



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

FABRICACION DE UNA PIEZA PROTOTIPO  
DE COMPOSITO Al-Si/SiCp, RESISTENTE AL  
DESGASTE.

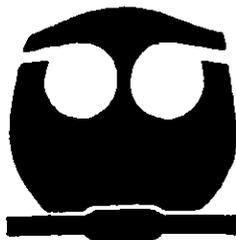
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

A N D R E S U R I B E G A R A Y



MEXICO, D.F.

2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE : PROF. CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL : PROF. J.ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA

SECRETARIO : PROF. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA

1<sup>er</sup>. SUPLENTE : PROF. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

2<sup>do</sup>. SUPLENTE : PROF. DARIO YAMAMOTO ANGEL

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA : Edificio D  
Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

ASESOR DEL TEMA :

  
M. en C. J. Alejandro García Hinojosa

SUPERVISOR TECNICO:

  
I.Q.M. Adrián M. Amaro Villeda

SUSTENTANTE :

  
Andrés Uribe Garay

**Gracias a ustedes**

**Sigan haciendo depósitos  
su cuenta se ampliara**

## INDICE

CAPITULOS

PROLOGO

INTRODUCCION

Capítulo I ANTECEDENTES

<b>1.1.- Compuestos de Matriz Metálica</b>	<b>4</b>
<b>1.2.- Propiedades</b>	<b>7</b>
<b>1.3.- Aplicaciones</b>	<b>14</b>
<b>1.4.- Metodología para la sustitución de piezas</b>	<b>17</b>
<b>1.5.- Procesos de Moldeo de Piezas de CMM</b>	<b>19</b>
<b>1.6.- Fabricación Método de Vórtice</b>	<b>24</b>
<b>1.7.- Diseño de sistema de colada</b>	<b>26</b>
<b>1.8.- Desgaste</b>	<b>31</b>

Capítulo II DESARROLLO EXPERIMENTAL

<b>2.1.- Selección de la pieza prototipo</b>	<b>43</b>
<b>2.2.- Material original de la pieza a reemplazar</b>	<b>44</b>
<b>2.3.- Materiales para la construcción de la pieza</b>	<b>47</b>
<b>2.4.- Diseño Experimental</b>	<b>48</b>
<b>2.4.1.- Equipo</b>	<b>49</b>
<b>2.4.2.- Fabricación del composito</b>	<b>50</b>
<b>2.4.3.- Modelo y placa modelo</b>	<b>51</b>
<b>2.4.4.- Tratamiento termico</b>	<b>55</b>
<b>2.4.5.- Ensayo de desgaste</b>	<b>56</b>

	2.4.6.- Evaluación in situ	57
Capítulo III	RESULTADOS	
	3.1.- Ensayo de desgaste	59
	3.2.- Ensayo de desgaste in situ	63
	3.3.- Análisis Metalografico	66
Capítulo IV	ANALISIS DE RESULTADOS	72
Capítulo V	CONCLUSIONES	74
	SUGERENCIAS	75
	BIBLIOGRAFIA	76
APENDICE	A Relación para las aletas de la propela	
APENDICE	B Cálculos del sistema de colada	
APENDICE	C fabricación del molde	
APENDICE	D Razón de desgaste	

# PRÓLOGO

El uso de los compuestos de matriz metálica (CMM), en las industrias automotriz y aeroespacial se ha incrementado, sin embargo hay una enorme cantidad de aplicaciones que permanecen inexploradas, debido a que los compósitos, no han adquirido aún su potencial completo como materiales ingenieriles de uso intensivo.

Sin embargo para adquirir esta posición en el uso industrial se tienen que salvar barreras técnicas, tales como: comportamiento en servicio, y alto costo, que están impidiendo la introducción a gran escala de los CMM a la industria. Es importante recalcar que soluciones a nuevas demandas y demandas específicas pueden encontrarse en la utilización de CMM. Ya que los compósitos permiten un diseño sistemático de procedimientos para llevar a cabo combinaciones de propiedades ingenieriles como son: resistencia a elevada temperatura, resistencia a la fatiga, resistencia a la tensión, resistencia al desgaste, resistencia a la abrasión, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, etc.

Mientras los requerimientos para materiales aeroespaciales están definidos principalmente por un alto modulo de rigidez y una alta resistencia con bajo peso, los criterios para la aceptación de compósitos en algunas áreas no espaciales, son alta dureza y eficiente manufacturabilidad.

Dentro de los procesos de fabricación de CMM los procesos de fundición tienen una alta eficiencia ya que permiten el control y obtención de características específicas en el producto terminado.

# INTRODUCCIÓN

Las investigaciones sobre los materiales denominados compósitos y en particular sobre los compósitos de matriz metálica ligera, han demostrado que es posible utilizarlos para sustituir diversos materiales tradicionales, con el objeto de disminuir costos desde las etapas de diseño de piezas, esto debido a las propiedades particulares de estos materiales. Los compósitos de matriz metálica, son mezclas de materiales en los cuales la matriz es un metal ó aleación, principalmente Al, Mg, etc. La cual es reforzada con materiales cerámicos: blandos ó duros y que presentan características de lubricación, fragilidad y/o resistente al desgaste, como: SiC, WC, TiC, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Grafito, Carbón, Mica, etc.

Para los compósitos de matriz metálica ligera el método de fundición y moldeo en arena es eficiente, y ha sido utilizado en diversos trabajos de investigación. En el presente trabajo se utiliza este proceso de manufactura (Vortex-colado en molde de arena) para obtener una pieza específica de aplicación ingenieril.

El objetivo del trabajo es fabricar una pieza de compuesto la cual pueda sustituir un material convencional, se analizará el diseño del sistema de colada para la fabricación del compuesto y se evalúa la resistencia al desgaste y se compara con la del material original.

Para lo anterior, se hacen pruebas para sustituir las aspas de un molino mezclador de arena (Marca Simpson 18 D.A.), que originalmente están hechas de un acero con tratamiento de temple y revenido, el cual se encuentra en operación en el Departamento de Metalurgia en el laboratorio de arenas de la Facultad de Química. El compuesto se fabrico por el método del Vórtice y es de una matriz Al-Si reforzado con 15 y 20 % en Vol. de SiCp.

Para realizar este trabajo en el capítulo primero, se realiza un resumen de las propiedades más importantes de los compósitos seguido de una recopilación de trabajos sobre compósitos en los cuales se determinan propiedades de desgaste particulares. Se presenta también una metodología para la sustitución y un ejemplo de la sustitución de las camisas de los cilindros, las cuales son fabricadas de hierro gris, en este mismo ejemplo se determina el por que las piezas prototipo son coladas en moldes de arena. El capítulo se cierra con un resumen sobre desgaste y que incluye definiciones, mecanismos, pruebas y las curvas características del mismo.

En el capítulo segundo (Desarrollo Experimental) se presenta un diagrama general de la elaboración de la pieza y se describen las etapas seguidas para la fabricación de esta. También se especifican las condiciones de fabricación de lo compósitos. Y se describe el equipo utilizado en la fabricación y el tipo de tratamiento térmico aplicado. Adicionalmente se describen las pruebas mecánicas, (resistencia al desgaste) aplicadas.

En el capítulo tercero, (Resultados) se tabula, los resultados obtenidos en las pruebas que fueron aplicadas a los compósitos fabricados, con sus respectivas gráficas. Se incluye también una gráfica comparativa entre los materiales fabricados y el acero de la pieza original.

# CAPITULO I: ANTECEDENTES

## 1.1 COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA BASE ALUMINIO

El aluminio y sus aleaciones monolíticas tienen la característica de ser ligeros, pero carecen de algunas propiedades físicas y mecánicas de otros materiales como son el acero y bronce.

Impulsando el desarrollo de materiales con propiedades específicas, surgen, después de años de investigación, los compósitos de matriz metálica (CMM) que son materiales en los cuales se adicionan distintas cantidades de cerámicos, tales como Grafito, Carburo de silicio, Alúmina, Mica, Carburo de Titanio, etc. en forma de fibras ó partículas a un metal base como Aluminio, obteniéndose como resultado, que se mejoren considerablemente algunas de sus propiedades con respecto al metal sin refuerzo.

Por definición un material compuesto requiere tener una fase dispersa mayor al 1% en volumen y un tamaño de partícula mayor a  $1\mu\text{m}$ . (Metals Handbook Vol. 18 ASM 1992)<sup>7</sup>.

Debido a que la forma del material disperso en la matriz es muy importante para determinar la capacidad de carga del compósito, estos han sido clasificados de acuerdo a la forma del material reforzante:

- 1) Compósitos reforzados con fibras continuas y discontinuas.
- 2) Compósitos reforzados con partículas o fibras cortas (whiskers).
- 3) Otros reforzantes en forma de; hojuelas, microesferas, etc.

La relación de longitud y diámetro de la fibra generalmente caracteriza la forma.

En los compósitos reforzados con fibras continuas, la carga aplicada es soportada directamente por ambas; la matriz y las fibras. En los compósitos reforzados con partículas la carga se transmite al material disperso a través de la matriz.

Los compósitos de acuerdo con su naturaleza pueden tener diferentes características, existen compósitos con matriz polimérica, concretos, compósitos de matriz metálica, y diversos reforzantes cerámicos, orgánicos, etc.

Dentro de los procesos para la fabricación de los compósitos vía procesos de fundición, se encuentran todas aquellas técnicas que permiten la obtención de CMM por medio de la agitación de la aleación matriz por arriba de la temperatura de liquidus o entre las temperaturas de liquidus y solidus, al mismo tiempo que se adicionan las partículas de refuerzo. Algunos de estos procesos son:

Compocolada y el Método del Vórtice.

Otros procesos, en los cuales se utilizan técnicas que aprovechan condiciones de presión, vibración, etc. se citan a continuación:

Fundición a Presión, Método de Pellet, Infiltración de Preformas bajo Presión, Método Centrifugo, Métodos de Atomización e Inyección de Gas, Aplicación de Vibraciones ultrasónicas, etc.

Es importante mencionar el proceso de fabricación de compósitos por metalurgia de polvos (Pulvimetalurgia), como una vía importante de fabricación. Ya que esta técnica se ha utilizado para producir una gran cantidad de piezas automotrices y de maquinaria de diversos materiales metálicos (Metals Handbook Vol. 7 ASM 1984).<sup>10</sup>

En relación con los diversos cerámicos reforzantes, el carburo de silicio se encuentra entre los denominados cerámicos duros con durezas entre 4 y 30 Gpa (580 a 4350 ksi) y que incluyen entre otros Alúmina ( $Al_2O_3$ ), Carburo de tungsteno (WC),

Carburo de titanio (TiC), Zirconia (ZrO<sub>2</sub>), Sílice (SiO<sub>2</sub>), y carburo de boro (B<sub>4</sub>C). Estos cerámicos duros mejoran favorablemente la resistencia a la abrasión del aluminio sin refuerzo.

Otros tipos de cerámicos son los de características blandas con durezas menores a 2 Gpa (290 ksi), entre ellos se encuentran: Grafito, Carbón, Mica, Talco, MoS<sub>2</sub> y PETE (Politetrafluoroetileno) los cuales mejoran las propiedades lubricantes en los compósitos con matriz de Aluminio.

Esta división arbitraria realizada sobre la dureza, esta basada también en el hecho, de que los compósitos que contienen partículas duras, generalmente exhiben un comportamiento diferente en fricción y desgaste que los compósitos que contienen partículas blandas en las aleaciones con la misma matriz.

J. G. Clegg 1991<sup>9</sup>, dice que para efectuar la producción de los compósitos, se han utilizado un sinnúmero de aleaciones para actuar como matriz metálica, entre ellas se encuentran: Al, Al-Li, Al-Si-Mg, aleaciones base cobre, aleaciones base hierro y acero, superaleaciones base níquel y aleaciones de Ti y Zr. Sin embargo a pesar de la variedad mencionada, son las matrices de Al y Al-Si-Mg las que presentan un dominio en las aplicaciones comerciales. Las partículas cerámicas empleadas también cubren un amplio rango de composiciones y están disponibles en distintas formas como son las fibras, partículas (angulares, esféricas ó semiesféricas), hojuelas de grafito y fibras cortas.

Los compósitos reforzados con partículas, tienen un costo menor que el costo de los compósitos reforzados con fibras. Además las propiedades mecánicas y físicas de los compósitos reforzados con partículas son generalmente isotrópicas. Se ha encontrado que este tipo de compósitos tienen un buen desempeño en aplicaciones tribológicas (P. K. Rohatgi 1990)<sup>7</sup>.

Los tamaños de las partículas de SiC utilizados en la fabricación de compósitos son de (1 a 120 $\mu$ m) y el porcentaje en volumen adicionado esta en el rango de 0.3 a 20%.

Los tipos de matriz, base Aluminio utilizadas, son principalmente:

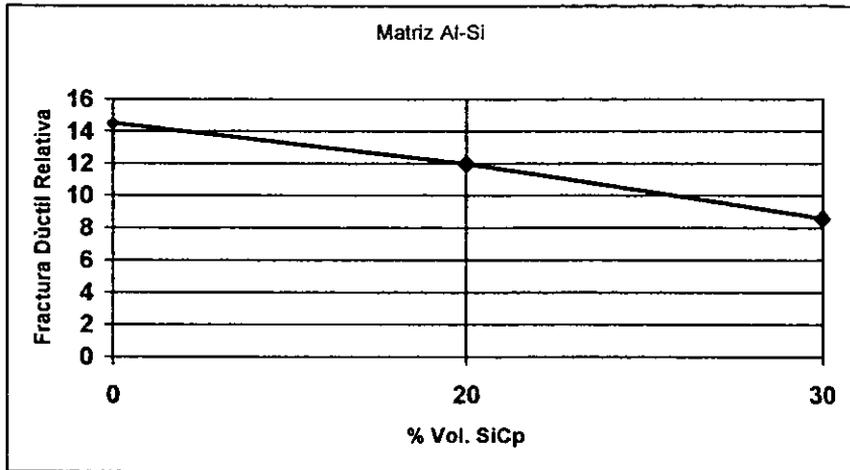
(Al-Si)      (Al-Cu)      (Al-Cu-Mg)

Estos compósitos se han fabricado principalmente a través de los procesos de forja líquida y metalurgia de polvos.

## 1.2 PROPIEDADES

Los Compósitos de Matriz Metálica (CMM) tienen muchas propiedades que los convierten en productos de aplicaciones comerciales; alta rigidez específica y excepcional resistencia al desgaste junto con buena conductividad térmica, esto hace a estos materiales excelentes productos para aplicaciones en equipo deportivo y en la industria automotriz entre otras. Sin embargo el procesamiento de estos materiales difiere del de las aleaciones convencionales en varios aspectos tales como: fusión, colada, maquinado y ensamble. Las mismas propiedades que son importantes en el producto terminado, pueden crear dificultades si no se consideran inicialmente en el diseño del proceso.

El tipo más común de compósito de matriz metálica es una mezcla de Carburo de Silicio y una matriz de aleación de Aluminio. Piezas de compósitos de este tipo pueden obtenerse por procesos convencionales de moldeo. Estos materiales desarrollan consistentemente propiedades isotrópicas, mecánicas y tribológicas. No obstante, a través de procesos como el de extrusión se puede obtener propiedades anisotrópicas, permitiendo con esto aplicaciones aún más específicas. Todas las propiedades varían dependiendo de la cantidad, tamaño y tipo de SiC, cambios en la matriz y parámetros de proceso. A continuación se presentan las gráficas uno, dos y tres, con algunas propiedades mecánicas de compósitos (P. K. Rohatgi 1996)<sup>1</sup>.

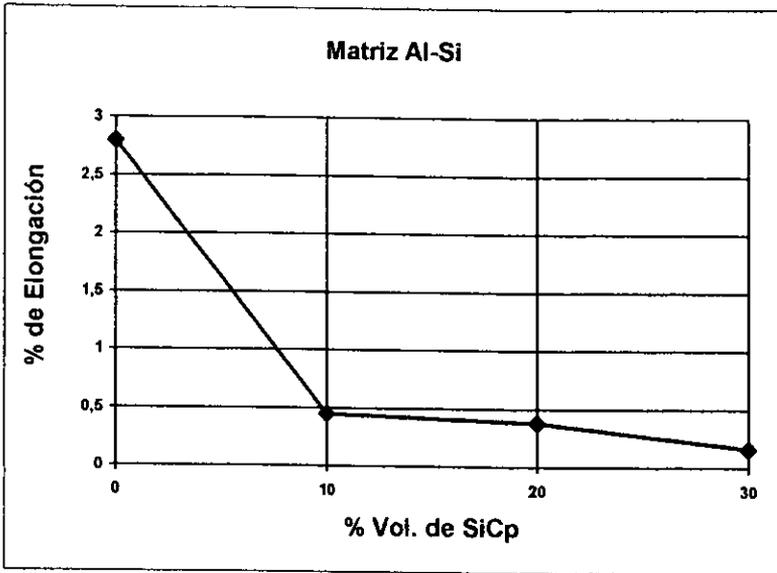


Gráfica 1 Fractura dúctil relativa vs % Vol. SiCp (P.K. Rohatgi 1996).

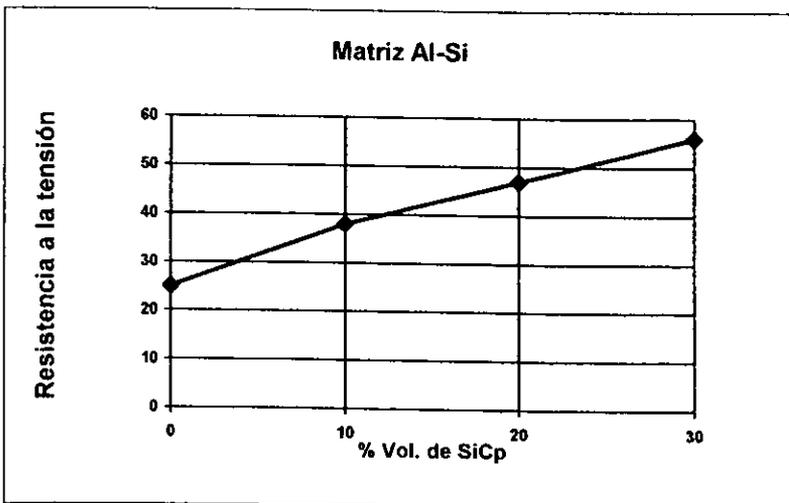
Esta gráfica y las dos siguientes están considerando el tipo más común de compuesto disponible, una mezcla de carburo de silicio en una matriz de aleación de aluminio (Sistema Al-Si/SiCp).

