



11
2ej.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA
ESTUDIO DEL ASENTAMIENTO DE LAS PARTICULAS
DE REFUERZO DURANTE LA REFUSION
DE UN COMPOSITO A356. SiCp

TRABAJO MONOGRAFICO DE
ACTUALIZACION
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A
CHRISTIAN MARTINEZ GALINDO



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente:	Prof. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco
Vocal:	Prof. Guillermo Fausto Salas Banuet
Secretario:	Profra. Teresita Robert Nuñez
1er. Suplente:	José Alejandro García Hinojosa
2o. Suplente:	Carlos González Rivera

Sitio donde se desarrolló el tema: Edificio "D", Facultad de Química, UNAM
Ciudad Universitaria, México, D.F.



Prof. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

Asesor



Christian Martínez Galindo

Sustentante



Con cariño para mis padres, Mateo y Genoveva, por todos estos años
de amor, comprensión, paciencia y esfuerzo.

A mis hermanos; Eliseo, Blanca, Lourdes, Lucía, Dolores, Vicente,
Xóchitl, Miguel y César, por su amistad y apoyo.

A mi creciente constelación de sobrinos: Ana, Carlos, Liliana,
Brenda, Marcos, Silvia, Issac, Mauricio, Eugenia, Raísa y Luisito,
por su alegría y fe en la vida.

A mi adorada esposa, Itamar, por su amor y apoyo incondicional.



“Si no fuéramos algo mas que seres unicos, seria fácil hacernos desaparecer del mundo”

Hermann Hesse.

A la memoria de mi hermano Rafael M.

Agradezco a mis amigos de la infancia, pubertad y adolescencia por su ayuda e indiferencia, ambas fueron forjadoras de mi caracter.

Y a toda la “banda”; Andrés y sus hermanos, Miguel y sus sobrinos, Arturo, Juan Carlos, Victor, Israel, José, Rogelio, Sergio, David, Antonio, Eduardo, Cristina, Blanca, Verónica, Laura, Arlette, Patricia, Angeles.... y un montón mas de amigos y conocidos que enriquecieron mi persona con sus buenos y malos consejos y su cotidiano ser.



Por supuesto, a la UNAM por ser la mejor.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. PANORAMA GENERAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	4
2.1 EVOLUCION DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	4
2.2 DESARROLLO DE LOS COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA.....	8
2.3 TENDENCIAS ACTUALES EN LA FABRICACIÓN DE COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA.....	11
2.4 RESUMEN.....	20
3. EL COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA A356/SICP.....	22
3.1 SUROIMIENTO DEL CMM A356/SICP.....	22
3.2 PROPIEDADES Y SU RELACIÓN CON LA DISTRIBUCIÓN DEL REFORZANTE.....	23
3.3 RESUMEN.....	34
4. SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE.....	35
4.1 EL FENOMENO DE SEDIMENTACIÓN.....	35
4.2 ASPECTOS TERMODINÁMICOS DE LA SEDIMENTACIÓN.....	36
4.3 CONDICIÓN METALOSTÁTICA.....	40
4.3.1 Variables críticas de asentamiento.....	41
4.3.2 Asentamiento y solidificación.....	44
4.4 CONDICIÓN METALODINÁMICA.....	49
4.5 ELABORACION Y PROCESAMIENTO.....	50
4.6 RESUMEN.....	56
5. DISCUSIÓN.....	58
6. CONCLUSIONES.....	62
7. BIBLIOGRAFÍA.....	65
8. ANEXOS.....	68
8.1 PROCEDIMIENTOS DE FABRICACIÓN PARA PRODUCTOS PLÁSTICOS REFORZADOS. ²¹	68
8.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SIC ²²	72
8.2.1 Características de algunos polítipos comunes de α -SiC.....	72
8.2.2 Tipos industriales de α -carborundum.....	73
8.2.3 Propiedades Físicas y Térmicas.....	74
8.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ALEACIÓN A356.....	75

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo primordial del presente trabajo es el de proporcionar información que ayude al entendimiento del fenómeno de asentamiento de las partículas de refuerzo durante la elaboración y procesamiento de la aleación reforzada o compuesto A356/SiCp. Obviamente el entendimiento de este fenómeno resulta de utilidad en el control y optimización de los procesos mencionados, lo cual se traduce en desarrollo tecnológico e incremento de la productividad.

En el contexto de este escrito se entiende por asentamiento la distribución preferencial de las partículas de refuerzo debido a la acción de la gravedad y cuya fuerza motriz es la diferencia de densidades entre la partícula y el metal líquido.

En si, el problema de asentamiento es competencia de la fluidinámica y existe actualmente un entendimiento avanzado del tema para el cual se han desarrollado diversas ecuaciones que explican el fenómeno y cuya complejidad varía desde lo fenomenológico o empírico hasta lo mecanístico. De esta manera, se trata de un problema, al parecer, bastante estudiado y sin mayores dificultades que la de escoger y adaptar una ecuación de entre las existentes para tal caso, sin embargo, son las características especiales del sistema y la competencia entre mecanismos durante la solidificación (ruta de elaboración y procesamiento de este compuesto) lo que hace importante el estudio de los fenómenos que intervienen en el asentamiento bajo estas condiciones.

Todas las ecuaciones que pretenden describir un fenómeno se basan en las propiedades del sistema en cuestión y estas dependen de variables externas que son controlables en cierta medida. Así pues, el enfoque que tiene esta monografía es el de establecer un puente entre las variables que se manejan en la elaboración de los compósitos A356/SiCp y su influencia en las propiedades del sistema en estado líquido y por lo tanto en la sedimentación del reforzante.

Cabe señalar que no solo se considera el sistema para el fenómeno de asentamiento sino que se trata de acoplar los posibles fenómenos existentes durante la solidificación del material compuesto como son atrapamiento y rechazo de las partículas por parte del frente de solidificación, cambios en composición química que alteren la humectabilidad de las partículas de refuerzo, distribución de temperatura en el sistema, comportamiento viscoso, etc.

Finalmente se ha tenido la necesidad de escoger una ecuación que describiera suficientemente el sistema, haciendo las consideraciones pertinentes, y es por eso que se hace referencia a la ecuación de Stokes de asentamiento obstaculizado y la influencia que sobre esta tienen las variables del sistema. No obstante el lector puede sacar provecho del material expuesto independientemente del vínculo con esta ecuación ya que se menciona el efecto de las variables sobre las propiedades del sistema en general y es fácil extrapolar a cualquier otro tipo de descripción matemática mecanística, empírica o semi-empírica.

2. PANORAMA GENERAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

2.1 *Evolución de los materiales compuestos.*

Un material compuesto puede definirse como la combinación de dos o mas materiales, a nivel macroscópico, que posee características diferentes a los de los materiales que lo forman.^{6,18}

La idea principal es sencilla; se tiene un material duro y rígido y se introduce en una matriz de un material tenaz, el resultado es un material con menor tenacidad que aquel del cual está hecha la matriz pero con mayor rigidez y resistencia, es decir, un material con propiedades híbridas.¹⁸

Al decir que la combinación de materiales que da origen a un material compuesto ocurre a nivel macroscópico se hace referencia a que existe una frontera reconocible por medios ópticos entre los materiales que lo conforman⁶.

Aún no se ha discutido a profundidad el nivel que comprende la definición de la combinación como macroscópica, pero el avance de la tecnología hace posible obtener combinaciones de materiales con tamaños individuales cada vez menores y con el tiempo puede ser necesario revisar y actualizar esta definición.

Para reforzar el argumento anterior basta con observar la experiencia humana en cuanto a materiales: el hombre ha sabido explotar los recursos naturales en su beneficio y ha obtenido materiales de construcción de entre los cuales destacan por su desempeño la madera y el acero. Estos dos materiales fueron grandes aliados en el desarrollo de la humanidad, ambos son ampliamente apreciados hasta nuestros días y ambos son ejemplos de materiales compuestos.⁶

En la antigüedad se les empleaba por ser excelentes materiales de construcción y manufactura y se les consideraba como un material en si, aun cuando se podían observar en la madera la existencia de "vetas" y se sabía que las propiedades cambiaban con la orientación de la veta. Mas tarde el avance tecnológico permitió observar la estructura del acero y se pudo constatar la existencia de dos componentes entrelazados; la perlita y la ferrita.

Es así como el avance tecnológico da origen a el concepto de material compuesto y se vislumbra la posibilidad de alcanzar toda una serie de propiedades que antes no era posible obtener en un solo material, es decir, se comprende la importancia de este "huevo" tipo de materiales.¹⁹

No se sabe a ciencia cierta cuando nace el concepto o se entienden las implicaciones del mismo, pero no es sino hasta que la técnica ha evolucionado lo suficiente, en cuanto a métodos de manufactura, que comienza el desarrollo e investigación en el campo de materiales compuestos.

En la evolución del concepto de material compuesto se puede observar fácilmente el orden de ideas que condujo al estado actual de los materiales compuestos diseñados por y para la ingeniería. A partir de la observación de los arreglos y estructuras en los materiales de la naturaleza, de su carácter compuesto y de la combinación de estructuras internas de dichos materiales, nace la curiosidad y la experimentación; el siguiente paso es la investigación y el desarrollo.²⁵

De esta manera, no pasa mucho tiempo para que se relacione la combinación de dos materiales con propiedades distintas para obtener un tercero con propiedades híbridas, y comienzan a surgir teorías y modelos para tratar de explicar las propiedades mecánicas en base a la cantidad en que se encuentran presentes cada uno de los componentes.

Sin embargo, ante la imposibilidad de representar las propiedades por medio de estos modelos en muchos sistemas y a partir de la observación de la naturaleza se percatan los investigadores de que no solo la cantidad de los materiales presentes afecta las propiedades de un material compuesto, sino que estas dependen también de la estructura o arreglo que posean los componentes. Este conocimiento es ampliamente difundido entre los investigadores en materiales y encuentra un campo fértil en la metalurgia, sector estratégico en el desarrollo de la sociedad humana, en donde se realiza la investigación profunda de la relación existente entre la microestructura de los metales y sus propiedades mecánicas.

Como resultado de estos esfuerzos se puede mencionar, por ejemplo, las actuales técnicas de modificación de las aleaciones Al-Si y las técnicas de nodularización de los hierros nodulares, ambos procesos tienen por finalidad cambiar las estructuras de las segundas fases presentes en cada una de las aleaciones para modificar las propiedades mecánicas del sólido resultante.

Existen diferentes maneras de combinar los materiales para obtener un material compuesto y dependiendo de la configuración de cada uno de los elementos se obtienen diferentes comportamientos. Las formas mas comunes en la naturaleza son aquellas que aparecen en la figura 1.²³

Al observar los arreglos que ocurren en la naturaleza y estudiar su función en el medio ambiente en que se encuentran, los investigadores se percatan de que las formas o estructuras internas de los componentes de los materiales compuestos los proveen de características propias que los hacen eficientes para cumplir una misión específica.²³

Una vez asimilados estos conocimientos básicos sobre los materiales, estructuras y desempeño de los mismos, es que madura y se desarrolla el concepto actual de los materiales compuestos diseñados para ingeniería y comienza la investigación y desarrollo de estos.

En un principio la investigación es mas intuitiva que dirigida y se comienza a idear sistemas o combinaciones de materiales para todo tipo de aplicaciones, llegando incluso al punto de considerarse que algunos de los sistemas compuestos desarrollados eran soluciones en busca de problemas.

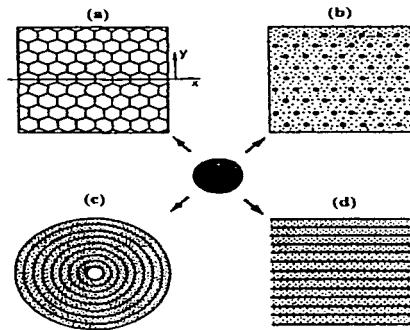


Figura 1. Cuatro tipos de materiales microestructurados que son mecánicamente eficientes: a) celdas prismáticas, b) fibras embebidas en una matriz "espumada", c) cilindros concéntricos con espuma entre ellos, y d) placas paralelas separadas por capas de material "espumoso". [25]

Otro problema que enfrenta el desarrollo de los materiales compuestos es la limitación de la técnica en cuanto a procesos de manufactura; ¿Cómo producir arreglos repetidos de dimensiones pequeñas, filamentos, celdas, hojuelas, etc. de los materiales elegidos como reforzantes y luego introducirlos o acoplarlos al material base o matriz? En los primeros años de investigación los plásticos y resinas combinados con materiales tejidos

parecían ser los sistemas mas aptos para desarrollar los materiales compuestos debido a la facilidad de manufactura que ofrecían.¹¹

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la idea principal de un material compuesto diseñado es la de satisfacer una necesidad mecánica específica con un material de desempeño superior, y las necesidades de la industria se encargaron de promover el avance tecnológico para que surgieran una nueva familia de materiales compuestos; los sistemas metal-cerámico.

