales por la elevación de temperatura (en particular la recristalización), la posible disolución de la fibra en la matriz y la relativamente fácil oxidación de las fibras de metales refractarios (W, Mo, Nb, etc.). Por ello, se han desarrollado con gran profusión las fibras cerámicas, que presentan numerosas ventajas no se disuelven en la matriz, su resistencia se mantiene a temperaturas elevadas, su módulo de elasticidad es alto, no se oxidan (con carácter general) y tienen baja densidad. Una de las primeras fibras continuas utilizada como refuerzo fue BORSIC, que está constituida por fibras de boro formadas sobre un alma de wolframio y con un revestimiento de carburo de silicio. Las fibras más empleadas como refuerzo son las de boro, alúmina y carburo de silicio.

#### **1.2.2.2. Partículas**

El refuerzo de menor coste económico es la partícula, y es el que nos permite obtener una mayor isotropía de propiedades. El control del tamaño y la pureza son los principales requisitos para su empleo en materiales compuestos. Refuerzos típicos en forma de partículas son la mica, óxidos (como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ), carburos (como el  $\text{TiC}$  o el  $\text{B}_2\text{C}$ ) y nitruros ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Los materiales más empleados son el grafito, la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el carburo de silicio ( $\text{SiC}$ ). En los últimos años, se han empezado a utilizar como partículas de refuerzo inter metálicos, principalmente de los sistemas Ni- Al y Fe-Al.



### 1.2.2.3. Fibras Discontinuas (Whiskers)

Las fibras discontinuas utilizadas normalmente para la producción de MMC's son mezclas de óxidos, comercializándose distintos diámetros, entre 3 y 5  $\mu\text{m}$ . Las fibras discontinuas conducen a propiedades inferiores que las fibras continuas, por lo que su coste se reduce.

Los whiskers tienen diámetros menores de 1  $\mu\text{m}$  y pueden tener una longitud de hasta 100  $\mu\text{m}$ , por lo que puede considerárselos como refuerzos discontinuos. Los principales whiskers disponibles comercialmente son los de SiC y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. El hecho de que normalmente se obtengan en forma mono cristalina, además de su pequeño diámetro, conduce a que tengan pocos defectos de fractura interna, y como consecuencia presentan mayores niveles de resistencia que otras fibras discontinuas, propiciándose su mayor uso. Recientemente, este crecimiento en su utilización se ha visto restringido en algunos países a causa de su carácter cancerígeno.

### 1.2.3. Interfase Matriz-Refuerzo

La interfase matriz-refuerzo condiciona las propiedades mecánicas finales de los compuestos. La transmisión y reparto de las cargas aplicadas al material compuesto se efectúa por la unión existente entre matriz y refuerzo si la unión no es buena, la matriz soportará la mayor parte de las tensiones y la función de los refuerzos será nula. La interfase es una región de composición química variable, que constituye la unión entre la matriz y el refuerzo, y que asegura la transferencia de las cargas aplicadas entre ambos.

Los principales parámetros necesarios para obtener una interfase “ideal” son:

- La humectación o mojado (entendiendo como la aptitud de un líquido a extenderse sobre un sólido, propiedad de alto interés cuando el conformado pasa por la infiltración de una preforma-refuerzo por un fundido-matriz) entre la matriz y el material de refuerzo debe ser bueno. Aquí interviene la naturaleza termodinámica de los diferentes elementos y, en especial, sus energías superficiales.

- Deben existir fuerzas de unión suficientes para transmitir los esfuerzos de la matriz al refuerzo.
- Las uniones deben ser estables en el tiempo y sobre todo en el rango de temperaturas de utilización del compuesto.
- Las zonas de reacción entre la matriz y el refuerzo deben ser reducidas y no afectar a los elementos de refuerzo.
- Los coeficientes de dilatación térmica de la matriz y de los refuerzos, son muy diferentes y causan tensiones internas a través de la interfase, sobre todo al utilizar el compuesto a altas temperaturas.

Es difícil clasificar los distintos tipos de uniones, aunque se puede realizar una clasificación según el tipo de reacción química que se desarrolla entre la matriz y los refuerzos:

- La matriz y los materiales de refuerzo son no activos e insolubles.
- La matriz y los materiales de refuerzo son no reactivos pero solubles.
- La matriz y los elementos de refuerzo reaccionan para formar un tercer componente en la interfase.

En primer lugar, se deben considerar las uniones de tipo mecánico, en las que no tiene lugar ninguna reacción química, este tipo de unión puede existir en el caso de refuerzos que tengan la superficie rugosa. La ausencia de unión química conduce a un material compuesto con propiedades mecánicas deficientes.

La unión con mojado y con disoluciones tiene lugar en los compuestos reforzados por casi cualquier elemento, excepto con los óxidos. La matriz humecta y/o disuelve parcialmente los elementos del refuerzo, sin que se forme ningún compuesto entre ambos, existiendo interacciones electrónicas a corta distancia (distancias atómicas).

En las uniones en las que se producen reacciones químicas, estas pueden ser simples, que hacen intervenir las transferencias de átomos de uno o ambos compuestos, formándose un nuevo

compuesto químico en la interfase, o bien reacciones más complejas, que se pueden representar mediante una secuencia de reacciones.

### 1.3 Materiales compuestos con matriz de aluminio y sus aleaciones (AIMMC's)

Ya hace mucho tiempo que la mayoría de los MMC's tanto en investigación y desarrollo como en varias aplicaciones industriales, son base aluminio y sus aleaciones. Esto se debe a que el aluminio es ligero, que es el primer requisito en la mayor parte de las aplicaciones de los MMC's actuales. Adicionalmente, es barato en comparación con otros metales ligeros, como el titanio y el magnesio. También se debe a que las aleaciones de aluminio convencionales se utilizan en grandes cantidades, en un gran número de aplicaciones, desde la industria de automoción y aeronáutica, comunicación y recreo.

Su excelente resistencia, ductilidad y comportamiento frente a la corrosión ya son bien conocidos y pueden modificarse para satisfacer los requisitos de muchas aplicaciones distintas.

Hoy en día, se pone un gran énfasis en la mejora de la eficiencia de las técnicas de producción en masa y la reducción de costes de producción. Una alternativa interesante es la de los materiales compuestos de base aluminio reforzado con partículas, que ofrecen propiedades más moderadas (desde el punto de vista mecánico), pero son mucho más baratos que los materiales reforzados con fibras continuas.

La **Tabla 3** presenta costes relativos de métodos de procesado y tipos de refuerzos en materiales compuestos.

*Tabla 3* Tendencia de costes de métodos de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica y refuerzos empleados. (2)

Proceso	Coste	Refuerzo
Unión por difusión		Monofilamentos
Pulvimetalurgia	↑	Whisker
Métodos spray		Fibra corta
Proceso en estado líquido		Partícula

Por último, el hecho de que estos AIMMC's presenten buenos desarrollos desde el punto de vista de procesos secundarios, tales como el conformado o soldadura, además de su posible reciclado en el caso de los compuestos reforzados con partículas, hace interesante que el uso de estos materiales en la vida cotidiana sea de alto interés.

### **1.3.1 Aluminio reforzado con partículas**

Otra tendencia en la investigación de AIMMC's es el desarrollo de técnicas más económicas, especialmente para refuerzos discontinuos. El elevado consumo de aluminio monolítico permite el desarrollo de tecnologías eficientes y viables económicamente. Muchas de estas tecnologías se pueden aplicar perfectamente en la producción de AIMMC's. En la actualidad, pueden utilizarse métodos convencionales de conformado, como es el caso de la extrusión, forja y laminación.

Los procesos convencionales en estado líquido, como es el caso de varios métodos de fundición, y los métodos de metalurgia de polvos se utilizan para la obtención de AIMMC's reforzados con partículas. Las partículas de carburo de silicio (SiC) son uno de los refuerzos discontinuos más comúnmente utilizados en AIMMC's a pesar de que la densidad del SiC es ligeramente mayor que la del aluminio. Este alto interés se debe a su bajo precio, al hecho de poseer una buena gama disponible y de proporcionar al compuesto alta resistencia y modulo elástico. El aumento de la resistencia al desgaste es también una propiedad mejorada.

Otro tipo de refuerzo utilizado en AIMMC's es alúmina. En comparación con el SiC es mucho más inerte y también más resistente a la corrosión y conveniente para aplicaciones a elevadas temperaturas.

## **1.4 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos: Dureza y Resistencia a la tensión.**

El control de las propiedades mecánicas reside en el concepto de la combinación de materiales metálicos tradicionales con fases de refuerzo. Bajo condiciones ideales, el compuesto

exhibe un límite superior de propiedades mecánicas y físicas definidas por la regla de las mezclas, dada por la ecuación (1):

$$P_c = P_m F_m + P_r F_r \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde  $P_c$ ,  $P_r$  y  $P_m$  son los valores de una propiedad determinada en el material compuesto, el refuerzo y la matriz, respectivamente, y  $F$  es la fracción volumétrica en cada caso. Es importante conocer cuando una propiedad de un material compuesto sigue la regla de las mezclas. Normalmente, se cumple usando fibras continuas como refuerzo (en la dirección de las fibras), y con interfases entre refuerzo y matriz con buena unión.

Combinando matrices y refuerzos que exhiban propiedades apropiadas, se pueden obtener cambios importantes en resistencia, modulo elástico, tenacidad a la fractura, densidad, etc. La clave del control de estas propiedades depende en parte del éxito en la selección del refuerzo. Una de las tendencias seguidas en la fabricación de MMC's es bajar el coste, que generalmente se consigue a costa de bajar el nivel de propiedades.

### **1.5. Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica**

Todas las ventajas ofrecidas por los MMC's posibilitan una serie de aplicaciones en diferentes sectores de la industria.

#### *Industria aeronáutica*

Las principales propiedades requeridas para materiales de aplicación aeronáutica son elevada resistencia, rigidez y bajo peso; por lo tanto, los materiales compuestos de matriz metálica presentan un gran potencial en esta área de aplicación, un ejemplo de aplicación es en las alas de los aviones, donde se moldea su forma en respuesta a las condiciones externas, es decir, de viento.

#### *Industria automotriz*

En la actualidad, la industria del automóvil está afrontando retos tecnológicos importantes como los referidos a la reducción del consumo de combustible, reducción de emisiones, reciclado de materiales y aumento, en general, del rendimiento. En este sentido, el uso de

materiales compuestos de matriz de aluminio con refuerzo discontinuo resulta especialmente ventajoso.

### *Industria de armamento*

Ya se han realizado investigaciones en el sentido de utilizar MMC's en misiles, siendo esta una reciente área de aplicación. Una de las aplicaciones es la fabricación de esferas de guía inercial de misiles, donde el requisito crítico es la rigidez del material, MMC's con elevada fracción volumétrica de partículas (40%) reforzando una aleación de aluminio, en sustitución del berilio, produce una reducción en costos y evita problema asociados con la toxicidad del berilio.

### *Industria electrónica*

Las aplicaciones de los materiales compuestos en electrónica están relacionadas con el comportamiento térmico.

Elevadas fracciones volumétricas de partículas reforzando matrices de aluminio, o fibras de carbono reforzando aluminio, pueden combinar adecuadamente el coeficiente de expansión térmica con el de un sustrato, mejorando la conductividad térmica y disminuyendo considerablemente el peso. (2)

## **1.6. Métodos de fabricación**

Normalmente los MMC's reforzados con partículas necesitan dos etapas para obtener una pieza con una forma y propiedades finales. En una primera fase de procesamiento se obtiene una preforma a partir de las materias primas y, posteriormente, se pasa a una etapa de consolidación final donde el material adquiere todas sus prestaciones.

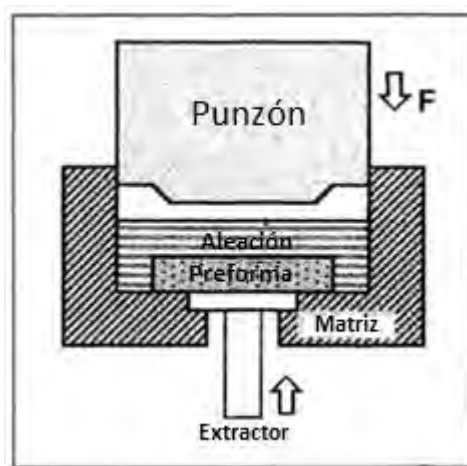
Métodos de procesamiento

- ✓ Colada por infiltración
- ✓ Re fusión o recolada
- ✓ Deposición por spray

✓ Pulvimetalurgia.

### *Colada por infiltración*

En este método **Figura 3**, los refuerzos más utilizados son whiskers de SiC y por general, fibras cortas. Inicialmente, se fabrica una preforma del material cerámico usando un aleante. Esta preforma se coloca en una matriz. A continuación, se adiciona el metal líquido y, seguidamente, por aplicación de presión, este se infiltra en la preforma.

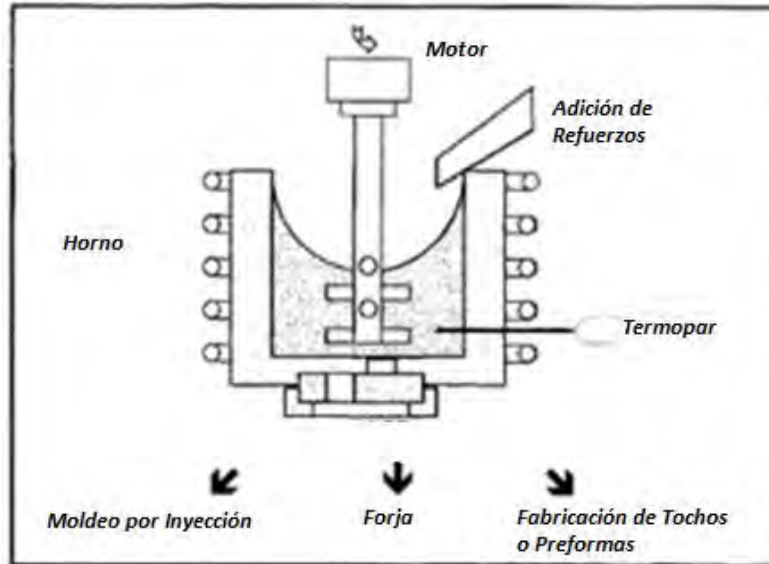


**Figura 3** Proceso de obtención de materiales compuestos por squeeze casting.

### *Re fusión o recolada*

Consiste en el conformado de un material en estado parcialmente solidificado, es decir, donde las cantidades de fase líquida y sólida estén delimitadas por las líneas de *liquidus* y *solidus* del diagrama de fases.

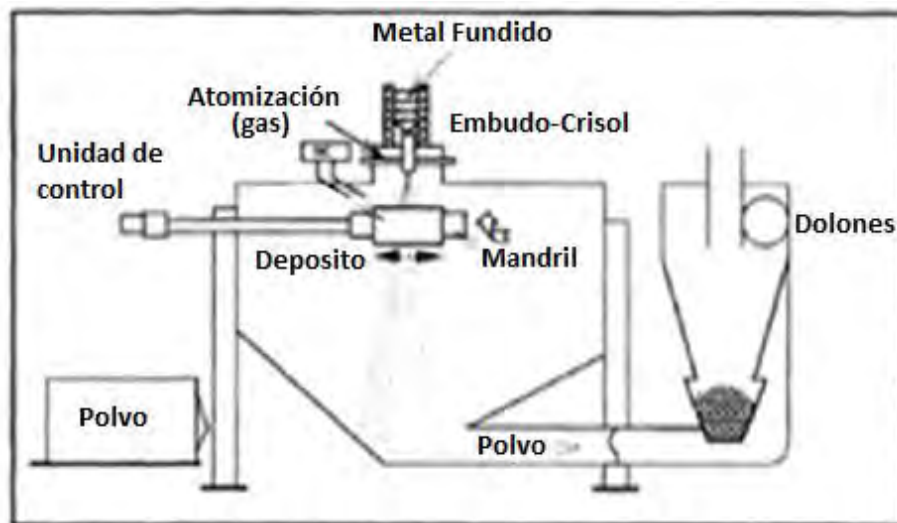
El mayor problema en la fabricación de MMC's por medio de re fusión es conseguir una humectación suficiente entre el baño metálico y el refuerzo, **Figura 4**.



*Figura 4* Proceso de fabricación de materiales compuestos por reo-fusión.

*Deposición por spray (spray forming)*

Este proceso está basado en la técnica de producción de polvos vía atomización por gas. En este caso *Figura 5*, las partículas de metal líquido producidas por atomización, chocan con un substrato intermedio, constituyendo una preforma. Este substrato es una matriz con la forma deseada.