Generalmente tensión y punto de fluencia mejoran con el incremento del SiCp en fracción de volumen acompañado por un decremento en la elongación y fractura dúctil.

El módulo de elasticidad se incrementa con el aumento en volumen de partículas en el metal base, con 20% en volumen el material tiene aproximadamente el mismo módulo elástico que el hierro gris 14 (Msi) bajo ambos; deslizamiento y desgaste abrasivos, la velocidad de desgaste de los CMM decrece con el incremento en volumen de partículas adicionadas. Un rango para las velocidades de desgaste abrasivo, son típicamente de 55 a 90 % menor que la velocidad de desgaste de las aleaciones más comunes de Aluminio sin refuerzo, nuevamente dependiendo del volumen de partículas en el compuesto (P.K.Rohatgi 1996)<sup>1</sup>.



Gráfica 2 % de elongación vs % en Vol. SiCp (P.K. Rohatgi 1996)



Gráfica 3 Resistencia a la tensión vs % Vol. SiCp (P.K. Rohatgi 1996)

El coeficiente de expansión térmica (CET) cambia con el contenido de carburo de silicio. Esto varía desde la línea base de  $24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  para Aluminio puro sin refuerzo a  $14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  para un compuesto con 30 % en volumen de SiCp como material de refuerzo (P. K. Rohatgi 1996)<sup>1</sup>.

La conductividad térmica de una aleación A359 con 20 % de SiCp como material de refuerzo es de alrededor de 43.386 (Cal /s m  $^\circ\text{C}$ ) y comparada con la de un hierro fundido grado 30 de 11.280 (Cal /s m  $^\circ\text{C}$ ) resulta ser casi cuatro veces mayor. La conductividad térmica para una aleación sin refuerzo A359 es de 33.05 (Cal /s m  $^\circ\text{C}$ ) (P. K. Rohatgi 1996)<sup>1</sup>.

R.A. Saravanan 1995<sup>2</sup>, realiza un estudio de desgaste por deslizamiento en un compuesto de Aluminio utiliza la aleación A356 con 10% de carburo de silicio en partículas como material de refuerzo. Para el estudio utiliza el aparato denominado de Perno-Disco. El comportamiento al desgaste del compuesto se estudio, bajo ciclos de carga y descarga. La combinación de carga seguida de descarga es considerada un ciclo y cada experimento involucra 3 ciclos. El estudio revela que la velocidad de desgaste del compuesto durante la descarga es menor comparado con el desgaste durante la etapa de carga. Esto se atribuye a dos principales aspectos.

- a) Incremento del endurecimiento por trabajado de la superficie
- b) Formación de una capa rica en óxido de hierro, formada en la superficie desgastada, como resultado de las altas presiones aplicadas.

M.K. Surappa 1996<sup>3</sup>, lleva a cabo estudios sobre desgaste considerando dos tipos: desgaste por deslizamiento y desgaste por erosión. Los compósitos son fabricados por la ruta de fundición y después se les aplica un proceso secundario de extrusión en caliente. El compuesto es fabricado con la aleación de Aluminio A356 reforzada con 10% de SiCp con un tamaño de  $40\mu\text{m}$ , los resultados de las pruebas de desgaste por deslizamiento indican que se mejora la resistencia al desgaste del

compósito con respecto a la aleación matriz. Esto como consecuencia del incremento de la resistencia al flujo que proporciona la presencia de las partículas de SiC en la superficie de la probeta. El SiCp también promueve la formación, de una capa protectora rica en hierro la cual limita el proceso de desgaste específicamente en la región de la segunda etapa de desgaste. Las etapas de desgaste se presentan en el inciso 1.8. DESGASTE.

Para el caso de desgaste por erosión se utilizaron partículas de cuarzo de (60 y 750 $\mu$ m), las cuales son aplicadas con velocidades de 18, 28 y 50 m/s con tres ángulos de impacto (15, 30 y 90 grados). Los estudios demuestran, que cuando el tamaño de las partículas del material erosivo, es mucho mayor que el tamaño de las partículas del material de refuerzo del compuesto, en estado extruido, la velocidad de desgaste es ligeramente menor que la velocidad de desgaste de la aleación base. A continuación se presenta la tabla 1.1 con las propiedades mecánicas de los compósitos utilizados en este estudio.

Material	Dureza Vickers	Modulo de Young (Gpa)	Esfuerzo de ruptura (Mpa)
Al-6.9Si/10%SiCp Mg (0.3%)	65.3	73.93	180.5
Al-6.9Si/10%SiCp Mg (0.68%)	70.2	75.11	222.5
Al-7%Si Mg(0.34)	48.1	67.41	199.64

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas de los compósitos (M. K. Surappa 1995).

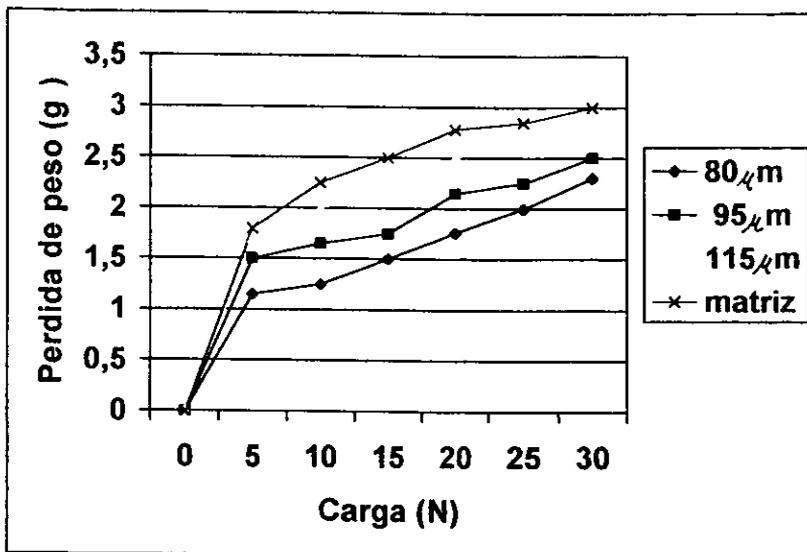
A. T. Alphas y J. Zhang, reportan que los compósitos exhiben mejores resistencias al desgaste que las aleaciones sin refuerzo, y en una variedad de condiciones de desgaste los compósitos reforzados con cerámicos en forma de partículas tienen mejores respuestas que los compósitos reforzados con fibras.

M. A. Taha y M. Abdel Hamid 1993<sup>5</sup>, realizan un estudio del comportamiento frente al desgaste de un compuesto Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en partículas, preparado por forja líquida con los siguientes tamaños de partícula 80, 95, 115 μm y fracciones en volumen de 38 a 42%. Bajo diferentes presiones 68 a 180 Mpa. Los autores concluyen que el desgaste mecánico se incrementa con la carga y la distancia de deslizamiento ambos con y sin lubricación. Además los resultados indican que se puede mejorar la resistencia al desgaste incrementando la presión de forja, se obtiene un resultado similar cuando se disminuye el tamaño de las partículas de alúmina.

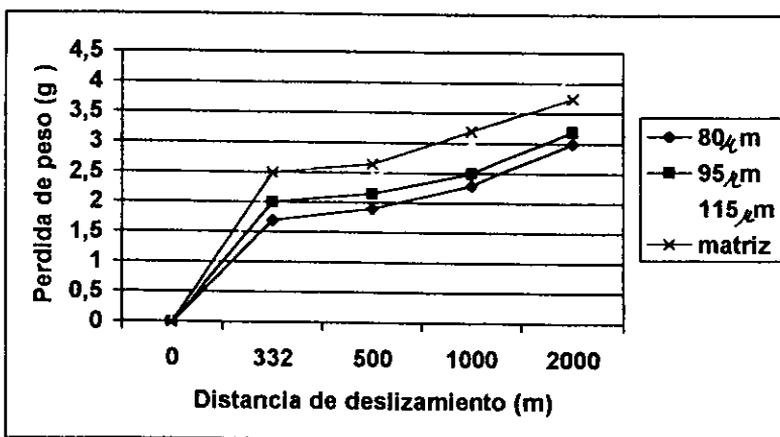
Las pruebas se llevan a cabo a una velocidad de 11.4 m/s. La gráfica 4 presenta los resultados para una presión de 90 MPa y tres tamaños de partículas de alúmina 80, 95, 115 μm y la del metal base.

La gráfica 5 presenta los resultados de distancia de deslizamiento y pérdida de peso para las mismas condiciones.

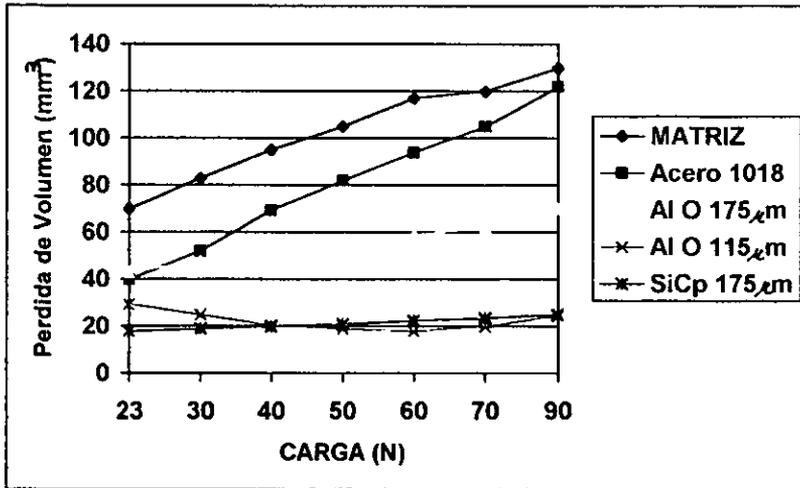
La gráfica 6 muestra, que la pérdida de volumen del compuesto Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Aluminio puro con 4.5% de magnesio con tamaño de partícula de 175 μm es menor que la pérdida de volumen del compuesto Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Aluminio puro y tamaño de partícula de 115 μm. También la pérdida de volumen del compuesto con SiCp es menor que la del compuesto con partículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con tamaño de 115 μm. Y comparado con el caso de la matriz de Aluminio y el acero 1018, ambos tienen una pérdida de volumen mayor que la de los compósitos.



Gráfica 4 Efecto del desgaste por el cambio en la carga aplicada para el sistema Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con diferentes tamaños de partícula (M.A. Taha 1993).



Gráfica 5 Efecto del desgaste por la distancia de deslizamiento para el sistema Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con diferentes tamaños de partícula (M.A. Taha 1993).



**Gráfica 6.** Comparación de la resistencia al desgaste entre varios compósitos. (M.A. Taha 1993).

Estos estudios de desgaste por deslizamiento y por erosión, indican la existencia de ciertas regiones donde los compósitos pueden tener un mejor comportamiento tribológico que las aleaciones base de los mismos.

### 1.3 APLICACIONES

La ligereza de los compósitos del tipo estudiado combinada con propiedades similares o aún mejores que las de hierro hacen a los compuestos de matriz metálica, materiales naturales para aplicaciones en la industria automotriz. Durante varios años se han investigado y probado discos de freno de CMM, con importantes ventajas sobre los discos de hierro las cuales son entre otras: la capacidad de conducción de calor la cual es mucho más rápida en el compósito, reducción de la vibración y ruido, reducción del peso a casi la mitad del peso de un disco de hierro.

Los antecedentes con relación a la aplicación de compósitos en sustitución de piezas de hierro o acero e incluso titanio, empiezan a ser cada vez mayores. Algunos autores como Weis D.J. y Rose D. presentan el caso de la aplicación de un compósito A359/20SiCp y un A359/19SiCp, para el caso de un alerón de avión, enfocando su estudio desde el punto de vista de condiciones de llenado de la pieza. Fritzke (1993) realiza estudios de un compósito de SiC, para el caso de un disco de frenos de automóvil, centrandó su estudio en el diseño del sistema de colada para mejorar la calidad microestructural y propiedades mecánicas de la pieza. En otros trabajos sobre compósitos, Gerald S Cole. (1993), comenta acerca del gran potencial que tienen los compósitos de matriz metálica en el sector de componentes automotrices, destacando aplicaciones como: Monoblocks, cabezas de motor, múltiples, sistemas de embrague y frenos, pistones, ejes de transmisión, algunos componentes de chasis, etc.

En el mismo artículo Cole dice: después de años de investigación los compósitos de matriz metálica llegan a la industria, sin embargo para que los CMM tengan una aplicación real fuera de la industria aeroespacial, las propiedades ingenieriles que los hacen valiosos deben estar disponibles a un costo competitivo, como en el caso de sus contrapartes sin refuerzo. Existen muy buenas oportunidades para aplicaciones de calidad de los CMM en la industria automotriz si estos pueden producirse a un costo adecuado. La más efectiva forma para obtener bajo costo son los procesos de fundición. En su artículo enfatiza que la reducción de peso de un vehículo, por el uso de materiales que suplan a los pesados hierros y aceros, con compósitos de matriz metálica, base Al ó Mg. provoca un importante ahorro de combustible, así como también una reducción en las fuerzas inerciales y la reducción de la masa rotativa, con lo cual se logra un incremento en la capacidad de aceleración y desaceleración del vehículo.

Rothagi 1996, menciona que, discos de freno de CMM fueron fabricados para el automóvil Lotus Elise, este es el primero de línea en que se aplican discos de freno de compuesto base aluminio. Esto contribuye al diseño intensivo en aluminio y que permite tener bajo control el peso del vehículo en solo 678 Kg.

Debido a que el coeficiente de expansión térmica (CET) es menor en los compósitos que en sus contrapartes sin refuerzo, los CMM se utilizan en ambientes tales como la electrónica aplicada en sistemas aeroespaciales, donde una combinación de ligereza y bajo coeficiente de expansión es importante. Los CMM'S son normalmente especificados en muchas de las nuevas aplicaciones electrónicas para satélites.

La resistencia al desgaste del carburo de silicio como reforzante en los CMM es muy alta, aplicaciones importantes como: discos de freno, tambores, horquillas para cambio de engranes, camisas para pistones, etc, requieren de diseños específicos para las áreas de contacto, esto como consecuencia de que normalmente no hay desgaste en los CMM pero, en los componentes con los que trabajan en los diferentes sistemas puede existir un patrón de desgaste no convencional, por lo cual se han desarrollado materiales especiales para trabajar como contrapartes en aplicaciones de Fricción /Desgaste.

## 1. 4. METODOLOGÍA PARA LA SUSTITUCIÓN DE PIEZAS

El reemplazar un material convencional tal como el hierro gris debe proporcionar algunos beneficios para los consumidores, de hecho un sistema que disminuye en peso puede proporcionar un menor costo de operación.

La sustitución de piezas existentes en equipo industrial, por productos que incrementen el valor ingenieril de los mismos es un proceso que no ocurre de la noche a la mañana. Es a través de una serie de evaluaciones, ya sea por un consumidor ó por las características propias del uso de la pieza. Como se puede determinar el que un material sea adecuado para una sustitución. Esto involucra pruebas que evalúen las propiedades importantes en la aplicación, sobre prototipos de corta duración. Esto permite que todas las partes involucradas en el proceso de manufactura adquieran experiencia con los nuevos materiales para contribuir al desarrollo de una fabricación al menor costo. Cuando se requiere un diseño nuevo así como un nuevo material, se requiere un proceso que toma tiempo y que requiere de diseños que permitan la retroalimentación, hasta llegar a la pieza final o material adecuado para la aplicación específica. Las etapas más importantes son:

- (A). Determinación de condiciones de uso de la pieza.
- (B). Recopilación y/o evaluación de las propiedades de diversos materiales.
- (C). Consideraciones sobre el método de fabricación
- (D). Costo total.

(A) En esta etapa se realiza un análisis de los requerimientos mínimos ó rangos de las propiedades necesarias para el funcionamiento de la pieza, esto esta determinado por las especificaciones de operación del sistema ó equipo en particular y de acuerdo a las condiciones de uso.

**(B)** En esta etapa se determinan criterios para la selección de los materiales que puedan cubrir los rangos de las propiedades especificadas en el análisis de la etapa previa. Es decir una vez que se escogen materiales es porque cubren los requerimientos de uso. Otros criterios para seleccionar entre los materiales escogidos pueden ser entre otros: el método de fabricación como se explica en la siguiente etapa, tipo de material ferroso ó no ferroso, apariencia visual, compatibilidad con el material a ensamblar, procesos secundarios como tratamiento térmico ó maquinado, etc. En la práctica industrial todos estos factores determinan el costo de la pieza

**(C)** Esta etapa aparece como consecuencia de que normalmente en una industria se tiene establecida una ruta de fabricación con diferente variantes, así esto puede limitar el uso de ciertos materiales que requieran la implementación de una nueva ruta de fabricación o de operaciones secundarias que no estén implementadas.

**(D)** Cuando se evalúa un nuevo material como alternativa para una aplicación particular, tales como los compósitos, lo más importante es el costo de la pieza ó producto terminado. El costo de la pieza terminada no es solo el costo del material, incluye el costo de la fabricación y terminado. En algunos casos la pieza puede ser rediseñada para aprovechar las diferentes propiedades físicas y mecánicas del nuevo material.