La idea de desarrollar materiales compuestos a base de reforzantes cerámicos en matrices de metal surge fácilmente de las necesidades de la industria ya que la tecnología actual demanda un desempeño mayor de sus componentes metálicos; mas resistentes, rígidos, ligeros, etc.³

Para llevar a cabo esta tarea se ensayan una gran cantidad de sistemas metal-cerámico y una variedad de combinaciones o configuraciones físicas. De entre estas últimas parecen tener éxito los reforzantes continuos en forma de fibras largas y orientadas y aquellos en forma de partículas equiaxiales.³

2.2 Desarrollo de los Compósitos de Matriz Metálica

Una de las primeras industrias impulsoras del desarrollo de los Compósitos de Matriz Metálica es la industria aeronáutica y aeroespacial, la cual desde sus inicios se encontró con la necesidad de emplear materiales de alta eficiencia debido a la naturaleza critica de su desempeño. Al mismo tiempo se observa la necesidad de aligerar las aeronaves, satélites, sondas, etc. para obtener un menor consumo de energía. El reto que se plantea es el de mejorar el desempeño total de los materiales empleados en la manufactura de los aparatos, es decir, el desarrollo de materiales compuestos diseñados para la ingeniería.^{3,19,11,30}

Es fácil imaginar que las condiciones extremas encontradas en el espacio plantearon de inmediato la necesidad de una ingeniería avanzada tanto en el diseño de las aeronaves y sus aparatos como de los materiales que se emplean en la fabricación de los mismos.¹⁹

La primera y mas evidente de las demandas que se tuvieron sobre los materiales fue la de disminuir su densidad sin comprometer su resistencia y desempeño. Las aleaciones ligeras no poseían las características deseadas y de inmediato surgió la idea de reforzarlas con componentes cerámicos, de esta manera no tardaron en desarrollarse Compósitos de Matriz Metálica con matrices a base de aleaciones de aluminio, magnesio, titanio, etc. El camino hacia sistemas metal-cerámico a emplear estuvo determinado por las aplicaciones específicas.

Tomemos el caso de los compósitos Al (o Mg)/Grafito los cuales tomaron importancia debido a que presentan una expansión térmica insignificante; los investigadores aplicaron esta propiedad para lograr estructuras térmicamente estables para las naves espaciales ya que los gradientes térmicos en el espacio pueden ocasionar campos de esfuerzos, por dilatación de las estructuras, suficientemente altos como para deformar plásticamente a sus componentes.³

Otra aplicación de los compósitos de matriz de Al reforzados con fibras de grafito es la de radiadores térmicos para las naves espaciales. Las fibras de grafito poseen una alta conductividad térmica y el compuesto de Al/Grafito posee una mayor conductividad térmica que el cobre y posee también una mayor rigidez y menor densidad, estas propiedades los hacen aptos para su empleo en los mencionados radiadores.³

El costo de este tipo de compósitos es extremadamente alto: \$ 1,500 a 4,000 U.S./kg. y su desarrollo solo fue posible por los elevados presupuestos asignados por los gobiernos de los países desarrollados a la industria espacial.³

Uno de los alicientes para realizar enormes inversiones en la industria espacial es el beneficio que aporta a otras industrias la investigación realizada. Un ejemplo de esto se encuentra en la industria aeronáutica, en donde son fácilmente escalables los avances en cuestión de aligeramiento de peso. Esta industria se encarga de desarrollar un nuevo tipo de Compósitos de Matriz Metálica.

Las características que llamaron la atención de la industria aeronáutica hacia este tipo de compósitos fueron las mismas que motivaron el desarrollo de los compósitos reforzados con fibras: la estabilidad térmica de las estructuras y la mayor relación propiedad/densidad, sin embargo, al encontrar que el sistema Al/SiCp posee características casi isotrópicas y propiedades como rigidez, resistencia al desgaste, etc. superiores a aquellas de la aleación madre, se motiva la investigación y desarrollo en otras aplicaciones.

De esta manera pronto se obtienen aplicaciones en la industria automotriz tales como el pistón elaborado por la compañía Toyota® en 1980, hecho de un compósito Al/Al₂O₃. Se escogió este compósito debido a las propiedades mecánicas a alta temperatura que posee.³

Los compósitos Al/SiCp hallaron aplicación en bielas y pistones para motores de competencia y alto desempeño en general. Esto es gracias a sus propiedades mecánicas a altas temperaturas y a su baja expansión térmica; esto último se aprovechó para reducir las tolerancias dimensionales del motor y lograr un ajuste casi perfecto.³

Además de las propiedades antes mencionadas, el aumento en la rigidez, conductividad térmica, y resistencia al desgaste propiciaron el uso de este compósito en diversos componentes de motores en general.

2.3 Tendencias actuales en la fabricación de Compósitos de Matriz Metálica.

Como se mencionó anteriormente, la investigación y desarrollo de los Compósitos de Matriz Metálica comenzó en la industria aerospacial, en donde gracias a los grandes presupuestos del primer mundo se lograron aplicaciones exitosas. Posteriormente la industria del transporte tomó las investigaciones y las aprovechó en su beneficio. A partir de entonces, los materiales compuestos pasan a ser un tema importante en el desarrollo tecnológico y la investigación en el campo de Compósitos de Matriz Metálica se incrementa a ritmo acelerado.^{23,19}

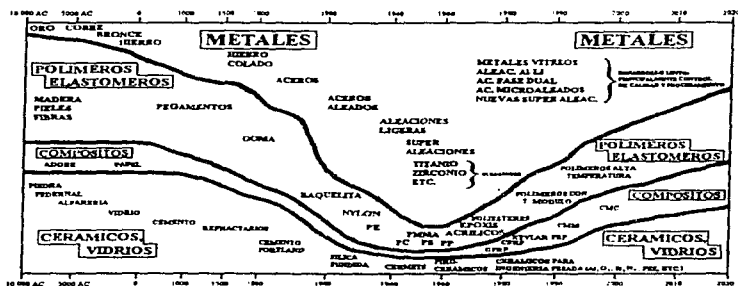


Figura 2. Evolución de los materiales de ingeniería. [27]

Surgen una gran cantidad de usos potenciales para los materiales compuestos, no solo aquellos de matriz metálica sino también se ensaya con cerámicos y plásticos como matriz. En general los materiales compuestos sufren un repunte como materiales de ingeniería y sugieren un reacomodo de las prioridades de investigación que hasta el

momento encabezaban los metales con las superaleaciones. Esta idea se puede expresar gráficamente mediante un esquema como el de la figura 2:²⁷

En la figura No. 2 podemos apreciar una proyección de la importancia relativa de estos materiales en el inicio del siguiente siglo, en la que se nota como ganan terreno frente a las superaleaciones, cerámicos y polímeros al ensancharse la banda correspondiente.

Tan solo en el campo de la metalurgia el impacto causado por el desarrollo de los Compósitos de Matriz Metálica ha motivado a las universidades a reconsiderar sus planes de estudio y ofrecer carreras de ingeniería en materiales como alternativa a la Ingeniería Metalúrgica.

Es notable el aumento en las aplicaciones de los materiales compuestos en las industrias que antaño dominaban los metales tales como la eléctrica, automotriz, materiales estructurales, etc. Por ejemplo, el desarrollo de sistemas de transporte eléctricos masivos crean la necesidad de conductores de alta resistencia mecánica y alta conductividad, la respuesta son compósitos de plata o cobre con distintos cerámicos.¹¹

Como se mencionó anteriormente, la industria aeroespacial se encargó de financiar la investigación y desarrollo en el área de Compósitos de Matriz Metálica, sin embargo los compuestos desarrollados respondían a las demandas tanto mecánicas como de mercado de dicha industria. Es decir, debido a la baja sensibilidad de esta industria en cuanto a velocidad y costos de producción se logró desarrollar cierto tipo de materiales con propiedades muy específicas como son alta estabilidad térmica, rigidez, alta relación conductividad/densidad, etc., pero cuyos costos serían limitantes en cualquier otra empresa.

El caso de la industria de la transportación es el extremo opuesto: se requieren de elevadas velocidades y bajos costos de producción y las demandas mecánicas de los componentes son un poco distintas a aquellas de la industria aeroespacial. Como consecuencia la industria del transporte pone sus ojos en otro tipo de materiales compuestos

(los CMM procesables por solidificación) que puedan satisfacer sus necesidades globales y se encarga de su investigación y desarrollo.¹¹

Las ideas expuestas en el párrafo anterior tratan de explicar la situación actual de la investigación y desarrollo en el área de Compósitos de Matriz Metálica, aportando evidencia de que aquello que comenzó como una solución en busca de problemas es ahora un campo de acción con intereses múltiples cada vez mejor definidos que influyen su desarrollo.

Cabe destacar que cada día es mayor el número de industrias que incursionan en el campo de los materiales compuestos en busca de soluciones para las demandas de la tecnología actual en su campo ya que la ecología y la elevada competencia del mercado globalizado exigen de la tecnología un mayor compromiso para con la productividad. Por lo tanto existen nuevas demandas de manufactura para los materiales compuestos y en especial para los Compósitos de Matriz Metálica.

La industria mecánica, por ejemplo, se encuentra en una posición intermedia en cuanto a costo y velocidad de producción, comparándola con la industria aeroespacial y la de transporte, y sus necesidades mecánicas se basan en la optimización de ciclos, manejabilidad y ahorro de energía, algunas de las necesidades específicas que se derivan son:¹¹

- Técnicas de manufactura para formas complejas.
- Propiedades tribológicas mejoradas.
- Mayor compatibilidad con otros materiales.
- Mejor desempeño termomecánico.
- Menores costos de producción y materiales.

Es posible construir una matriz tridimensional en donde se sitúan las tendencias actuales de fabricación, de esta manera es posible ubicar las tendencias actuales de desarrollo para los materiales compuestos. Esta idea se expresa gráficamente en la figura No. 3.

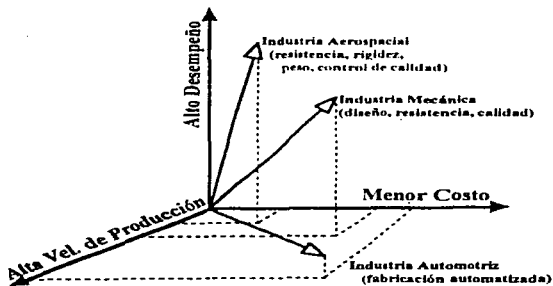


Figura 3. Metas para el desarrollo de Materiales Compuestos en diferentes industrias.[11]

Es posible organizar la experiencia acumulada en este campo hasta el momento para generar criterios para la selección de un método de manufactura tecnológicamente factible que proporcione un material útil con posibilidades en el mercado actual.

Estos criterios de selección se basan en propiedades no solo de los materiales que se desean obtener sino de los procesos mismos. A continuación se presenta una breve discusión de estos criterios.

- **Procesabilidad.**

La elección de los materiales base (matriz y reforzante) y de la forma del reforzante, ya sea preforma, fibra o partícula, depende no solo de las propiedades finales del material que se desea producir sino de la facilidad e incluso posibilidad técnica para su fabricación.

Se puede ubicar las diferentes tecnologías o técnicas de manufactura en un gráfico como el de la figura No. 4 con el fin de facilitar su comparación.¹¹

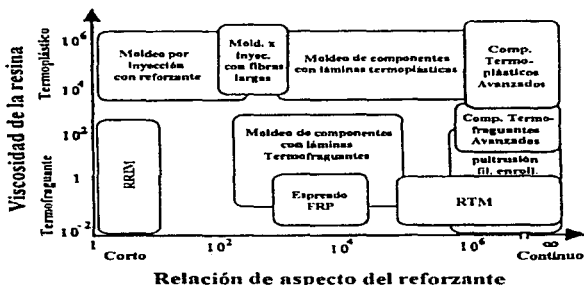


Figura 4. Mapa de técnicas de procesamiento de compósitos con respecto a las características de los materiales que se emplean. [11]

La relación de aspecto se refiere a la razón de dimensiones características (longitud/espesor, por ejemplo) de las fibras, hojuelas o partículas empleadas como reforzante. conforme esta relación de aspecto se aproxima a la unidad se obtiene reforzantes equiaxiales.