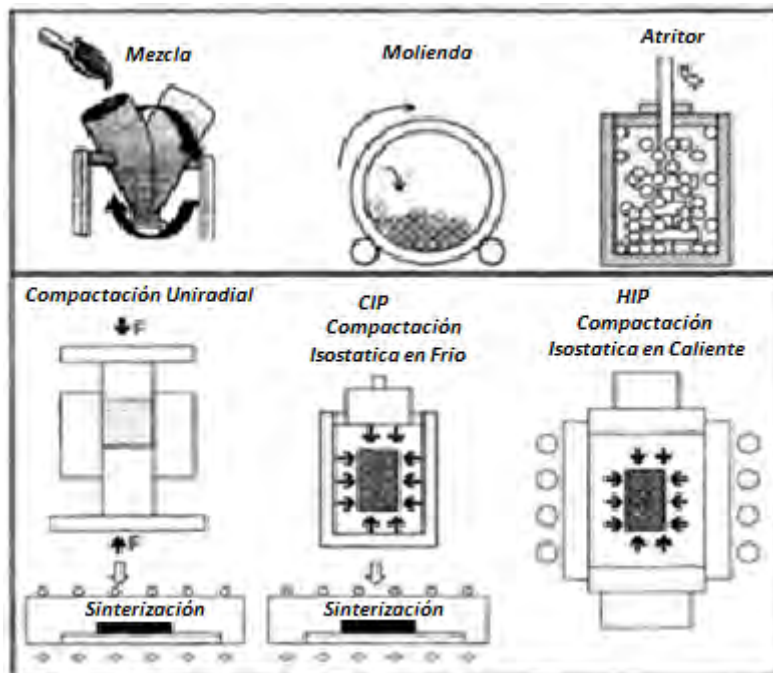


*Figura 5* Proceso de obtención de materiales compuestos por spray.



## Pulvimetalurgia

El proceso de obtención de MMC's por vía pulvimetalúrgica consiste, básicamente, en la mezcla de polvos metálicos y refuerzos, en estado sólido, seguida de compactación y consolidación **Figura 6**. Este proceso presenta la ventaja de requerir menores temperaturas durante la preparación de los compuestos en estado líquido. De esta forma, la interacción entre matriz y refuerzo es menor por lo que se minimizan las reacciones interfaciales indeseables, posibilitando de esta forma, una mejora en las propiedades mecánicas.



**Figura 6** Proceso de fabricación vía pulvimetalurgia.

### 1.6.1 Fabricación por método de “Vórtice”

El método de Vórtice es uno de los más utilizados, debido a que es relativamente fácil de operar y su costo de operación es bajo. Este método se basa en agitar con la ayuda de un aspa, el metal líquido y dispersar el reforzante. En la **Figura 7**, se muestra el diagrama del equipo. Éste tiene como objeto dispersar las partículas ( $\text{SiC}_p$ ) en el metal líquido por medio del impulsor o aspa, las partículas son suministradas por medio de un sistema de dosificación, el uso de una

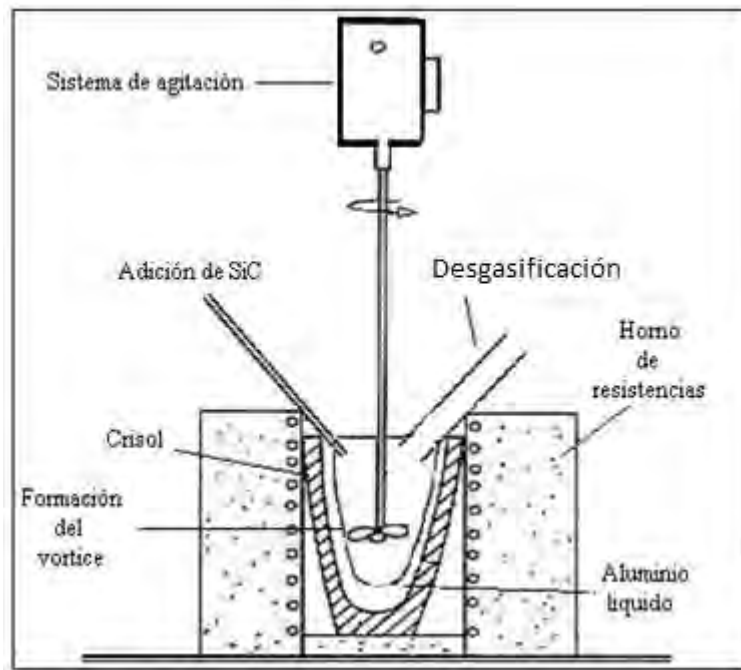
atmósfera inerte es esencial para evitar atrapamiento de gas; el flujo de gas inerte penetrará siempre en la zona del metal de alta turbulencia.

Incrementando la cantidad de partículas en el metal líquido, aumenta la viscosidad, pero aumentando la temperatura se puede minimizar la viscosidad.

Los compuestos de matriz metálica hechos por vórtice requieren especiales precauciones incluyendo control en la temperatura, diseño del sistema de agitación. Las desventajas en este método son la segregación, estancamiento y/o flotación del refuerzo en la matriz, aglomeración de partículas cerámicas, fractura de las partículas durante la agitación y reacciones interfaciales.

Las variables que se mantendrán fijas son: porcentaje en volumen del refuerzo, temperatura de agitación, temperatura del refuerzo, composición química de la matriz, porcentaje de humedad, composición en la mezcla de moldeo de arena.

La **Figura 7** nos muestra un esquema del método de vórtice.



**Figura 7** Esquema de método Vórtice (3)

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

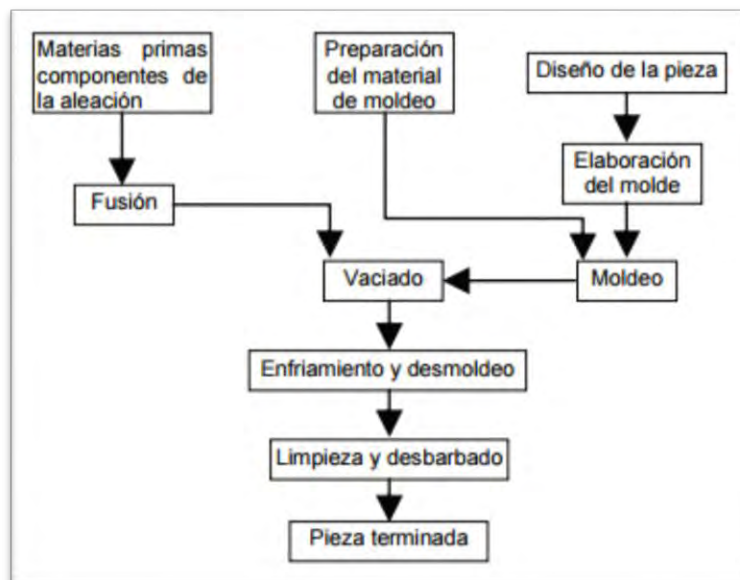
### 2.1 Proceso de fundición de composites colados de matriz metálica

El siguiente capítulo se describen las bases teóricas en las que está sustentado el procesamiento de los compuestos de matriz metálica.

Se da forma a los materiales compuestos a través de diversas tecnologías de procesamiento. Las dos fases se fabrican por separado antes de mezclarse y formar la pieza final.

Los MMC's fabricados utilizando procesos en estado líquido, si bien no presentan altas propiedades, las que se obtienen cumplen una relación de compromiso con la viabilidad económica del proceso, lo que hace que este método tenga una gran aplicabilidad a escala industrial.

Para llevar a cabo un proceso de fundición se requiere del metal líquido y el molde o matriz, en él que entra el metal; la **Figura 8** muestra el diagrama de flujo de un proceso común en la producción de piezas de proceso de fundición.



*Figura 8 Etapas principales del proceso de fundición. [4]*

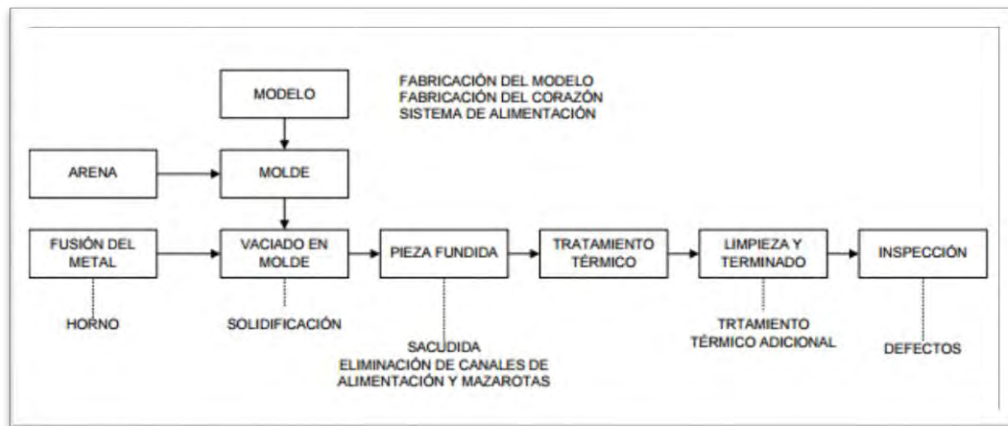
En los procesos de dispersión tanto en estado líquido como semilíquido, los MMC's fabricados de esta forma, se limitan a refuerzos discontinuos y porcentajes muy bajos, ya que se pueden producir rechazos entre el refuerzo y la matriz, falta de mojado y de homogeneidad del refuerzo dentro de la pieza, exceso de reactividad entre el refuerzo-matriz, rotura del refuerzo, formación de clusters, alta porosidad, por lo que es necesario llevar a cabo la mezcla del MMC's mediante agitación mecánica. Obtenido el material compuesto, la mezcla es sometida a distintos procesos de colada y conformación, por fundición, gravedad, inyección, centrifugado o baja y alta presión.

### 2.1.1 Modelo de la pieza y fabricación del molde de arena.

El proceso de moldeo en verde, comienza con la fabricación del modelo de la pieza, luego este modelo se coloca en la arena para generar una cavidad negativa y se ubican los sistemas de llenado que guiaran el metal fundido hacia las cavidades del molde.

Una vez el metal se solidifica al interior de la cavidad, se destruye el molde y se extrae la pieza terminada; si es necesario se puede realizar el proceso de tratamiento térmico a la pieza fundida o realizar los procesos adicionales de acabados y controles necesarios.

La **Figura 9** nos muestra los diversos pasos para la producción, en una típica operación de fundición de arena en verde.



**Figura 9** Pasos de producción en una operación típica de fundición de arena en verde. [5]

### 2.1.2 Proceso de moldeo en verde y mezcla de moldeo

El término “arena verde” es conocido principalmente por el contenido de humedad en la mezcla de moldeo. La arena se somete a un moldeado/mezclado, proceso en el que varios tipos de arcilla y aditivos químicos se mezclan con la arena, estos últimos actúan como aglutinantes, dando como resultado que, dicha mezcla es ideal para su acción inmediata en el moldeo, no necesitando otro proceso intermedio.

A veces el diseño de la fundición implica huecos internos en la pieza, esto se hace mediante el uso de corazones de arena que están constituidos por una mezcla de arenas con aglutinantes químicos.

El proceso de fundición en arena, consiste en la elaboración de moldes a partir de la mezcla de arena de sílice y bentonita (arcilla activada) de un 8 a 10% de esta última, con una baja cantidad controlada de agua de 2 – 3.5%.

En el molde de arena participan básicamente dos tipos de arena, la arena de contacto y la arena de relleno, la primera arena definirá la tersura de la pieza.

Normalmente el molde se divide en dos partes, la superior llamada *cope* o tapa y el inferior llamado *drag* o base.

Las ventajas y desventajas del moldeado en arena verde son:

#### Ventajas

- Económico: es un proceso más barato que el resto de otro tipo de fundición.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Posibilidad de utilización en gran cantidad de metales y aleaciones.
- Acabado uniforme y semi-liso.
- Se trata de un proceso flexible con costos de materiales bajos.
- La mezcla de arena se recicla.

#### Desventajas

- Las tolerancias que se obtienen suelen ser bastante grandes.

- No es el proceso más adecuado para la realización de piezas de geometría compleja.
- Los acabados superficiales que se obtienen no son los mejores.

Todos los tipos de arcilla desarrollan propiedades adhesivas y cohesivas, cuando se les mezcla con agua. La cantidad de adhesión o cohesión propiamente, depende de la cantidad de agua que se le adicione a la mezcla. Cuando el contenido de agua es bajo las propiedades de cohesión son aumentadas y se adhiere por ellas misma, pero cuando la adición de agua es alta, sucede lo opuesto (6).

Para el caso de las aleaciones coladas base aluminio los estudios previos hechos en laboratorio de fundición de la Facultad de Química, utiliza la mezcla de moldeo que se muestra en la **Tabla 4**.

*Tabla 4 Composición idónea de la arena para aluminio (6).*

Descripción	Clasificación	Cantidad
Arena	Oklahoma AFS 90-100	86%
Bentonitas	Cálcica	6%
	Sódica	4%
Agua	Humedad	4%

## 2.2 Diseño de Sistema de Colada

El sistema de colada es una parte esencial del molde, se define como un conjunto de ductos y componente que conducen al metal líquido a la cavidad del molde que originara la pieza a fabricar, haciendo que ésta se llene.

En el diseño de sistema de colada, una característica importante es la sensibilidad de la aleación. Esta sensibilidad es reflejada en oxidación y/o re-oxidación en el metal líquido, mal llenado, atrapamiento de gas.

Los principales componentes de un sistema de colada para piezas de aluminio son: bajada, corredor y entrada, estos a su vez están complementados con otros componentes, como la extensión, en la que se le coloca una tina y un colchón, al corredor se le llega a adicionar una extensión, este último sirve para atrapar la escoria proveniente del flujo metálico.

La comparación de un buen sistema de colada y un mal sistema de colada difieren en lo siguiente:

Los componentes de un buen sistema de colada

1. Evitan producción de óxidos y escoria.
2. Retienen óxidos y escoria.
3. No permiten aire atrapado.
4. No causan erosión en los moldes con corazón.
5. Introducen el metal en el molde con un mínimo de turbulencia.
6. Maximizan el rendimiento de metal.
7. No permiten penetración del metal.
8. Permiten uniformidad en el llenado y en cada una de las cavidades del molde.

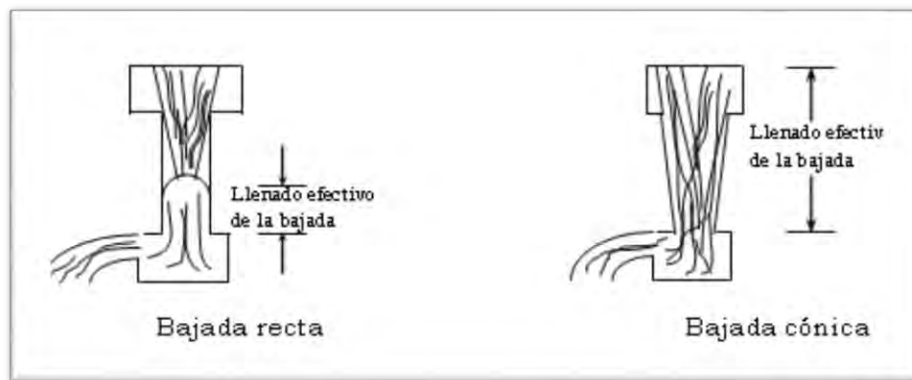
Los componentes de un mal sistema de colada

1. Pueden producir óxidos y desgajamiento de arena.
2. No retienen óxidos ni escoria.
3. Pueden atrapar gas y aire.
4. Pueden causar erosión en los moldes.
5. Introducen el metal en el molde con turbulencia y de esta manera causa re oxidación.
6. Se tiene un bajo rendimiento de metal.
7. No promueven la penetración de metal.
8. No controlan el flujo y el tiempo de llenado.

En el diseño de sistema de colada una característica a considerar, es la sensibilidad de la aleación. Esta sensibilidad es reflejada en oxidación del metal líquido, mal llenado, atrapamiento de gas.

A continuación, se describen la función de cada uno de los componentes del sistema de colada:

*Bajada*: esta se ubica por arriba de la línea de partición. El diseño de la bajada debe ser con una disminución gradual (cónica) para lograr un llenado más tranquilo. Una bajada recta provoca variaciones en el llenado en la bajada, como pueden apreciarse en la **Figura 10**.



**Figura 10** Diseño de colada para llenado efectivo.

*Colchón de Bajada*: El metal que entra por primera vez en la bajada, puede dañar el sistema de corretores, por lo que, una extensión en el fondo de la bajada, puede minimizar estos daños, absorbiendo la energía del llenado. El diámetro del colchón puede ser igual o cercano a cuatro o cinco veces el diámetro de la bajada y la altura o profundidad puede ser dos o tres veces el diámetro de la bajada. En la **Figura 11** se pueden apreciar la forma más típica del colchón de bajada.