Un ejemplo específico fue el realizado por J. A. E. Bell 1996 quién desarrollo la aplicación potencial de un compósito, utilizando dos tipos de reforzantes, partículas de carburo de silicio (SiCp) y partículas de Nikel-Grafito (Ni-Gr) en una matriz de Aluminio silicio con las siguientes porcentajes (Al/8%Si/10%Vol.SiCp/5%Vol.Ni-Gr.) este compósito se denomino {INCO GrA-Ni<sup>TM</sup> (10-5)}. Y se utilizo para sustituir las camisas de los cilindros fabricadas originalmente de hierro gris y que son utilizadas comúnmente en el monoblock de maquinas automotrices de Aluminio. Bell, presenta en la tabla 1.2 la comparación de las propiedades claves para la sustitución.

PROPIEDAD		HIERRO GRIS	INCO GrA-Ni <sup>TM</sup> (10 - 5)
Composición		Fe/2.9 - 4%C/1.5 - 2.6%Si/ 0.7%Mn	Al/8%Si/10%Vol. SiCp /5%Vol. Ni-Gr
Desgaste por deslizamiento en seco (mm <sup>3</sup> /km)	C A R G A S	200 N	1000
		350 N	10,000
Densidad (g/cc)		6.9 - 7.35	2.77
Cond. Térmica (W/m <sup>2</sup> K) 25°C		40 - 72	138
Calor específico (J/g <sup>2</sup> K) 25°C		0.56	0.86
Temp. Max. de operación °C		550 - 600	450
CET (ppm <sup>2</sup> C) 25-300°C		12	17

Tabla 1.2 Propiedades clave para la sustitución de Hierro Gris por un Compósito. {INCO GrA-Ni<sup>TM</sup> (10-5)}

Las camisas para cilindro fabricadas de Hierro Gris se usan para proteger la superficie de los cilindros, del desgaste por los pistones y anillos.

Al realizar la sustitución del hierro gris en esta aplicación, se obtiene un monoblock con menor peso con un mejoramiento en la transferencia de calor debido a la alta conductividad térmica y difusividad del CMM de aluminio, así como un mejor ensamble en el monoblock debido a la similitud de las propiedades de expansión entre la camisa de pistón y el monoblock.

## 1.5 PROCESOS DE MOLDEO DE PIEZAS DE CMM

La dispersión de fibras discontinuas y partículas dentro de los metales fundidos provoca un incremento en la viscosidad de estos, lo cual limita y afecta la fluidez de las aleaciones y como consecuencia los procesos de moldeo se dificultan, esto principalmente en los procesos de moldeo por gravedad para piezas con espesores delgados. Sin embargo, se han obtenido un sinnúmero de piezas por los procesos de moldeo por gravedad, teniendo en consideración el efecto de las partículas sobre la

viscosidad del compósito. Este hecho, implica la aplicación de una mayor energía mecánica durante los procesos de fabricación y utilizar sistemas de colada modificados. Así utilizando procesos de fusión modificados y diversos procesos de moldeo, se obtienen piezas con características específicas. A continuación se resumen los más importantes procesos de moldeo de piezas.

**Moldeo a Presión (Die Casting):** Este proceso a través del cual el metal fundido es moldeado bajo presión en moldes de considerable complejidad y normalmente por operaciones cíclicas automáticas o semiautomáticas, tiene las mejores cualidades para producir grandes cantidades de partes al mejor precio. Este proceso proporciona piezas fundidas muy cercanas a la forma final, lo cual reduce el maquinado, ya que en los compósitos el maquinado puede ser un gran desafío, además debido a la presión de inyección la porosidad puede reducirse significativamente. Aleaciones Al-Cu conteniendo 18% y 24% de fibras de  $Al_2O_3$  han sido fabricadas por esta técnica.

**Forja Líquida (Squeeze Casting):** Este proceso comparte algunas características del moldeo a presión (Die Casting). El metal es inyectado dentro de un molde de acero bajo presión donde ocurre una rápida solidificación, sin embargo, las presiones en este proceso son al menos cuatro veces más altas que la presión en el proceso anteriormente descrito, (20,000 Psi vs 5,000 Psi). Esta presión contribuye a obtener una pieza sin defectos y permite una fácil infiltración en preformas cerámicas. Este proceso es uno de los más importantes ya que ha sido comercialmente utilizado para la producción de partes automotrices y aeroespaciales.

**Moldeo por Gravedad:** Prototipos, volúmenes bajos e intermedios, o piezas que requieren corazones son normalmente obtenidas utilizando las técnicas de colado por gravedad. El caso de moldes permanentes, en el cual el metal es colado en un molde de hierro o acero, se utiliza comúnmente para requerimientos de volúmenes intermedios de piezas y donde la geometría de la pieza permite la alimentación por la periferia. Piezas de aleaciones sin material reforzante que pueden obtenerse en molde

permanente, no pueden obtenerse exitosamente con compósitos de matriz metálica. Esto, como consecuencia de la baja cantidad de turbulencia permitida por estos materiales, así como por la susceptibilidad al atrapamiento de gases. Sistemas de colada que normalmente trabajan exitosamente con aleaciones tales como A356 o A359 pueden no ser exitosos para la obtención de piezas de compósito. En general los moldes permanentes que existen no permiten la obtención de piezas de compósito libres de defectos, sin efectuar cambios substanciales en el sistema de colada.

**Moldeo en Arena:** Es el más sencillo y versátil de los procesos utilizados para fabricar piezas por fundición de casi todos los materiales metálicos disponibles comercialmente. Los moldes se fabrican con relativa facilidad y con bajo costo, este proceso se escoge específicamente para producir piezas estructurales y piezas muy grandes.

Las bajas velocidades de enfriamiento obtenidas en los moldes de arena permiten la segregación de las partículas, sin embargo en aplicaciones específicas de desgaste esto puede ser benéfico, ya que un alto volumen de partículas dispersas puede provocar superficies con un reforzamiento selectivo, por ejemplo en secciones delgadas de compósitos colados en arena o a través del manejo de enfriadores, obteniendo así segregación de partículas en áreas específicas.

En este proceso la aleación es colada en moldes de arcilla o arena aglutinada, normalmente se utiliza para la obtención de bajos volúmenes de piezas o de difícil geometría. El moldeo en arena permite una máxima flexibilidad para el sistema de colada y diseño de la bajada, para algunas aplicaciones el moldeo en arena es dimensionalmente menos preciso que otros métodos y por lo tanto requiere en algunos casos, altos niveles de maquinado para obtener la forma final.

## Discusión del moldeo de piezas prototipo

Una de las principales discusiones en la mercadotecnia aplicada a los compósitos de aluminio y para el caso presentado en el inciso anterior, es el alto costo del compuesto comparado con el costo del hierro gris. Además debido a que el costo final de la pieza es de primordial importancia, y considerando que la cantidad de material maquinado en una pieza puede disminuirse, lo cual disminuye el costo de fabricación Entonces es posible utilizar esta ventaja, fabricando un modelo, teniendo en cuenta que la pieza se obtendrá a través del proceso de moldeo a presión eliminando así una buena cantidad de maquinado.

J. A. E. Bell 1996 presenta la tabla 1.3 donde enfatiza esta discusión mostrando la cantidad de material extra requerido para moldeo en arena y molde permanente, frente a las necesidades del moldeo a presión.

- 1; Tipo de molde para las camisas de los pistones diámetro (7.5-10 cm).
- 2; Adición para maquinado de ambos lados.
- 3; Material maquinado.
- 4; Conicidad interna para corazones.
- 5; Material requerido incluyendo Sistema de Alimentación.

1	2	3	4	5
ARENA	1.5 mm	40-55%	No	250
Molde Permanente	1.0 mm	20-40%	Si	200
Dado	0 - 0.25 mm	0-16%	Si	150

Tabla 1.3. Especificaciones para diversos tipos de moldeo. (Bell 1996)

La tabla 1.3 muestra que el moldeo a presión es en el que se disminuye al máximo la cantidad de maquinado de una pieza. Además sabemos que el moldeo a presión es el más atractivo para aplicaciones que requieren altos volúmenes de producción, una desventaja en este método es el alto costo para el maquinado del dado. Por esta razón los prototipos son normalmente colados en moldes de arena o en molde permanente.

**Moldeo al Vacío o Baja Presión:** En este proceso se utiliza una presión controlada para forzar el compuesto fundido dentro de un molde, con esto se resuelven algunos de los problemas creados por la sensibilidad de los compósitos de matriz metálica a la turbulencia y al atrapamiento de gases.

Moldeo al Vacío, para este se aplica un vacío a un molde permanente o a una caja de moldeo alrededor de un molde de arena aglutinada, en los dos casos deben estar sellados los moldes o cajas para forzar el metal hacia adentro de la cavidad.

Moldeo de baja presión, utilizando aire a presión en un horno sellado para empujar el metal a un tubo de alimentación dentro del molde.

Estos métodos han sido usados para producir exitosamente piezas fundidas de CMM. Sin embargo es normalmente necesario llevar a cabo modificaciones a estas técnicas, para evitar aspiración de aire dentro de los sistemas de colada cuando se moldean compósitos de matriz metálica. Estas técnicas de moldeo pueden producir fundiciones con una mayor cantidad de partículas, de las que es posible obtener en el moldeo por gravedad.

## 1.6 FABRICACIÓN DE COMPÓSITOS POR EL MÉTODO DEL VÓRTICE

Esta técnica consiste en la introducción del material de refuerzo (Cerámico) dentro de un metal o aleación fundida a la que se imparte agitación por medio de una flecha metálica (generalmente acero) recubierta por material refractario. La velocidad de agitación del medio es tal que permite la distribución y suspensión homogénea de las partículas, esto es necesario debido a que existe poca humectación del cerámico con el baño líquido, el contacto debe ser promovido induciendo artificialmente la humectación o usando fuerzas externas para vencer las barreras termodinámicas de energía superficial y arrastre viscoso. Para el caso particular del sistema Al-Si/SiCp es notoria la necesidad de mantener las partículas de SiC en suspensión en el baño metálico ya que su densidad es mayor que la del aluminio,  $2.6 \text{ g/cm}^3$  para el aluminio en estado líquido y  $3.2 \text{ g/cm}^3$  para el carburo de silicio.

La calidad obtenida en un producto es el resultado del conocimiento y control eficaz de las variables que intervienen en su proceso de fabricación. Para la elaboración de CMM, se deben considerar distintas variables y la interacción que presentan entre ellas.

La estructura y propiedades mecánicas de los compósitos, son el resultado de la interacción entre las propiedades individuales de sus constituyentes. Sin embargo, la obtención de las propiedades óptimas para cada pieza producida depende en gran medida del estricto control que se lleve a cabo sobre las variables. No obstante la versatilidad del método del Vórtice, la cantidad de variables a controlar sigue siendo un problema para la mayoría de los productores de compósitos. Es necesario instalar sistemas de control de temperatura, velocidad de agitación y regular estrictamente los tiempos de operación. Dentro de las variables que actúan sobre la estructura y las propiedades del CMM obtenido, es importante considerar que algunas de estas

variables interactúan entre sí y por tanto algunos de los efectos que se estudian en forma individual pueden alterarse significativamente bajo la presencia de un cambio en la magnitud de dos o más variables a un tiempo dado.

En las siguientes líneas se resumen las principales variables de proceso que afectan la dispersión de las partículas de SiC en la aleación de Aluminio:

- Temperatura del baño
- Precalentamiento de las partículas de cerámico
- Tamaño, Forma y porcentaje de las partículas
- Adición de elementos aleantes
- Rapidez de adición de las partículas al medio fundido
- Velocidad de agitación del medio fundido
- Naturaleza química y física de la intercara
- Desgasificación
- Temperatura de vaciado

## 1.7 DISEÑO DE SISTEMAS DE COLADA

La finalidad básica del sistema de colada es permitir el llenado de un molde, con metal líquido, garantizando que las piezas sean obtenidas con las características requeridas al menor costo posible. Es necesario determinar la posición de la bajada, corredores y ataques. Otros objetivos que deben lograrse en un diseño son:

- El molde debe ser llenado en un tiempo tal que se evite la solidificación prematura del metal y consecuentemente un llenado incompleto del molde.
- El metal líquido debe entrar a la impresión de la pieza de modo que produzca gradientes térmicos que promuevan el enfriamiento adecuado de la pieza.
- Disminuir el atrapamiento mecánico de gases en el metal
- Limitar la entrada de escoria a la pieza introduciendo diversos componentes y realizando una adecuada escorificación
- Optimizar el rendimiento del metal
- Optimizar los costos de maquinados y acabado de la pieza

### 1.7.1. Sistema de colada para aleaciones convencionales.

Los componentes básicos de un sistema de colada son: Tazón de colada, Canal vertical o bajada, Colchón o base de la bajada, Alimentadores, Corredor, Extensión del corredor y Ataques. Los componentes que se utilizan, para el cálculo de las dimensiones del sistema son:

Área transversal inferior de la bajada----- $(A_s)$

Área transversal del corredor o corredores----- $(A_R)$

Área transversal de los ataques ----- $(A_G)$

Con estas iniciales se consideran diferentes relaciones de colada las cuales se expresan para sistemas presurizados y no presurizados como muestra la tabla 1.4.

Sistema	(As)	(AR)	(AG)
Presurizado	1	0.8	0.7
No Presurizado	1	2.5	3.5

(As) También se denomina área de estrangulamiento.

Tabla 1.4 Ejemplos de relaciones de colada.

Los sistemas de colada no presurizados se utilizan para metales o aleaciones de alta sensibilidad a la oxidación tales como: Mg, Cu, Zn, Al, Hierro Nodular, etc.

Los sistemas de colada presurizados se utilizan para metales y aleaciones con una baja sensibilidad a la oxidación como los siguientes: Acero, Hierro Gris y aleaciones Cu-Mn.

Para el cálculo de un sistema de colada los diversos métodos parten de la Ec. De Bernoulli (balance de energía en el sistema de colada), para llegar a la Ec. de Torricelli, expresión que determina la velocidad del metal en caída libre en la bajada, dada por la Ec (1).

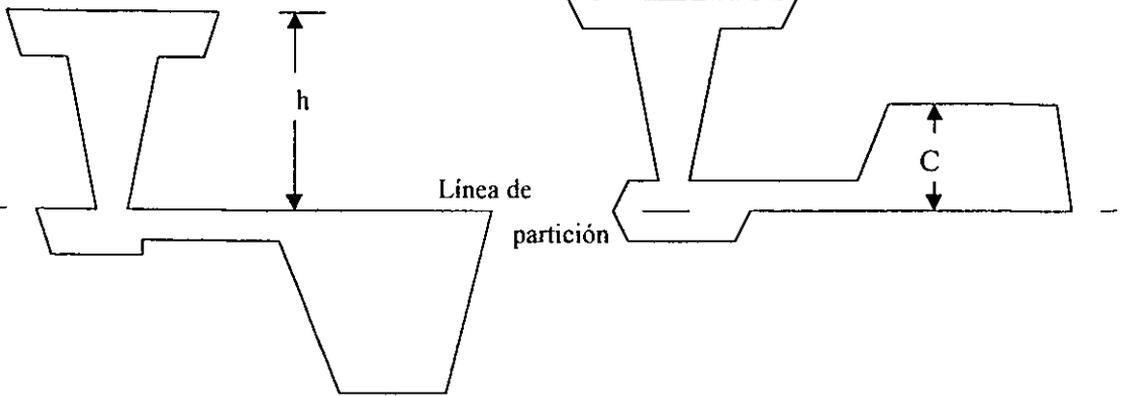
$$(1) \quad V = F_r (2gH)^{1/2}$$

Donde:  $V$  = Velocidad de caída libre.  
 $F_r$  = Factor que corrige las pérdidas de velocidad por fricción.  
 $g$  = Aceleración de la gravedad.  
 $H$  = Altura desde la cual inicia la caída el metal líquido.

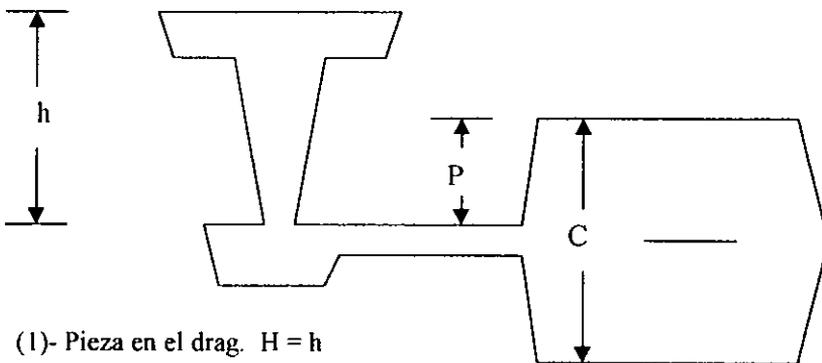
La altura  $h$  debe corregirse en función de la posición de la pieza respecto al plano de partición, de acuerdo con la figura 1.1. la cual presenta tres casos.

(1) Pieza en el Drag

(2) Pieza en el Cope



(3) Pieza dividida



(1)- Pieza en el drag.  $H = h$

(2)- Pieza en el cope.  $H = h - C/2$

(3)- Pieza dividida.  $H = h - P^2/2C$

Figura 1.1 Esquema y fórmulas para determinar la altura metalostática efectiva de la bajada  $H$ , en función de la posición de la pieza. (AFS, Gating and Riserling Worksheet).

Para calcular el flujo másico R se considera que este es función de un espesor crítico y del peso de la pieza, de esta forma y utilizando la tabla 1.5. para aluminio con las consideraciones de espesor y peso, derivadas por la AFS se puede calcular R.

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

W = Peso de la pieza en libras

Tabla 1.5 Espesor crítico y flujo másico para aluminio (AFS, hoja de trabajo de ataques y corredores (AFS. Gating and Riserig Worksheet)).

Una vez calculado el gasto, se puede determinar el área de control con la expresión para el cálculo del Area transversal inferior de la bajada (As) o área de estrangulamiento utilizando la ecuación (2), que involucra el flujo másico permitido, y las pérdidas por fricción.

$$(2) \quad A_s = R / \rho C_D \sqrt{2gH}$$

- Donde:
- R = Flujo másico conocido (Tabla 1.5).
  - $\rho$  = Densidad de la aleación.
  - g = Aceleración de la gravedad.
  - H = Altura metalostática efectiva de la bajada.
  - $C_D$  = Coeficiente de descarga para el sistema.