Aunque el gráfico se refiere a la viscosidad de la resina empleada en la fabricación de compósitos de matriz plástica, se aplica lo mismo a las matrices metálicas en donde los índices de fluidez y los rangos de solidificación dan una idea de la facilidad de procesamiento del sistema.

- *Control sobre la orientación y distribución del reforzante.*

Debido a la dependencia que tienen las propiedades mecánicas de la distribución del reforzante en la matriz de los materiales compuestos, resulta obvia la importancia que tiene el poseer un método de manufactura capaz de proporcionar control sobre esta variable. Por ejemplo, es mas fácil procesar los materiales compuestos con reforzante en forma de fibras cortas o partículas que aquellos con reforzante en forma de fibras o preformas, pero el control de su distribución final puede ser realmente complicado ya que se combinan toda una serie de factores macro y microscópicos.¹¹

En la figura No. 5 podemos encontrar una representación gráfica del grado de control sobre la orientación del reforzante que poseen diversas técnicas o tecnologías de fabricación.

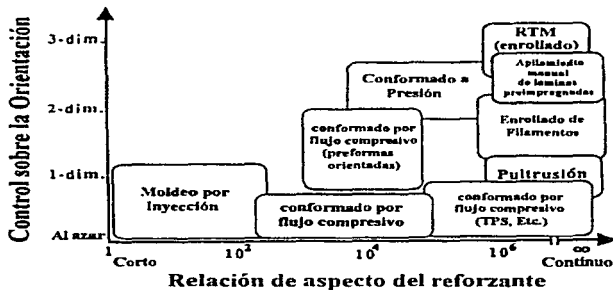


Figura 5. Mapa de técnicas de procesamiento de compósitos con respecto a su potencial para controlar la orientación del reforzante. [11]

- *Economía del proceso.*

Para la selección de un proceso se deben tener en cuenta las demandas del mercado y la economía del mismo. Así para un mercado con baja demanda de las piezas de materiales compuestos se pueden emplear métodos o tecnologías 'baratas' con relaciones de producción bajas y ciclos largos.¹¹

En cambio, cuando el mercado demanda una producción masiva se necesita emplear procesos con ciclos de producción cortos y por lo tanto tasas de producción elevadas, obviamente esta tecnología resulta mas cara. La elección final depende de las demandas económicas y de mercado específicas de cada pieza.¹¹

Para visualizar este concepto se puede crear un gráfico como el de la figura No. 6, en el cual se aprecia la complejidad de la pieza contra volumen de producción, en donde se ubican los diferentes procesos de manufactura.

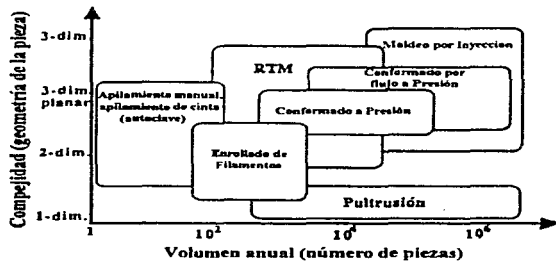


Figura 6. Mapa de técnicas de procesamiento de compósitos con respecto a su habilidad para producir formas complejas y tasas de producción anual. [11]

La llave para la interpretación de este diagrama es la idea de que los procesos con altas tasas de producción y elevada complejidad de la geometría de la pieza producida son mas caros que los que manejan geometrías sencillas y tasas de producción baja. No obstante, esta idea general debe ser considerada en base el conocimiento de cada uno de los procesos ya que la tecnología ofrece nuevas soluciones continuamente.

En la actualidad la tecnología demanda cada vez mas un mayor desempeño de sus piezas o componentes mecánicos y la geometría de las piezas elaboradas de materiales compuestos es cada vez mas compleja. como se mencionó anteriormente, al ganar procesabilidad en formas complejas se corre el riesgo de perder algo de las ganancias en propiedades mecánicas intrínsecas de la combinación de materiales.¹¹

Tomemos como ejemplo el caso de la rigidez; en la figura No. 7 podemos observar la ubicación de algunos procesos actuales de fabricación de materiales compuestos en relación a la rigidez intrínseca del material y a la rigidez del producto típico elaborado por esos procesos.

La rigidez intrínseca del material es aquella que se logra por medio de la combinación de las propiedades de la matriz con las del reforzante, cualquiera que sea la forma en que este se incorpore; partícula, fibra u hojuela. La rigidez del producto es la que se debe al diseño o geometría de la pieza elaborada con el material compuesto, de tal manera que si el producto es una lámina poseerá una rigidez distinta a la de un perfil en "T", por ejemplo.

Es claro que en el futuro se buscará desarrollar procesos que ocupen el cuadrante superior derecho de esta figura; se busca producir geometrías complejas con compósitos avanzados bajo condiciones de manufactura atractivas.^{11, 25}



Figura 7. Ilustración esquemática del potencial de rigidez del diseño contra la rigidez intrínseca del compósito. [26]

Para lograr condiciones de manufactura atractivas se debe buscar un método integral, es decir, un método que proporcione la forma final del producto con el menor número de pasos o subetapas involucrados.²⁶

Por otro lado, el desempeño de las geometrías complejas puede ser susceptible de mejorarse por medio del diseño para contrarrestar la desventaja en propiedades mecánicas que presentan estas piezas frente a las elaboradas en geometrías simples.

Por último, debe considerarse el ciclo de vida del material compuesto y la posibilidad de reciclar una vez terminada la vida útil de la pieza. Esto es de vital importancia en las industrias con elevados volúmenes de producción ya que el reciclaje posee un gran impacto tanto en la ecología como en la factibilidad económica de cualquier proyecto de producción en masa. Se busca producir una pieza de un material compuesto reciclable de tal manera que el material compuesto no pierda totalmente su valor al final de la vida útil de la pieza.¹¹

2.4 Resumen.

En la actualidad el uso de los materiales compuestos se encuentra en expansión en las industrias automotriz y mecánica. Las necesidades específicas que estas industrias buscan satisfacer, incluyen:

- Una mayor relación propiedades mecánicas / densidad.
- Mejores propiedades tribológicas.
- Mejores propiedades a altas temperaturas.
- Bajos costos de producción, elevados volúmenes de producción y reciclabilidad del producto.
- Procesabilidad en formas complejas.

La solución para estas necesidades parece ser el desarrollo de Compósitos de Matriz Metálica y en especial los Compósitos de Matriz Metálica con reforzantes en forma de partículas o fibras cortas dispersas de manera homogénea ofrecen ventajas de procesabilidad en formas complejas, producción sencilla y elevada cantidad, que los hacen comercialmente factibles y reciclables.

Gracias a esta factibilidad comercial se han desarrollado varios sistemas de matriz metálica y reforzante cerámico en forma de partículas. De entre estos sistemas destaca por sus bondades el compuesto Al/SiCp, el cual cuenta entre sus propiedades mejoradas con respecto a la matriz las siguientes:

- Mayor rigidez.
- Mayor resistencia al desgaste.
- Mejores propiedades a elevadas temperaturas.
- Mayor resistencia a la fractura.
- Mayor resistencia a la fluencia.

- Menor coeficiente de expansión térmica.

En especial la industria automotriz esta interesada en el desarrollo de los compósitos A356/SiCp para elaborar distintos componentes de los motores y la aleación reforzada puede ser empleada en la elaboración de piezas con geometría compleja, para casi cualquier industria, por medio de colada en moldes de arena o permanentes o por colada a presión en moldes permanentes.

El requerimiento básico para la elaboración de estos compósitos es el contacto íntimo entre las partículas y la aleación líquida que asegure una interfase resistente.

Las propiedades físicas y fisicoquímicas, tanto de la aleación como de las partículas de refuerzo influyen sobre la distribución final del reforzante y, por lo tanto, las propiedades mecánicas del material; si se desea obtener propiedades mecánicas óptimas es necesario asegurar que la distribución final del reforzante sea lo mas homogénea posible.

Una de las causas de distribución preferencial del reforzante es el asentamiento por gravedad de las partículas cerámicas durante la fusión y vaciado en los moldes del material compuesto. Después de esta discusión resulta claro que es importante el estudio del asentamiento de las partículas de refuerzo en la aleación líquida A356 con el fin de obtener procesos de manufactura y de reciclaje para estos compósitos (A356/SiCp), que exhiban características favorables a su producción y comercialización.

3. EL COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA A356/SiCp.

3.1 Surgimiento del CMM A356/SiCp

La aleación A356 es utilizada en la industria de la fundición para elaborar piezas por colada en moldes de arena o permanentes. Sus características mas preciadas son su fluidez y su relativo bajo punto de fusión (828-883K) que, aunados a su microestructura que la provee de propiedades mecánicas tales como resistencia a la vibración, alta resistencia a la tracción y a la fluencia, etc., la convierten en un atractivo material de manufactura de piezas mecánicas, ornamentales, utensilios domésticos, etc.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Otros
6.5-7.5	0.12	0.10	0.05	0.30-0.45	0.05	0.20	0.15

Tabla 1. Límites de composición para la aleación A356 [29]

Recientemente la industria espacial y automotriz han puesto su esfuerzo en el desarrollo de materiales con una mayor relación propiedades mecánicas/densidad con el objeto de minimizar el peso neto de sus unidades y lograr ahorros en combustible y ganancias en maniobrabilidad y desempeño de las mismas.

Debido a la complejidad de las piezas de empleo automotriz se pensó desde un principio en obtener un Compósito de Matriz Metálica con propiedades óptimas para la fundición y colada, que es la tecnología empleada para la elaboración de dichas piezas.

La investigación no tardó mucho en dar por resultado el desarrollo del Compósito de Matriz Metálica A356/SiCp con propiedades para la fundición semejantes a las de la aleación base y propiedades mecánicas mejoradas.³⁷

El nuevo material ha sido sujeto a intensa investigación en los últimos diez años durante los cuales se ha desarrollado suficiente información como para intentar su empleo en la manufactura de componentes críticos de motores de combustión interna, tales como pistones y monoblocks, desplazando al hierro gris. Incluso existe un producto que ha comercializado la empresa DURALCAN® el cual consiste de lingotes de este material compuesto destinados a las fundidoras que deseen emplearlo como materia prima.

3.2 Propiedades y su relación con la distribución del reforzante.

Debido a la introducción del reforzante en forma de partículas equiaxiales homogéneamente dispersas, las propiedades mecánicas que se logran son de carácter isotrópico; las investigaciones revelan variaciones con la orientación del orden del 4%. Esta es una característica deseable en las piezas o productos finales de geometría compleja, en donde la direccionalidad de las propiedades mecánicas ocasiona bajo rendimiento de la forma útil.³

En la tabla No. 2 podemos encontrar una comparación de las propiedades mecánicas de la aleación base y la aleación reforzada. Cabe destacar que aún cuando la densidad total del material se incrementa, el aumento en la relación propiedades/densidad lo hace atractivo como material ligero de alto desempeño ya que la densidad del Compósito de Matriz Metálica corresponde a una fracción de aquella del hierro gris.³⁸

Las propiedades enlistadas en la tabla 2 corresponden a aquellas que se miden normalmente con un ensayo de tracción. Además de estas existen otras propiedades características del Compósito de Matriz Metálica A356/SiCp que lo hacen un material de

ingeniería valioso y con grandes posibilidades. A continuación se discutirá brevemente las propiedades mas importantes de este material.