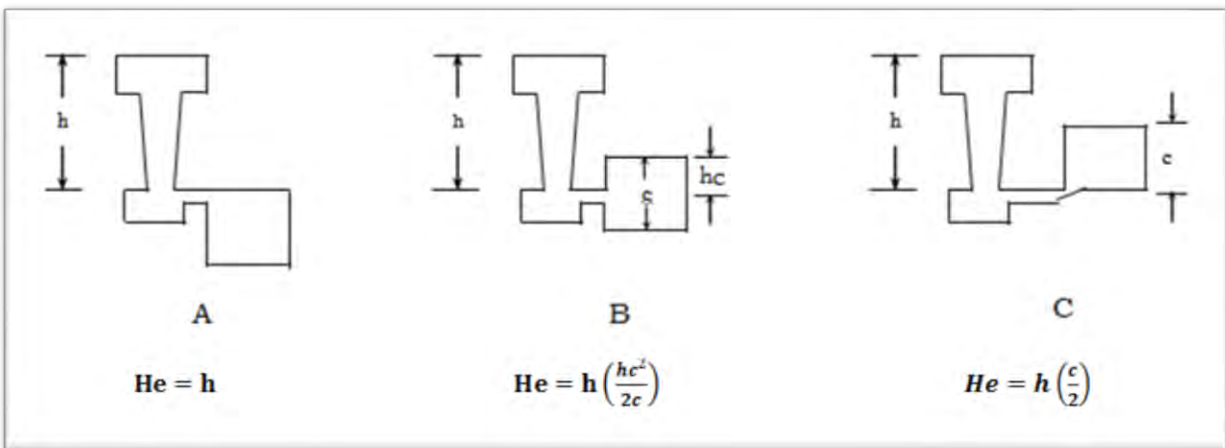
**Figura 11** Tipos de Colchón de bajada.



*Corredores:* Cuando el nivel de presión es establecido en la bajada, la dimensión de los corredores puede ser calculada. El diseño de los corredores debe estar trazado para lograr mínimas pérdidas de temperatura, esto, da ventaja a que el tiempo de residencia ayude a la flotación de escorias, relación alto ancho 1:1 o 2:1 de sección cuadrada y rectangular respectivamente.

*Entradas:* Estas pueden ser más delgadas en la sección donde el metal es introducido, generalmente para aleaciones base aluminio, se utiliza una relación ancho/espesor 3:1 a 1:1.

*Posición de la pieza respecto al plano de partición:* La pieza puede estar en su totalidad, dentro de la parte inferior de la caja, una parte en la caja superior y otra en la parte inferior, o totalmente en la parte superior de la caja, de acuerdo a la **Figura 12**, con ello se calcula la altura efectiva de la bajada “He”.



**Figura 12** Diferentes posiciones de la pieza. a) En la parte inferior, b) entre la parte inferior y superior, c) en la parte superior. Donde  $h$  = altura de la bajada y tina;  $c$  = altura de la pieza,  $hc$  = altura de la pieza desde el punto de entrada del metal líquido.

Siguiendo el método de AFS (9), el cálculo para las dimensiones del sistema de colada se basa en cálculo de:

- Área transversal inferior de la bajada  $(A_{Tb})$
- Área transversal de corredor o corredores  $(A_{Tc})$
- Área transversal de entrada o entradas  $(A_{Te})$

Las áreas anteriores definen lo que se llama “relación de colada”, es decir, la relación entre  $A_{Tb}$ :  $A_{Tc}$ :  $A_{Te}$ . Las relaciones de colada recomendadas para aleaciones base aluminio se muestran en la **Tabla 5**.

*Tabla 5 Relaciones de colada para piezas de aluminio convencional.*

Sistema	( $A_{Tb}$ )	( $A_{Tc}$ )	( $A_{Te}$ )
No presurizado	1	1.5	2
	1	2	3
	1	2	4

Los sistemas no presurizados son utilizados para aleaciones de baja densidad y alta sensibilidad, como las aleaciones de aluminio.

El cálculo del sistema de colada, parte de la ecuación de Bernoulli (balance de energía en el sistema de colada), llegando a la siguiente relación, que determina la velocidad del metal en caída libre en la bajada.

$$v = f_r \sqrt{2gHe}$$

$v$  = Velocidad de caída libre (m/s).

$f_r$  = Factor que corrige las pérdidas de velocidad por fricción.

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $\text{cm/s}^2$ ).

$He$  = Altura efectiva de la bajada (cm).

La altura  $He$  debe corregirse en función de la posición de la pieza respecto al plano de partición.

$He = h$	para piezas en la parte inferior
$He = h \left( \frac{hc^2}{2c} \right)$	para piezas colocadas en ambas partes
$He = h \left( \frac{c}{2} \right)$	para piezas en la parte superior

Se debe calcular el gasto másico  $R$  el cual es función de un espesor crítico y del peso de la pieza ( $W$ ) de acuerdo a la **Tabla 6**.

**Tabla 6** Calculo para gasto másico para piezas de aluminio en función del espesor crítico de la pieza y su peso  $W$  (lb) (8)

Espesor Crítico (plgs)	Flujo másico (lb/seg)
$\leq 1/4$	$R = 1.48\sqrt{W}$
$1/4$ a $9/16$	$R = 1.25\sqrt{W}$
$> 9/16$	$R = 0.68\sqrt{W}$

Una vez calculado el gasto, se puede determinar el área de control con la expresión para el cálculo del área transversal inferior de la bajada ( $A_{Tb}$ ), donde se involucra el flujo másico y la pérdida por fricción.

$$A_{ib} = \frac{R}{\rho f_r \sqrt{2gH}}$$

donde:

$f_r$  = coeficiente de fricción.

$\rho$  = densidad de la aleación (Kg/L).

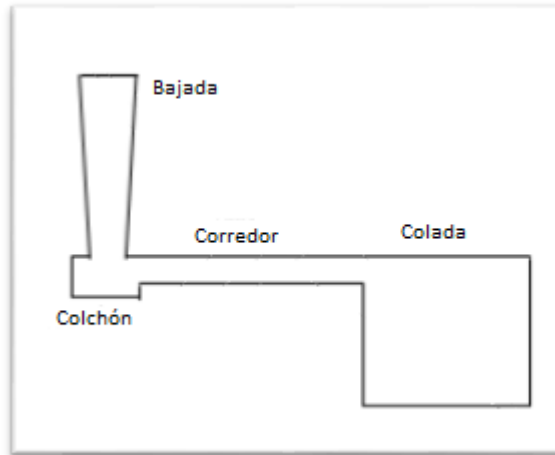
H = Altura metalostática efectiva de la bajada (cm).

g = aceleración de la gravedad ( $ms/s^2$ ).

R = gasto másico (Kg).

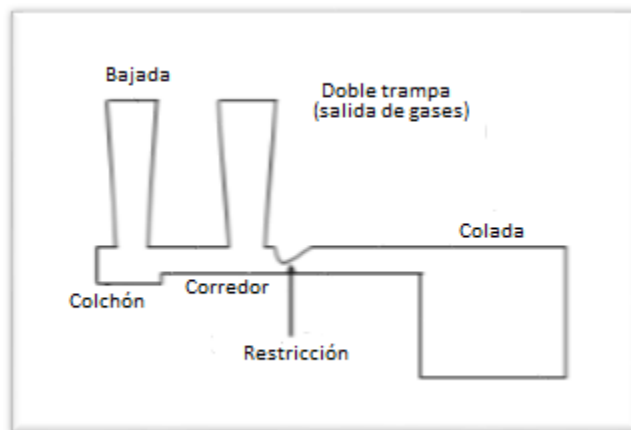
### 2.3 Sistemas de colada para MMC's

*Coladas convencionales:* Inicialmente se intentó que los compuestos colados fueran basados en el moldeo por gravedad en moldes de arena, en la **Figura 13**, se observa como la simple forma del sistema atrapa aire a través de burbujas, lo que fue inaceptable, que hacían que defectos gruesos se localizaran en la superficie, por el atrapamiento de aire causado por la turbulencia durante el llenado del molde.



*Figura 13 Sistema de colada convencional*

*Doble trampa y sistema de restricción:* El sistema con la doble trampa y el sistema de colada con restricción fueron desarrollados posteriormente. El principal fue creado con un área dentro del sistema de colada para permitir el atrapamiento de gases, en donde estos pueden ser liberados a la atmósfera como puede observarse en la **Figura 14**. Este sistema funcionó bien, pero tuvo la desventaja de la disminución en el rendimiento del metal, el rendimiento del metal es definido por el peso del metal en la pieza, expresado en un porcentaje del total del metal a colar dentro de la cavidad del molde, dicho de otra forma, serian (colada + alimentadores + pieza).



*Figura 14 Sistema de colada de doble trampa y restricción.*

*Interrupción del flujo de colada:* Más recientemente, otros sistemas de colada fueron desarrollados para la fabricación de piezas de colada de composites. Se les conoce como interrupción del flujo de colada o centro de colada. Este sistema trabaja con la interrupción temporal del flujo de metal dentro de la cavidad del molde y está en el punto más bajo del sistema de colada, esto da el tiempo justo para el atrapamiento de aire durante la descarga o la continuación del llenado del molde.

Para técnicas de moldeo por gravedad y baja presión los criterios básicos en el medio de moldeo de sistema de colada en compuestos de aluminio consisten en no tener turbulencia en la entrada y dentro del molde.

## 2.4 Fluidéz

Una propiedad muy importante en cualquier colada es la fluidez, la cual es una medición relativa de la movilidad del metal en las cavidades del molde, también llamado índice de fluidez (IF), esta se describe como “la capacidad que tiene la aleación a distribuirse en el molde antes de que ésta solidifique”. Algunas características que determinan la fluidez, en el caso de fabricación de piezas coladas de compósitos son:

- a) La cantidad de partículas (SiC). Al incrementar la cantidad de partículas de SiC y en el rango de temperaturas de 780°-800° C, éstas tienden a formar  $Al_4C_3$ , que es un sólido, esto da como resultado el incremento de la viscosidad y la disminución de la fluidez.
- b) El tamaño de partícula. La influencia del tamaño de partícula es determinante, si la partícula es muy pequeña y se agrega a una matriz en la misma proporción que un tamaño de partícula mayor, la primera presenta una menor fluidez, esto es debido a que los puntos de enfriamiento son más y por lo tanto tiende a solidificar más rápido.
- c) El sobrecalentamiento. La fluidez se favorece cuanto hay un sobre calentamiento de la aleación, entre 150° y 200° C máximo, se recomienda no llegar a temperaturas máximas de colada de 780° a 800° C, si se alcanzan temperaturas mayores se formarán fases indeseables.

## 2.5 Humectabilidad

La humectabilidad se puede definir como, la habilidad de un líquido a propagarse en una superficie sólida, y representa un íntimo contacto entre el líquido y el sólido.

Los factores que reducen la humectabilidad son:

1. La presencia de películas de óxido en la superficie. Las capas de óxido crean una resistencia de penetración de la partícula en la matriz, especialmente cuando la partícula es adicionada por la parte de superior.
2. Generalmente, el valor del ángulo de contacto se incrementa con una disminución en la temperatura del metal líquido, por ejemplo, la humectabilidad mejora a altas temperaturas, normalmente a 900 °C.
3. Las propiedades en la superficie de la partícula también afectan la humectabilidad, por la adsorción de contaminantes, por ejemplo, en SiC<sub>p</sub> se afecta con la presencia de capas de óxido.
4. El tamaño de las partículas, las partículas pequeñas son más difíciles de dispersarse porque interactúan gran cantidad de áreas superficiales.

La humectabilidad es un paso crítico en el proceso de colada, en particular en *Cast Aluminium Metal Matrix Composites* o con sus siglas en inglés, CAIMMC's, el cual es reforzado con partículas, con la incorporación de estas partículas dentro de la matriz.

Una buena humectabilidad entre la fase del cerámico sólido y la matriz metálica líquida es, una condición esencial para la generación de una unión satisfactoria entre estos dos. Para las consideraciones metalúrgicas se promueven varios factores en la región interfacial de un compuesto:

1. Un íntimo contacto entre el reforzante y la matriz, para que la humectabilidad sea satisfactoria.

2. Una muy baja reacción química en la interfase y una pequeña o nula inter difusión, entre las fases del componente y el componente ( $\text{SiC}_p$ ) no sea degradado.

Por lo que existen métodos que promueven la humectabilidad y se explican a continuación:

1. La adición de elementos aleantes en la matriz, por ejemplo, la adición de magnesio, calcio, titanio o zirconio; reducen la tensión superficial del metal, decreciendo la energía interfacial sólido-líquido en el metal, o induciendo humectabilidad por reacción química. La adición de magnesio en el metal de aluminio mejora la humectabilidad porque éste tiene una baja tensión superficial ( $0.599 \text{ N m}^{-1}$ ) comparada con la del aluminio ( $0.760 \text{ N m}^{-1}$ ). La adición de 3% en peso de magnesio en aluminio reduce la tensión superficial de  $0.760$  a  $0.620 \text{ N m}^{-1}$  a  $720 \text{ }^\circ\text{C}$ . (9)
2. Revestimiento en las partículas cerámicas, en general, las superficies de las partículas no metálicas son difíciles de humectar por un metal líquido. La humectabilidad de estas puede ser lograda revistiendo a las mismas con un metal humectable como el níquel, cobre, plata o cromo; el níquel es con frecuencia el más utilizado para revestir partículas cerámicas usadas en compuestos base aluminio. El revestimiento de partículas puede ser aplicado por una gran variedad de técnicas por ejemplo deposición química de vapor, electro deposición, cementación, etc.
3. Tratamiento de las partículas, hay una gran importancia en el precalentamiento de las partículas cerámicas antes de ser adicionadas al metal líquido, el precalentamiento remueve las impurezas en la superficie de las partículas, y altera la composición de la superficie formando una capa de óxido que promueve la humectabilidad de la partícula.

Estos métodos se basan en el incremento de la energía superficial del sólido, y decrecimiento en la tensión superficial de la aleación líquida o, decrecimiento de la energía interfacial sólido-líquido y la inter fase partícula-matriz.

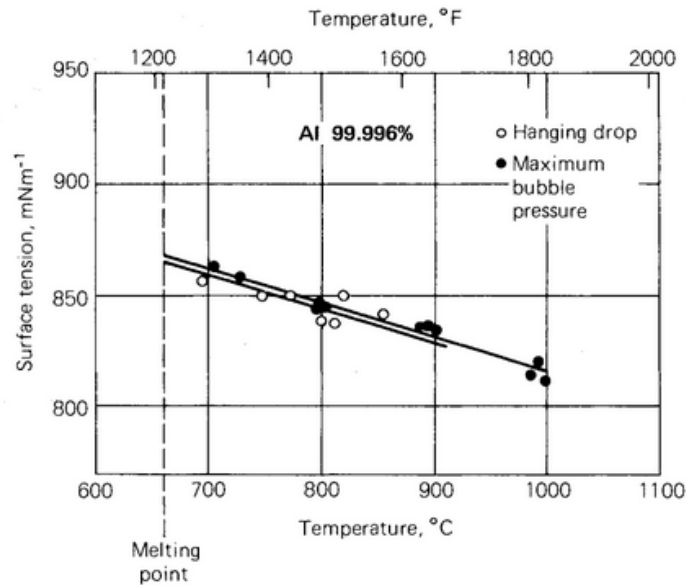
En la **Tabla 7** se constata, que con 4% en peso de Magnesio, la tensión superficial del aluminio se modifica, disminuyendo de 862 a 805 ( $\text{mJ m}^{-2}$ ), de igual manera, al utilizar partículas de  $\text{SiC}$ , se disminuye de 560 a 520 con lo que aumentando el % en peso del Mg, se espera que baje aún más de lo reportado, mejorando así la humectabilidad.

**Tabla 7** Presión límite  $P_0$  (kPa) para la infiltración de alúmina compacta y partículas de SiC a  $T=750^\circ\text{C}$  para diferentes aleaciones de aluminio. (11)

Alloy	$\gamma_{lv}$ (mJ m <sup>-2</sup> )	$P_0$ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$P_0$ (SiC)
Al	862	853	560
Al – 5wt% Sn	731	720	439
Al – 0.5wt% Pb	708	766	422
Al – 0.7wt% Sr	719	-	630
Al – 4 wt% Mg	805	925	520

Otro factor que disminuye la tensión superficial, es el aumento de temperatura, en la **Figura 15** se puede observar con respecto al aluminio puro, pero es muy similar dicho comportamiento adicionando el magnesio, además de que la aleación base sigue el comportamiento de la regla de las mezclas.