### 1.7.2. Sistema de colada para Compósitos de matriz metálica.

Para las técnicas de moldeo por gravedad y baja presión, los criterios básicos en el diseño de las coladas de compósitos de Aluminio consisten principalmente en obtener una entrada del metal sin turbulencias dentro de la cavidad del molde.

Se utiliza una bajada de forma cuadrada y también los ataques son de forma rectangular. En la tabla 1.6 y figura 1.2 se presenta el diseño, propuesto por Rohatgi 1996<sup>1</sup>, de un sistema de colada para compósitos base aluminio.

Componentes del sistema	Bajada (Base)	Restricción	Corredores	Ataques
Relación	1.12 - 1.15	1.0	2.0-3.0	4.0 - 5.0

Tabla 1.6. Relaciones para el sistema de colada, (P.K. Rohatgi 1996).

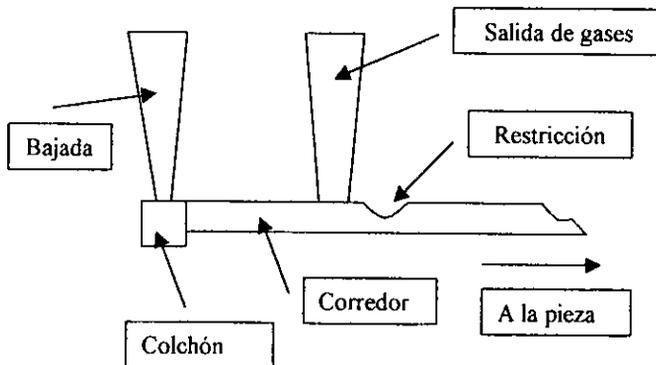


Figura 1.2. Trampa para burbujas y restricción en un sistema de colada, de compósito. (P.K. Rohatgi 1996).

Después de la restricción se observa un sistema no presurizado en el cual los componentes del sistema se incrementan en su sección transversal conforme se acercan a la cavidad del molde.

Este sistema de colada incorpora una restricción y una trampa para los gases atrapados mecánicamente, en esta zona se encuentra un área de baja velocidad de flujo de metal lo cual permite que el aire atrapado pueda escapar. Si el sistema de atrapamiento trabaja en forma adecuada, lo cual puede alcanzarse con una correcta relación entre la base de la bajada y la restricción, el compuesto que fluye dentro del sistema después de la restricción estará libre de aire.

Es importante que el sistema de colada logre el llenado de la cavidad por el fondo, para evitar el goteo del metal.

El sistema trabaja bien pero tiene una desventaja, disminuye el rendimiento de metal, lo cual aumenta la cantidad de compuesto que debe fundirse comparado con un sistema tradicional.

El rendimiento de metal, para un sistema de este tipo es del orden de 65%.

## 1.8 DESGASTE

Se denomina sistema tribológico al sistema en el que se llevan a cabo, fenómenos tales como adhesión, fricción, desgaste, erosión, y lubricación de sólidos en contacto. Este sistema puede ser dinámico o estático y estar formado por dos o más cuerpos en contacto superficial. (A. D. Sarkar B. Sc. 1990)

Existen muchas definiciones del termino desgaste, las cuales no son muy adecuadas debido a que estas no abarcan toda la complejidad del fenómeno. Dos definiciones aceptadas son:

- Desgaste es la remoción de material a partir de la superficie de un sistema tribológico, lo cual implica superficies en movimiento relativo bajo mecanismos de contacto.

- La siguiente definición se encuentra en el manual de normas con la clave ASTM G40-88 la cual dice: desgaste es el daño ocurrido a la superficie del sólido, que generalmente involucra pérdidas progresivas de material, debido al movimiento relativo de los cuerpos en contacto. Fenómenos como la formación de reacciones químicas o fenómenos cíclicos son solo casos particulares de determinados sistemas tribológicos.

Así el desgaste puede ser el resultado de un gran número de eventos que suceden en los sistemas tribológicos con un número casi infinito de combinaciones.

El desgaste sigue una relación simple, llamada relación de Archard (A. D. Sarkar 1990) <sup>11</sup> que se expresa como:

$$K=V/S=W*P/H$$

Donde K es el factor de desgaste, V el volumen perdido, P es la presión ó carga aplicada, S es la distancia recorrida, H la dureza de indentación y W es una constante que dependerá del material y de las condiciones de la prueba. Esta constante, según el mecanismo de que se trate toma diferentes valores y significados. Se puede calcular, al realizar la prueba de desgaste y al tomar la dureza del material, ya que todos los términos que involucra la relación quedan determinados.

### **1.8.1 Mecanismos de desgaste**

**INTRODUCCIÓN:** Las superficies ingenieriles son rugosas y tienen colinas y valles, estas comúnmente son llamadas asperezas. De manera que el contacto entre dos sólidos, bajo una carga aplicada ocurre inicialmente sólo en unos cuantos puntos

aislados, por ello el área de contacto real se localiza únicamente en una fracción del área aparente. De este modo, el esfuerzo normal aplicado es muy alto en las regiones de contacto y puede exceder el punto de fluencia de uno de los sólidos o de ambos. En tal caso, las áreas de contacto tenderán a soldarse entre sí formando uniones o juntas, las cuales deben romperse para iniciar o sostener el movimiento relativo. La fuerza necesaria para romper estas uniones es una medida de la fricción. La ruptura o deformación de las áreas de contacto continuará hasta que el área de contacto real sea suficiente para soportar la carga, en este punto la deformación disminuye o incluso cesa.

Otro de los mecanismos que producen fractura y pérdida de material es el microcorte. Si una aspereza dura ó partícula se desliza sobre un material blando actúa como una herramienta de corte. Este mecanismo remueve material de la superficie y la profundidad y tamaño de la huella, depende del tamaño del elemento cortante.

Otro mecanismo que actúa en el desgaste es el impacto. Las condiciones normales de impacto son establecidas en la superficie mecánica de contacto bajo condiciones de percusión con un ángulo de incidencia, el cual tiende a ser normal. Esto se produce cuando la energía transferida a una superficie no puede ser disipada en forma de calor o deformación plástica, entonces la superficie se relaja formando fracturas por impacto. Esto requiere una alta densidad de energía y condiciones típicas de alta tensión durante una muy corta duración. La fractura por impacto se produce mas continuamente en un material frágil.

**Contaminantes:** A medida de que se rompen las uniones, aparecen residuos producidos por el desgaste. Para evitar esto hay que impedir la formación de uniones; lo que se logra separando la interfase con una película extraña al sistema que inhiba la interacción de los átomos de metal en los puntos de contacto entre los dos sólidos.

Para comprender el desgaste, es indispensable estudiar la topografía y la naturaleza fisicoquímica de las superficies. El grado de deformación superficial y

subsuperficial de los sólidos representa un aspecto fundamental en el mecanismo de fricción y desgaste por lo que al analizar la naturaleza y cantidad de desgaste en un sistema en particular de maquinaria, se deben estudiar los esfuerzos de contacto y los tipos de movimiento.

Dependiendo del diseño del sistema, se desprenderán partículas que no pueden escapar del área de contacto y toman una función abrasiva. Al mismo tiempo la dificultad de mantener una lubricación continua, provoca adhesión.

Para materiales metálicos los efectos adicionales de la corrosión son muy severos incrementándose el factor de desgaste.

### **1.8.2 Tipos de desgaste:**

Siempre que hay movimiento relativo entre dos sólidos que soportan una carga existe una situación potencial de desgaste. En términos generales, se sabe que el movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Puede existir una combinación de estos dos últimos, o el desgaste puede deberse a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes. Un metal puede interactuar con un no metal, o con líquidos, como aceite lubricante o agua de mar. Los tipos de desgaste se clasifican dependiendo de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga.

Desgaste por erosión. Se define como el proceso de eliminación de metal provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. Si las partículas son gotas líquidas el desgaste es por cavitación. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de las partículas respecto de la superficie. Los materiales frágiles fallan por agrietamiento de las superficies cuando la fuerza de impacto se aplica en forma normal.

Desgaste por Adherencia: en este caso, el movimiento relativo puede ser deslizante unidireccional o de vaivén, o bien la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud.

Desgaste por Abrasión: las partículas abrasivas producidas por los residuos del desgaste o por partículas extrañas al sistema tales como arena y polvo circundante permanecen atrapadas en la superficie deslizante y eliminan material principalmente por la formación de surcos.

Otras formas de desgaste son: el desgaste por ludimiento que aparece como resultado del movimiento oscilatorio de dos superficies en contacto, como sucede en máquinas donde existe vibración entre las partes. El desgaste por fatiga que surge como resultado de las cargas cíclicas; por ejemplo, en los baleros con rodillos que produce pérdida de material al desbastarse las capas superficiales. Y cuando un componente está sumergido en un medio fluido y tiene movimiento rotativo, habrá erosión y cavitación.

### 1. 8. 3      Ensayo de desgaste

El ensayo que ofrece más información sobre el desgaste de piezas de máquinas, se obtiene únicamente cuando se les somete a condiciones normales de funcionamiento, los ensayos abreviados de desgaste realizados en laboratorio tienen solo un valor comparativo, pero su realización es imprescindible como un método de control.

La resistencia a la abrasión de un material es generalmente determinada en condiciones controladas que simulan los movimientos observados en las situaciones reales. La máquina de perno-disco la cual corresponde a un ensayo de alto esfuerzo aplicado, es un aparato muy usado para pruebas de desgaste esta prueba esta normalizada con la denominación -ASTM G83-89- su esquema se muestra en la figura 1.3.

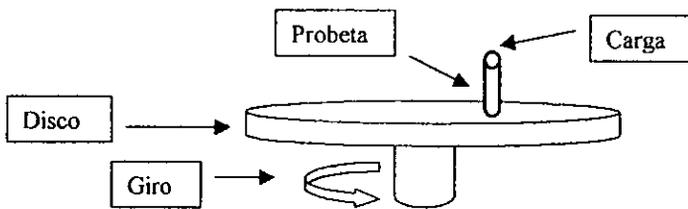


Figura 1.3. Esquema de la máquina denominada (Perno-Disco).

En esta máquina el perno se monta en forma normal. Las variables son carga normal, velocidad de deslizamiento, la atmósfera y la temperatura ambiente.

La cantidad de desgaste puede establecerse pesando el perno en una balanza analítica. Una prueba de desgaste completa requiere el registro de la pérdida de peso en relación con los intervalos de deslizamiento para obtener el desgaste inicial durante

el arranque y en el estado estacionario. En la figura 1.4, se muestra una gráfica característica de una curva de desgaste.

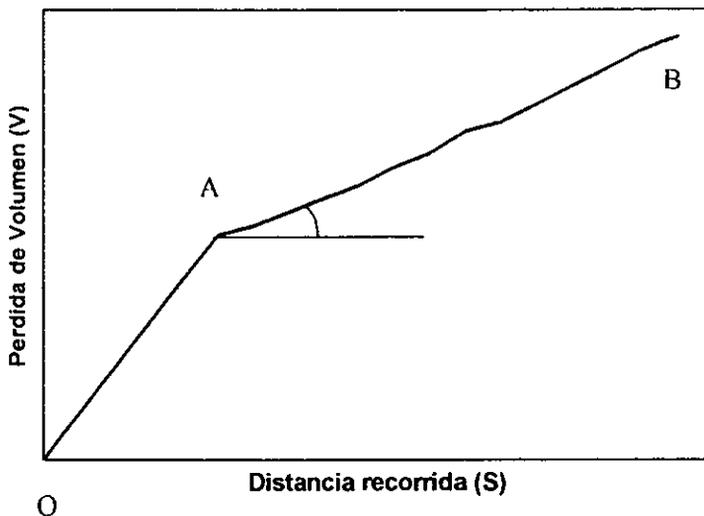


Figura 1.4 Curva característica para desgaste.(A. D. Sarkar 1990)

En la curva el punto cero corresponde al encendido de una máquina, o sea, cuando la distancia de deslizamiento es cero. Inicialmente, la pérdida de peso sigue un patrón de características curvilíneas 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. Es importante trabajar en condiciones de estricta limpieza química y el método requiere extremo cuidado.

#### 1.8.4 Desgaste en compósitos

Las aleaciones base aluminio se han usado en aplicaciones de piezas o componentes de un sistema, donde es importante un bajo peso asociado con propiedades mecánicas, que no pueden encontrarse en los materiales monolíticos. Sin embargo, la relativamente baja resistencia de las aleaciones de aluminio ha limitado su uso en ciertos ambientes en los que se encuentra en contacto con otro metal o alguna superficie con la cual exista fricción. En años recientes se han fabricado compósitos de matriz de aluminio con fibras y/o partículas de cerámicos de los denominados duros (Durezas mayores a 4 Gpa). Estos compósitos presentan un aumento importante en las propiedades tribológicas incluyendo deslizamiento, desgaste abrasivo, fricción y arranque.

El comportamiento de los CMM frente a la fricción y desgaste depende de la naturaleza de las partículas reforzantes y de la naturaleza de la matriz que las contiene. Las asperezas de un material pueden fácilmente desgastar las partículas blandas tales como carbón y mica; esto no sucede en partículas más duras como Alúmina y SiC.

Para desgaste por deslizamiento se puede afirmar que entre más duras sean las partículas dispersas se obtendrán menores velocidades de desgaste, con excepción de las partículas de sólidos lubricantes dispersas en una matriz, las cuales proporcionan bajas velocidades de desgaste a pesar de su baja dureza. Partículas con alta dureza proporcionan un alto coeficiente de fricción.

En la mayoría de los casos la resistencia al desgaste de los compósitos se incrementa con el incremento del contenido de partículas duras. Sin embargo en el caso del desgaste por erosión se han reportado resultados opuestos (A.J. Nimham 1988). Para casos en que el material erosivo es de partículas más blandas que las partículas dispersas en la matriz, los resultados indican una disminución en la velocidad de desgaste por este mecanismo.

Con el objeto de lograr un mejor manejo de la información de las pruebas de desgaste se han propuesto diversos métodos para clasificar el desgaste ya sea de acuerdo a su severidad o de acuerdo al mecanismo básico que contribuye a este.

A.D. Sarkar 1990.<sup>11</sup> deriva fórmulas para correlacionar la velocidad de desgaste, con las condiciones de operación y las propiedades mecánicas. Una constante adimensional denominada coeficiente de desgaste fue definida y mostró tener una gran importancia para describir el desgaste mecánico. El incremento en carga y/o distancia de deslizamiento, son factores determinantes en las condiciones de trabajo, como las principales causas de desgaste. Los lubricantes desempeñan un papel muy importante en los sistemas tribológicos ya que estos disminuyen la velocidad de desgaste. Los más importantes efectos de una buena lubricación, ya sean con grasa o aceites, en la disminución del desgaste pueden explicarse por el decremento en las fuerzas de fricción, lo cual proporciona principalmente una disminución en la temperatura del sistema.

### **1.8.5 Curva Factor de Desgaste – Carga**

Cuando en un nuevo material se investiga su comportamiento frente al desgaste, la primera etapa es usualmente una evaluación de la cantidad de desgaste con el incremento de la distancia recorrida. La siguiente etapa es graficar el factor de desgaste frente a la carga.

A continuación se describen las zonas de una curva típica de factor de desgaste frente a carga aplicada.

Para bajas cargas, hay un régimen de desgaste no severo (a-b), seguido por un régimen de transición (b-c) donde el factor de desgaste se incrementa en pocos ordenes de magnitud. Posteriormente si se incrementa la carga, la curva se estabiliza, entrando

en una zona donde el factor de desgaste vuelve a tener ordenes de magnitud similar (c-d). La carga a la cual la curva tiene un punto de inflexión es llamada carga de transición y las zonas donde los factores son estables corresponden a diferentes regímenes de desgaste como se muestra en la figura 1.5.

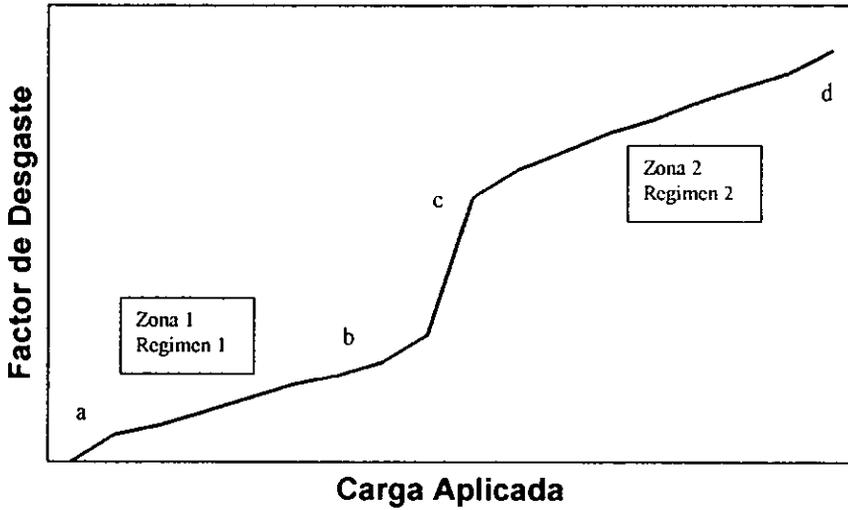


Figura 1.5. Curva típica de Factor de Desgaste frente a Carga.(A. D. Sarkar 1990)

## CAPITULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL

El objetivo de este trabajo es la obtención de una pieza prototipo de compuesto de matriz metálica ligera base aluminio, la cual sustituya eficientemente las aspas de un molino fabricadas comercialmente en acero. Es necesario realizar la evaluación de las propiedades más importantes para la aplicación a que esta destinada la pieza. Además es necesario recalcar que, para lograr este objetivo se requiere cubrir una serie de etapas bien determinadas. En la figura 2.1. se presenta un diagrama general para la obtención de una pieza por el proceso de fundición. Como puede observarse en el diagrama todas y cada una de las etapas requiere de atención para alcanzar el objetivo. Por un lado la elaboración del molde requiere no sólo del manejo de las variables que influyen en las características físicas y mecánicas del molde, como: humedad, permeabilidad, dureza, etc. También requiere de la elaboración de un modelo y/o de una placa modelo, así como del diseño de un sistema de colada. Para el modelo y la placa modelo se deben cuidar: el dimensionamiento para maquinados, contracción, etc.