<i>Material</i>	<i>Resistencia a la cedencia (Mpa)</i>	<i>Resistencia a la tensión (Mpa)</i>	<i>% ϵ</i>	<i>Módulo de rigidez (GPa)</i>
A356 / 0%SiC _p	200	276	6.1	75.2
A356 / 10%SiC _p	283	303	0.6	80.7
A356 / 15%SiC _p	324	331	0.3	89.8
A356 / 20%SiC _p	332	352	0.4	96.5

Tabla 2. Propiedades de la aleación A356 reforzada con partículas de SiC [31]

• *Resistencia a la tracción.*

Al observar los resultados de los ensayos de tracción realizados sobre la aleación A356 y el material compuesto A356/SiCp se puede observar un incremento en la resistencia a la tracción por parte de la aleación reforzada. El incremento de aproximadamente 4 Ksi en la resistencia a la tracción debido a la presencia del reforzante ha tratado de ser explicada por medio de diversas teorías, las primeras teorías aceptadas explican la elevada resistencia a la tracción debido al aumento del endurecimiento por deformación que experimenta la matriz al interaccionar las dislocaciones con el reforzante. Se propone en esta teoría que al servir de anclaje a las dislocaciones el reforzante aumenta la interacción entre estas y aumenta su número dando origen a la formación de subgranos, provocando el endurecimiento adicional.⁹

El endurecimiento adicional ocurre principalmente a bajas deformaciones y es sensible al tamaño de la partícula ya que este determina el acomodo de los esfuerzos plásticos de la matriz; las partículas grandes tienden a fracturarse debilitando el material y deteniendo el proceso de endurecimiento adicional. La evidencia del endurecimiento a bajas deformaciones indica una interacción entre las partículas y la matriz en el rango elástico, las

partículas acomodan por medio de deformación elástica la deformación plástica de la matriz ampliando el rango de transición elástico-plástico.⁹

Por otro lado los esfuerzos residuales ocasionados por la diferencia de coeficientes de expansión térmica durante la solidificación constituyen otro mecanismo de endurecimiento; al ser acomodados estos esfuerzos se incrementa el número de dislocaciones (densidad de dislocaciones).²

El aumento en la resistencia a la tracción depende, en gran manera, de la cantidad y distribución del reforzante en la matriz, así como de la ruta de procesamiento del material compuesto. La homogeneidad en la dispersión del reforzante provee de características isotrópicas al material y proporciona la resistencia máxima al material al distribuirlo uniformemente y evitar zonas mas estrechas propensas a la fractura.⁹

De igual forma el procesamiento correcto del material asegura una sólida intercara metal-cerámico que prevendrá el desprendimiento de las partículas lo cual acarrea la nucleación y crecimiento de "huecos" debilitando la matriz. Las prácticas inadecuadas de procesamiento del material compuesto en estado líquido provocan porosidad e inclusiones que detrimentan esta propiedad mecánica.

El asentamiento o agrupamiento de las partículas de SiC causado por las fuerzas boyantes y de gravedad y las características de mojado de las partículas por la aleación líquida favorecen la nucleación de "huecos" al fracturarse la matriz en las zonas delgadas y con alto grado de triaxialidad de esfuerzos que se encuentran atrapadas en estos agrupamientos de partículas.⁹

- *Rigidez*

La propiedad de rigidez se refiere a la deformación elástica que sufre un material bajo un esfuerzo dado y por lo tanto involucra al módulo de Young, que es la constante

elástica de propiedades entre deformación y esfuerzo. Al introducir las partículas reforzantes de SiC en la aleación A356 se logra producir un material compuesto con una constante elástica de proporcionalidad mayor, tal y como se puede observar en las gráficas de esfuerzo contra deformación de la figura No. 8.

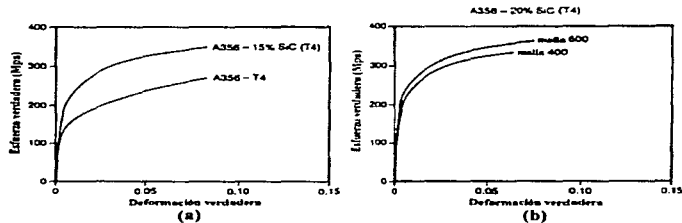


Figura 8. Curvas de esfuerzo deformación para: a) Aleación A356 y A356-15% vol SiC, y b) A356-15% vol SiC con partículas a 400 y 600 mallas. En ambos casos los especímenes son sujetos a tratamiento térmico T4. [9]

El motivo primordial de dicho aumento en el valor de módulo de Young es la presencia misma de una fase sólida dispersa con un elevado módulo de Young, como es el caso del SiC, al combinarse las propiedades elásticas de la matriz y reforzante para soportar un esfuerzo aplicado el resultado es una deformación menor a la que sufriría la aleación sin reforzar.⁹

Posteriormente, cuando el esfuerzo alcanza valores suficientes para deformar plásticamente a la matriz, esta deformación es acomodada por medio de deformación

elástica del reforzante y se genera un estado de esfuerzos mayor en el que ocurre una mayor interacción entre las dislocaciones proporcionando, así, un endurecimiento adicional que retarda la fluencia del material compuesto. El resultado general de este acomodo de esfuerzos por deformación elástica del reforzante y endurecimiento de la matriz por deformación es una transición del comportamiento elástico-plástico que aún cuando no incrementa notablemente el límite proporcional si proporciona un incremento sustancial en la tensión de fluencia y en el módulo elástico.⁹

La experiencia acumulada hasta el momento por diversos autores indica que el módulo de elasticidad del material compuesto es poco sensible a la distribución del reforzante en la matriz y que está determinado en gran manera por el porcentaje en volumen del reforzante presente en la matriz de tal manera que se puede obtener un buen estimado de éste por la regla de mezcla:²³

$$E_C = E_M V_M + E_R V_R \dots \dots \dots (1)$$

En donde :

E_C = Módulo del material compuesto.

E_M = Módulo de la matriz.

E_R = Módulo del reforzante.

V_M = Porcentaje en volumen de la matriz.

V_R = Porcentaje en volumen del reforzante.

El caso del módulo de Young es el mas sencillo de predecir de entre las propiedades mecánicas ya que como se mencionó anteriormente sólo depende del porcentaje en volumen del reforzante, sin embargo, como en todos los demás casos la obtención de propiedades óptimas depende de una secuencia de procesamiento adecuada que asegure un material libre de defectos tales como porosidad, inclusiones, etc.

- *Resistencia a la fluencia.*

Como se mencionó anteriormente, la presencia del reforzante en la aleación A356 provoca un retardo en la aparición del comportamiento de transición elástico-plástico que tiene como consecuencia un incremento en el módulo elástico mas no así con el límite proporcional, es decir, la pendiente de la recta que representa el comportamiento elástico aumenta, pero el valor de la deformación a la cual ocurre la fluencia no varía sensiblemente. Lo anterior significa que el valor de la tensión de fluencia, definido por medio del margen de 0.2% de la deformación, sufre un incremento proporcional al del módulo de Young.⁹

Las razones de este incremento en la tensión de fluencia son los mecanismos de endurecimiento adicional debidos a la presencia del reforzante en forma de partículas dispersas que restringen u obstaculizan el flujo de la aleación matriz y por lo tanto depende de la homogeneidad del reforzante. Adicionalmente el agrupamiento de las partículas de SiC provoca configuraciones internas de la matriz metálica que generan estados de esfuerzos triaxiales en zonas "delgadas" de la matriz y conllevan a su ruptura temprana debilitando el material.

- *Coefficiente de expansión térmica*

El coeficiente de expansión térmica de las partículas de SiC es menor que el de la matriz de Al-Si y por lo tanto al combinar ambos materiales el resultado es un material compuesto con un coeficiente de expansión térmica menor al de la aleación base; este disminuye conforme aumenta el porcentaje en volumen de SiC.³

Es por eso que los materiales compuestos de Al-Si/SiCp son atractivos para la construcción de piezas o estructuras que requieren de estabilidad térmica de sus dimensiones tales como pistones, bielas, flechas, etc.

Otra característica atractiva que proporciona la diferencia en coeficientes de expansión térmica de la matriz y el reforzante es el mecanismo de endurecimiento por tensiones generadas durante la solidificación o tratamiento térmico de las piezas elaboradas con el material compuesto.²

- *Conductividad eléctrica y térmica.*

El compuesto A356/SiCp no exhibe conductividades térmica o eléctrica mejoradas, sin embargo, debido a la naturaleza de la aleación base es un buen conductor de ambas. Las propiedades mecánicas mejoradas y la baja densidad del material lo hacen atractivo para aplicaciones eléctricas o de intercambio de calor, pero actualmente se encuentran en desarrollo materiales compuestos con propiedades eléctricas y térmicas mejoradas que dejan en segundo plano al material aquí considerado.³

- *Resistencia al desgaste.*

El SiC posee una alta dureza y al agregarlo como reforzante se obtienen propiedades de resistencia al desgaste y a la fricción mejoradas. Se ha encontrado que el par hierro colado/Al-Si-SiCp, con una adecuada preparación de las superficies en contacto, es especialmente resistente al desgaste mutuo.³

Para lograr esta resistencia al desgaste mejorada es necesario asegurar una intercara metal-cerámico resistente para evitar el desprendimiento de las partículas del seno de la matriz.

- *Maquinabilidad.*

Al modificar la rigidez y dureza de la aleación base por medio del reforzante se logra una mejor maquinabilidad para el material compuesto A356/SiCp que aquella de la aleación base. La presencia de las partículas de SiC disminuye el tamaño de las rebabas de material

que se desprende durante el maquinado y evita el desgarramiento del material y el calentamiento excesivo de la herramienta de corte. No obstante, el desgaste de esta aumenta.

- *Propiedades mecánicas a alta temperatura.*

El desarrollo de propiedades mecánicas a alta temperatura es uno de los objetivos clave que se han planteado para los materiales compuestos. Las propiedades mecánicas importantes en la mayoría de las aplicaciones de los materiales compuestos base aluminio, reforzados con partículas son el módulo de elasticidad (rigidez), resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, ductilidad y termofluencia (creep).²

⇒ *Módulo de elasticidad.*

El módulo de elasticidad del material compuesto depende de la naturaleza de los módulos de cada componente. Debido a las temperaturas de trabajo de las piezas, que son relativamente bajas para el SiC, el comportamiento del módulo elástico del material compuesto está determinado por la dependencia de la temperatura del módulo de la matriz. Así podemos observar que aunque el módulo de Young del material compuesto es mayor que el del material base sobre un rango amplio de temperaturas, la dependencia de este con la temperatura exhibe el mismo comportamiento en ambos casos.

Otra evidencia de que la dependencia de la temperatura del módulo elástico de los materiales compuestos es determinada por el comportamiento de la matriz se encuentra en el hecho de que al aplicar un tratamiento térmico al material compuesto se modifica su comportamiento elástico.

⇒ *Tensión de fluencia.*

El aumento en la tensión de fluencia en los materiales compuestos se debe a las restricciones de flujo de material que imponen las partículas a la matriz metálica y al endurecimiento adicional que proporciona el campo de esfuerzos generado por la diferencia de coeficientes de expansión térmica entre las partículas y la matriz.

Conforme aumenta la temperatura los esfuerzos residuales en la matriz son relevados y ocurre un ablandamiento del material. Además, conforme aumenta la temperatura la resistencia a la fluencia intrínseca de la matriz disminuye y las restricciones de flujo impuestas por las partículas desaparecen de tal manera que conforme la temperatura aumenta y se acerca a la temperatura homologa ($T/T_f = 0.8$), la tensión de fluencia del material compuesto se aproxima a aquella de la aleación base. Se ha observado en la práctica que la resistencia a la fluencia del material compuesto conserva ventaja sobre la de la aleación base hasta temperaturas del orden de 400°C.²

La temperatura también afecta la morfología de las fases presentes y el tamaño de grano y, por lo tanto, afecta la resistencia a la fluencia.

⇒ *Resistencia a la tracción y ductilidad.*

El porcentaje de deformación previo a la ruptura de este material compuesto es menor a aquel de las aleaciones base y por mucho; mientras para una aleación Al-Si se obtienen porcentajes de deformación del orden de 6%, para la aleación reforzada A356/SiC se obtienen porcentajes menores al 1%. Esto se debe a la ruptura de las partículas y a la falla de la matriz en los espacios comprendidos entre los agrupamientos o conglomerados de partículas donde la elevada triaxialidad de los esfuerzos ocasiona la formación de huecos. Los huecos así formados crecen y se unen para ocasionar la ruptura del material.

Conforme aumenta la temperatura la resistencia a la tracción intrínseca del material disminuye, pero debido a la disminución de la resistencia a la fluencia el campo de esfuerzos generado, entonces, no es suficiente para ocasionar ruptura de la partículas y el mecanismo de fractura cambia. El nuevo mecanismo de fractura implica la nucleación y coalescencia de huecos en la matriz. La temperatura de transición del mecanismo de fractura depende del porcentaje en volumen de reforzante en el material compuesto.

El efecto neto del aumento en la temperatura consiste en disminuir la resistencia a la tracción pero en cambio mejora la ductilidad y aumenta el porcentaje de deformación o elongación del material compuesto.