**Figura 15** Tensión superficial en dependencia de la temperatura del aluminio puro determinado por dos métodos (12)





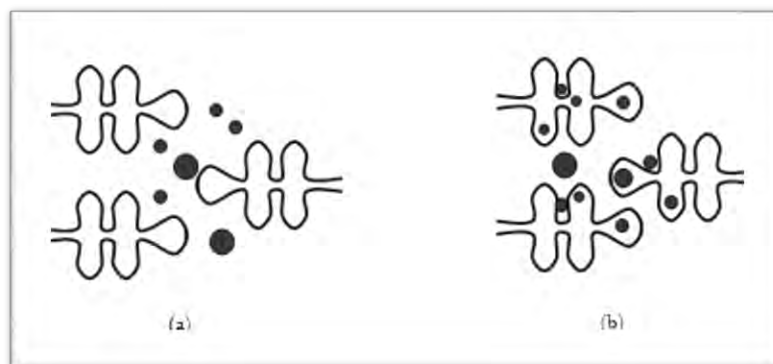
## 2.6 Procesos de solidificación

El proceso de solidificación es un paso crucial que determina el patrón de partículas distribuidas, así como la microestructura en MMC's, e influencia muchas de las propiedades del CAIMMC's. Una buena interacción entre las partículas y el frente de solidificación, puede ser determinado por un rango de solidificación, y la morfología de la estructura solidificada, puede llevar a la captura de la partícula por el frente de solidificación, en algunos casos y el rechazo de la partícula en otros.

La presencia de los reforzantes en la matriz metálica puede provocar los siguientes efectos durante la solidificación:

- a) En algunos casos, se cataliza la nucleación heterogénea de la fase sólida, especialmente en matrices de Al-Si híper eutécticas.
- b) Afecta el calor latente y la conductividad en el líquido.
- c) Influye en la viscosidad y en la fluidez e imparte propiedades tribológicas.
- d) Limita la convección del fluido debido a la estrechez entre las partículas y los intersticios.
- e) Hay flotación o asentamiento del cerámico debido a la diferencia de densidades.
- f) Influencia en la inestabilidad morfológica de la intercara sólido-líquido a planos dendríticos.
- g) Influencia de brazos dendríticos gruesos (influye a la magnitud de estos).
- h) Afecta al tamaño de grano.

La **Figura 16** nos muestra diferentes formas de solidificación de los MMC's.



**Figura 16** Solidificación de un MMC's. (a) el frente de solidificación empuja a las partículas hasta las últimas zonas de solidificación, (b) en este suceden dos aspectos captura y atrapamiento, en el primero la partícula es rodeada totalmente por la fase sólida que crece; y la segunda la partícula es confinada a las regiones interdendríticas que solidifican al final.

## 2.7 Flotación y asentamiento de partículas

El asentamiento de las partículas cerámicas en MMC's fabricados por procesos en estado líquido, ocurren durante la fabricación, la fusión y/u operación de colada. Esto resulta en una distribución no uniforme de la partícula cerámica en la matriz metálica y consecuentemente degrada las propiedades mecánicas en los MMC's. Los aglomerados de partículas están relacionados con este problema, haciendo que las partículas se asienten más rápidamente. De esta forma las partículas pueden estar desigualmente distribuidas macroscópicamente (regiones sin partículas, debido al asentamiento) o microscópicamente (aglomerados de partículas). Consecuentemente las propiedades no son uniformes. En algunos casos la extrusión o el laminado pueden homogenizar la microestructura. Sin embargo, es claro que una buena estandarización de los procesos de asentamiento es importante, para optimizar el proceso y propiedades en los procesos de fundición con agitación para MMC's.

Estudios previos han demostrado que:

- Cuando la partícula es fina la proporción de asentamiento aumenta, debido a la formación de aglomerados.
- Aumentan las zonas sin partículas con el incremento en el tiempo de residencia en el horno del compuesto líquido.
- Las partículas de SiC reaccionan químicamente con la matriz de aluminio.
- Los compuestos muestran una distribución heterogénea de partículas debido al empuje de las partículas por el crecimiento de las dendritas.

## 2.8 Resistencia al desgaste

El desgaste es generalmente definido como la pérdida de material en una superficie, es el resultado de un movimiento relativo entre esta superficie y otra.

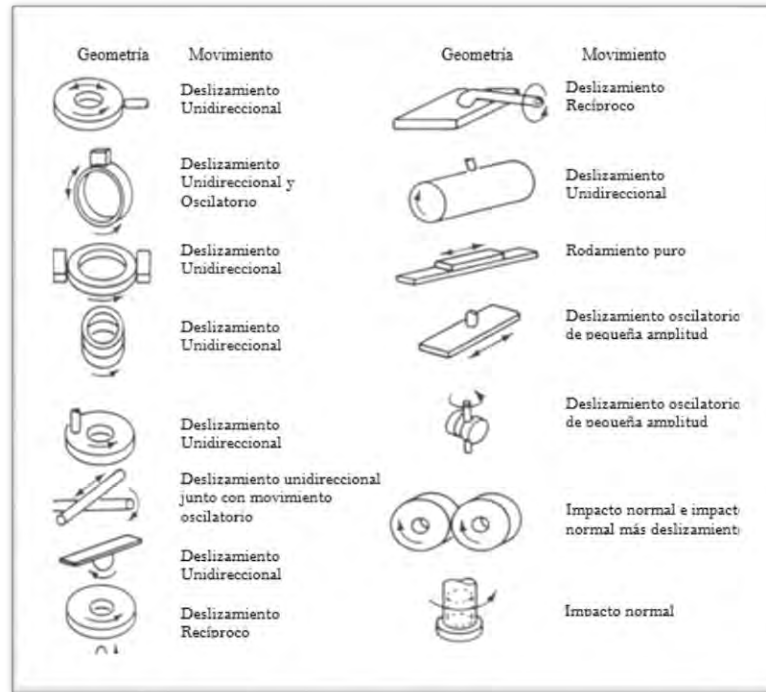
La adhesión en el desgaste se relaciona con la fricción y lubricación, el estudio de estos tres parámetros se le conoce como propiedades tribológicas. Aunque los aparatos utilizados en la prueba tribológica frecuentemente son usados para otro tipo de pruebas como: fricción, desgaste y lubricación, que estos son diferentes fenómenos.

Una prueba de desgaste puede estar hecha con o sin lubricante, el área de interés es el material donde responde el desgaste. Una prueba de fricción mide la fuerza de fricción o el coeficiente de fricción. En adhesión, la prueba de fricción puede ser usada para evaluar el desempeño del lubricante y la prueba de desgaste, frecuentemente para monitorear la fricción.

En 1960 la American Society for Lubrication Engineers (ASLE) listó más de 200 tipos de pruebas de desgaste y equipo usado, y la lista fue creciendo desde entonces. Esta amplia variedad, es el resultado de desear el aseguramiento del control apropiado y la prueba conveniente y necesaria para simular las condiciones de desgaste. El equipo descrito en la **Figura 17**, es la configuración típica de la prueba de desgaste. Sin embargo, las pruebas de desgaste no están limitadas a tal equipo. Este equipo provee más control y oferta de instrumentación a alta degradación o simulación de las condiciones de desgaste.

Algunos materiales pueden ser desgastados por una variedad de mecanismos, por ejemplo: abrasión, erosión, fatiga y oxidación, influenciando a tales factores la temperatura ambiente, condiciones de carga y las condiciones de la contrafase. Uno de los más importantes aspectos para la prueba de desgaste es la simulación de las condiciones actuales del desgaste.

Los compositos presentan un mayor grado de resistencia al desgaste, que la aleación matriz, el cerámico sirve como refuerzo de la misma, otro beneficio que presentan, es mayor resistencia al calor.



**Figura 17** Pruebas típicas de desgaste. El tamaño del espécimen no es menor que 25 mm (1.0 pulgada en los pins y blocks) ni mayor que 75 mm (3.0 pulgadas en rines y discos). Algunos aparatos proveen una carga simple, y otros son ajustables, algunos incrementan la carga automáticamente. Las velocidades son variables en un amplio rango, dependiendo de los aparatos (2.5 mm/s a 2540 mm/s o 0.1 plg/s a 100 plg/s).

Distintas clasificaciones de desgaste pueden ser desarrolladas. Las dos más comunes están basadas en:

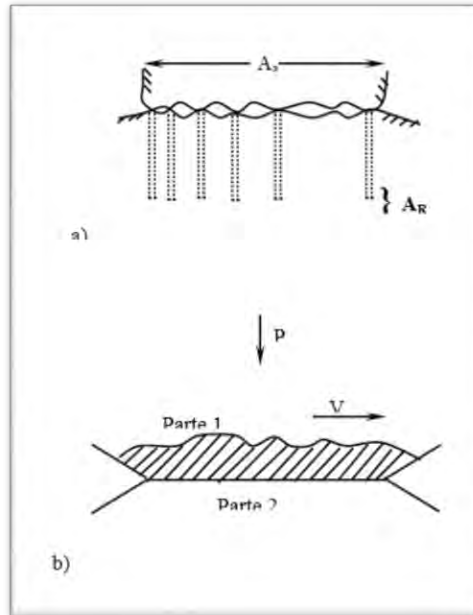
- 1) Mecanismos físicos, remoción o desplazamiento del material.
- 2) Mecanismo de operación tales como acción mecánica (desgaste por rodamiento, desgaste por movimiento, etc.) e interacción de material (metal-metal, metal-polímero, etc.).

Ambas clasificaciones son consideradas, porque ilustran una complejidad del desgaste y la necesidad de una correcta simulación de éste.

Existen muchos mecanismos físicos de desgaste, sólo se mencionarán tres tipos básicos: adhesión, abrasión y fatiga.

*Adhesión:* Esta ocurre cuando una superficie se une con otra y el subsiguiente movimiento ocurre la ruptura en uno de los materiales, como se representa en la **Figura 18**. Bajo una carga

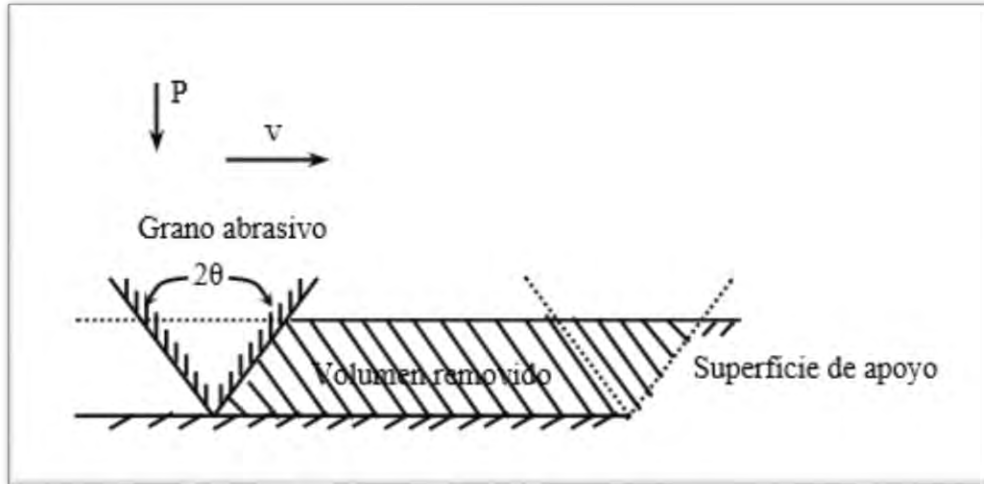
aplicada (dependiendo del material), puede ocurrir deformación, primero elástica y luego plástica. La deformación continuará hasta que el área de contacto real sea suficiente para soportar la carga. En este punto la deformación cesa.



**Figura 18** Descripción esquemática de la adhesión. a) el contacto entre dos superficies es caracterizada por  $A_a$ , el área aparente de contacto, y  $A_R$  el área real de contacto sumando todas las uniones. b) La unión de adhesión y el movimiento en la superficie causa ruptura a lo largo de la parte 1. Si no hay desgaste se tiene falla en la parte 2.

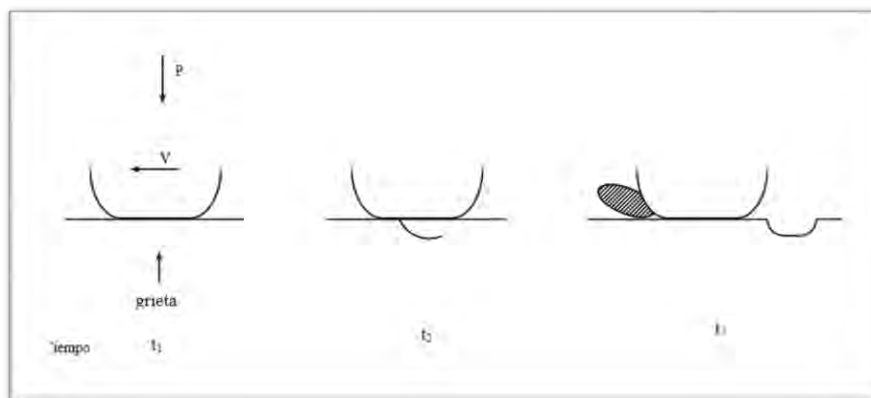
**Abrasión:** Ocurre cuando existe una protuberancia dura y áspera, en la superficie de un material y mantiene partículas atrapadas entre las superficies plásticamente deformadas o cortadas, resultado del movimiento.

Los procesos básicos de abrasión se ilustran en la **Figura 19**. Este modelo puede ser subdividido en los términos exactos de la naturaleza de la deformación o procesos de corte. Por ejemplo, una partícula de arena produce significativamente alto desgaste en la superficie (dos cuerpos abrasivos). La resistencia de un material a la abrasión es moderadamente constante cuando el abrasivo es mucho más duro que el material, la dureza de ambos es similar y la acción de abrasión se acerca al pulido.



**Figura 19** Esquema de desgaste por abrasión, describiendo una partícula haciendo una ranura sobre un material más suave.

**Fatiga:** Se difiere al desgaste en abrasión o adhesión, donde la pérdida o desplazamiento de material resulta de una simple interacción; la fatiga requiere de múltiples interacciones. En la fatiga una superficie experimenta repetidos esfuerzos cíclicos, llevando al agrietamiento. Las grietas se conectan y da como resultado partículas sueltas llevando al desgaste, se ilustran en la **Figura 20**. La fatiga depende fuertemente del esfuerzo, muchos estudios indican que el rango de desgaste es proporcional a  $n$  (esfuerzo), donde  $n$  está en el orden de 8 o 9. Generalmente la fatiga provoca más rango de desgaste que la abrasión o la adhesión.



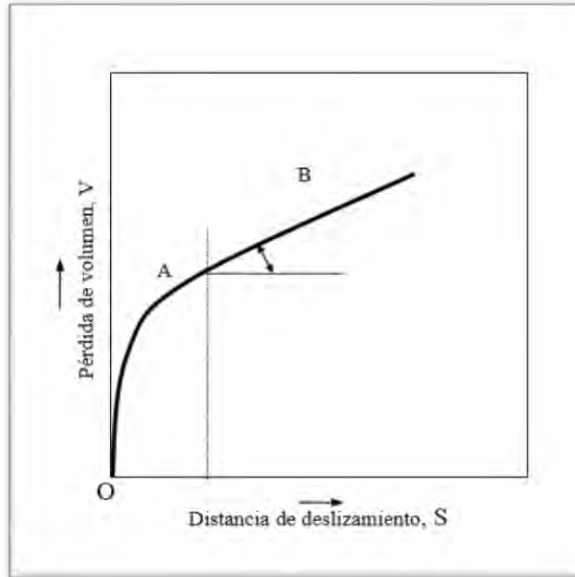
**Figura 20** Al tiempo  $t_1$  la grieta se forma. Con el subsecuente ajuste la grieta se propaga  $t_2$ . A  $t_3$  después de subsecuentes ciclos, la grieta se propaga a la superficie, y se forma una partícula suelta.

Existe una variedad de parámetros que influyen a todos los mecanismos de desgaste:

- ❖ Parámetros del material: composición, tamaño de grano, módulos, conductividad térmica, dureza, etc.
- ❖ Parámetros designados: forma, carga, tipo de movimiento, rodamiento, vibración, tiempo del ciclo, etc.
- ❖ Parámetros del medioambiente: temperatura, humedad, atmósfera, contaminación, etc.
- ❖ Parámetros del lubricante: tipo de lubricante, estabilidad del lubricante, tipo de fluido del lubricante, etc.
- ❖ Presencia o ausencia de desgaste.

Estos parámetros aplican para ambos miembros en contacto de desgaste <sup>[9]</sup>.

Si la pérdida de volumen en peso, se grafica en forma continua relacionándola con la distancia de deslizamiento, se obtiene una curva característica como la que se muestra en la **Figura 21**. El punto O corresponde al encendido de la máquina, es decir, cuando la distancia de deslizamiento es cero. Inicialmente, la pérdida de peso es curvilínea y la relación de pérdida de peso o volumen por unidad de distancia de deslizamiento disminuye, hasta que se une suavemente en A con la recta AB. La cantidad de pérdida de volumen en el régimen determinado por OA es el desgaste en el arranque inicial y AB es el estado estacionario. La pendiente del régimen estacionario es lineal y se utiliza para expresar la razón de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento, y a una carga y velocidad dadas, es constante para cada material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie.