Una vez cubiertas estas etapas se llega a la etapa de moldeo donde convergen las dos vertientes, por un lado la obtención de un metal líquido previamente tratado, para que presente las características y la temperatura de vaciado adecuadas. Y por el otro la fabricación de un molde con un material de moldeo adecuado con las propiedades físicas y mecánicas requeridas y con un sistema de colada que permita un eficiente llenado de la pieza.

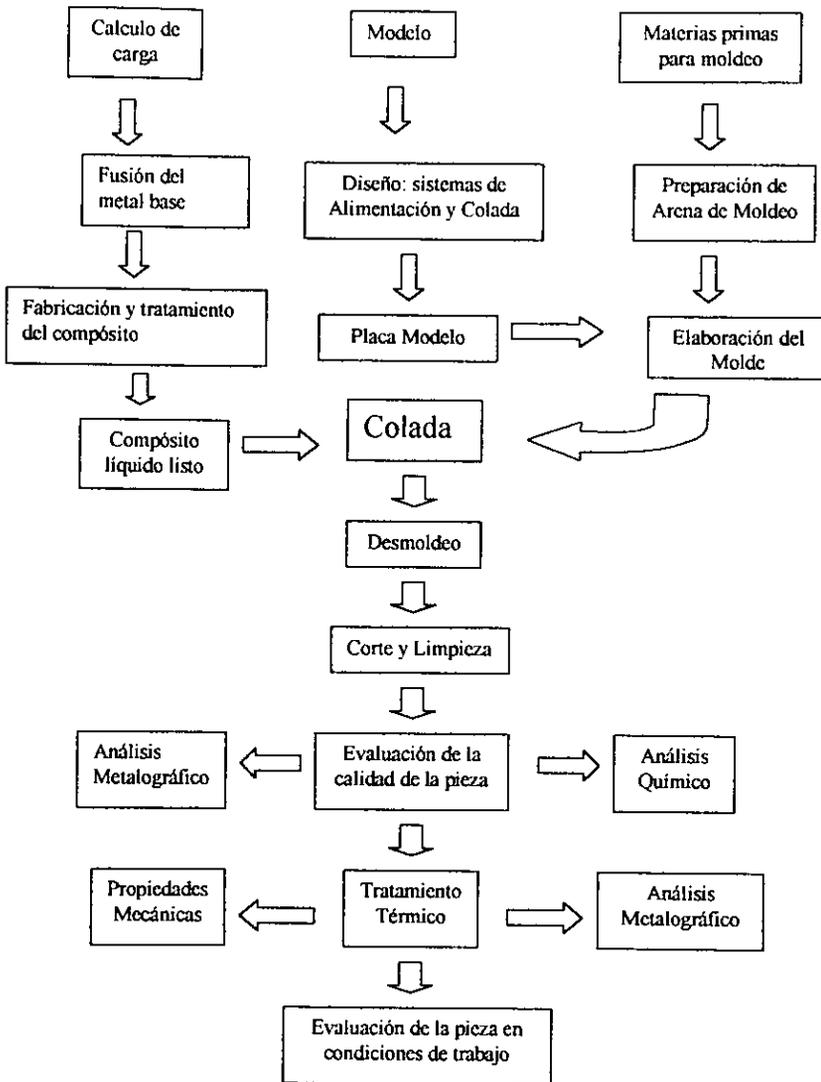


Figura 2.1. Diagrama general de la fabricación de la pieza prototipo

Una vez que se cuela la pieza se procede a la operación de desmoldeo, la cual debe llevarse a cabo una vez que el enfriamiento de la pieza sea suficiente para asegurar, que no sufrirá deformaciones al entrar en contacto con el aire a temperatura ambiente. Otras operaciones son limpieza, corte, maquinado, y en este caso la evaluación de la calidad de la pieza con la obtención de probetas para la evaluación de las propiedades más importantes (Resistencia al desgaste y Dureza).

## 2.1 SELECCIÓN DE LA PIEZA PROTOTIPO:

Condición de operación de la pieza prototipo:

La pieza prototipo (Aspa) se encuentra bajo una combinación de desgaste por abrasión y erosión.

En la preparación de arenas de moldeo, el tiempo óptimo de operación del molino para el mezclado de una carga es de 5 min. a una velocidad de 40 rpm. La carga de arena es de 3 a 5 kg, y durante todo el tiempo de operación las aspas se encuentran en contacto continuo con la arena por esto las piezas deben tener una adecuada resistencia al desgaste.

Para el estudio de la sustitución de las aspas del molino con un compuesto de matriz metálica ligera se consideró:

- El método de fabricación del compuesto, el cual fué realizado mediante el proceso de vórtice.
- La capacidad de las instalaciones para la evaluación de la pieza prototipo, que incluye: prueba in situ, evaluación de propiedades mecánicas y evaluación metalográfica.
- Propiedades mecánicas más importantes, solicitadas al sistema de compuesto seleccionado AlSi/SiCp.

- Posibilidad de reemplazar las Aspas de uno de los molinos del departamento de arenas por un material más ligero y similar en su resistencia al desgaste.
- Menor costo de la fabricación de la pieza con el compuesto seleccionado, matriz A356 reforzada con SiC en forma de partículas angulares, comparado con la fabricación de la pieza en acero y también con el uso de un material reforzante más caro como el Carburo de titanio y Carburo de boro.

## 2.2 MATERIAL ORIGINAL DE LA PIEZA A REEMPLAZAR:

Para el análisis de las propiedades del material de la pieza original (acero) fueron realizadas las siguientes etapas:

- Análisis químico:

El análisis químico nominal del material original de la pieza se presenta en la tabla siguiente:

%C	%Cu	%Ni	%Mn	%S	%Si	%P	%V	%Mo
0.60	0.0450	1.1875	0.5125	0.012	0.5845	0.04	0.0321	0.036

El cual fue realizado por espectrofotometría de absorción, para Mn y P. El C y S fueron evaluados por métodos volumétricos.

- Ensayos mecánicos:

La dureza del material fue de 33 Rc. en promedio.

De la prueba de desgaste aplicada (Máquina de Perno-Disco), al acero de la pieza original, se determinó una razón de desgaste de  $3.35 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{m}$ .

- Análisis metalográfico:

Se realizó un análisis metalográfico para la pieza original que incluyó dos etapas; en estado de recocido total y estado de llegada y los resultados fueron:

En estado de recocido total y analizando por microscopía óptica presenta un contenido aproximado de 75% de Perlita y 25 % de Ferrita, que corresponde a un 0.6% de C.

En estado de llegada presenta una mezcla de microestructuras. Entre las que destaca un predominio de la fase de martensita revenida, con ferrita en algunas zonas y estructura típica widmanstatten, así como una pequeña cantidad de perlita. (Fig. 3.1). Aparentemente el acero tiene un tratamiento térmico de temple y revenido. La pieza original puede observarse en la figura 2.2.

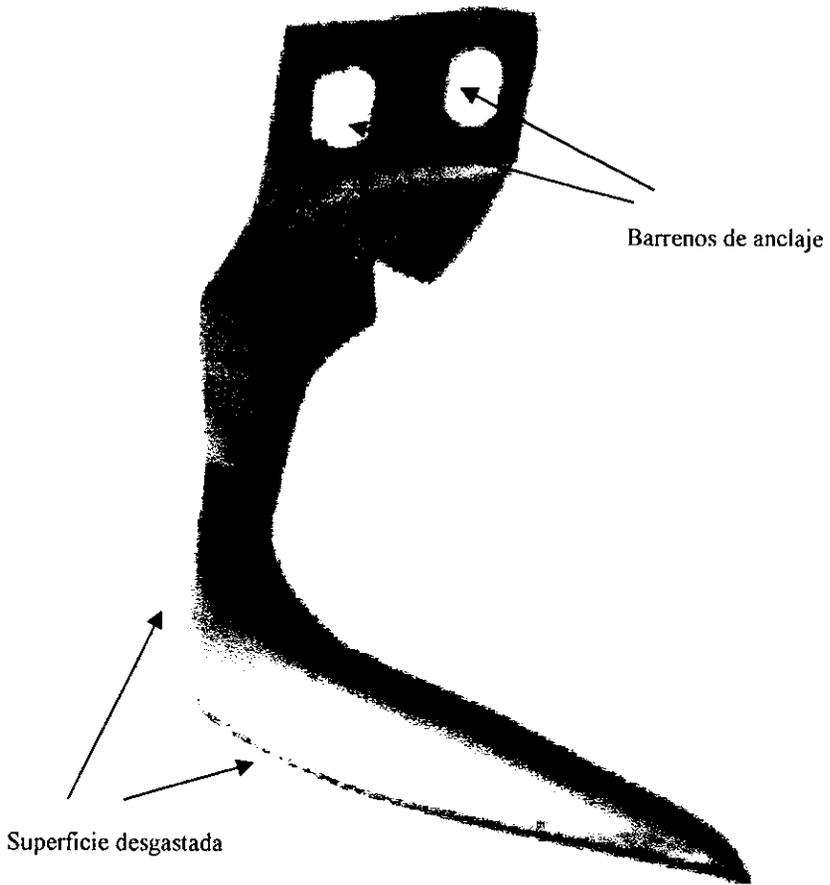


Figura 2.2. Foto de la pieza original.

## 2.3 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PIEZA PROTOTIPO:

Los materiales para fabricar el compuesto de matriz metálica ligera fueron:

1. Aleación de aluminio A356 de la siguiente composición química:

Aleante	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
%/w	0.23	0.35	0.08	6.65	0.32	0.12	Balance

2. Carburo de silicio (SiC) en forma de partículas angulares  
(Tamaño 35-40  $\mu$ )
3. Aleación maestra de Estroncio (10wt%Sr), como agente humectante y para mejorar la respuesta al tratamiento térmico. (0.05% en peso)
4. Magnesio en forma de metal puro, para mejorar la respuesta al tratamiento térmico de la pieza de compuesto e incrementar la dureza de la matriz. (0.7% en peso).
5. Gas inerte Argón de alta pureza (99.995%), el cual se utilizó para la desgasificación del compuesto.

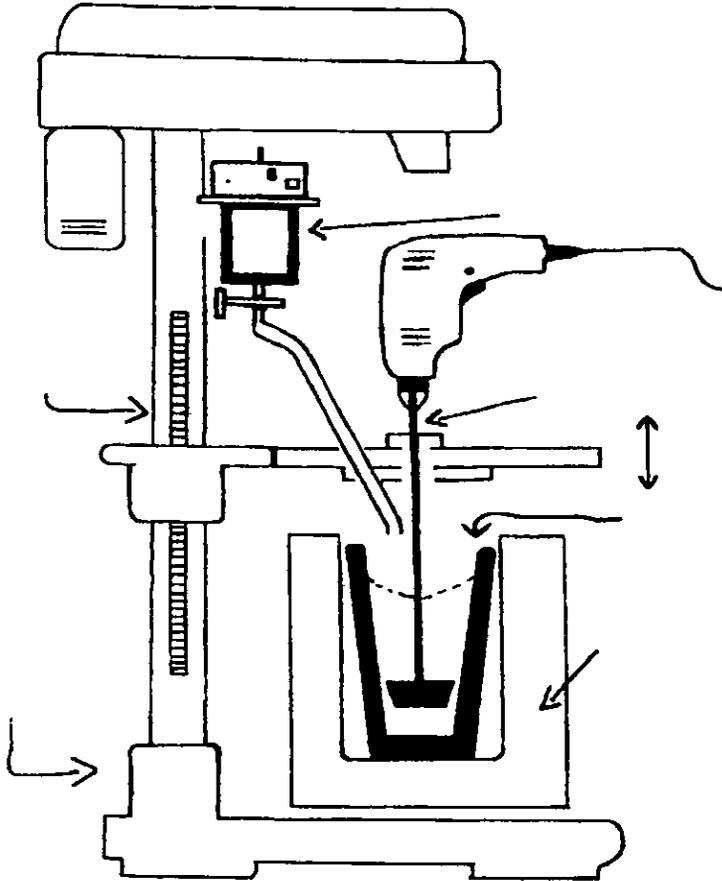
La aleación A356 es utilizada ampliamente en la industria, además ha sido utilizada por diversos autores en trabajos de investigación para obtención de compósitos, reportando buenos resultados en la incorporación de las partículas de cerámico.

## 2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El equipo que se utilizó para la fabricación del compuesto consiste en varios sistemas que se complementan entre ellos, los cuales permiten la reproducibilidad de las fusiones. El sistema de fusión consiste en un horno de resistencias eléctricas de 3500 W, y alimentación de 220 V, utilizando un controlador de temperatura de (0-1200 °C). El crisol fue de Carburo de Silicio tamaño (A10) y debe mantenerse firme dentro del horno. Ya que la velocidad de agitación del metal dentro del mismo es de 1000 rpm. El horno cuenta con una tapa que tiene en su superficie exterior aditamentos para la flecha y el sistema de precalentamiento de cerámico (Tolva/horno) y cuenta en su superficie interior con material aislante. El sistema motriz para la agitación consiste en un taladro con alimentación eléctrica de 127 V y con velocidad variable (Ajustable entre 100-2500 rpm).

El sistema de precalentamiento de cerámico (Tolva/horno) esta sujeto a la tapa del horno. Se compone de un cilindro de acero con resistencias eléctricas. Dentro de la cavidad de las resistencias hay un contenedor cilíndrico con la base cónica que desemboca, por medio de un tubo, en el baño líquido. El tubo cuenta con una válvula de paso. La (tolva/horno) cuenta con un vibrador eléctrico que permite un flujo constante de las partículas de SiC. A continuación se presenta la figura 2.3. con un esquema del equipo utilizado.

## 2.4.1.-EQUIPO



- 1.- Tolva/horno
- 2.- Línea para el taladro
- 3.- Flecha
- 4.- Horno de resistencias
- 5.- Crisol
- 6.- Taladro de banco
- 7.- Cremallera

Figura 2.3. Esquema general del equipo de fabricación.

Se fabricaron las piezas por el método de Vórtice, el cual consiste en proporcionar agitación vigorosa en el metal líquido con el objeto de provocar un vórtice, esta agitación permite la incorporación y suspensión de las partículas de carburo de silicio al baño metálico. Durante la fabricación se adicionó una aleación maestra de estroncio para mejorar la humectabilidad de las partículas de SiC, también se adicionó magnesio para mejorar la respuesta al tratamiento térmico del compuesto.

#### 2.4.2.- FABRICACION DEL COMPOSITO:

Se pesa y prepara la carga metálica aleación de aluminio A356 y se procede a su fusión, el peso base para la fusión es de 850 g. La carga metálica se precalienta y se adiciona al crisol. Es importante alimentar el carburo de silicio al baño metálico con la temperatura adecuada, por tanto se coloca la cantidad correspondiente en volumen de partículas de carburo de silicio 15 ó 20 % en el sistema de precalentamiento y dosificación de cerámico (Tolva/horno), este sistema se utiliza para el precalentamiento del cerámico y el control de la alimentación del carburo de silicio al baño líquido. La temperatura de precalentamiento del Carburo de Silicio es de 500°C. Una vez que el metal de la aleación base esta fundido se adicionan, dos materiales importantes en la fabricación de compósitos; estroncio como aleación maestra (Al-10Sr) y Magnesio en forma de metal puro. Para tener 0.7% en peso de Mg. y 0.05% en peso de Sr. Se permite la incorporación de estos dos materiales, antes de iniciar la operación de alimentación del cerámico, esta operación se realiza en forma intermitente con ayuda del vibrador y la válvula que tiene el sistema (Tolva/horno) y dura aproximadamente entre 6 y 7 min, durante la operación se proporciono una agitación al baño líquido de 1000 r.p.m. para provocar un vórtice. Esto se realiza con el sistema adaptado que consiste en un taladro de velocidad variable y una propela de acero, la cual consiste en 3 placas unidas a un vastago con un angulo de 120°

entre ellas, (Anexo A). La propela esta recubierta con material refractario (Fibra cerámica).

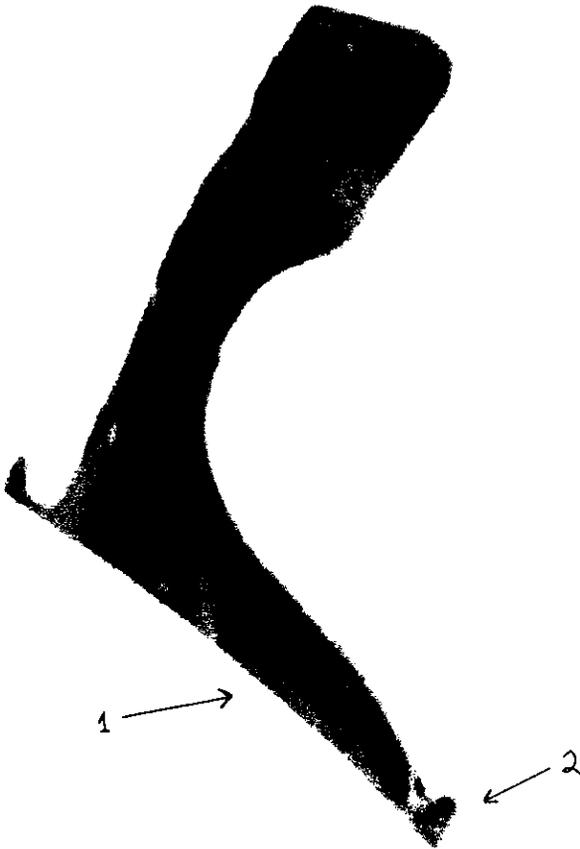
La temperatura del baño líquido se mantiene en el rango de 740°C a 780°C.