⇒ *Termofluencia (creep)*

El modelo aplicado para la termofluencia de materiales no reforzados maneja el concepto de 'umbral' de tensión, este es el valor por encima del cual se observa la termofluencia y la velocidad con que ocurre este fenómeno es representada por un arreglo de potencia como el siguiente:

$$\dot{\epsilon} = A' ((\sigma - \sigma_0)/E)^n \exp (-Q/RT) \dots \dots \dots (2)$$

o por el modelo de estructura invariante:

$$\dot{\epsilon} = A (\lambda/b)^3 D/b^2 ((\sigma - \sigma_0)/E)^4 \dots \dots \dots (3)$$

En donde:

A, A' y n son constantes.

λ = Tamaño de subgrano o espaciamiento de barrera

D = Coeficiente de difusión de red

b = Vector de Burgers

σ = Esfuerzo aplicado

σ_0 = Esfuerzo 'umbral'

E = Módulo de Young

Q = Energía de activación

R = Constante de los gases

T = Temperatura

Los resultados obtenidos para las aleaciones reforzadas siguen el mismo comportamiento general que las aleaciones sin reforzar; su comportamiento se ajusta al arreglo de potencia a bajos esfuerzos y altas temperaturas y se despega de él a altos esfuerzos y bajas temperaturas. Un análisis de los resultados obtenidos para un material compuesto A356/20% SiCp demuestra que el modelo que mejor funciona, y que proporciona información útil como es el umbral de esfuerzo para la termofluencia, es el de la ecuación (2) con $n = 5$

Los resultados de los ensayos realizados en este tipo de material a altas temperaturas (400°C) demuestran que la resistencia a la termofluencia aumenta con la adición del reforzante, hasta niveles de 20% en volumen y que la composición de la matriz ejerce poca influencia.

Otra variable importante que determina el comportamiento de termofluencia de las aleaciones reforzadas es el tamaño de las partículas. Para tamaños de partícula finos ($< 10 \mu\text{m}$) el comportamiento a altas temperaturas se apeg a al modelo de la ecuación (3) y se obtiene mayor resistencia a la termofluencia, mientras que para partículas gruesas ($> 10 \mu\text{m}$) el comportamiento de la velocidad de fluencia esta representado por la ecuación (2) y la resistencia a la termofluencia es inferior a la del caso anterior.

En general los umbrales de esfuerzo o esfuerzos mínimos para que ocurra la termofluencia disminuyen con la temperatura y aumentan con el porcentaje en volumen de reforzante.

3.3 Resumen

Las necesidades de la industria y la tecnología modernas del transporte han dado origen al nacimiento del material compuesto A356/SiCp, el cual exhibe propiedades mejoradas con respecto a la aleación base debido a la presencia de las partículas cerámicas de refuerzo.

La ruta de elaboración y procesamiento del compuesto de matriz metálica A356/SiCp mas común es la de solidificación.

La gran mayoría de las propiedades mecánicas del material compuesto son altamente dependientes de la distribución del reforzante en la matriz, es por eso que el entendimiento y control de los mecanismos de solidificación y asentamiento del reforzante son críticos en su elaboración y procesamiento.

El objetivo primordial es el control de las variables de procesamiento para obtener una distribución final homogénea del reforzante.

4. SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE.

4.1 El fenómeno de sedimentación

Se entiende por sedimentación el comportamiento de un sistema sólido-líquido, en el cual la fase sólida se encuentra contenida en la fase líquida, consistente en el desplazamiento de la fase sólida hacia el fondo del recipiente que contiene el sistema. El caso análogo en que la fase sólida se desplaza hacia la superficie del líquido se denomina flotación.

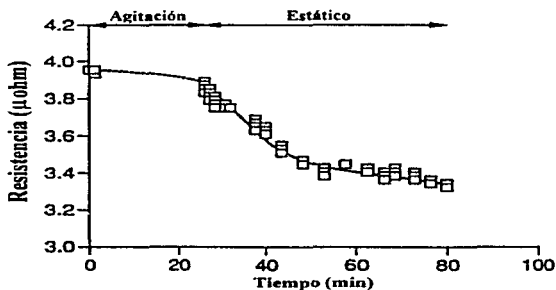


Figura 9. Variación en la resistencia del metal fundido, y por lo tanto en contenido de SiC, en una sección del baño metálico para diferentes tiempos. [9]

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

El fenómeno de asentamiento por gravedad o sedimentación en el composito A356/SiCp ocurre debido a la diferencia en densidades del SiC y la aleación líquida y, por supuesto, a la acción del campo gravitatorio terrestre.

Durante la fusión de las aleaciones reforzadas con partículas de SiC el asentamiento de estas comienza en cuanto se alcanza la temperatura de la zona pastosa de la aleación. Se puede observar evidencia de este comportamiento en la figura No. 9, en donde se relaciona directamente la resistencia de la aleación con el contenido de SiCp del segmento en donde se realiza la medición.⁹

La sedimentación es un fenómeno que raramente se presenta solo en los sistemas de casi cualquier proceso, normalmente se encuentra acompañado por fenómenos de transporte de momento por flujos de carácter convectivo, difusivo o mecánico y el caso se complica aún mas cuando ocurre alguna reacción química en el sistema ya que esto modifica las condiciones físicas y químicas.

4.2 Aspectos termodinámicos de la sedimentación

♦ Formación de Al_4C_3

Una primera aproximación al problema de la sedimentación en un sistema como el que se estudia en el presente caso es mediante el empleo de la ecuación de Stokes para sedimentación obstaculizada:²⁹

$$V_s = D_p^2 g (\rho_p - \rho_l) / 18 \eta^* (1-C)^{4.65} \dots\dots\dots (4)$$

En donde:

D_p = Diámetro de la partícula.

ρ_p y ρ_l = densidades de la partícula y el líquido respectivamente.

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

η = Viscosidad del líquido

C = concentración de partículas, en % en volumen.

Como se puede deducir fácilmente de esta expresión, la sedimentación de las partículas depende de las variables físicas del sistema y de las características de las partículas de refuerzo así como de la concentración de estas. Si se escogen un tamaño de partícula y un porcentaje en volumen fijos, se encuentra que la velocidad de asentamiento depende principalmente de la viscosidad del metal líquido.

La viscosidad del sistema Al-Si-SiC depende principalmente de la temperatura y porcentaje de partículas de SiC presentes, debido a la reacción que ocurre entre el aluminio y el SiC:



La aleación reforzada A356/SiCp se comporta como un líquido viscoelástico y al ocurrir la reacción (5) se presentan zonas de viscosidad y temperatura heterogénea, lo cual resulta en una distribución heterogénea de las partículas.⁹

El producto de la reacción (5), el Al_4C_3 , actúa como un aglomerante de las partículas y es el culpable del aumento local de la viscosidad. Termodinámicamente hablando, este producto de reacción puede ser controlado por medio del contenido de Si en la aleación al desplazar el equilibrio de la ecuación (5) hacia el lado izquierdo. Se ha determinado que para un contenido de 12% Si la cinética de reacción puede ser frenada a temperaturas menores de 735°C, no obstante con contenidos de aproximadamente 10% de Si y temperaturas en el rango de 700 a 735°C la velocidad de reacción es lo suficientemente lenta y se logra evitar efectos negativos.^{9, 24}

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

♦ *Naturaleza fisicoquímica de la incorporación de las partículas.*

Uno de los principales factores que afectan la velocidad de sedimentación o flotación de las partículas en un fluido, o incluso el comportamiento en sí, es la afinidad entre las fases líquida y sólida.

Para que la incorporación de las partículas al baño tenga lugar es necesario que ocurran dos fenómenos: 1) contacto íntimo entre las partículas y el metal fundido, reemplazando la intercara sólido/gas de la partícula por una intercara sólido/líquido, y 2) para que esto suceda el cambio de energía del sistema debe ser favorable.¹⁰

Las principales contribuciones energéticas al proceso son las energías de superficie, potencial, cinética y térmica. La energía boyante es aquella que resulta de la oposición del líquido a ser desplazado por un cuerpo sumergido y, cuando se considera una velocidad de desplazamiento muy pequeña, puede ser considerada como una manifestación de la energía potencial. Despreciando las energías cinética y térmica, para una partícula esférica grande que entra en el seno de un fluido a través de intercara plana gas/líquido, las contribuciones energéticas durante la transferencia son:¹⁰

$$E_{\text{sup}} = \pi R^2 \gamma_{lg} (2(1 - \cos \omega) \cos \theta + \sin^2 \omega) \dots \dots \dots (6)$$

$$E_{\text{pot}} = \frac{1}{4} \pi R^3 \rho_p g (1 - \cos \omega) \dots \dots \dots (7)$$

$$E_{\text{boy}} = 4R^4/48 \rho_l g (-3\cos 4\omega + 8\cos 3\omega + 12\cos 2\omega - 75\cos \omega + 55) \dots \dots \dots (8)$$

En donde:

γ = Tensión superficial

ρ = Densidad

θ = Ángulo de contacto

g = Aceleración debida a la gravedad

R = Radio

ω = Ángulo semiapical

y el cambio energético total esta dado por la suma:

$$E_{\text{tot}} = \Sigma E_i = E_{\text{sup}} + E_{\text{pes}} + E_{\text{boy}} \dots \dots \dots (9)$$

Se puede analizar los cambios energéticos resultantes durante la inmersión de una partícula por medio de una gráfica como la de la figura No. 10. En ella se muestra el cambio total de energía que ocurre a diversos ángulos de inmersión. Se analizan dos casos: para un ángulo de contacto (θ) de 157° (condición de no mojado) y para un ángulo de 60° (condición de mojado)

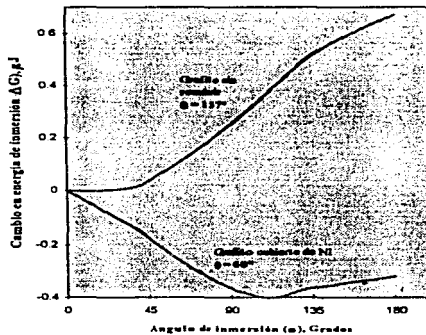


Figura 10. Variación típica del cambio de energía para una esfera como función del ángulo de inmersión; partículas de 250 μm en aluminio fundido. [10]

Es fácil concluir de las curvas que la condición mas favorable para la incorporación de las partículas en el baño metálico es aquella donde ocurre el mojado de las partículas por el metal fundido ($\theta < 90^\circ$). El ligero incremento energético del sistema observado durante la última etapa de inmersión de la partícula, en el caso en que la partícula es mojada ($\theta = 60^\circ$) se debe a la creación de una nueva superficie sólido/líquido en el seno del baño de aluminio.

Posteriormente al solidificar la aleación la distribución final del reforzante se ve afectada por los fenómenos de atrapamiento y empuje de las partículas por parte de la fase primaria. Cuando la partícula es susceptible de ser mojada por la aleación sufre menor segregación por parte de la fase primaria en crecimiento y es atrapada por esta conforme la solidificación avanza, obteniéndose una distribución mas homogénea.^{7,10}

4.3 Condición metalostática

El caso mas sencillo para tratar la sedimentación del reforzante en la aleación líquida es aquel en que el baño metálico se encuentra en reposo, es decir, en condiciones metalostáticas. En tales circunstancias el campo de velocidades en el metal líquido es nulo o suficientemente pequeño como para ser despreciado y la velocidad de asentamiento o flotación de las partículas puede ser descrito mediante un balance de fuerzas entre las componentes gravitatoria, boyante y de fricción.⁸

Las condiciones particulares del sistema, tales como tensión superficial, mojabilidad de la partícula, fracción volumétrica de sólidos, etc., determinan las consideraciones a emplear en el desarrollo de un modelo o ecuación que describa el asentamiento de las partículas.⁹

Assumiendo que se puede representar la sedimentación de las partículas de refuerzo en el material compuesto A356/SiCp por medio de la ecuación de Stokes para la velocidad de sedimentación obstaculizada (4), lo cual no es una mala suposición bajo condiciones

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

metalostáticas siempre y cuando se logre frenar la reacción (5), se encuentra uno con las variables críticas que se describen en la siguiente sección:

4.3.1 Variables críticas de asentamiento

Partiendo de la ecuación de Stokes (4) se encuentra uno con las siguientes variables críticas de asentamiento.