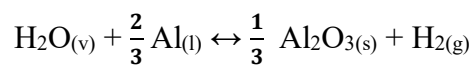


*Figura 21* Curva típica de desgaste.

## 2.9 Evaluación de los compositos

En la producción de piezas de MMC's, el control de calidad requiere ir más allá de los asociados con los metales y aleaciones ordinarias. Es necesario monitorear la fracción de partículas cerámicas y la uniformidad de su distribución en la matriz de aluminio. Detectar asentamiento de partículas, y zonas sin partículas. Detectar defectos en el producto como fracturas, contracciones, porosidad, distribución y cantidad del reforzante, características microestructurales de la matriz, etc.

*Porosidad:* El gas primeramente responsable de la porosidad en las aleaciones de aluminio coladas es el H<sub>2</sub>, este puede entrar en la aleación líquida por medio del vapor de agua.



La solubilidad del H<sub>2</sub> en el Aluminio aumenta, cuando la temperatura alcanzada en el metal líquido se incrementa. La solubilidad es medida en ml/100g Al de aleación, **Tabla 7**. Los elementos de aleación o aleantes afectan también la solubilidad del H<sub>2</sub>. Generalmente el elemento de aleación decrece la solubilidad del H<sub>2</sub>.



**Tabla 8** Densidades relativas y nivel de H<sub>2</sub> en aleaciones de aluminio. (12)

ALEACION	DENSIDAD RELATIVA	NIVEL DE H ml/ 100g Al
C355.2	2.63-2.69	0.090-0.076
A356.2	2.61-2.66	0.100-0.072
A357.2	2.63-2.66	0.094-0.074
319	2.69-2.74	0.075-0.055
319	2.30-2.50	0.215-0.165
319	2.10-2.30	0.265-0.215
<b>380</b>	<b>2.71</b>	<b>0.098-0.074</b>

Como la solubilidad del H<sub>2</sub> es mayor en el aluminio líquido en comparación con el metal sólido, por lo que este queda atrapado formando poros. Como se asume que no hay difusión de H<sub>2</sub> en el metal sólido, pero si existe en el metal líquido, al final de la solidificación este último puede incrementar la concentración de H<sub>2</sub>.

Por lo tanto, el tamaño y cantidad de porosidad en las piezas coladas son usualmente el resultado del nivel de gas en la aleación fundida, y el rango de temperatura. En el anexo 1 se ilustra el patrón comparativo de inspección visual usado para algunas fundiciones de aluminio, donde muestra el nivel de gas en el metal.

*Cantidad:* La cantidad de partículas en el compuesto está determinada por las condiciones en el proceso de fabricación, por ejemplo, una buena agitación debe proveer el contacto (humectabilidad) entre el metal líquido y la partícula con el mínimo de gas absorbido. Se debe de tener un control en la temperatura para evitar la sedimentación o segregación de las partículas y para evitar reacciones interfaciales.

*Distribución:* Como se ha mencionado en el proceso de solidificación, es un paso crucial que determina el patrón de partículas distribuidas. Una buena interacción entre las partículas y el frente de solidificación puede ser determinado por un rango de solidificación y la morfología de la estructura solidificada y puede llevar a la captura de la partícula por el frente de solidificación en algunos casos y el rechazo de la partícula en otros. Otra condición esencial para la generación de una unión satisfactoria entre la fase del cerámico sólido y la matriz metálica líquida es una

buena humectabilidad, se ha definido a la humectabilidad como la habilidad de un líquido a esparcirse en una superficie sólida y representar un íntimo contacto entre el líquido y el sólido.

## 2.10 Diseño de Experimentos

Los modelos de diseño de experimentos son modelos estadísticos clásicos, cuyo objetivo es averiguar si determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, para cuantificar dicha influencia.

La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación. Es sabido que, si se repite un experimento en condiciones distintas al original, los resultados presentan una cierta variabilidad. Si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento. Pero si se experimenta en procesos industriales, la variabilidad será mayor en la mayoría de los casos.

El objetivo del diseño de experimentos es estudiar si cuando se utiliza un determinado tratamiento se produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar aplicando el tratamiento y no aplicándolo. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación.

La metodología del diseño de experimentos estudia como variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta; de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés.

Un experimento se realiza por alguno de los siguientes motivos:

- Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta.

- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas.

### *Inconsistencia de los datos*

Los procesos cambian con el tiempo, se producen cambios en el personal (cambios de personas, mejoras del personal por procesos de aprendizaje, motivación, etc.), cambios en las máquinas (reposiciones, reparaciones, envejecimiento, etc.). Estos cambios tienen influencia en los datos recogidos, lo que hace que los datos históricos sean poco fiables, sobre todo si se han recogido en un amplio espacio de tiempo.

Por lo que, para el experimento que se realizó, se trató de no cambiar a las personas involucradas, así como utilizar los mismos equipos durante las diversas pruebas, pesar siempre las mismas cantidades, etcétera. Tratando así de mantener al mínimo la inconsistencia en los experimentos.

### *Variables con fuerte correlación*

Puede ocurrir que en el proceso existan dos o más variables altamente correlacionadas que pueden llevar a situaciones confusas. Por ejemplo, en el proceso hay dos variables  $X_1$  y  $X_2$  fuertemente correlacionadas que influyen en la respuesta, pero si en los datos que se tiene aumenta al mismo tiempo el valor de las dos variables no es posible distinguir si la influencia es debida a una u otra o a ambas variables (confusión de los efectos). Otra situación problemática se presenta si solo se dispone de datos de una variable (por ejemplo, de  $X_1$  y no de  $X_2$ ), lo que puede llevar a pensar que la variable influyente es la  $X_1$  cuando, en realidad, la variable influyente es la  $X_2$  (variable oculta).

### *El rango de las variables controladas es limitado*

Si el rango de una de las variables importantes e influyentes en el proceso es pequeño, no se puede saber su influencia fuera de ese rango y puede quedar oculta su relación con la variable de interés o los cambios que se producen en la relación fuera del rango observado. Esto suele ocurrir cuando se utilizan los datos recogidos al trabajar el proceso en condiciones normales y no

se experimenta (cambiando las condiciones de funcionamiento) para observar el comportamiento del proceso en situaciones nuevas.

Una variable destacada en este punto es la temperatura de trabajo, que fue de 850° C, si esta hubiese sido de 800° C antes del tratamiento al metal líquido, podría comenzar a solidificar durante la adición y mezcla del SiC, por lo que no puede modificarse dicha temperatura de trabajo.

### **2.10.1 Planificación de un experimento**

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones.

La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación, para el estudio de estos problemas, se basaba en estudiar los factores uno a uno, esto es, variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes:

- Es necesario un gran número de pruebas.
- Las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tienen un campo de validez muy restringido.
- No es posible estudiar la existencia de interacción entre los factores.
- Es inviable, en muchos casos, por problemas de tiempo o costo.

Las técnicas de diseño de experimentos se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, son más eficaces y proporcionan mejores resultados con un menor coste.

Las etapas a seguir en el desarrollo de un problema de diseño de experimentos son las siguientes:

- ❖ Definir los objetivos del experimento. Identificar todas las posibles fuentes de variación, incluyendo:
  - a. Factores tratamiento y sus niveles,
  - b. Unidades experimentales,
  - c. Factores de ruido: factores bloque, factores ruido y covariables.
- ❖ Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales a las condiciones de estudio (tratamientos).
- ❖ Especificar las medidas con que se trabajará (la respuesta), el procedimiento experimental y anticiparse a las posibles dificultades.
- ❖ Ejecutar un experimento piloto.
- ❖ Especificar el modelo.
- ❖ Esquematizar los pasos del análisis.
- ❖ Determinar el tamaño muestral.
- ❖ Revisar las decisiones anteriores y modificarlas si se considera necesario.

Los pasos del listado anterior no son independientes y en un determinado momento puede ser necesario volver atrás y modificar decisiones tomadas en algún paso previo.

En resumen, las posibles fuentes de variación de un experimento son:

Fuente	Tipo
* Debida a las condiciones de interés *	* Planificada y sistemática *
* Debida al resto de condiciones controladas* (Factores "nuisance")	* Planificada y sistemática *
* Debida a condiciones no controladas. * (error de medida, material experimental, etc.)	* No planificada, pero ¿sistemática? *

## 2.10.2 Condiciones de Repetitividad y Condiciones de Reproducibilidad

Como se menciona en ASTM E177, se definen las condiciones de repetitividad como “*las condiciones en las que el mismo operador obtiene resultados de pruebas independientes. con el mismo método aplicado a objetos de prueba idénticos en el mismo laboratorio utilizando el mismo equipo dentro de intervalos de tiempo breves*” y, las condiciones reproducibilidad como “*las condiciones en las que los resultados de una prueba se obtienen con el mismo método aplicado a idénticos objetos de prueba por diferentes operadores en diferentes laboratorios con diferentes equipos*”. Esto se refiere a que un laboratorio/instalación implica necesariamente, un operador diferente, equipos, ubicación, supervisión y demás características difieren a la original, pero que convergen con los mismos resultados.

Lo anterior mencionado, es para que, si en un futuro se requieren nuevos ensayos de las pruebas realizadas, los datos obtenidos representen la misma magnitud o sean similar a los cuales he obtenido con los experimentos.

Por lo que las pruebas se repitieron 3 veces, donde se espera obtener un promedio en la cantidad de partículas.

# Capítulo

## 3

### Desarrollo Experimental

#### 3.1 Selección de la pieza prototipo

La pieza a fabricar, es una guía de caja de moldeo, ésta se encuentra sometida a desgaste y este ocurre, en el momento del ensamble de la caja, como se muestra en la *Figura 22*.



*Figura 22* Guía de ensamble de caja de moldeo.

La cuestión importante es saber ¿cómo se determinó el uso del material compuesto para la sustitución de la pieza fabricada originalmente en hierro gris? sin duda, un punto importante es que, el aluminio tiene una densidad baja, la cual es de  $2.7 \text{ g/cm}^3$  y el compuesto tiene un promedio de  $2.8$  a  $2.9 \text{ g/cm}^3$  con lo que, al tener menor peso, es más sencillo cargarlo y transportarlo.

Otro punto importante, es que la pieza está sometida a ciclos de fricción, lo cual la va desgastando, por ello se busca sustituirlo con un material más resistente al desgaste.

Mientras que la elección del refuerzo, se tomó con el parámetro de compatibilidad con la matriz, es decir, que tuviese una densidad parecida a la matriz, el SiC<sub>p</sub> presenta una densidad de 3.2 g/cm<sup>3</sup> y sobre todo se determinó porque, los carburos por naturaleza son duros y esto, daría al material la característica solicitada más importante, que es la resistencia al desgaste.

### 3.2 Material original de la pieza a remplazar

Un punto importante es el material con el que se fabrica la pieza original, para ello se le realizó un análisis químico, el cual se muestra a continuación en la **Tabla 10**.

*Tabla 10 Composición química de la guía de ensamble.*

<i>% C</i>	<i>% Si</i>	<i>% Mn</i>	<i>% P</i>	<i>% S</i>	<i>% Fe</i>
<i>3.682</i>	<i>1.936</i>	<i>0.647</i>	<i>0.168</i>	<i>0.144</i>	<b>Balance</b>

Comparado con la literatura, se encontró que se aproxima a un hierro gris clase G2000 el cual presenta la composición de la **Tabla 11**, aunque cabe mencionar que la cantidad de silicio contenido en la pieza, es menor al necesario en dicha clase, sin embargo, es el más cercano en composición a todos los elementos presentados en la composición.

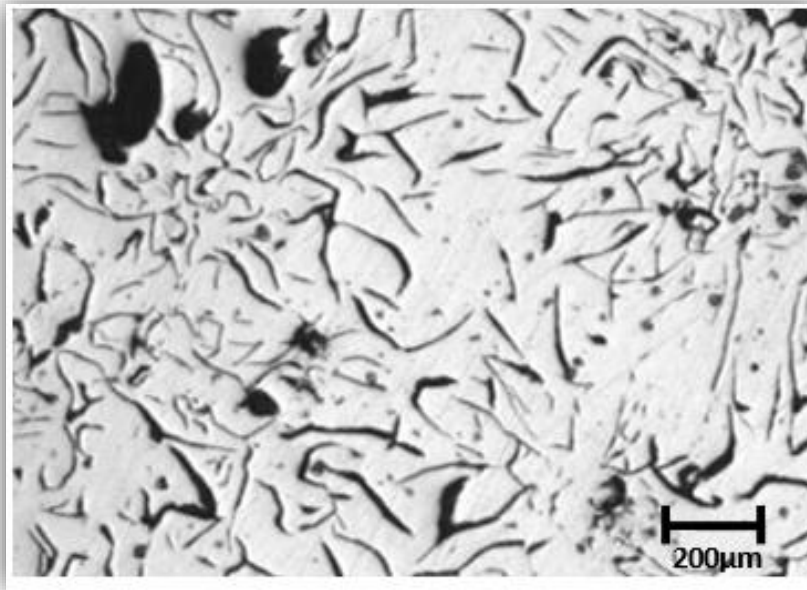
*Tabla 11 Composición química de hierro gris clase G2000.*

<i>% C</i>	<i>% Si</i>	<i>% Mn</i>	<i>% P</i>	<i>% S</i>	<i>% Fe</i>
<i>3.50-3.80</i>	<i>2.40-2.60</i>	<i>0.50-0.70</i>	<i>0.20-0.80</i>	<i>0.08-0.13</i>	<b>Balance</b>

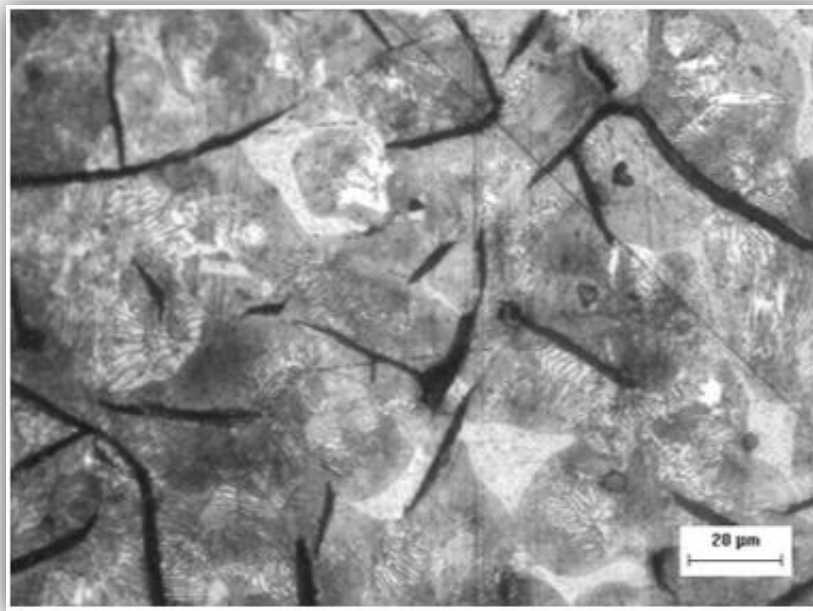
Este material de acuerdo a la norma, debe tener una dureza Brinell 160 a 200.

Posteriormente se le realizó análisis metalográfico para una mejor identificación del mismo, la microestructura se muestra en las **Figuras 23** y **Figura 24**.





*Figura 23* Microestructura del hierro gris clase G2000, sin ataque, donde se muestra que el grafito es tipo C, el cual se caracteriza por ser de tamaño irregular en longitud y grosor.

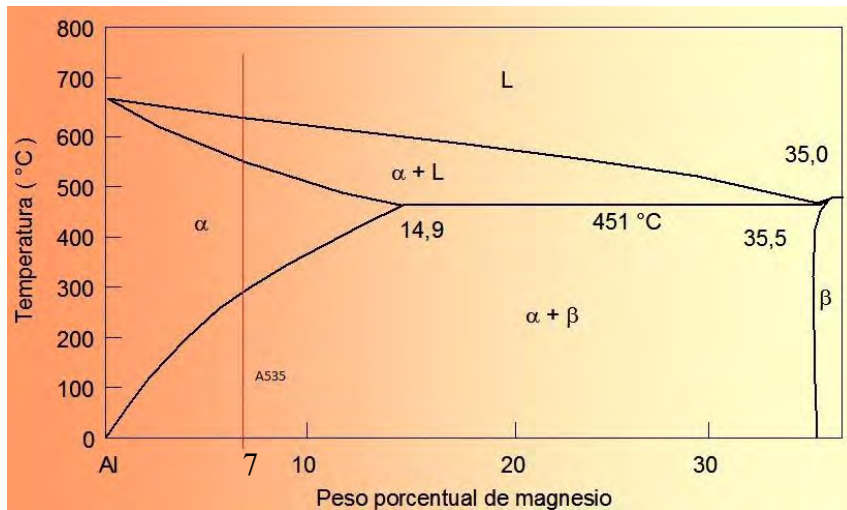


*Figura 24* Microestructura de hierro gris, donde se muestra una matriz perlítica. Se observa la presencia de ledeburita (zonas blancas y triangulares), la cual es muy frágil.