Posteriormente se realiza la operación de desgasificación con un flujo de argón de 1.8 l/min. Durante la desgasificación se realiza una agitación intermitente para evitar el asentamiento de las partículas de carburo de silicio en el fondo del crisol. Se permite la evolución de los gases del metal líquido y al finalizar esta operación el compuesto esta listo para la colada.

La temperatura de colada se encuentra en el rango de 770 a 780°C.

#### 2.4.3.- MODELO Y PLACA MODELO:

La fabricación del modelo se llevo a cabo rectificando las dimensiones de la pieza desgastada figura 2.2 la cual había perdido sus dimensiones en la zona de contacto con la arena. Para obtener las dimensiones originales se dibujo la pieza desgastada y se continuaron las líneas de las zonas que no presentaban desgaste. Estas dimensiones se trasladaron, considerando tolerancias y ángulos de salida necesarios, a la pieza de madera de pino de la cual se fabrico el modelo. La pieza de madera era un cuadrado de 20 por 20 centímetros con un espesor de 4.5 cm. La cual fue cortada y labrada para obtener el modelo el cual permitiría la obtención de una pieza con las dimensiones adecuadas. La figura 2.4 presenta una foto del modelo fabricado.



- 1.- Zona de alto desgaste
- 2.- Extensiones para muestra metalografica

Figura 2.4. Dimensiones del modelo fabricado en madera.

Una vez obtenido el modelo de la pieza se adicionaron las salientes o muñones que aparecen en los extremos de la base de la pieza, como se muestra en la figura 2.4, esta zona de la pieza es la que se encuentra sometida a un desgaste más severo, los muñones fueron cortados, una vez que se realizó la operación de colada de la pieza, y se procedió a evaluar en esta zona la incorporación y distribución del SiC, con la ventaja de mantener las dimensiones de la pieza.

La zona escogida para situar las salientes se encuentran en contacto continuo con la arena cuando el molino se encuentra en operación.

Adicionalmente se construyó una placa modelo de la pieza prototipo esta se fabricó con el siguiente procedimiento:

1. Moldeo del modelo fabricado en arena silica número AFS 160-165 colocando una bajada vertical hasta el drag.
2. Se separaron ambos el drag y el cope.
3. Se colocó un marco, cuadrado de acero comercial de media pulgada de espesor, sobre el drag.
4. Se fabricó un tazón de colada en la arena del cope y este se coloca sobre el marco de acero.

La figura 2.5 muestra el Drag, Cope y el marco de acero.

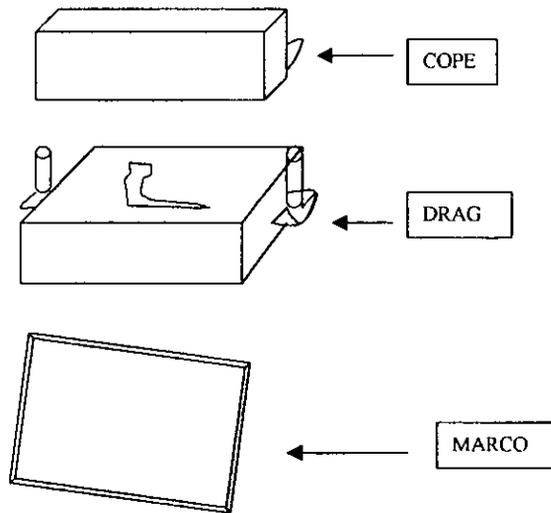


Figura 2.5. Drag, Cope y el marco de acero, para fabricar la placa modelo.

La operación de colada de la placa modelo se realizó con una aleación comercial de aluminio A356.

La placa obtenida es del tipo de doble cara, la elaboración de esta placa facilita la operación de moldeo además de que permitió el montaje de los sistemas de colada probados, otra ventaja importante es que la placa modelo tiene una mayor duración, comparada con el modelo suelto de la cual fue fabricada.

#### 2.4.4.- TRATAMIENTO TÉRMICO

Tomando en cuenta los estudios realizados por, (Jacinto 1995)<sup>12</sup>, para determinar las temperaturas y tiempos para los tratamientos de envejecimiento, aplicados a los compósitos base aluminio, se selecciona el siguiente procedimiento.

El tratamiento térmico aplicado a las piezas fabricadas, y probetas para el ensayo de desgaste fue de envejecimiento. Este consistió de las siguientes operaciones:

- Recubrimiento de las piezas y probetas para desgaste con pintura refractaria (base Circón) para evitar la oxidación de sus superficies.
- Tratamiento de envejecimiento a una temperatura de solución de 530°C durante un tiempo de 8:15 min. y un temple en agua a 60°C.
- Tratamiento de envejecimiento natural durante 24 hrs. Este se llevó a cabo a temperatura ambiente.
- Tratamiento de envejecimiento artificial a una temperatura de 155°C durante un tiempo de 7 horas.

#### 2.4.5.- ENSAYO DE DESGASTE

El ensayo de desgaste se realiza en el aparato mostrado en la figura 2.6 El motor del equipo es de  $\frac{1}{4}$  Hp con 2400 rpm. totales, el control permite mantener un régimen de trabajo de 100 rpm. En este ensayo el brazo termina en la probeta para desgaste que tiene 6.2 mm de diámetro y una longitud de 25 mm. Sobre el brazo se coloca la carga necesaria para cada prueba. El disco es de un acero 4140 Templado y Revenido y tiene 18 cm de diámetro. Todas las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente sin utilizar lubricante.

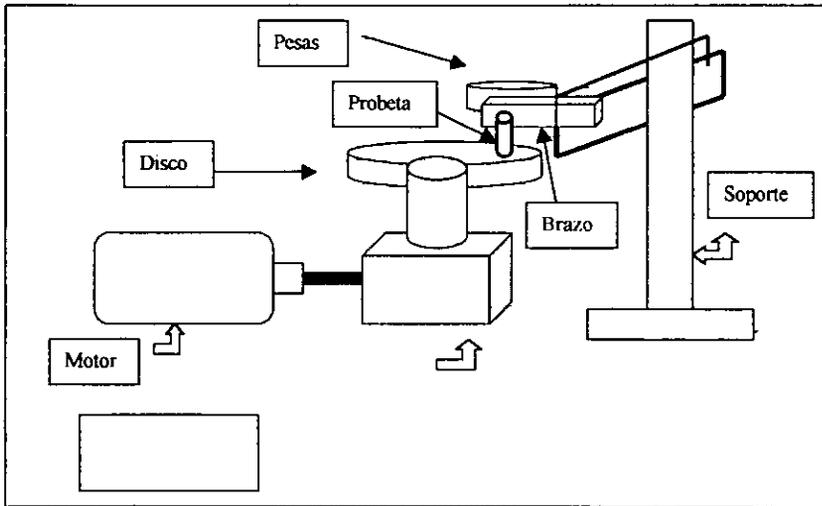


Figura 2.6. Esquema del equipo para ensayo de desgaste.

Las pruebas se efectuaron con el siguiente procedimiento:

Las probetas se limpiaron exhaustivamente para eliminar los residuos de la pintura de circonio, la cual fue aplicada para evitar la oxidación de la superficie, durante el tratamiento térmico y se aplica un terminado a lija 600 en todas las probetas, sobre la superficie de contacto con el disco, después de esta operación se limpiaron nuevamente para eliminar filos dejados por el maquinado y que pudieran desprenderse durante las pruebas, enmascarando así los resultados.

Cada probeta se peso en una balanza analítica (sesivilidad de  $10^{-4}$ g) y esta misma balanza se utilizó para pesar las probetas después de cada tiempo específico de prueba, es decir después de intervalos de 30 minutos a una velocidad de disco de 100 rpm, con una carga de 6.535 kg.

Las probetas fueron sometidas en total a 2 horas de prueba cada una, se tabulan los resultados y se obtienen las velocidades de desgaste para cada una de las probetas los resultados se presentan en el Capítulo III.

#### 2.4.6. Evaluación de la pieza Prototipo in situ (en condiciones de operación)

De las piezas obtenidas se destinaron dos de ellas para realizar pruebas directamente en el molino mezclador de arena. La prueba consiste en montar la pieza fabricada en el molino y permitir el uso del molino durante el tiempo normal de operación en el departamento de arenas. Se realizaron mediciones de perdida de peso a intervalos de tiempo diferentes para obtener las curvas de perdida de peso contra tiempo.

El tiempo normal de uso del molino por cada carga específica es de 5 minutos totales y consisten en 2 minutos de mezclado de la arena con la cantidad de agua calculada y posteriormente 3 minutos de mezclado con los aglutinantes, después de estas operaciones la arena queda lista para la operación de moldeo.

Para obtener el peso de la pieza esta se desmonta del molino, la pieza esta sujeta al brazo del molino por dos tornillos, se limpia de la arena que se adhiere a su superficie, se seca y terminadas estas operaciones se obtuvieron los pesos de la pieza, se registraron y se volvió a montar la pieza en el molino para que continuara en funcionamiento.

## CAPITULO III RESULTADOS

### 3.1.- ENSAYOS DE DESGASTE

Los resultados obtenidos de los ensayos de desgaste que se aplicaron a los compósitos fabricados y la probeta de la pieza original del molino, se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 3.1. Resistencia al desgaste del compósito Al-7Si/15%Vol. SiCp,  
con una carga de 6.535 kg.

Tiempo (min)	Peso de la probeta ( g )	Diferencia (g)	Volumen perdido $1 \times 10^{-3}$ ( cm <sup>3</sup> )	Distancia Recorrida (m)
0	1.7935	0.0	0.0	0.0
30	1.7878	0.0057	2.17	584.3
60	1.7803	0.0075	4.87	1168.6
90	1.7771	0.0032	6.05	1753.0
120	1.7704	0.0067	8.52	2349.3

**Nota:** densidad del compósito con 15% SiC=2.71 g/cm<sup>3</sup>

Tabla 3. 2. Resistencia al desgaste del compósito Al-7Si/20%Vol. SiCp,  
con una carga de 6.535 kg

Tiempo (min)	Peso de la probeta (g)	Diferencia (g)	Volumen perdido $1 \times 10^{-3}$ (cm <sup>3</sup> )	Distancia Recorrida (m)
0	1.6289	0.0	0.0	0.0
30	1.6232	0.0057	2.08	593.1
60	1.6099	0.0133	6.93	1177.4
90	1.6036	0.0063	9.23	1761.7
120	1.5962	0.0074	11.93	2346.1

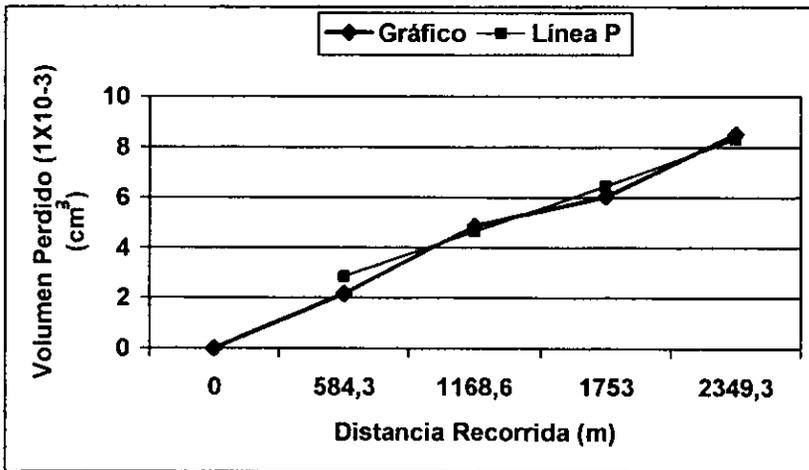
**Nota:** densidad del compósito con 20% SiC=2.74 g/cm<sup>3</sup>

Tabla 3.3. Resistencia al desgaste del acero de la pieza original  
 Con una carga de 6.535 kg.

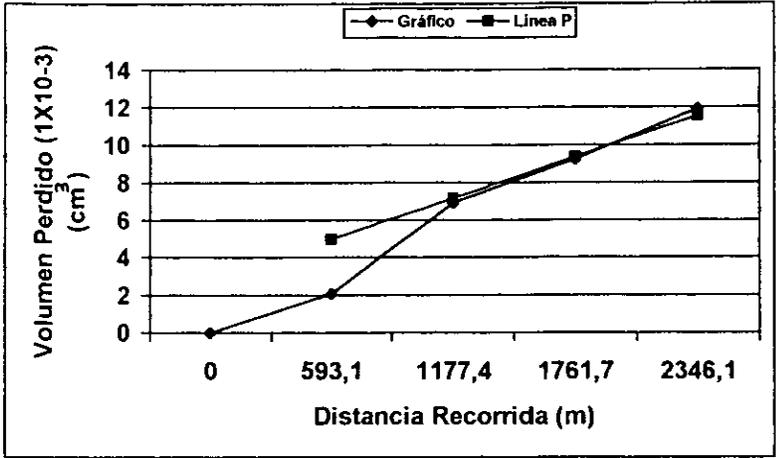
Tiempo (min)	Peso de la probeta (g)	Diferencia (g)	Volumen perdido $1 \times 10^{-3} \text{ (cm}^3\text{)}$	Distancia Recorrida (m)
0	5.7596	0.0	0.0	0.0
30	5.7535	0.0061	0.87	584.33
60	5.7419	0.0116	2.52	1168.67
90	5.7296	0.0123	4.28	1753.00
120	5.7145	0.0151	6.44	2337.33

Nota: densidad del acero:  $7.0 \text{ g/cm}^3$

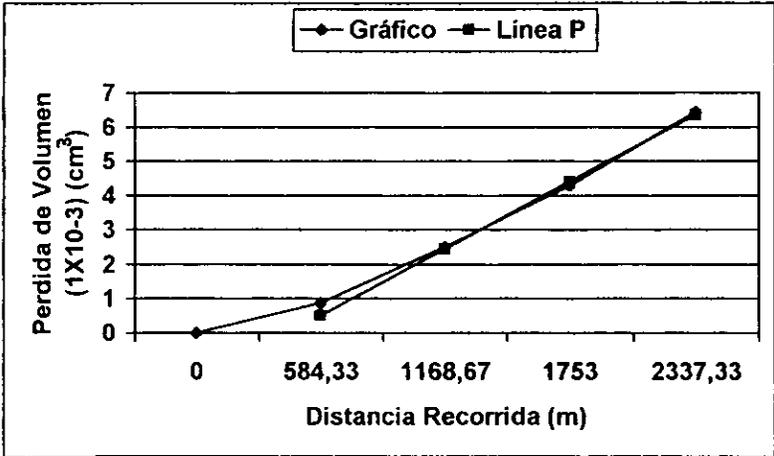
A continuación se presentan las gráficas para los resultados tabulados y se presenta la línea de regresión lineal, para la segunda etapa de desgaste de la curva para calcular la razón de desgaste en cada caso particular, el Anexo D presenta los datos para obtener la pendiente de la línea P.



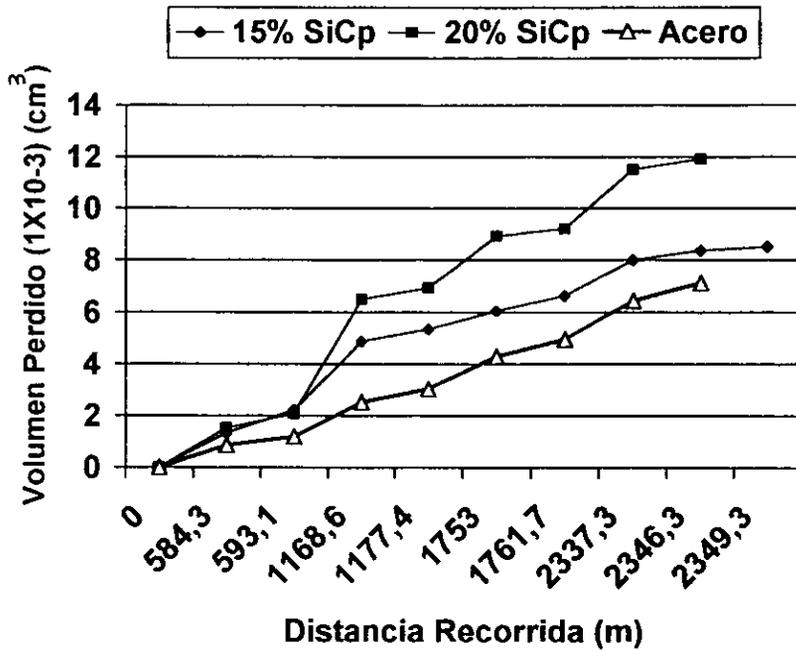
Gráfica 3.1. Composito fabricado con 15% Vol. SiCp.



Gráfica 3.2. Para un compuesto fabricado con 20% Vol. SiCp.



Gráfica 3.3. Para la pieza original de acero.



Gráfica 3.4. Comparación de los tres materiales ensayados.

En la tabla 3.6. se encuentran los valores de razón de desgaste para los tres materiales ensayados. Estos valores solo son válidos para las condiciones de la prueba efectuada en la maquina de perno-disco de los laboratorios del Departamento de Metalurgia.

Material	Razón de Desgaste (cm³/m)
Compósito 20% SiCp	$5.45 \times 10^{-6}$
Compósito 15% SiCp	$3.44 \times 10^{-6}$
Acero de la pieza original	$3.16 \times 10^{-6}$

Tabla 3.6. Razón de desgaste

### 3.2.- ENSAYO DE DESGASTE IN SITU

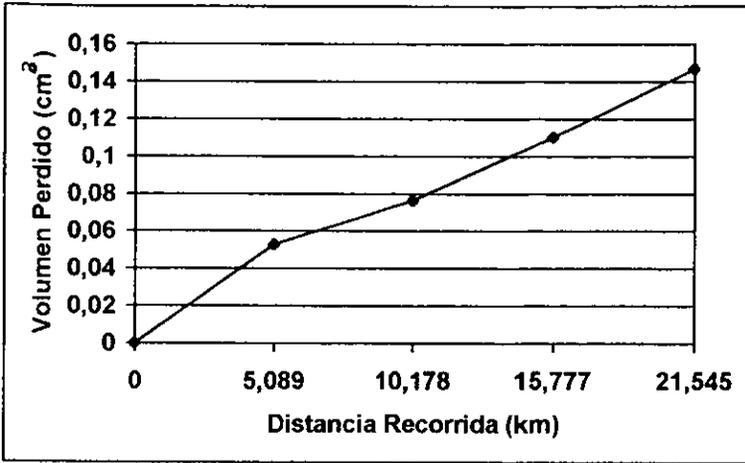
Los resultados obtenidos en las pruebas efectuadas directamente en el molino se presentan en las tablas 3.4. y 3.5. Para los composites fabricados, con adición de Carburo de Silicio con 15 y 20 % en volumen respectivamente.