Aceleración gravitacional (g)

Se asume que es una constante durante todo el proceso, sin embargo, existen técnicas de procesamiento (por ejemplo la colada centrífuga y la colada a presión) que introducen fuerzas y patrones de flujo que la modifican, en estos casos la ecuación de Stokes pierde validez y es necesario un modelo mas complejo.

Densidad de la partícula (ρ_p)

Debido a que el SiC no presenta transformaciones de fase en el rango de temperaturas de procesamiento de la aleación reforzada, la densidad de la partícula no varía durante este.²²

Densidad del metal líquido (ρ)

La densidad de la aleación líquida depende de su composición química y de la temperatura. Es por eso que la posible reacción entre el SiC y la aleación A356 puede producir variaciones en la densidad del baño metálico. Si la diferencia de densidades entre partícula y metal líquido es grande, entonces existirá la sedimentación o flotación de las partículas. Se desea que esta diferencia sea mínima.

Diámetro de la partícula(D_p)

Es deseable que las partículas empleadas como reforzante posean una distribución cerrada (es decir, con una dispersión mínima) para poder obtener un comportamiento representativo por medio de la ecuación de Stokes, según la cual a menor tamaño de partícula existe una menor velocidad de sedimentación. No obstante existen limitantes físicas y de proceso ya que el tamaño de la partícula determina el comportamiento mecánico, el modo de fractura, el área total de humectación y, por lo tanto, la energía de incorporación, etc. Los tamaños de partícula que hasta el momento han reportado buenos resultados son en el rango de 8-12 μm .⁹

Fracción volumen de reforzante (C)

Las fracciones en volumen empleadas de reforzante en el material compuesto A356/SiC varían desde 10 hasta 25 % dependiendo de las propiedades mecánicas que se deseen alcanzar, se han reportado concentraciones en la zona eutéctica de 35 % en volumen con un tamaño de partícula de 10 μm , este valor es considerado como una aproximación a la máxima fracción en volumen incorporable, de manera homogénea, a la aleación A356.²⁹

La concentración de partículas tiene un efecto sobre la viscosidad aparente del metal líquido que, dependiendo de su humectabilidad, crea un obstáculo para la sedimentación. No obstante, la distribución final del reforzante se ve afectada por la segregación de las partículas durante la solidificación.

Viscosidad del metal fundido (η)

La velocidad de asentamiento es inversamente proporcional a la viscosidad del metal líquido y por lo tanto una aleación viscosa parecería ser ideal para evitar la sedimentación de las partículas. No obstante, una alta viscosidad en muchas ocasiones implica una baja fluidez

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

del metal fundido y la fluidez es una característica esencial de las aleaciones procesables por solidificación originándose un compromiso entre la fluidez y la velocidad de sedimentación.⁹

Las variables que influyen sobre la viscosidad de la aleación base son la temperatura, la composición química y la estabilidad termodinámica del sistema; el producto de reacción entre el aluminio y el SiC, el Al_4C_3 , modifica la viscosidad del material pudiendo ocasionar gradientes de esta propiedad en el sistema. Estos gradientes de viscosidad ocasionan a su vez gradientes de temperatura, al modificar las condiciones de transporte de energía, que favorecen la degradación selectiva del reforzante y modifican su distribución final.²⁸

Cabe mencionar que aun cuando la aleación base se considera que se comporta como un fluido newtoniano, la aleación reforzada con SiC no lo hace. Es decir, la viscosidad de la aleación reforzada varia con el esfuerzo cortante aplicado o velocidad de arrastre, es por eso que se debe ser cuidadoso al aplicar la ley de Stokes y tomar en cuenta que se trata de una aproximación hecha mediante la simplificación de que la etapa transitoria de asentamiento es corta y que la velocidad desarrollada por la partícula es baja y constante durante todo el proceso.⁹

Humectabilidad o ángulo de contacto (θ)

Esta variable no esta considerada directamente en la ecuación de asentamiento obstaculizado de Stokes pero influye sobre las variables que esta considera, con todas las consecuencias que esto implica; de la humectabilidad de las partículas depende la viscosidad aparente de la aleación reforzada. Si el baño metálico no moja las partículas estas tienden a aglomerarse, sobre todo en las burbujas de gas que nuclean durante la solidificación, y aumenta el diámetro aparente de partícula.^{1,4,28}

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

Estabilidad termodinámica

En el sistema Al-Si-SiC el SiC es capaz de reaccionar con el aluminio para formar Al_4C_3 y [Si] de acuerdo con la ecuación (5), lo cual trae como consecuencia la modificación de la química del sistema, creando zonas con gradientes de viscosidad que favorecen la sedimentación preferencial de las partículas dentro del baño metálico. El producto de reacción actúa también como aglomerante de las partículas y ocasiona dispersión en la distribución de tamaños de partícula al aumentar su diámetro aparente, acrecentando el efecto anterior. La degradación de las partículas y el aumento en la concentración de Si en la aleación son, también, efectos secundarios de la reacción.

No obstante, si la reacción ocurre en menor grado favorece la humectabilidad de las partículas. La velocidad de reacción depende del porcentaje de Si y de la temperatura del baño; para que la reacción transcurra lentamente a las temperaturas de trabajo típicas de la aleación A356/SiCp (650-735°C) se necesita un contenido de Si de aproximadamente 10%.^{33,34}

4.3.2 Asentamiento y solidificación.

Durante la solidificación de los materiales compuestos se superponen los fenómenos de asentamiento por gravedad de las partículas de refuerzo y el acomodo de las mismas por parte de la fase primaria en crecimiento. Con respecto a la interacción de las partículas de refuerzo con la fase primaria de la aleación que solidifica se puede hablar de dos fenómenos que determinan la estructura final de solidificación; i) Atrapamiento de las partículas por parte de la fase primaria, y ii) Rechazo de las partículas hacia los canales interdendríticos.⁷

Modelo teórico de rechazo de las partículas.⁷

Para explicar este fenómeno se asume que existen fuerzas de rechazo que mantienen una película de líquido entre el frente de solidificación y la partícula, y que estas se oponen a fuerzas de arrastre de la partícula que la empujan contra el frente de solidificación y favorecen su atrapamiento.

Las fuerzas de arrastre están totalmente estudiadas y poseen mecanismos aceptados por la comunidad científica, mientras que las fuerzas de rechazo aun provocan controversia. La naturaleza de la fuerza que empuja a la partícula hacia los canales interdendríticos es de naturaleza molecular y es afectada por variables fisicoquímicas como el ángulo de contacto entre sólido y líquido (ángulo de mojado), la curvatura de la intercara sólido/líquido, la diferencia en propiedades térmicas de la partícula y el líquido, etc.

Al establecer un balance de fuerzas en el sistema se llega a la conclusión de que existe una velocidad para la cual las fuerzas de arrastre sobrepasan a las de rechazo y la partícula es atrapada por la fase primaria. El problema de esta teoría es el de evaluar las fuerzas de rechazo para ofrecer una predicción del comportamiento de atrapamiento/rechazo.

Predicciones sobre el comportamiento atrapamiento/rechazo.⁷

Se puede aplicar la teoría de atrapamiento/rechazo representando la naturaleza molecular de las fuerzas de rechazo por medio del empleo de propiedades fisicoquímicas del sistema.

Un método para realizar predicciones consiste en comparar las conductividades térmicas de la partícula y el líquido que solidifica; si se cumple la desigualdad:

$$\lambda_p/\lambda_L > 1 \dots\dots\dots(10)$$

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

entonces las partículas serán rechazadas y si el cociente es menor a la unidad entonces las partículas serán atrapadas. En la expresión anterior λ_p y λ_l son las conductividades térmicas de la partícula y el líquido respectivamente.

La explicación ofrecida es que cuando la partícula posee una conductividad térmica baja crea un efecto aislante en el frente de solidificación que incrementa la diferencia de temperaturas locales (sobreenfriamiento cinético) y se forma una protuberancia que empuja a la partícula. Este criterio es útil en algunos casos pero no funciona en otros. Otro criterio mas acertado, según lo demuestra la experimentación, ha sido propuesto por Surappa y Rohatgi y se basa en la relación de difusividades térmicas de la partícula y el líquido. De acuerdo con este criterio, cuando se cumple la desigualdad:

$$(\lambda_p r_p C_p / \lambda_l r_l C_l)^{0.5} > 1 \dots\dots\dots (11)$$

entonces la partícula es atrapada y cuando el cociente posea un valor menor a la unidad la partícula será rechazada.

Otra propiedad que sirve para establecer un criterio de rechazo de las partículas es la energía interfacial. Debido a que el proceso de atrapamiento requiere del reemplazo de la intercara líquido/partícula por una nueva intercara sólido/partícula, el signo del cambio energético total ($\sigma_p - \sigma_{sl}$) determina el comportamiento: cuando $\sigma_p < \sigma_{sl}$ ocurre el atrapamiento, en caso contrario ocurre el rechazo de la partícula. Aunque existen evidencias experimentales de que el criterio funciona, en situaciones prácticas de manufactura prevalecen condiciones de no equilibrio y existen fuerzas exteriores que dificultan el empleo de este criterio.

Comportamiento experimental.

Experimentalmente se ha podido observar que los sistemas en donde las partículas de refuerzo no promueven la nucleación de la fase primaria durante la solidificación son propensos a sufrir rechazo de las partículas. Por otro lado, si las partículas de refuerzo son capaces de producir nucleación de la fase primaria es menos probable que sean rechazadas o lo serán en menor grado.⁷

Adicionalmente, el reacomodo que sufre el reforzante depende del tamaño de la microestructura que solidifica y este es determinado por la velocidad de crecimiento (avance del frente de solidificación) y esta a su vez esta determinada por la velocidad de extracción de calor. Cuando las velocidades de crecimiento son altas (del orden de 27000 $\mu\text{m/s}$) las dendritas que se forman son pequeñas y la distribución de las partículas es mas homogénea, aun cuando la fase primaria las rechace. Para las velocidades de crecimiento lentas ($< 17000 \mu\text{m/s}$) las partículas sufren una segregación importante.⁷

Al confrontar los resultados experimentales con los modelos teóricos de predicción del comportamiento de atrapamiento o rechazo podemos observar que el criterio que resulta acertado en la mayoría de los casos es el de difusividades térmicas. No obstante, los resultados finales dependen en gran manera de las condiciones de extracción de calor y dado que todos los modelos difieren en sus apreciaciones de la velocidad de solidificación, sus resultados son poco comparables.

El efecto de la temperatura y el contenido de Si sobre la velocidad de sedimentación es el anteriormente mencionado de aglomeración de las partículas, lo cual resulta en un incremento aparente en el diámetro de las partículas y promueve su sedimentación. En este caso el aumento en el tamaño de partícula se ve compensado por el aumento de la viscosidad debido al producto de reacción, pero el resultado sigue siendo una distribución heterogénea de las partículas.

SEDIMENTACION Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

Existen otras condiciones bajo las cuales ocurre la aglomeración de partículas, como es el caso cuando la humectabilidad del SiC por parte del metal líquido es pobre. Bajo tales circunstancias la aglomeración de las partículas es favorecida por la disminución de la energía libre del sistema que implica la disminución del área de contacto sólido/líquido, en especial cuando se tiene gran cantidad de gases disueltos que al nuclear en forma de burbujas "atrapa" o aglomera a las partículas de SiC. Curiosamente, la reacción entre el SiC y el aluminio líquido promueve el mojado de la partícula y ayuda a disminuir este efecto.¹³

La evidencia experimental hasta el momento apunta hacia el hecho de que la sedimentación en la aleación reforzada A356/SiC es considerable; así lo demuestran los resultados obtenidos por Loyd et al.⁷ esquematizados en la figura No. 9, además, el cálculo de la velocidad de asentamiento obstaculizado por medio de la ecuación de Stokes arroja un resultado, para un aleación A356/15% SiCp, de $20 \mu\text{m/s}$ ²⁹ lo cual es relativamente alto si se toma en cuenta los tiempos de mantenimiento del metal líquido. Es por eso que la agitación del baño metálico es una práctica recomendada aunque aún existe la posibilidad de disminuir la necesidad de agitación al promover la humectabilidad de las partículas por medios fisicoquímicos como son adiciones de elementos reactivos surfactantes al metal líquido y acondicionamiento de la superficie de las partículas por reacción química.