Las anteriores metalografías, fueron hechas para la identificación y en este caso, ratificación de que dicha composición coincide con un hierro gris y su estructura presentada.

### 3.3 Clasificación de la materia prima

Se fabricaron dos ligas o coladas de aleación A535, utilizando un horno a gas, lo ideal habría sido obtener una composición de 93% Aluminio y 7% Magnesio en promedio.



*Figura 25 Diagrama Aluminio-Magnesio.*

En la **Figura 25** se observa, una línea en la composición química de la aleación Al-7%Mg, solo si, fuese una aleación pura de Al con Mg, este diagrama aplicaría para determinar la temperatura de fusión de la aleación.

Para que los posteriores experimentos fueran homogéneos respecto a composición química, se realizó una mezcla lo más colindante al 50% en peso de cada una de las coladas antes obtenidas.

La composición química que arrojaron las dos ligas, están en las **Tabla 12** y **Tabla 13** respectivamente.

*Tabla 12 Composición química de la aleación base A535, Primera colada*

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.422	0.372	0.035	0.629	7.260	0.051	0.024	Balance

*Tabla 13 Composición química de la aleación base A356, segunda colada.*

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
2.583	0.418	0.191	0.088	7.040	0.137	0.621	Balance

Recordando que, a partir de estas, se consolidó la matriz base para la fabricación del composito, con una mezcla de 50% de cada una. La **Tabla 14** muestra la composición promedio al mezclar ambas ligas, en el proceso de re fusión.

*Tabla 14 Composición promedio de ambas ligas.*

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
1.502	0.395	0.113	0.359	7.150	0.940	0.322	Balance

Un problema en la utilización de Magnesio en las aleaciones en general, es su alta reactividad, con lo cual normalmente se ocuparía una mayor cantidad de material, por ende, se trató de aumentar su eficiencia al utilizar un dispositivo como campana, el cual se puede apreciar en la **Figura 26**.



*Figura 26 Campana para la introducción de Mg al líquido.*

Con este dispositivo se aumentó la recuperación de magnesio, obteniendo 78% en la primera liga y 72% en la segunda, con lo que, se disminuyó la cantidad de magnesio utilizado.

Otro componente es el SiC<sub>p</sub>, el cual fue utilizado en una mezcla de tamaño de partícula 40 y 50 µm, actualmente a tamaño de malla de 325 y 270 respectivamente, en una proporción de 50% cada uno.

### 3.4 Fabricación de la pieza de fundición

#### 3.4.1 Mezcla de moldeo.

El molde se fabricó por la técnica de moldeo en verde, la mezcla utilizada se presenta en la **Tabla 15**. Esta composición se obtuvo en trabajos previos.

*Tabla 15 Mezcla de moldeo utilizada.*

Descripción	Clasificación	Cantidad % w
Arena	Oklahoma AFS 90-100	86 %
Bentonitas	Cálcica	6%
	Sódica	4%
Agua	Humedad	4%

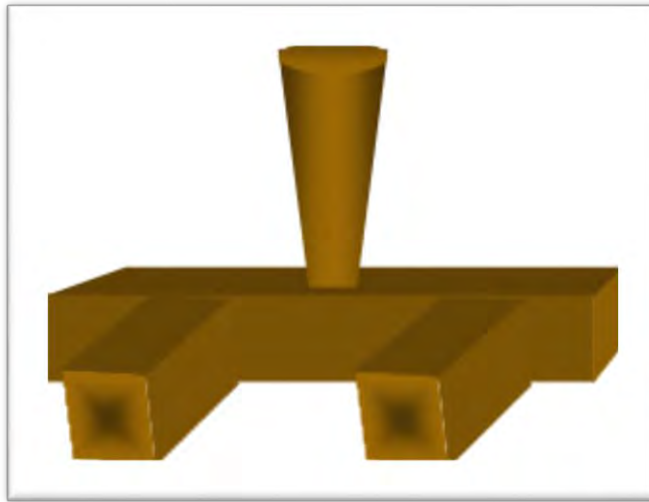
Las propiedades que presenta, la anterior mezcla de moldeo, se observan en la **Tabla 16**.

*Tabla 16 Propiedades de la mezcla de moldeo.*

Resistencia a la Compresión	12-14 Psi
Permeabilidad	100-120 diter
Resistencia al Impacto	60 %
Humedad	4%

### 3.4.2 Diseño de Sistemas de Colada

Este trabajo presenta un diseño de sistema de colada que, tomando en cuenta el método sugerido por la AFS [1989] *Figura 27*, que tienen una relación de colada de 1:1.5:2 y 1:2:3 para un sistema “no presurizado”, debido a que, a las aleaciones de aluminio, se les considera que presentan alta sensibilidad a la oxidación.



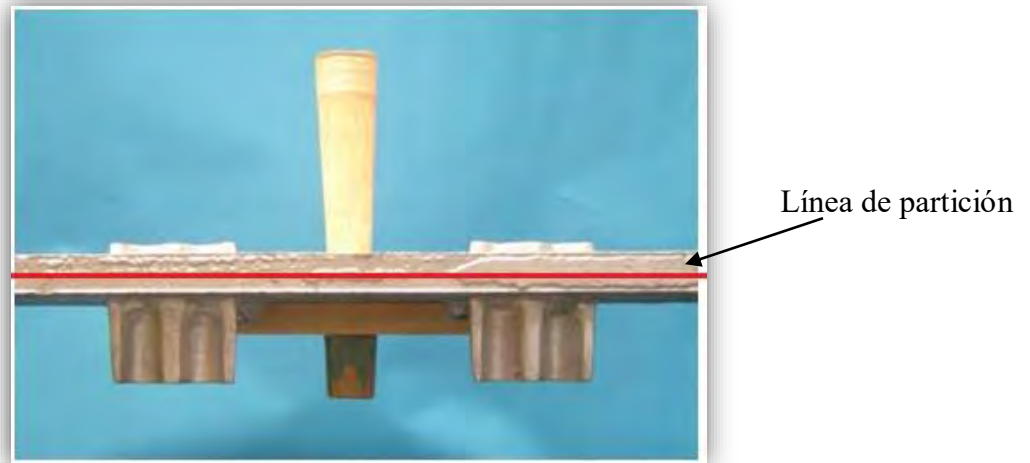
*Figura 27 Esquema del sistema de colada.*

Los cálculos de las dimensiones de los componentes de los sistemas de colada, se detallan en el anexo 1.

### 3.4.3 Modelo y placa modelo

La placa modelo reúne las siguientes características, que pueden observar en la *Figura 28*:

- ❖ El sistema de colada está integrado a la placa modelo, salvo bajada y tina de vaciado.
- ❖ Se ubicaron los sistemas de colada en la parte inferior del molde.
- ❖ Se colocó colchón a la bajada.
- ❖ Se colocaron extensiones en los corredores.
- ❖ La pieza se ubicó en la parte superior e inferior de la placa.
- ❖ No se usaron alimentadores ya que la pieza es de sección delgada.



*Figura 28 Placa modelo mostrando la colocación del sistema de colada y la pieza, en relación a la línea de partición*



*Figura 29 Placa modelo mostrando las dos guías de ensamble, también llamado drag(6).*

La **Figura 29** se muestra la parte inferior de la placa modelo, esta presenta las dos guías de ensamble así como, la entrada correspondiente a cada una y el corredor.

La **Figuras 30** y **Figura 31** se muestran las cavidades inferior y superior respectivamente, que deja en la arena del molde la placa modelo.



*Figura 30 Molde inferior de arena.*

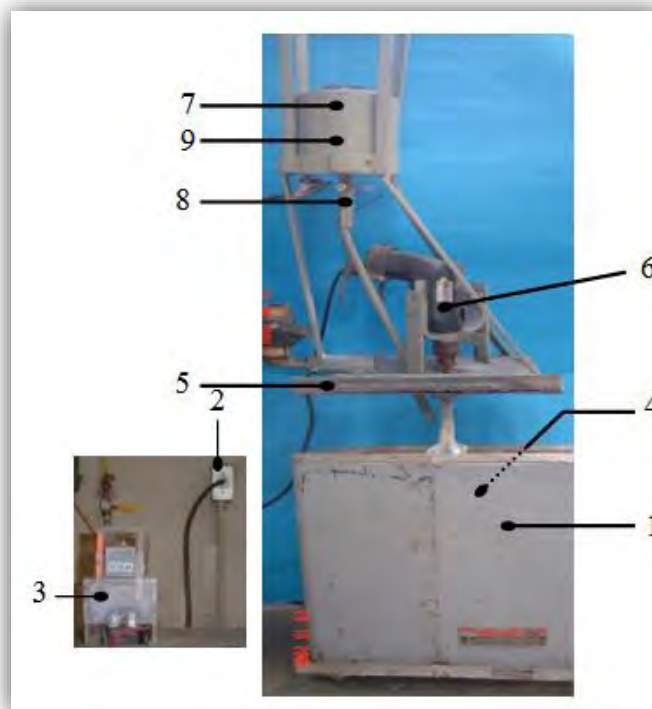


*Figura 31 Molde superior de arena.*

#### **3.4.4 Equipo**

Las características del equipo utilizado para la fabricación del compuesto, *Figura 32*, son:

- ❖ Sistema de fusión
  - Horno de resistencia eléctrica de 3500 W, (1)
  - Alimentación de 220 V, (2)
  - Controlador de temperatura de (0-1200 °C), (3)
  - Crisol de carburo de silicio tamaño A 10, (4)
  - Tapa de horno con aditamentos para la flecha y sistema de precalentamiento de cerámico, (5)
- ❖ Sistema motriz de agitación
  - Taladro con alimentación eléctrica de 127 V, velocidad variable (100-2500 RPM), (6)
- ❖ Sistema de precalentamiento del cerámico (horno-tolva) (7)
  - Está sujeto a la tapa del horno, es un cilindro de acero con resistencia eléctrica, dentro de la cavidad de la resistencia, hay un cilindro con base cónica, que desemboca por medio de un tubo al baño líquido.
  - El tubo con válvula de paso, (8)
  - La (tolva/horno) con un vibrador eléctrico que permite flujo constante de SiC (9).



*Figura 32 Equipo utilizado en la fabricación del composito.*



### 3.5 Diseño experimental

Se evaluaron tres tiempos de agitación, 1, 3 y 5 minutos, así como tres velocidades de agitación distintas, 500, 700 y 900 RPM, esto, durante la mezcla del metal líquido al adicionarse el carburo de silicio.

Se realizó por triplicado cada una de los cruces, que se observan en la **Tabla 17**, para con ello obtener una media de los resultados.

### 3.6 Fabricación del compuesto

La fabricación del compuesto se realizó en las siguientes etapas:

1. Preparación de la carga metálica.
  - CORTE Y TAMAÑO. Se consideró el tamaño del crisol en el cual se llevaría a cabo la fusión, con lo que se realizaron cortes a los lingotes, que previamente se obtuvieron en las ligas, tratando de utilizar 50% en la carga de cada liga, para así tener el mismo % de Mg.
  - PRECALENTAMIENTO. Antes de que se realizara la fusión, la carga se precalentó aproximadamente a 450° C en la parte superior del horno, con el fin de que la fusión fuese más rápida. Por otro lado, se puso en funcionamiento el horno a una temperatura de 900° C, de igual manera las partículas de refuerzo fueron colocadas para su calentamiento a 450° C.
  - RE FUSIÓN Y TRATAMIENTO. Una vez que el horno y crisol presentan una temperatura estable de 900° C, se introduce la aleación base, cuando están líquidos los lingotes y alcanzada una temperatura de 850° C, se retira la escoria de la superficie y se introduce el taladro con la flecha y se pone en funcionamiento con las RPM necesarias, esto hace la función de mezclador al comenzar agitarse el metal líquido, se vierten las

partículas, pasado el tiempo necesario de agitación, se apaga y retira la flecha de mezclado.

- VACIADO Y DES MOLDEO. Se procede al vaciado del metal líquido a los moldes de arena, se dejan enfriar y se procede a desmoldar y limpiar las piezas de la arena.

# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

En este capítulo, se analizan las piezas visualmente y las imágenes de las microestructuras obtenidas, para la cuantificación de las partículas, así como comparación entre los resultados experimentales.

### 4.1 Evaluación Visual

El primer cuestionamiento hacia las piezas obtenidas, es sobre su aspecto visual, con el objeto de verificar que hayan sido piezas completas y libres de defectos, tales como arena atrapada, porosidad, aglomeración de partículas y en el peor de los casos, que las piezas no se llenaran por completo,

Las piezas con respecto a la variable Tiempo de Agitación de 1 minuto con 700 y 900 RPM en velocidad de agitación *Figura 33*, presentaron piezas completas y sin defectos a simple vista, las demás piezas salieron mal, al no poderse llenar por completo o presentar grandes zonas de ausencia de metal.



*Figura 33* Pieza B en prueba 1 min y 700 RPM.

En la **Figura 34**, experimento 3 repetición B, se ve claramente como la pieza no fue llenada completamente de metal.

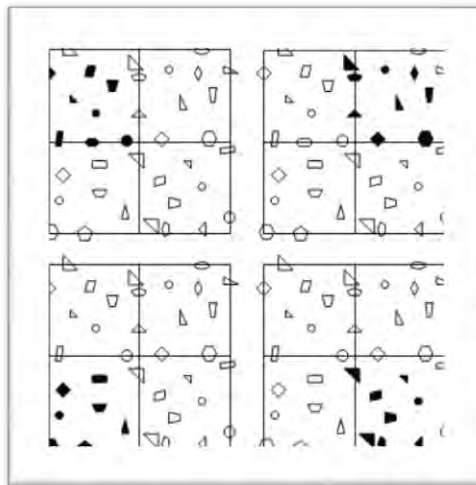


**Figura 34** No hubo llenado completo. Pieza 3B

#### 4.2 Conteo de partículas en las piezas

En los compuestos de MMC's es necesario, monitorear la fracción de partículas cerámicas y la uniformidad de su distribución en la matriz.

Por este motivo, se monitorea la fracción de partículas, para ello se tomó el método cuadrático, el cual es aplicado por Karnezis (13), donde propone el conteo de las partículas en un área específica, como se muestra en la **Figura 35**, para un área de la muestra observada por microscopía óptica, se divide en cuatro campos las partículas que están en cada uno de esos cuadros es contabilizada.

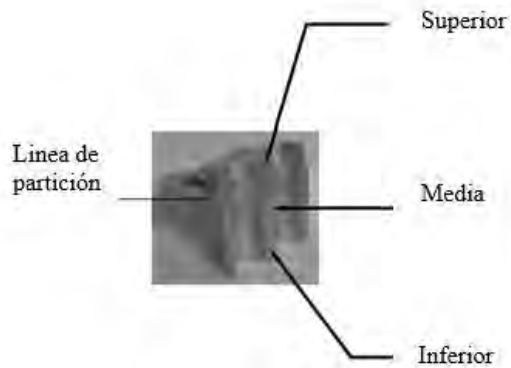


**Figura 35** Técnica de conteo de partículas (anexo 2)

A cada cuadrícula se realiza un conteo de las partículas que son cruzadas por las líneas correspondientes, así como las partículas contenidas dentro de cada uno de los campos. La evaluación final del conteo de partículas por muestra, está dado por el promedio de la cantidad de partículas en cada imagen.

Se suma el contenido de cada campo, para tener el total de las partículas, y se divide por el área total evaluada, para tener unidades de [partícula/cm<sup>2</sup>].

En este caso se dividió la pieza en 3 secciones: inferior, media y superior para poder cuantificar las partículas en cada orejilla obtenida como se puede observar en la **Figura 36**.



**Figura 37** Zonas para análisis metalográfico.

La **Figura 37** muestra la pieza 1 B sección inferior, es decir, primera selección de variables, segunda prueba.