Tiempo (min)	Peso (g)	Diferencia (g)	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Distancia recorrida promedio (m)
0.0	190.19	0.0	0.0	0.0
120	189.96	0.233	0.0850	6785.8
240	189.73	0.225	0.2492	13571.6
360	189.55	0.185	0.3167	20357.5
516	189.34	0.204	0.3912	29179.1
661	189.21	0.130	0.4386	37378.6

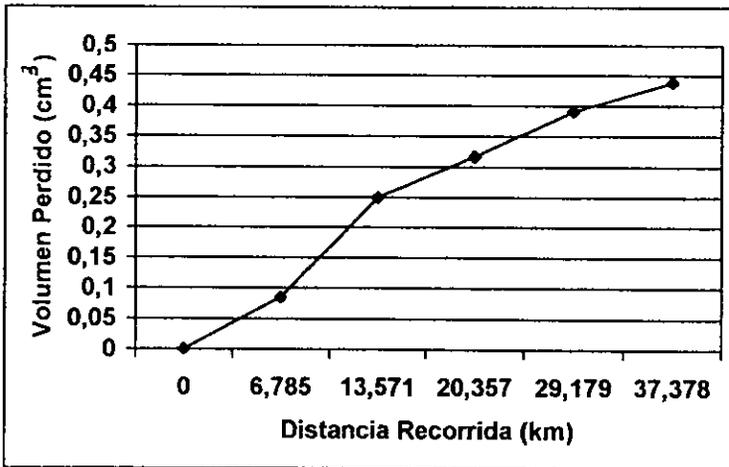
Tabla 3.4. Desgaste in situ para un compuesto con 20 % de SiCp

Tiempo (min)	Peso (g)	Diferencia (g)	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Distancia recorrida promedio (m)
0.0	187.342	0.0	0.0	0.0
90	187.200	0.142	0.05239	5089.38
180	187.135	0.065	0.07638	10178.76
279	187.043	0.092	0.1103	15777.07
381	186.94	0.099	0.1468	21545.04

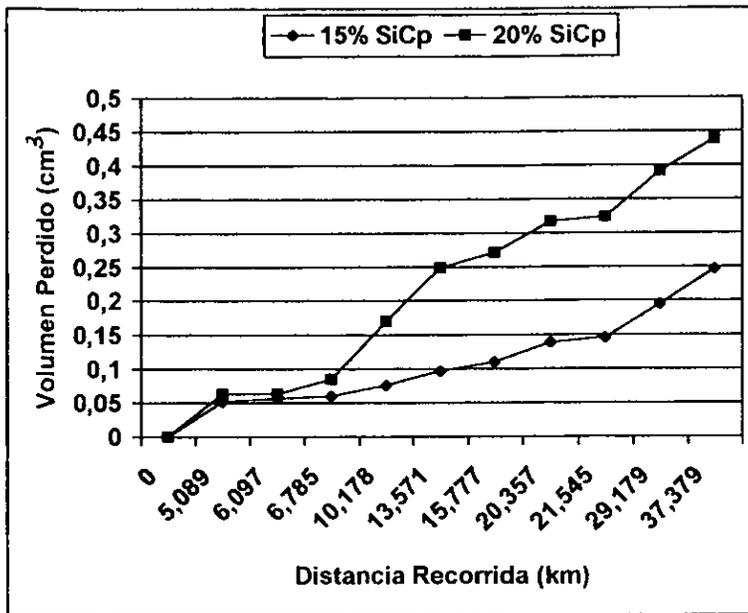
Tabla 3.5. Desgaste in situ para un compuesto con 15 % de SiCp



Gráfica 3.5. Para la pieza fabricada con 15% de SiCp



Gráfica 3.6. Para la pieza fabricada con 20% de SiCp



Gráfica 3.7.comparativa de los dos compósitos fabricados.

En la tabla 3.7 se encuentran los valores de razón de desgaste para las piezas que se probaron en el molino mezclador de arena.

Material de la pieza	Razón de Desgaste (cm <sup>3</sup> /m)
Compósito 20% SiCp	$1,08953 \times 10^{-5}$
Compósito 15% SiCp	$7,72033 \times 10^{-6}$

Tabla 3.7 razón de desgaste de la prueba in situ.

### 3.3.- Análisis Metalografico

A continuación en la figura 3.1. Se presenta la microestructura del material del cual esta fabricada la pieza original, misma que fue comentada en la pagina # 45.



Figura 3.1. Microestructura del acero de la pieza original, en condiciones de llegada. (fase martensítica con ferrita en algunas zonas y estructura típica widmanstätten y pequeñas áreas con perlita)

Resolución 400 X.

Las metalografías de los compósitos de los cuales se fabricaron las piezas prototipo se presentan en las siguientes figuras, la figura 3.2 presenta la microestructura del compósito con 15% en vol. de SiCp como material reforzante.

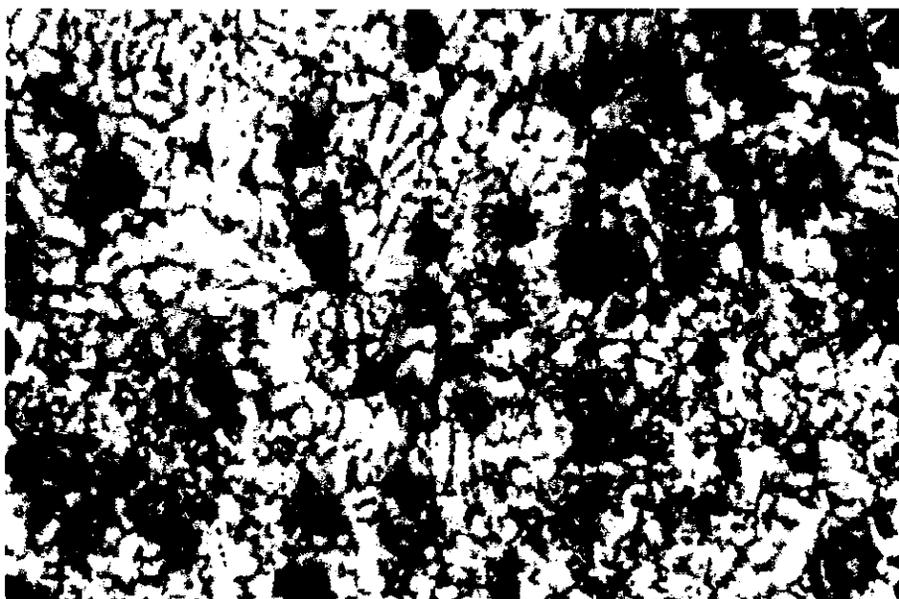


Figura 3.2. Microestructura del compuesto reforzado con 15% en Vol. de SiCp. Con 200 X de resolución. (Partículas de carburo de silicio en una matriz aluminio-silicio con silicio en forma globular).

La figura 3.3 presenta la microestructura del compuesto reforzado con 15% en Vol. de SiCp obtenida a mayor nivel de resolución que el de la figura previa.



Figura 3.3. Microestructura del compuesto reforzado con 15% en Vol. de SiCp. Con 400 X de resolución. (Se observan claramente los globulos de Si enbevidos en la matriz de Al-Si).



A continuación la figura 3.5 presenta la microestructura del compósito fabricado con 20% en Vol. de SiCp como material reforzante, para el caso de alto nivel de resolución.

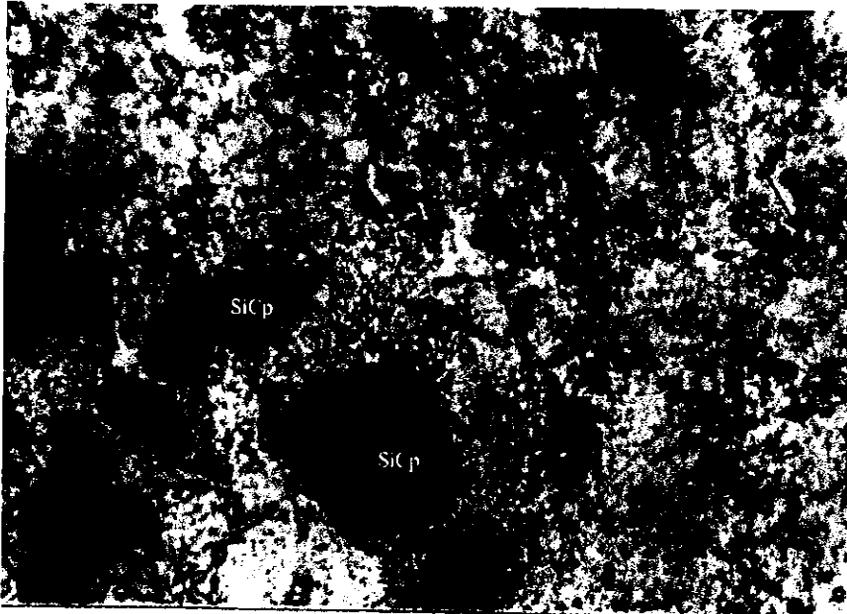


Figura 3.5 Microestructura del compuesto reforzado con 20% en Vol. de SiCp. Con 400 X de resolución (Se presentan las partículas de SiC rodeadas de globulos de Si).

En la figura 3.6 se presenta una fotografía de la pieza fabricada y que incluye el sistema de colada.

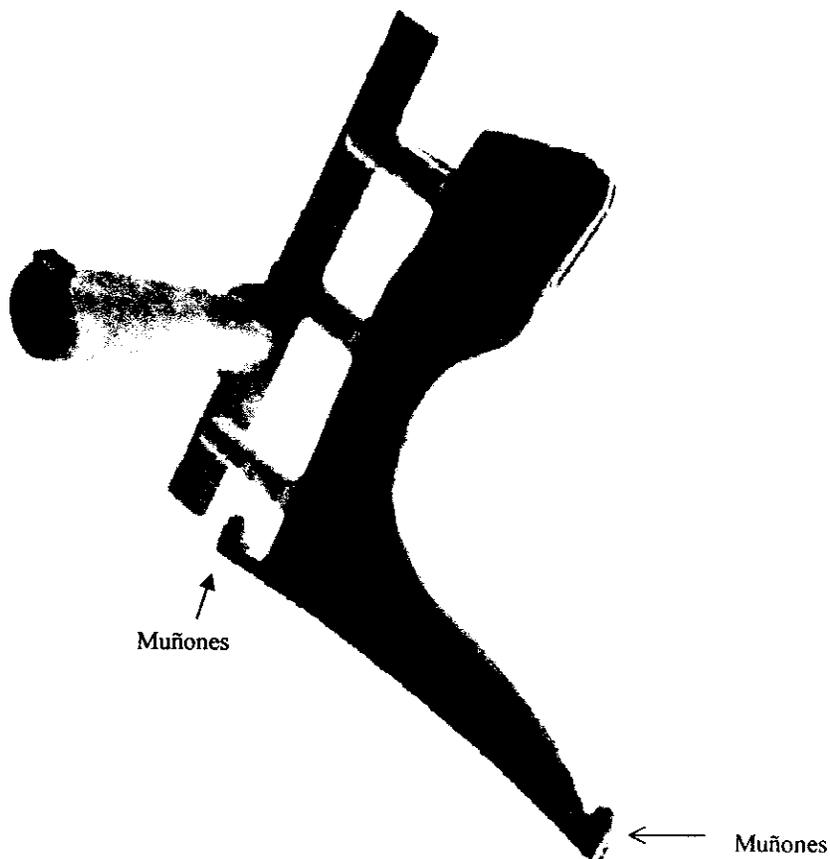


Figura 3.6. Fotografía del aspa, incluyendo sistema de colada y los muñones para observación metalográfica.

## IV.- ANALISIS DE RESULTADOS

Se calculo el sistema de colada a través de las condiciones teóricas propuestas por la AFS, para aleaciones monolíticas y los resultados obtenidos fueron utilizados como guía para calcular y obtener las dimensiones de un sistema de colada que incluyera las consideraciones más importantes propuestas por Rohatgi, para sistemas de colada de compósitos. El sistema de colada obtenido fue probado experimentalmente, obteniéndose un llenado de la pieza en su totalidad, con un rendimiento bajo de metal en la relación (pieza-sistema de colada) y una baja efectividad del sistema para obtener una pieza con una buena distribución del material reforzante, la mayor parte de las partículas de carburo de silicio se distribuyeron en la totalidad del sistema de colada, un esquema del sistema de colada propuesto por Rohatgi se presenta en la figura 1.2 mostrando, en el sistema propuesto una restricción al flujo de metal y un espacio para salida de gases, estos dos elementos son adicionales a un sistema convencional, los ataques la bajada y la salida de gases son de forma rectangular.

Debido a lo anterior se diseño un nuevo sistema de colada alternativo, el cual incluía consideraciones de los dos sistemas de colada previos, obteniendo con este una mejor distribución del material reforzante y reproducibilidad, con lo cual se realizaron las pruebas necesarias para determinar la posibilidad de sustituir al material del cual esta hecha la pieza original.

En el anexo B se resumen los resultados para las dimensiones de los tres sistemas de colada calculados.

De los resultados obtenidos de la prueba de desgaste y de la dureza de los materiales. Se observa que a pesar de que la dureza de los dos composites es significativamente inferior a la del acero, la resistencia al desgaste entre el acero y el compuesto reforzado con 15% de SiC es muy similar, mientras que en el acero la pérdida de volumen es de  $0.00644 \text{ cm}^3$  después de ensayarse durante 120 min., Para estas mismas condiciones la pérdida en volumen del compuesto es de  $0.00852 \text{ cm}^3$ .

Para el caso del compuesto con 20% de SiC, el desgaste fue mayor,  $0.01193 \text{ cm}^3$ , que es 30 % mayor que el obtenido en el compuesto reforzado con 15 % en volumen de SiC.

Las líneas pendientes (P) que se muestra junto con los resultados graficados por separado en las gráficas 3.1, 3.2 y 3.3 permiten obtener la razón de desgaste para la carga aplicada, la razón solo es valida para las condiciones y parámetros de la prueba efectuada.

En la gráfica 3.7 se presenta los resultados de las dos piezas ensayados directamente en el molino, Aspas fabricadas con 15 y 20 % de SiCp respectivamente, se observa que la pérdida de volumen del compuesto con 20 % de SiCp en volumen como material de refuerzo, es del doble que la pérdida de volumen que sufre el compuesto con 15 % de SiCp en volumen como material de refuerzo. Este resultado corrobora el comportamiento mostrado por las probetas en la prueba de desgaste en la maquina de desgaste de Perno-Disco.

La figura 3.6 presenta la pieza ensamblada con el sistema de colada que presento los mejores resultados.

## **V.- CONCLUSIONES:**

Se pueden obtener piezas de compuesto, con SiCp como material de refuerzo obteniendo una adecuada distribución del mismo, utilizando las dimensiones del sistema de colada propuesto en este trabajo.

La razón de desgaste del compuesto Al-7Si/15%SiCp es del mismo orden de magnitud que la razón de desgaste del acero del que esta fabricada el aspa del molino mezclador de arena.

En base a lo anterior es viable realizar la sustitución del acero utilizado en la fabricación del Aspa del molino mezclador de arena (Marca Simpson 18 D.A.) por un compuesto del sistema Al-7Si/SiCp con 15% de SiCp en partículas como material de refuerzo y moldeado en arena en verde.

## **SUGERENCIAS:**

Para obtener un patrón más completo del mecanismo de desgaste y una velocidad de desgaste promedio, en el caso de los compósitos estudiados, es necesario realizar un plan de pruebas que incluyan variaciones de la carga aplicada, en las pruebas de desgaste realizadas en la máquina de Perno-Disco, y graficar los datos de razón de desgaste, obtenidos de las gráficas de volumen perdido frente a distancia recorrida, contra las cargas aplicadas.

Se requieren realizar pruebas para modificar el sistema de colada y obtener un rendimiento de metal más adecuado con una distribución similar a la obtenida con el sistema de colada propuesto.

## Bibliografía:

1. J.A.E. Bell, A.E.M. Warner, T.F. Stephenson, E. Siegrist, "SOME AUTOMOTIVE APPLICATIONS FOR CAST GRAPHITIC ALUMINUM NICKEL SILICON CARBIDE MMC", Processing, Properties and Applications of Cast Metal Matrix Composites. Edited by P. K. Rohatgi, The Minerals, Metals and Materials Society, (1996), P. 247-258 y 289-296.
2. R.A. Saravanan, S. Seshan and M.K. Surappa, "DRY SLIDING WEAR BEHAVIOR OF A356-10 VOL % SiCp COMPOSITES DURING CYCLIC LOADING" Recent Advances in Metallurgical Processes Vol. I, Eds. D.H. Sastry, E.S. Dwarakadasa, G.N.K. Iyerengar and S. Subramanian. New age International Publishers, New Delhi, (1997), P. 585-589.
3. B.N.Pramila Bai, R.A. Saravanan and M.K. Surappa, "TRIBOLOGICAL STUDIES ON ALUMINUM MATRIX COMPOSITES", Inorganic Matrix Composites, Edited by M.K. Surappa, The Minerals, Metals and Materials Society, (1996), P. 171-187
4. Gerald S. Cole, "APPLICATION OF CAST METAL MATRIX COMPOSITES IN AUTOMOTIVE COMPONENTS", Second International Conference on Tuscaloosa, Alabama, (1993), P. 9-19.