Velocidad de enfriamiento

La velocidad de enfriamiento durante el procesado por solidificación de la aleaciones reforzadas establece la velocidad de avance del frente de solidificación y la forma de la intercara sólido-líquido (s/l); ambas determinan si las partículas de reforzante serán atrapadas o rechazadas, de tal manera que las velocidades de enfriamiento altas producen velocidades de avance de intercara s/l altas y tamaños finos de dendritas, lo cual favorece que las partículas queden atrapadas en los espacios interdendriticos y, por lo tanto, la distribución final sea homogénea.⁷

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

Por otro lado, la sedimentación se superpone al crecimiento de la fase sólida de tal manera que si el crecimiento de la fase primaria es lento existirá bastante tiempo para que exista la sedimentación de las partículas en los espacios interdendríticos amplios típicos de las velocidades de solidificación lentas, y la distribución final resultante es poco homogénea, mostrando bandas de SiC^{20} . En este aspecto se parte de la suposición de que para lograr anular el efecto de la sedimentación se deben desarrollar velocidades de avance de la intercara s/l del mismo orden de magnitud que la velocidad de sedimentación obstaculizada precedido para las partículas.

4.4 Condición metalodinámica

El objeto de la agitación es el de transmitir momento (cantidad de movimiento) a la aleación reforzada en estado líquido para contrarrestar los efectos de la fuerza de gravedad y anular el fenómeno de asentamiento.⁸

La energía necesaria para contrarrestar el asentamiento depende de la composición, temperatura y propiedades fisicoquímicas del sistema, según se ha discutido anteriormente. No obstante, es difícil calcular el trabajo que es necesario aplicar al sistema para tal fin. Es posible atacar el problema desde el punto de vista mecánico y plantear las ecuaciones de transporte para posteriormente resolverlas con ayuda de algún paquete de cómputo.

Si bien es una tarea ardua no es imposible y dependiendo del grado de complejidad que se desee manejar se pueden emplear algunas correlaciones empíricas para plantear las ecuaciones fundamentales. Un ejemplo exitoso de este tipo de trabajo es el efectuado por Bui et al.⁸ en donde se emplea el código PHOENICS para resolver el sistema de ecuaciones generado para un sistema Al-SiCp con agitación mecánica.

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

Otra manera de realizar este trabajo es por medio de correlaciones empíricas, o semiempíricas, que involucren las dimensiones y características físicas del sistema en agitación y las propiedades de la aleación reforzada en estado líquido o pastoso. Este tipo de relaciones o criterios de operación han sido desarrollados a través de los años para diversos tipos de reactores industriales.²⁰

4.5 Elaboración y procesamiento.

La ruta mas popular y barata para la elaboración del material compuesto A356/SiCp y en general para los materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas cerámicas es la del procesamiento por solidificación, es decir, la incorporación de las partículas de refuerzo en la aleación en estado líquido para posteriormente permitir la solidificación bajo condiciones apropiadas que resulten en una microestructura y propiedades óptimas.^{1, 4, 9, 10}

• Técnicas de introducción de partículas

Existen varias técnicas para la introducción de partículas de refuerzo en la aleación fundida, todas ellas pretenden la incorporación de las partículas por algún medio mecánico que permita ponerlas en contacto íntimo con el metal fundido y conseguir que este último las humecte.¹

De manera general los procesos de elaboración de materiales compuestos por solidificación se pueden agrupar de la siguiente manera:^{1, 10}

- a) **Técnicas de inyección de polvos.** Las partículas son inyectadas en un chorro de gas inerte dentro de la aleación fundida y las partículas se incorporan al metal mientras las burbujas de gas coalescen y flotan hacia la superficie.

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCION FINAL DEL REFORZANTE

- b) *Fabricación in situ*. Se agregan las partículas a un chorro de metal líquido mientras se llena el molde donde ha de solidificar.
- c) *Agitación mecánica*. Se aplica un agitador mecánico de paletas a la aleación fundida para formar un vórtice (vortex) en el cual se adicionan las partículas, estas se distribuyen homogéneamente debido a la agitación del metal líquido.
- d) *Adición de pellets*: Se forman pequeños pellets o briquetas de una mezcla de polvo de la aleación base y las partículas de refuerzo para posteriormente adicionarlas al baño metálico mientras se agita manualmente o mecánicamente.
- e) *Aceleración centrífuga de la partículas en el baño metálico*: Se emplea la aceleración centrífuga para distribuir las partículas en el baño metálico, este método es empleado para obtener refuerzo selectivo en piezas coladas.
- f) *Empuje mecánico*. Se introduce y dispersa el reforzante en el metal fundido por medio de dos cilindros reciprocantes o cualquier otro dispositivo reciprocante.
- g) *Ultrasonido*. Promueve la incorporación por medio de ultrasonido de alta intensidad aplicado al baño metálico.

De entre los métodos mencionados el mas aplicado y el que cumple mejor con los propósitos de rentabilidad tecnológica es el de agitación mecánica por medio de propelas.^{4,10} La agitación mecánica del baño metálico también es empleada como tecnología de reciclamiento de los materiales compuestos de matriz metálica con refuerzo en forma de partículas.⁹

Para obtener un material útil con propiedades mecánicas óptimas es necesario asegurar una distribución homogénea del reforzante en la matriz y para alcanzar este objetivo es necesario un cierto grado de entendimiento y control sobre las diversas variables de proceso, tanto en la fabricación como en el procesamiento y reciclaje de las aleaciones colables reforzadas.⁹

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

Como ya se mencionó anteriormente, el proceso de elaboración de materiales compuestos de matriz metálica más utilizado es el de agitación mecánica, y entre sus variables críticas de proceso se encuentran las siguientes^{10, 24}

- Viscosidad de la combinación metal líquido - reforzante
- Grado de agitación del metal líquido con las partículas.
- Temperatura de mezclado.
- Propiedades térmicas del reforzante y la matriz.
- Presencia de fuerzas externas
- Tamaño, forma y porcentaje en volumen de partículas adicionadas.
- Morfología de solidificación de la fase primaria.
- Interacción entre la fase primaria y las partículas (mojado).
- Segregación de las partículas por la fase primaria.
- Velocidad de enfriamiento.

Cada una de estas variables ejerce una influencia sobre la distribución final de las partículas de refuerzo; el efecto de algunas de ellas es mas crítico que el de las otras y la facilidad o dificultad para controlarlas es también variable. Por otro lado, no todas las variables mencionadas son independientes y los efectos combinados pueden, o no, ser de importancia.

Algunas de las variables ejercen mas de un efecto sobre las propiedades finales del material compuesto fabricado, por ejemplo, la agitación no solo dispersa de manera homogénea las partículas de refuerzo sino también determina la cantidad de óxidos introducidos al seno del metal fundido, el atrapamiento de gases como el H_2 y, por lo tanto, la porosidad del material, etc.

A continuación se discutirá con mayor detalle la naturaleza de estas variables.

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

♦ *Técnicas para promover el mojado de las partículas.*

Debido a la importancia que posee el mojado de las partículas por el baño metálico, es un objetivo promoverlo durante la elaboración de las aleaciones reforzadas. Para este fin existen diversas técnicas que pretenden disminuir el ángulo de mojado, aumentando la energía superficial del sólido (γ_w), disminuyendo la energía interfacial sólido/líquido (γ_{sl}), o disminuyendo la tensión superficial del líquido (γ_l).¹⁰ Las técnicas para promover el mojado se pueden agrupar como sigue:^{1,10,28}

- 1) *Recubrimientos metálicos:* Al recubrir las partículas con metales como Ni y Cu se cambia la interfase metal/cerámico por una metal/metal que posee energía de incorporación menor.
- 2) *Tratamiento térmico de las partículas:* Por este medio se acondicionan las partículas al causar desorción de los gases normalmente adsorbidos en su superficie proporcionándole un estado energético superior.
- 3) *Irradiación ultrasónica del baño:* La energía transmitida por medio del ultrasonido causa desorción parcial de los gases adsorbidos en las partículas y promueven el mojado.
- 4) *Promoción de la reacción metal-cerámico:* Favoreciendo la formación de productos de reacción estables y congruentes entre la aleación fundida y las partículas de refuerzo se puede mejorar el mojado al disminuir la energía interfacial sólido-líquido. Cabe señalar que solo unos cuantos sistemas metal-cerámico poseen productos de reacción que favorecen el mojado y no ocasionan el detrimento de las propiedades mecánicas.
- 5) *Adición de elementos reactivos al baño metálico:* El uso de elementos reactivos promueve el mojado reduciendo la tensión superficial del baño metálico, disminuyendo la tensión interfacial sólido/líquido o induciendo reacción química entre la aleación y las partículas.

Una vez que se ha logrado la incorporación de las partículas a la aleación fundida existen dos posibles rutas de procesamiento por solidificación:

- 1) El empleo inmediato de la aleación reforzada para la elaboración de piezas finales o casi finales, por medio de colada en moldes de arena en verde o permanentes, por gravedad o a presión.
- 2) Elaboración de lingotes que posteriormente servirán como materia prima para la fabricación de piezas por colada, extrusión o rolado de la aleación reforzada.

Cuando se procesa la aleación reforzada por medio de extrusión, rolado o forjado se provoca flujo plástico de la matriz que da como resultado una redistribución del reforzante. Estos procesos y sus variables se encuentran fuera de los intereses del presente trabajo.

Debido a las ventajas en sencillez, economía y volumen de producción que presenta el procesamiento de las aleaciones por medio de fusión y colada para la elaboración de piezas de geometría compleja, este procedimiento se ha adoptado para las aleaciones reforzadas con partículas, tales como la A356/SiCp.^{9,11}

Cuando se procesan las aleaciones reforzadas con partículas por medio de fusión y colada, ya sea que se parta de un lingote primario o de material reciclado, se encuentra uno con dos fenómenos que determinan la distribución final del reforzante; el asentamiento y la solidificación. En estos dos fenómenos intervienen diversos parámetros del proceso. Durante la fusión del material compuesto se debe considerar:^{24,30}

- 1) *La temperatura y tiempo de precalentamiento*: el objetivo es disminuir la humedad y eliminar suciedad que posteriormente pudiera inducir la formación de inclusiones o productos de la reacción sólido-líquido que afecten la humectabilidad de la partícula o la viscosidad del baño metálico.
- 2) *Temperatura de trabajo del horno*: Si se emplean temperaturas por encima de 735°C la cinética de reacción de las partículas de SiC con la matriz se incrementa y se modifica la viscosidad del sistema de manera heterogénea de tal manera que se favorece la formación

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

de gradientes de temperatura y asentamiento preferencial de las partículas, además de disminuir la fluidez del material y prevenir el llenado correcto de los moldes.

- 3) *Velocidad de agitación:* Cuando la aleación reforzada alcanza la temperatura de la zona pastosa las partículas de SiC comienzan a asentarse por diferencia de densidades, siendo entonces necesario aplicar agitación. Una agitación muy intensa puede promover oxidación excesiva del baño metálico e introducción de óxidos al seno del mismo. Una agitación deficiente permite el asentamiento de las partículas.
- 4) *Tiempo de agitación:* El mantener la agitación por mas tiempo del necesario, y especialmente a altas temperaturas, produce defectos en el material por atrapamiento de óxidos, modifica la viscosidad y distribución del reforzante y promueve el atrapamiento de gases.
- 5) *Tratamiento del metal líquido:* En el caso de las aleaciones reforzadas no es posible por los medios convencionales ya que esto implica el arrastre de las partículas y la deficiencia de reforzante en ciertas zonas. La adición de elementos reactivos es una práctica común para promover el mojado de las partículas por el metal líquido y para modificar la morfología de la fase eutéctica en las aleaciones base Al-Si.

Posteriormente, al vaciar el metal fundido en los moldes, los fenómenos de asentamiento y solidificación se superponen para dar como resultado la distribución final del reforzante. Las variables que se debe considerar durante esta etapa son:^{22,24,31}

- a) *Temperatura de colada:* Proporciona el gradiente de temperatura promotor de la solidificación. Si esta temperatura es muy baja el material solidificara antes de que se llene adecuadamente el molde y si es muy alta se promueve la reacción entre el SiC y la aleación base, disminuyendo su fluidez y ocasionando mal llenado del molde.
- b) *Diseño del sistema de colada:* El diseño de corredores, ataques, sistemas de alimentación, etc. determina los patrones de flujo tanto en colada a gravedad como en colada bajo presión, así como los tiempos y velocidades locales de solidificación influyendo, por lo tanto, de gran manera sobre el asentamiento y el comportamiento de atrapamiento/rechazo de las partículas por la fase primaria.