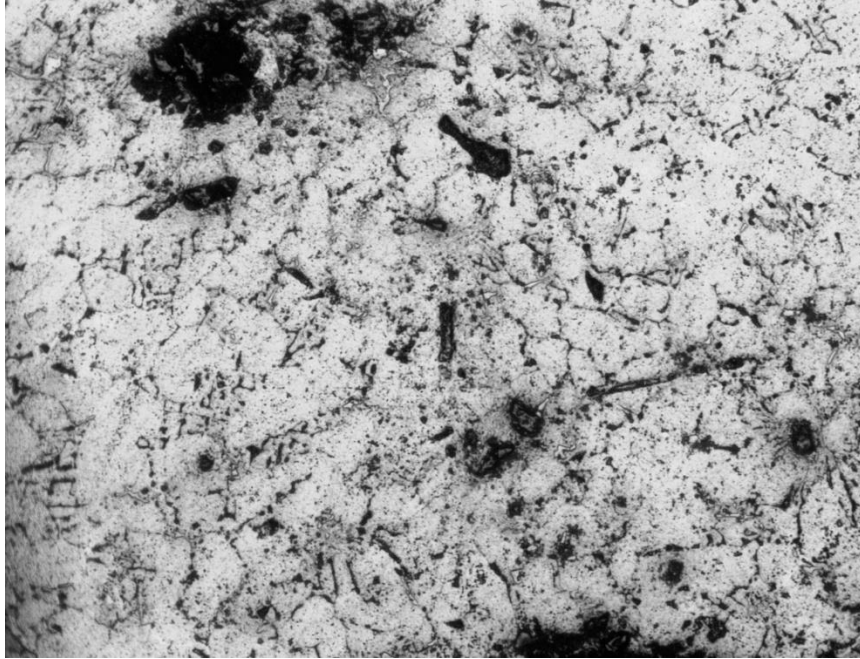
**Figura 37** Pieza 1 B sección inferior a 100x.

Con el resultado del conteo de partículas de las piezas obtenidas, se creó la **Tabla 16**.

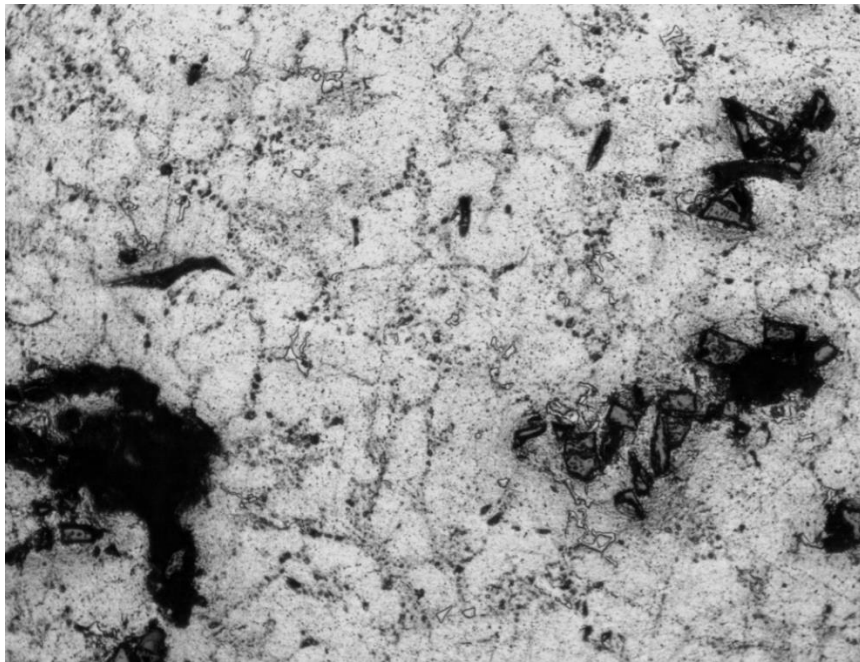
*Tabla 16* Conteo de partículas

# de Pieza	# de Ensayo	Llenado Completo	Cantidad de Partículas/ $\mu\text{m}^2$	Presenta Porosidad	Aglomeración de Partículas
<b>1</b> 500 RPM 1 Min	A	No	sin conteo	Si	Si
	B	No	sin conteo	Si	Si
	C	No	sin conteo	Si	Si
<b>2</b> 700 RPM 1 Min	A	Si	42	No	No
	B	Si	39	No	No
	C	Si	36	No	No
<b>3</b> 900 RPM 1 Min	A	Si	38	No	No
	B	Si	40	No	No
	C	Si	37	No	No
<b>4</b> 500 RPM 3 Min	A	No	sin conteo	Si	Si
	B	No	sin conteo	Si	Si
	C	No	sin conteo	Si	Si
<b>5</b> 700 RPM 3 Min	A	No	sin conteo	Si	Si
	B	No	sin conteo	Si	Si
	C	No	sin conteo	Si	Si
<b>6</b> 900 RPM 3 Min	A	No	sin conteo	Si	Si
	B	No	sin conteo	Si	Si
	C	No	sin conteo	Si	Si
<b>7</b> 500 RPM 5 Min	A	No	sin conteo	Si	Si
	B	No	sin conteo	Si	Si
	C	No	sin conteo	Si	Si
<b>8</b> 700 RPM 5 Min	A	No	sin conteo	Si	Si
	B	No	sin conteo	Si	Si
	C	No	sin conteo	Si	Si
<b>9</b> 900 RPM 5 Min	A	No	sin conteo	Si	Si
	B	No	sin conteo	Si	Si
	C	No	sin conteo	Si	Si

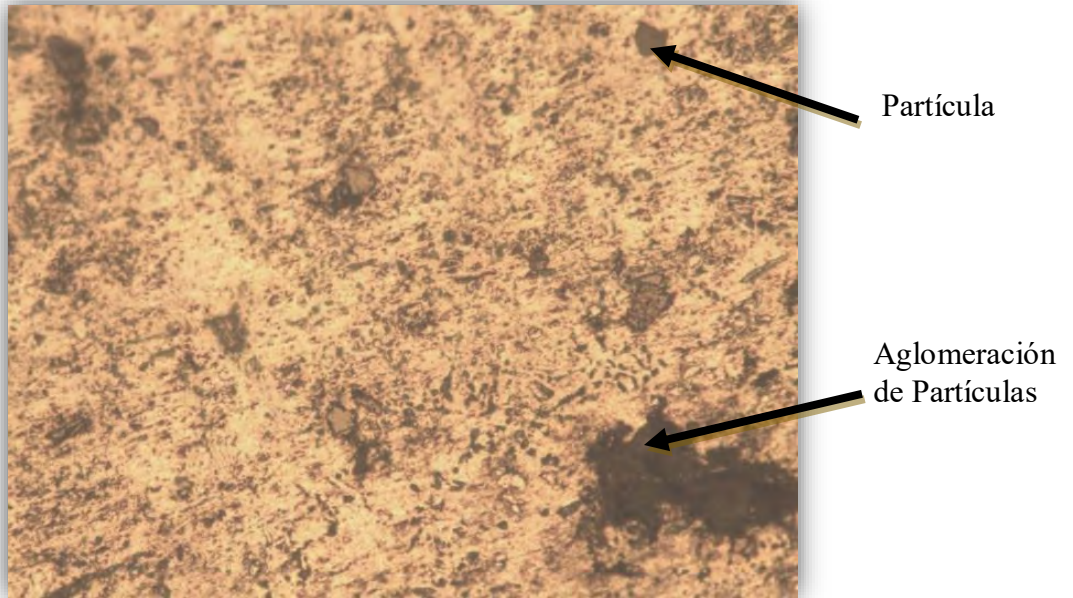
En la **Figura 38** se observa un ejemplo, de una clara aglomeración de partículas, que presentaron las piezas que no llenaron por completo y algunas partículas independientes.



*Figura 38 Pieza 2 C sección central a 100x.*

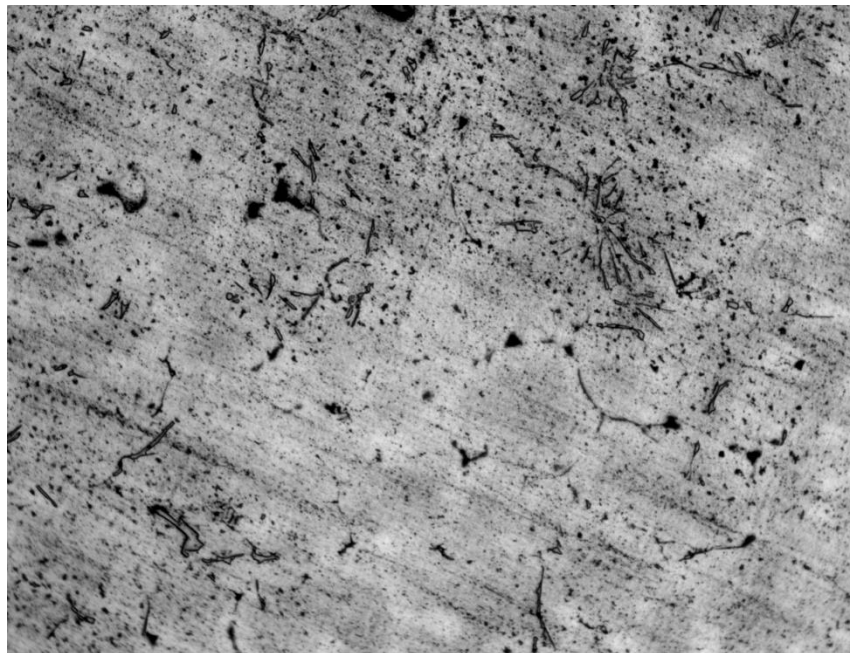


*Figura 39 Pieza 2 A sección central a 100x.*



*Figura 40 Pieza 4 A sección media a 100x.*

Se obtuvieron piezas, que presentan una mayor porosidad y aglomeración de partículas como en la **Figura 40** hasta **Figura 46**.

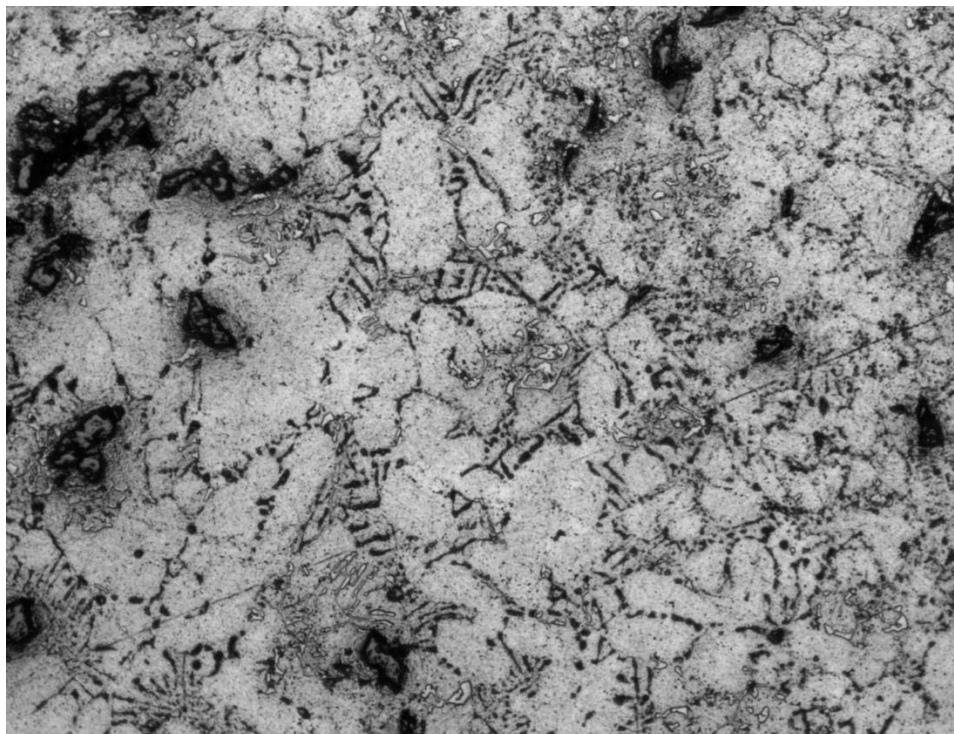


*Figura 41 Pieza 3 A sección inferior a 100x.*

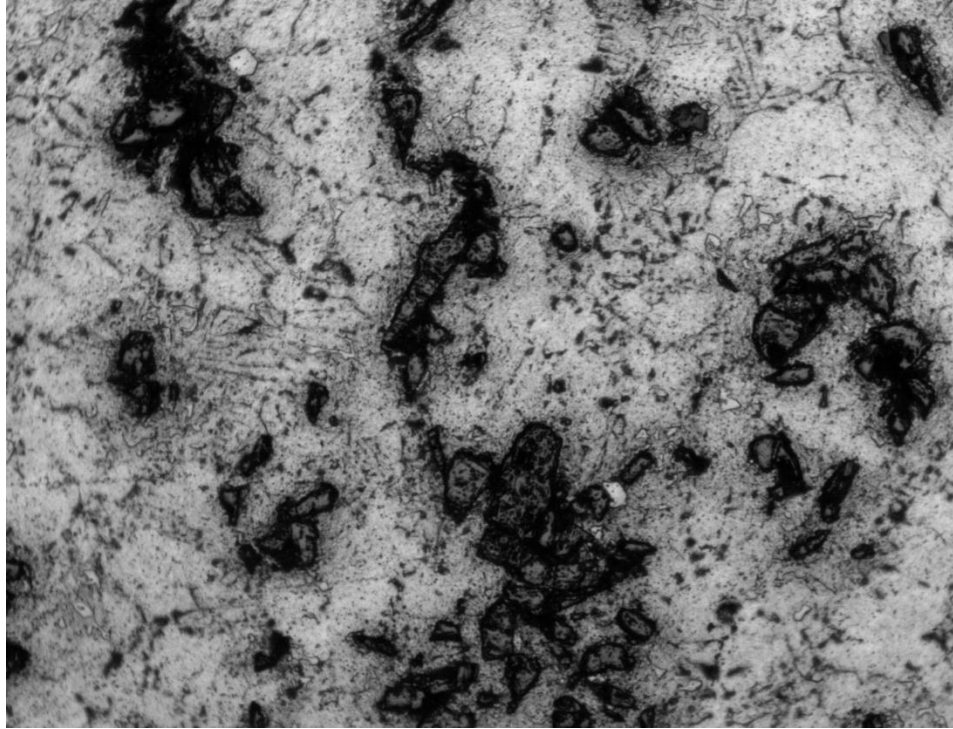




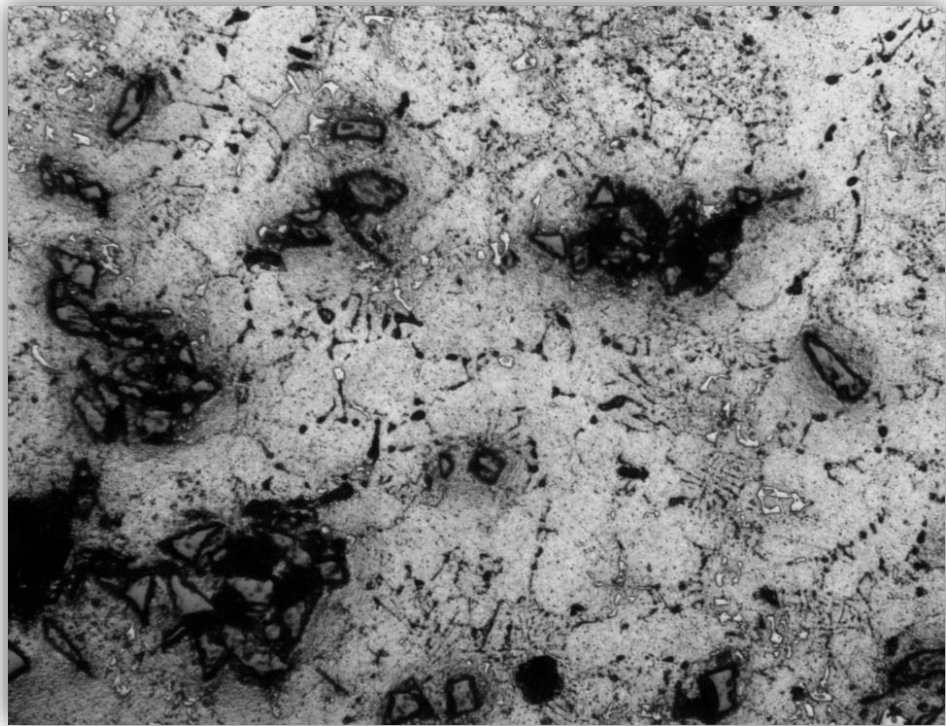
*Figura 42 Pieza 4 B sección central 100x.*