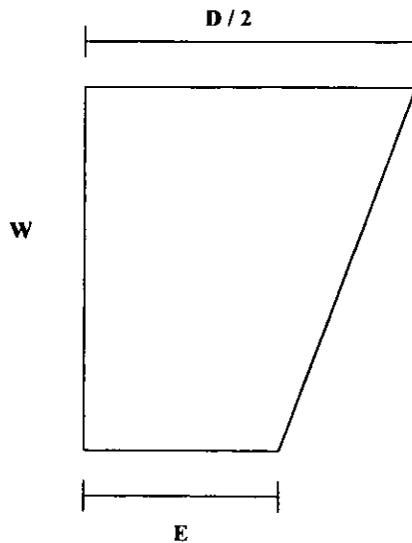
5. M.A. Taha, N.A. EL-Mahallawy, M.Abdel Hamid, H.A. Hanna, "WEAR BEHAVIOR OF SQUEEZE CAST Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PARTICULATE MMC", Second International Conference on Tuscaloosa Alabama, (1993), P.335-345.
6. AFS, Course N° 7-250, Gating and Riserling (1989).
7. P.K. Rohatgi, Y. Liu, and S. Ray, "FRICTION AND WEAR OF METAL MATRIX COMPOSITES", ASM Handbook Vol. 18, (1992), P. 801-811.
8. Pradeep Rohatgi, "CAST METAL MATRIX COMPOSITES", ASM Handbook, Vol. 15, (1992), P. 840-854
9. J.C. Clegg, "METAL MATRIX COMPOSITES", The foundryman, (1991).
10. Metals Handbook POWDER METALURGY Vol. 7, ASM. (1984).
11. A. D. Sarkar B. Sc. DESGASTE DE METALES. Editorial LIMUSA 1990, P. 77-92.
12. J.R. Méndez B. COMPARACION DE LA RESPUESTA AL TRATAMIENTO TERMICO DE ENVEJECIMIENTO ENTRE UNA ALEACION A356 Y UN COMPOSITO Al-Si-Mg-10% SiCp. Tesis 1995 México D.F.

# **APENDICE:A**

## APENDICE: A

### RELACIONES DE LAS ALETAS DE LA PROPELA DE ACERO

La propela consta de 3 aletas unidas al vastago en un ángulo de  $120^\circ$  entre cada una con las siguientes relaciones entre sus lados.



$$E = 0.8 D$$

W = altura de la aleta

D = Diámetro de la propela

# **APENDICE:B**

## APENDICE: B

### SISTEMA DE COLADA

Las consideraciones para el diseño de sistemas de colada y sistema de alimentación de aleaciones de aluminio son:

Para piezas delgadas no se necesitan alimentadores.

El aluminio y sus aleaciones son sensibles a la oxidación por lo tanto un sistema de colada no presurizado es la mejor opción.

Se utiliza el método propuesto por la AFS para las aleaciones convencionales y posteriormente estos resultados se modifican para obtener las dimensiones del sistema de colada para los compósitos fabricados.

Cálculos:

- Sistema de colada normal para aleaciones de aluminio.  
(Gating and Riserling Worrksheet)
- Sistema de colada modificado para compósitos. ( P.K. Rohatgi 1996)
- Sistema de colada, propuesto (Híbrido)

#### **Diseño por AFS (Aleaciones Monolíticas)**

Se partio de los siguientes datos

Espesor crítico 8 mm

Peso de la pieza 200 g

Peso del sistema de colada 25% del peso de la pieza

Peso total 250g

Cálculo del flujo másico

En primer lugar se considera el espesor crítico de la pieza (sección más delgada) en este caso es de 8 mm, con la tabla 1.5 se tiene un flujo másico determinado por la siguiente expresión.

$$R = 1.25(W)^{1/2} \text{ (a)}$$

Donde:  $R$  = Flujo másico (lb/s)

$W$  = Peso de la pieza más peso del sistema de colada, (En libras)

$$W = 250\text{g} (1 \text{ lb}/454 \text{ g}) = 0.55 \text{ lb} \quad \text{Así } R = 1.25(0.55)^{1/2} = 0.927 \text{ lb/s}$$

$$\text{Por tanto } R = 0.927 \text{ lb/s} (454 \text{ g/lb}) = 421 \text{ g/s}$$

Cálculo del área de la base de la bajada:

$$A_s = R/\rho C_D(2gH)^{1/2} \text{ (b)}$$

Donde:  $R$  = Flujo másico, conocido

$\rho$  = Densidad del aluminio  $2.7 \text{ g/cm}^3$

$g$  = Aceleración de la gravedad  $9.8 \text{ m/s}^2$

$H$  = altura crítica del molde  $9.9 \text{ cm}$

$C_D$  = coeficiente de descarga para este sistema  $0.8$

Para la altura crítica según la figura 1.1 se tiene:

$$H = h - p^2/2C \quad H = 10\text{cm} - (0.4^2)/2(0.8) \quad H = 9.9 \text{ cm}$$

Entonces sustituyendo en (b) resulta que.

$$A_s = 1.4 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto para bajada cónica, el diámetro de la sección circular inferior es  $1.35 \text{ cm}$ .

Para el diámetro superior de la bajada

$$D_{s_b} = (H/H_1)^{1/4} (D_{i_b}) = (10/2)^{1/4} (1.35 \text{ cm}) = \underline{1.95 \text{ cm}}$$

Donde:  $H$  = altura total del cope

$H_1$  = altura del tazón de colada

Utilizando la siguiente relación de colada  $1 : 2 : 3$  se tiene:

### Área de corredores

$A_c$  = dos veces el área inferior de la bajada

$$2(1.4) = \underline{2.8 \text{ cm}^2}$$

2 corredores

Corredor izquierdo para un solo ataque por tanto  $1/3(2.8 \text{ cm}^2) = \underline{0.93 \text{ cm}^2}$

Corredor de sección cuadrada de 0.96 cm por lado

Corredor derecho para dos ataques por tanto  $2/3(2.8 \text{ cm}^2) = \underline{1.86 \text{ cm}^2}$

Corredor de sección cuadrada de 1.36 cm por lado con una sección reducida antes del segundo ataque.

Área del corredor reducida ( $A_{CR}$ ).

$$A_{CR} = 1.1(A_C - A_G)$$

$$A_{CR} = 1.1(1.86 - 1.4) = \underline{0.5 \text{ cm}^2}$$

Área de ataques:

$$A_G = \text{Tres veces el área inferior de la bajada} = 3(1.4) = \underline{4.2 \text{ cm}^2}$$

$$A_G = 3(1.4) = \underline{4.2 \text{ cm}^2}$$

Los ataques son de la forma  $t = 3X$

$$A_G = X(t) = X(3X) = 3X^2 \text{ de donde } X = (A_G/3)^{1/2} = (1.4/3)^{1/2} = \underline{0.70 \text{ cm}}$$

Ahora para ( $t$ ) se tiene que  $t = 3X = \underline{2.0 \text{ cm}}$

### Sistema de colada modificado para compósitos

Considerando las sugerencias de P.K. Rohatgi expresadas en el capítulo primero (pagina 30 y 31), el diseño del sistema de colada es el siguiente:

Peso de la pieza 200 g

Peso del sistema de colada 300 g

Peso total 500 g

Calculo del flujo másico

Con el mismo procedimiento se utilizo la tabla 1.5 y con el espesor de la pieza se tiene:

$$R = 1.25(W)^{1/2}$$

Donde  $R = \text{Flujo másico (lb/s)}$

W = Peso de la pieza mas peso del sistema de colada en libras

$$W = 500 \text{ g} \quad 500 \text{ g} (1 \text{ lb}/454 \text{ g}) = 1.1 \text{ lb} \quad \text{Así } R = 1.25(1.1)^{1/2} = 1.3 \text{ lb/s}$$

Por tanto  $R = 1.3 \text{ lb/s} (454 \text{ g/lb}) = 595 \text{ g/s}$

Cálculo del área de la base de la bajada:

$$A_s = R/\rho C_D (2gH)^{1/2}$$

$$A_s = 595/2.74(0.8(2(980(9.9))))^{1/2}$$

Entonces  $A_s = 1.90 \text{ cm}^2$

Para este caso el paso controlante es la restricción y con el área calculada las dimensiones para una bajada cónica de sección cuadrada serian de 1.4 cm por lado.

Entonces el área inferior de la bajada corresponde al área de la restricción (A restric.).

Así, la forma de la restricción sugerida en este método, es cuadrada con 1.35cm por lado

Y considerando la siguiente relación de colada  $1.13 : 1 : 1.5 : 2.5$  se obtienen las nuevas dimensiones para el área de la base de la bajada ( $A_s$ ).

$$A_{\text{restric.}}(\text{relación}) = A_s \quad 1.90(1.13) = 2.1 \text{ cm}^2$$

Por tanto las dimensiones de la base de la bajada son las de un cuadrado de 1.45 cm por lado.

Considerando la longitud característica y utilizando por analogía con la ecuación para el diámetro superior de la bajada se tiene:

$$D_{s_b} = (H/H_1)^{1/4} (D_{i_b}) = (10/2)^{1/4} (1.45 \text{ cm}) = \underline{2.1 \text{ cm}}$$

Donde: H = altura total del cope

$H_1$  = altura del tazón de colada

Entonces las dimensiones de la parte superior de la bajada son las de un cuadrado de 2.1 cm por lado.

Para el corredor se tiene:

$$A_{\text{restric. (relación)}} = A_R \quad 1.90(1.5) = 2.85 \text{ cm}^2$$

Por tanto para un corredor cuadrado se tiene 1.7 cm por lado.

Para los ataques se tiene:

$$A_{\text{restric. (relación)}} = A_G \quad 1.90(2.5) = 4.75 \text{ cm}^2$$

Y para 3 ataques se tiene  $4.75/3 = 1.58 \text{ cm}^2$  para cada ataque.

Y las dimensiones para los ataques son de 0.8 cm de espesor por 2 cm de ancho.

### Sistema de colada propuesto

Debido a que el sistema de colada propuesto por Rohatgi no permitió la adecuada distribución de las partículas reforzantes se propuso el siguiente sistema de colada, considerando los siguientes datos:

Peso de la pieza 200 g

Peso del sistema de colada 200 g

Peso total 400 g

Calculo del flujo másico

Con el mismo procedimiento se utilizo la tabla 1.5 y con el espesor de la pieza se tiene:

$$R = 1.25(W)^{1/2}$$

Donde  $R =$  Flujo másico (lb/s)

$W =$  Peso de la pieza mas peso del sistema de colada en libras

$$W = 400 \text{ g} \quad 400 \text{ g} (1 \text{ lb}/454 \text{ g}) = \underline{0.88 \text{ lb}} \quad \text{Así } R = 1.25(0.88)^{1/2} = 1.17 \text{ lb/s}$$

$$\text{Por tanto } R = 1.17 \text{ lb/s} (454 \text{ g/lb}) = 532 \text{ g/s}$$

Cálculo del área de la base de la bajada:

$$A_s = R/\rho C_D(2gH)^{1/2}$$

$$A_s = 532/2.74(0.8(2(980(9.9))))^{1/2}$$

Entonces  $A_s = 1.74 \text{ cm}^2$

Para bajada cónica de sección circular las dimensiones del diámetro son de 1.48 cm.

Y para el diámetro superior de la bajada se tiene:

$$D_{S_b} = (H/H_1)^{1/4}(D_{i_b}) = (10/2)^{1/4} (1.48\text{cm}) = \underline{2.92 \text{ cm}}$$

Donde: H = altura total del cope

$H_1$  = altura del tazón de colada

Considerando la siguiente relación de colada **1 : 3 : 2**

Entonces para el corredor se tiene:

$$\text{Área de la bajada (relación)} = A_R \quad 1.74(3) = \underline{5.22 \text{ cm}^2}$$

$$5.22 \text{ cm}^2/2 \text{ corredores} = \underline{2.6 \text{ cm}^2} \text{ por corredor}$$

Por tanto para corredores de forma rectangular se tienen las siguientes dimensiones: 1.7 cm por 1.5 cm.

Para los ataques se tiene:

$$\text{Area de la bajada (relación)} = A_G \quad 1.74(2) = 3.48 \text{ cm}^2$$

$$\text{Y para 3 ataques se tiene} \quad 3.48/3 = 1.0 \text{ cm}^2 \quad \text{para cada ataque.}$$

En este caso los ataques son de forma cilíndrica con un diámetro de 1.3 cm.

En la tabla B.1 se presenta un resumen de las dimensiones, incluyendo las del sistema teórico (método AFS) para el caso de una aleación sin refuerzo y de los sistemas probados para el caso de los compósitos fabricados.

Dimensiones de los sistemas de colada

	AFS Teórico (Aleaciones monolíticas)	Propuesto por Rohatgi (Compósitos)	Híbrido Experimental (Propuesto)
Dimensiones de la bajada	Cónica Diámetro inferior 1.4 cm Diámetro superior 1.9 cm	Cuadrada Inferior 1.45 cm Superior 2.1 cm	Bajada circular Diámetro inferior 1.48 cm Diámetro superior 2.2 cm
Restricción	No considera	1.37 cm por lado	No considera
Corredores	2 Corredores cuadrados Izquierdo 0.96 cm por lado y Derecho 1.36 cm por lado con una reducción de canal	1 Corredor en forma rectangular Sin reducción de canal 1.7 cm por lado	2 Corredores en forma rectangular Sin reducción de canal 1.7 X 1.5 cm
Ataques ó entradas	3 Ataques rectangulares de 0.7 X 2 cm	3 Ataques rectangulares de 0.8 X 2 cm	3 Ataques cilíndricos con diámetro de 1.3 cm
Relación de colada	1 : 2 : 3	1.13 : 1 : 1.5 : 2.5	1 : 3 : 2
Rendimiento de metal (%)	80	40	50
Observaciones	Sistema teórico para aleaciones de aluminio sin aditamentos.	Sistema propuesto por Rohatgi. Incluye una restricción antes de la cual el sistema es presurizado. El sistema no permitió la distribución de las partículas reforzantes	Diseño utilizado y que proporciono una adecuada distribución de las partículas de material reforzante.

Tabla B.1 Resumen de las dimensiones de los sistemas de colada

# **APENDICE:C**

## APENDICE C

### FABRICACIÓN DEL MOLDE

Se utilizó una placa modelo para la fabricación del molde de arena en verde, el molde se preparó con arena de careo, con la siguiente mezcla:

6% Bentonita cálcica

6% Bentonita sódica

4.5% de humedad

Arena Silica número AFS 160-165

Se preparo la misma mezcla para los dos tipos de sistemas de colada, probados.

Se utilizo la misma mezcla para las piezas de esta tesis.

# **APENDICE:D**

## APENDICE D

### RAZON DE DESGASTE

Para calcular la razón de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento se calcula la pendiente de la curva de desgaste, que involucra volumen perdido frente a distancia recorrida en la segunda parte de la curva o régimen estacionario, las curvas aparecen en el capítulo III de Resultados, gráficas 3.1, 3.2 y 3.3.

Para el cálculo de la pendiente se aplica la operación de regresión lineal.

Para el caso del compuesto Al-7Si/15%Vol. SiCp con una carga de 6.535 kg se tiene:

Volumen perdido $1 \times 10^{-3} \text{ (cm}^3\text{)}$	Distancia Recorrida (m)	Valor de la Pendiente
2.17	584.3	3,4413E-06 $\text{cm}^3/\text{m}$
4.87	1168.6	
6.05	1753.0	
8.52	2349.3	

Para el caso del compuesto Al-7Si/20%Vol. SiCp con una carga de 6.535 kg se tiene:

Volumen perdido $1 \times 10^{-3} \text{ (cm}^3\text{)}$	Distancia Recorrida (m)	Valor de la Pendiente
2.08	593.1	5,45066E-06 $\text{cm}^3/\text{m}$
6.93	1177.4	
9.23	1761.7	
11.93	2346.1	

Para el caso del acero de la pieza original con una carga de 6.535 kg se tiene:

Volumen perdido $1 \times 10^{-3} \text{ (cm}^3\text{)}$	Distancia Recorrida (m)	Valor de la Pendiente
0.87	584.33	3,16087E-06 $\text{cm}^3/\text{m}$
2.52	1168.67	
4.28	1753.00	
6.44	2337.33	

El valor de la pendiente es la razón de desgaste y en forma comparativa se tiene:

Material	Razón de Desgaste ( $\text{cm}^3/\text{m}$ )
Compósito 20% SiCp	$5.45 \times 10^{-6}$
Compósito 15% SiCp	$3.44 \times 10^{-6}$
Acero de la pieza original	$3.16 \times 10^{-6}$

Los valores obtenidos para la razón de desgaste solo son validos para las condiciones de la prueba efectuada.

Para el caso de la prueba de desgaste en situ se aplica la operación de regresión lineal a las gráficas obtenidas, gráficas 3.5 y 3.6. con los datos siguientes:

Para el caso de la pieza fabricada con compuesto Al-7Si/15%Vol. SiCp

Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Distancia Recorrida (m)	Valor de la Pendiente
0.05239	5089.38	7,72033 X 10 <sup>-6</sup> cm <sup>3</sup> /m
0.07638	10178.76	
0.1103	15777.07	
0.1468	21545.04	

Para el caso de la pieza fabricada con compuesto Al-7Si/20%Vol. SiCp

Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Distancia Recorrida (m)	Valor de la Pendiente
0.0850	6785.8	1,08953 X 10 <sup>-5</sup> cm <sup>3</sup> /m
0.2492	13571.6	
0.3167	20357.5	
0.3912	29179.1	
0.4386	37378.6	

El valor de la pendiente es la razón de desgaste y en forma comparativa se tiene:

Material de la pieza	Razón de Desgaste (cm <sup>3</sup> /m)
Compósito 20% SiCp	1,08953 X 10 <sup>-5</sup>
Compósito 15% SiCp	7,72033 X 10 <sup>-6</sup>