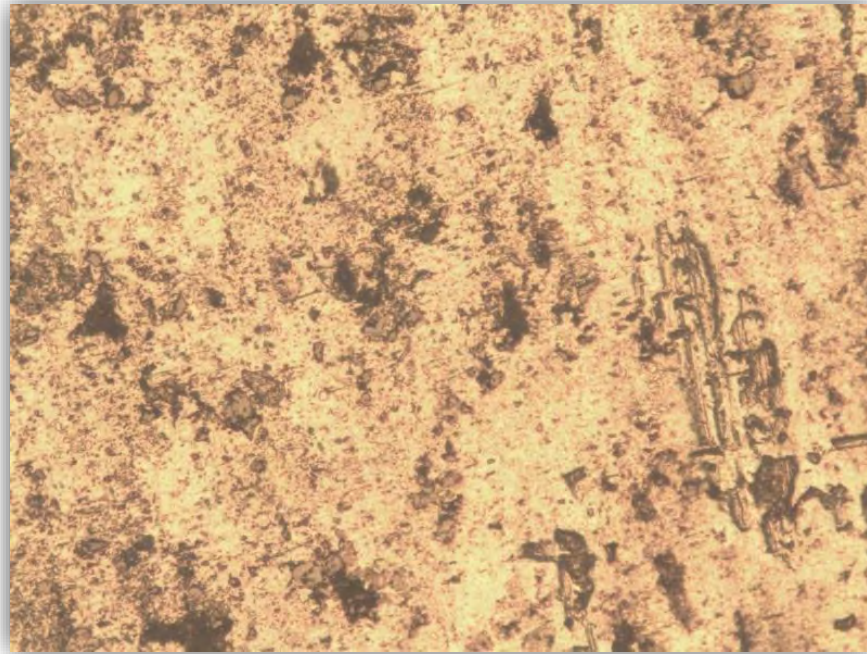
*Figura 43 Pieza 5 A sección inferior 100x.*



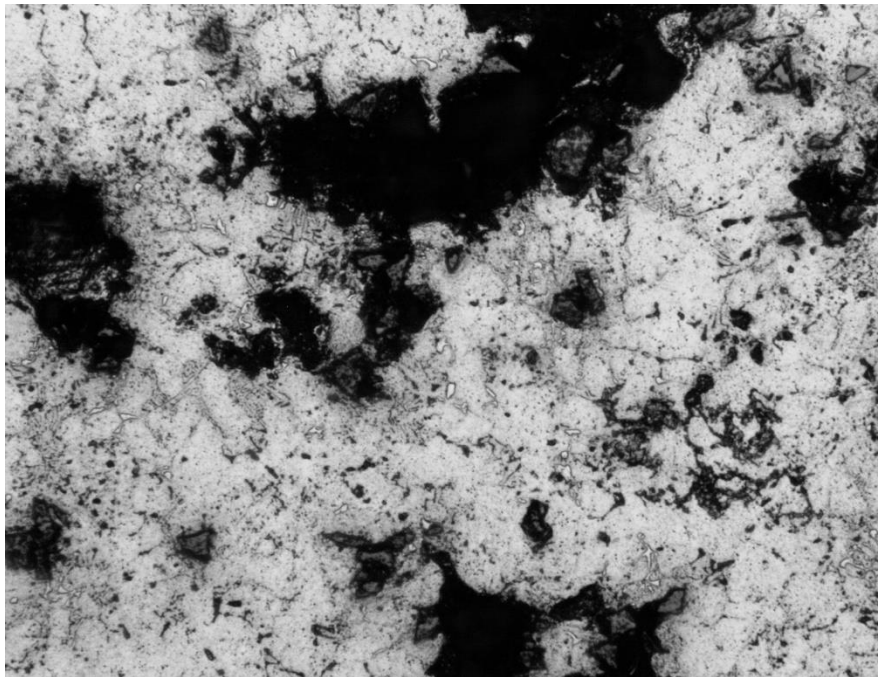
*Figura 44 Pieza 6 C sección superior 100x.*



*Figura 45 Pieza 7 B sección central 100x.*



*Figura 46 Pieza 8 B sección inferior 100x.*



*Figura 47 Pieza 9 C sección superior 100x.*

Se observa en la **Tabla 16**, que no hay una gran varianza entre la cantidad de partículas que presentan las piezas.

En las imágenes se pueden notar fases triangulares, que son precipitados de  $Mg_2Si$ .

# Capítulo 5

## Conclusiones

- Las condiciones de tiempo de agitación mayores a 1 minuto, presentan una pérdida considerable de temperatura y con ello disminuye la fluidez de la aleación.

De acuerdo con la **Tabla 17** (7)

Tabla 17. Propiedades físicas típicas de aleaciones de aluminio por fundición.

Alloy	Temper and product form <sup>(a)</sup>	Specific gravity <sup>(b)</sup>	Density <sup>(b)</sup>		Approximate melting range		Electrical conductivity, %IACS	Thermal conductivity at 25 °C (77 °F), cal/cm·s·°C	Coefficient of thermal expansion, per °C × 10 <sup>-6</sup> (per °F × 10 <sup>-6</sup> )	
			kg/m <sup>3</sup>	lb/in. <sup>3</sup>	°C	°F			20-100 °C (68-212 °F)	20-300 °C (68-570 °F)
535.0	F(S)	2.62	2519	0.091	550-630	1020-1170	23	0.24	23.6 (13.1)	26.5 (14.7)

La temperatura de trabajo fue de 800° C, este sobre calentamiento se estableció para inicio del tratamiento al metal líquido, pero en la **Tabla 18** se observa cómo disminuye la temperatura con el paso del tiempo, considerando que al menos se perdía 0.1° C/s durante el tratamiento y posteriormente en el enfriamiento dentro del molde, propiciando así, que solidificase antes del llenado total del molde en tratamientos de 3 y 5 minutos, hubiese esto sido inferior si se manejase la mayor pérdida de temperatura de 0.5° C cada segundo, ya que en el tratamiento de 5 minutos se perdió solo en el tiempo de agitación 150° C.

Tabla 18 Velocidad de enfriamiento. (7)

Casting processes	Cooling rate, °C/s	Dendrite-arm spacing, mm
Plaster, dry sand	0.05-0.2	0.1-1
Green sand, shell	0.1-0.5	0.05-0.5
Permanent mold	0.3-1	0.03-0.07
Die	50-500	0.005-0.015
Continuous	0.5-2	0.03-0.07

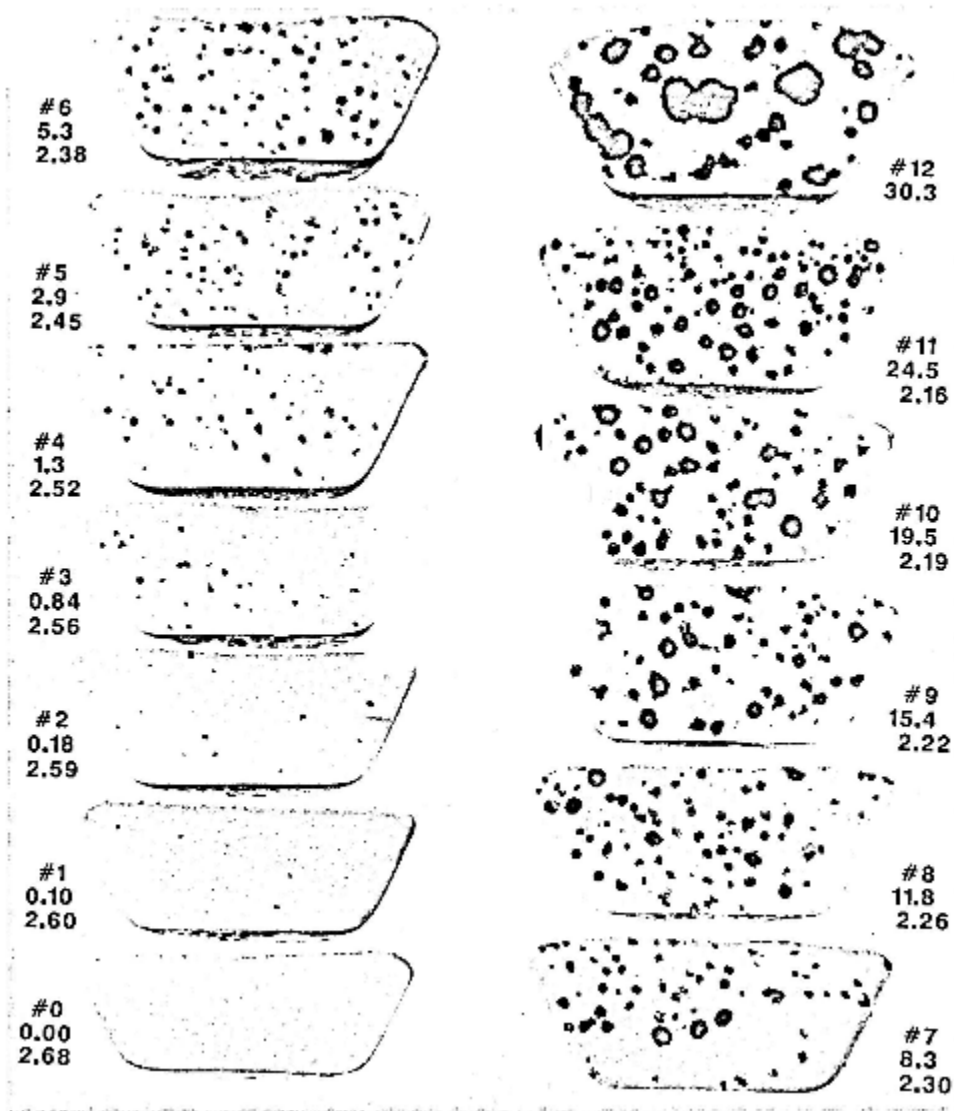
- La fabricación de un compuesto con una matriz de Al-7%Mg, es casi el doble de magnesio que normalmente se reporta en fabricación del mismo, este presenta problemas para el vaciado del metal, ya que se aglomeran demasiado las partículas.
- La velocidad de 500 RPM en agitación es demasiado pequeña para el proceso, esto hace que el carburo de silicio no se mezcle homogéneamente, se forman aglomeraciones de gran tamaño, que obstaculizan el avance del metal por la pieza durante la colada al molde.
- La fabricación del compuesto por el método de vórtice, no es factible para la aleación Al-7%Mg reforzado con carburo de silicio, ya que presenta zonas heterogéneas a lo largo de la pieza, con lo que se contrapone con la hipótesis propuesta.
- Existió una pérdida de la humectabilidad afectada al parecer, por la presencia de Mg<sub>2</sub>Si.

## Bibliografía

1. Poveda Martínez, Santiago. “**Representación Normalizada de Piezas de Material Compuesto**” Lecturas Complementarias Materiales Compuestos. pp. 2.
2. Edil Da Costa, Cesar. “**Materiales Compuestos de Matriz Metálica. 1 Parte. Propiedades y Aplicaciones**” En: Revista de Metal Madrid 36 (2000) pp., 179-192.
3. Edil Da Costa, Cesar. “**Materiales Compuestos de Matriz Metálica. 2 Parte. Métodos de Procesado y consolidación de MMC’s reforzados con partículas**” En: Revista de Metal Madrid 36 (2000) pp. 193-197.
4. Ptolomeo, “**Modelado de Procesos de Manufactura**”, Cap. 2 pp. 7.
5. Facultad de Ingeniería Industrial Julio Garavito, “**Curso de Procesos de Manufactura**”, Laboratorio de Producción, Colombia, 2008, pp 31.
6. María de los Ángeles Casales Hernández “**Manufactura de una guía de ensamble de caja de moldeo de composito colado Al-Si-SiC<sub>p</sub>, en sustitución de hierro gris**” Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México 2005.
7. American Society Metallurgical (ASM), “**Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**”, Vol. 2 Edicion The Materials Information Company. Editorial ASM International, 1992. pp 39-41, 137, 491, 500, 528.
8. American Society Metallurgical (ASM), “**Metallography and Microstructures**”, Vol. 9 Edicion The Materials Information Company. Editorial ASM International, 1985 pp. 1379
9. Merino Del Amo, Nuria. “**Fabricación y Caracterización de Materiales Compuesto de Matriz Metálica Reforzados con Nano fibras de Carbono**” Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Complutense de Madrid, España, 2010. pp. 260.
10. Bautista Lujano Joel Alonso, Pasalagua Chavez Angélica Lilian “**Desgasificación en fundición de aluminio por medio de pastillas de Hexafluoruro de azufre**”, Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, México 2008. pp. 39
11. “**Effects of the oxide layer on pressure infiltration of packed ceramic particulate by aluminum alloys**” (Disponible en <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap707.pdf> consultado 15 de Agosto de 2017)
12. Hatch E. John “**Aluminium: Properties and Physical Metallurgy**” American Society for Metals 1984 pp. 16
13. P.A. Karnezis, G. Durrant and B. Cantor “**Characterization of Reinforcement Distribution and Cast Al-Alloy/SiC<sub>p</sub> Composites**” Materials Characterization 1988. pp. 97-109.

# ANEXO 1

## Nivel de Porosidad



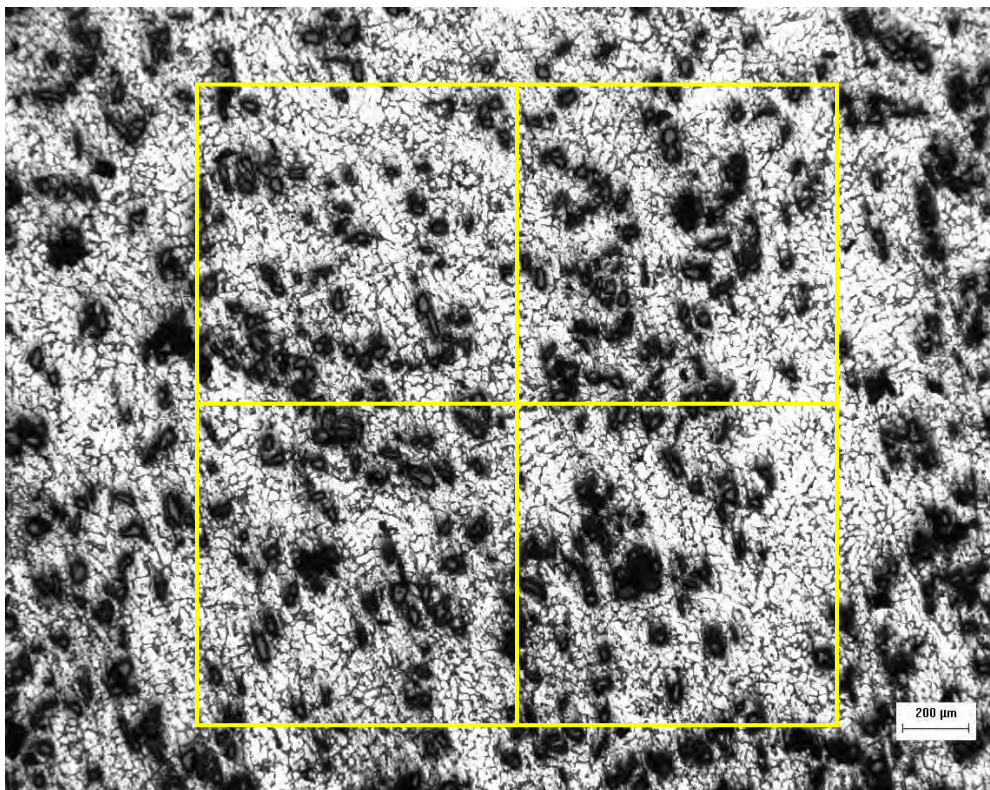
Estándar Comparativo de aleación de aluminio por desgacificado  
% de Superficie – Densidad – Área de Porosidad (100 mm de presión)

## Anexo 2

### Distribución de partículas

Técnica para evaluar la cantidad de partículas y distribución en la matriz (método cuadrático)

#### Distribución de Partículas



En esta técnica se divide la microestructura en 4 cuadros en los cuales se puede evaluar el área en base a la escala. un área conocida, en este caso el área es  $2.56 \text{ mm}^2$  por cada campo, que es el resultado de hacer la conversión de  $\mu\text{m}^2$  a  $\text{mm}^2$ .

Se cuentan las partículas de cada cuadro de acuerdo a la siguiente relación:

Campo 1: partículas de (L1 + L2 + L3) + partículas dentro del campo

Campo 2: partículas de (L4 + L5 + L6) + partículas dentro del campo

Campo 3: partículas de (L7 + L8 + L9) + partículas dentro del campo



Campo 4: partículas de (L10 + L11 + L12) + partículas dentro del campo

Dando como resultado: (ejemplo)

Campo 1: 113 partículas

Campo 2: 105 partículas

Campo 3: 101 partículas

Campo 4: 115 partículas

Se suman las partículas de cada campo, y se divide entre 4, para obtener el promedio de partículas en cada cuadro, por último, este resultado se divide por el área de un campo, de la siguiente forma:

$\Sigma$  de partículas en los campos 434 partículas / 4 = 108.5 partículas / 2.56 mm<sup>2</sup> = 42.38 partículas/cm<sup>2</sup>.

Si la cantidad de partículas en cada campo es similar se considera que la distribución es homogénea.