- c) *Velocidad de enfriamiento*: La velocidad de extracción de calor del molde proporciona la forma de la intercara de avance de solidificación. Dependiendo de la humectabilidad de la partícula, la forma y tamaño de la fase primaria y su velocidad de avance, ocurre el fenómeno de atrapamiento o rechazo del reforzante por parte de la fase primaria. La velocidad de enfriamiento en un molde está dada por la velocidad de extracción de calor y sobre esta influyen; i) El material de que está hecho el molde; los moldes permanentes o de colada a presión son metálicos y poseen una mayor capacidad de extracción de calor que los de arena, y ii) Las condiciones térmicas de los alrededores del molde.

4.6 Resumen

La literatura aporta varios modelos teóricos para predecir la velocidad crítica de solidificación por debajo de la cual ocurrirá el empuje de las partículas por parte de la fase primaria, así como criterios para la predicción del atrapamiento o rechazo de las mismas. Los resultados experimentales encontrados para la aleación A356/SiCp demuestran que las partículas son rechazadas por la fase primaria que solidifica bajo las condiciones industriales de proceso, en contra de lo que predicen algunos modelos teóricos de empuje de partículas.

El rechazo de las partículas es fuertemente influenciado por la humectabilidad de las mismas por parte del metal líquido y la velocidad de avance de la intercara sólido/líquido.

Para mejorar la humectabilidad de la partícula existen técnicas como el acondicionamiento de la superficie, adición de agentes surfactantes y promoción de la reacción entre las partículas cerámicas y el metal líquido, de las cuales han demostrado ser útiles las dos últimas. No obstante, no importa cual técnica se elija para promover la humectabilidad, el problema de segregación de las partículas siempre es influenciado en gran manera por la velocidad de extracción de calor que determina la morfología y velocidad de avance del frente de solidificación.

SEDIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN FINAL DEL REFORZANTE

Por otro lado durante la fusión y permanencia en estado líquido de la aleación reforzada A356/SiCp, ocurre el fenómeno de asentamiento de las partículas de refuerzo. Dicho fenómeno puede ser representado por medio de la ecuación de Stokes para asentamiento obstaculizado. Son variables que afectan al asentamiento: la humectabilidad de la partícula, la viscosidad y, por lo tanto, la temperatura y porcentaje de Si en la aleación que determinan el avance de la reacción de la ecuación (5).

Durante el procesamiento por solidificación de la aleación reforzada se sobrepondrán los efectos de empuje por parte de la fase primaria y sedimentación de las partículas. Según resultados obtenidos con la ecuación de Stokes existe una velocidad de asentamiento de las partículas para cada sistema que debe ser igualada por la velocidad de avance de la intercara sólido/líquido para evitar que el asentamiento por gravedad influya ostensiblemente sobre la distribución final del reforzante.

5. DISCUSIÓN

Se han planteado las condiciones tecnológicas y de mercado actuales que demandan el surgimiento de una nueva generación de materiales de ingeniería de alto desempeño. Entre los sectores que están promoviendo esta revolución en la ciencia e ingeniería de los materiales se encuentra la industria automotriz que demanda materiales mas ligeros para sus motores y que sean fácilmente procesables por la ruta de solidificación, para lograr los niveles de producción deseados.^{3, 6, 11, 18, 25, 27, 30}

El sistema mas prometedor y sobre el que se han enfocado los esfuerzos es el sistema Al-Si-SiCp, en especial la aleación reforzada A356/SiCp, la cual posee propiedades mecánicas atractivas como son: alta rigidez, resistencia a la tracción y a la vibración, temperatura de fusión baja y buena fluidez (bajo condiciones controladas), baja densidad y coeficiente de expansión térmica, alta resistencia a la termofluencia y, en general, mejor desempeño que la aleación base a altas temperaturas.^{3, 4, 24, 30, 31, 32}

Las propiedades mecánicas de esta aleación reforzada son el resultado de la combinación de las respectivas propiedades mecánicas de la aleación base y el reforzante mas los efectos de la unión metal-cerámico y la distribución de las partículas de refuerzo en la aleación.^{9, 13}

El dicho popular que reza "una cadena es tan fuerte como el mas débil de sus eslabones" es apto para describir la situación de la intercara de unión metal-cerámico; si esta es fuerte las propiedades mecánicas del material serán óptimas, de lo contrario no se obtiene el máximo desempeño del sistema.¹³

Además, la distribución de las partículas influye sobre la transferencia de esfuerzos entre matriz y reforzante y por lo tanto sobre el acomodo de las deformaciones plásticas/elásticas que proporcionan los mecanismos adicionales de endurecimiento y

otorgan su alta resistencia a la tracción a estos materiales. De la misma manera, casi todas las propiedades mecánicas, a excepción del módulo de elasticidad, son sensibles a la distribución del reforzante; entre mas homogénea sea esta, mejor y mas isotrópica será la propiedad mecánica. Es por eso que se debe prestar especial atención a las propiedades de la intercara metal cerámico y a la distribución final del reforzante en la aleación reforzada.^{2, 4, 7, 9, 13}

La ruta de procesamiento escogida para estas aleaciones reforzadas ejerce una gran influencia sobre las características de la intercara de la unión metal/cerámico y sobre la distribución final de las partículas de refuerzo.^{3, 14, 26, 34}

El tema de interés para el presente trabajo ha sido el de la distribución final del reforzante, y en el procesamiento por solidificación existen dos fenómenos que determinan esta: El atrapamiento/rechazo de las partículas por parte de la fase primaria que solidifica y la sedimentación por gravedad del material reforzante. En ambos casos, la humectabilidad de las partículas, estabilidad termodinámica del sistema, temperatura, viscosidad de la aleación en estado líquido, tamaño de partícula del reforzante, fracción en volumen de SiC, energía aplicada al sistema (agitación) y velocidad de enfriamiento, son las variables a controlar.^{1, 4, 7, 8, 9, 12, 15, 23, 24, 30}

Experimentalmente se ha encontrado que el rechazo de las partículas por la fase que solidifica ocurre en la mayoría de las condiciones de proceso, no obstante, mejorando las condiciones de humectabilidad de las partículas y con una velocidad de solidificación que propicie el crecimiento de dendritas "finas" se puede promover la nucleación sobre las partículas de SiC dando lugar a un rechazo "disperso" que beneficie la homogeneidad de la distribución final del reforzante, obteniéndose así un material útil.^{1, 7, 9, 10, 12, 15, 23, 28, 29, 33}

En el caso de la sedimentación se ha hallado evidencia experimental de que esta ocurre en una extensión importante y con una velocidad considerable para el procesamiento en masa de la aleación reforzada A356/SiCp.^{9, 31} El mejorar la humectabilidad también es una

práctica recomendada para evitar el asentamiento ya que influye macroscópicamente al evitar la aglomeración de las partículas y microscópicamente al modificar las fuerzas de arrastre que ejerce el líquido sobre la partícula y por lo tanto modifica la velocidad de asentamiento.^{1, 24, 28, 31, 33}

Existen diferentes técnicas para mejorar la humectabilidad como son adición de metales reactivos al baño, promover la reacción metal-cerámico, acondicionamiento de la superficie de la partícula, radiación con ultrasonido, etc.^{1, 28, 33}

En el diseño del proceso es importante obtener un estimado de la velocidad de asentamiento de las partículas para tratar de obtener, por medio de la velocidad de enfriamiento, una velocidad de avance de intercara s/l del mismo orden de magnitud, ya que este es el criterio para disminuir el efecto de la sedimentación sobre la distribución final del reforzante.^{4, 7}

Finalmente se puede decir que en el asentamiento por gravedad del SiC influyen una cantidad de factores que pueden ser analizados por medio de la expresión de Stokes para la velocidad de sedimentación obstaculizada. En este primer acercamiento se pretende observar el efecto de las variables de proceso sobre las propiedades que considera la expresión anteriormente citada con el objeto de obtener una base de análisis que se empleara como punto de partida en la investigación futura.²⁹

El material expuesto a través de este trabajo es producto de una amplia investigación y fue programado con el objetivo de proporcionar un panorama integral que incluye las condiciones y demandas de la tecnología actual que propician el surgimiento de los materiales compuestos para posteriormente plantear la influencia de las variables del procesamiento por solidificación sobre la distribución final del reforzante, haciendo énfasis en el fenómeno de asentamiento por gravedad y su principal competidor, el empuje de las partículas por parte de la fase primaria.

DISCUSIÓN

Se pretende de esta manera proporcionar los conocimientos básicos y las herramientas de análisis para plantear posteriores investigaciones que profundicen el conocimiento e implementen el avance tecnológico en el campo de las aleaciones reforzadas procesables por la ruta de solidificación.

Se pretende de esta manera proporcionar los conocimientos básicos y las herramientas de análisis para plantear posteriores investigaciones que profundicen el conocimiento e implementen el avance tecnológico en el campo de las aleaciones reforzadas procesables por la ruta de solidificación.

6. CONCLUSIONES

Dado el estado actual de la tecnología y para satisfacer un mercado global cada vez mas competitivo, es necesario el desarrollo de una nueva familia de materiales compuestos: los materiales compuestos procesables por solidificación. Tal es el caso del material compuesto A356/SiCp.

Las propiedades mecánicas de estos materiales dependen en gran manera de la distribución del reforzante en la aleación base, es por eso que se deben controlar las variables de proceso que determinen el comportamiento de atrapamiento/rechazo de las partículas por parte de la fase primaria y la sedimentación por gravedad del reforzante.

En los procesos industriales las principales variables a controlar son: i) Temperatura de proceso, ii) Agitación mecánica (intensidad y tiempo) y iii) Velocidad de solidificación.

Es importante promover la humectabilidad de las partículas de SiC ya que esto facilita su incorporación y dispersión en la aleación fundida y propicia la nucleación heterogénea durante la solidificación, resultando ambas en una distribución mas homogénea del reforzante

Las condiciones ideales de procesamiento dependen de las características particulares del sistema (D_p , % volumen de reforzante, Secuencia de proceso, etc.). No obstante, existen algunos lineamientos generales que pueden servir de guía [4], en general la investigación indica que son necesarios "altos" niveles de agitación, tamaños de partícula pequeños ($<10 \mu m$), porcentajes de reforzante bajos ($<15\%$) y temperaturas "altas" de trabajo. Una mayor discusión del tema se encuentra en el artículo de referencia.

En el procesamiento de los materiales compuestos reforzados con partículas cerámicas existe la prohibición del proceso convencional de desgasificado, tan ampliamente utilizado en las aleaciones de aluminio, ya que esto implicaría arrastrar las partículas de refuerzo. Es por ello que se debe seguir una técnica de fusión adecuada para evitar el atrapamiento de gases y también durante el procesamiento se debe poner atención al tiempo e intensidad de agitación del baño con el mismo fin.

Es necesaria la creación de modelos teóricos que expliquen el comportamiento de atrapamiento/rechazo, que incluyan las propiedades térmicas de los materiales, las condiciones de solidificación y la curvatura de la intercara de solidificación, ya que los que existen actualmente carecen del refinamiento necesario.

En el caso de la simulación, el asentamiento de las partículas de SiC ha sido reproducido con bastante éxito para la condición metalostática por medio de la ecuación de Stokes para asentamiento obstaculizado, las condiciones que se deben cumplir para poder aplicarla son: temperatura y contenido de Si que permitan condiciones de viscosidad cuasi-newtoniana ($\%Si > 10$, $T < 735\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Bajo condiciones metalodinámicas la ecuación de Stokes pierde valor y es necesario cuantificar la transferencia de momento de los dispositivos de agitación hacia las partículas y el baño metálico, para establecer los campos de velocidades correspondientes.

Actualmente es posible, y necesario, elaborar modelos mecanísticos para el asentamiento obstaculizado de las partículas que predigan el comportamiento bajo agitación. Estos modelos se elaboran en base a la ecuación general de transporte de momento y se resuelven con ayuda de códigos generales para ecuaciones de transporte tales como CONDUCT₂ y PHOENICS₂. La utilidad de tales modelos es en el diseño de equipo, tal como los agitadores, e ingeniería de proceso para las aleaciones reforzadas.

CONCLUSIONES

Durante los últimos diez años este tipo de materiales ha sido objeto de intensa investigación y se posee hasta el momento un cuerpo considerable de conocimientos, no obstante, aun hace falta investigación en este campo que contribuya al entendimiento de las interacciones metal-cerámico durante el procesamiento y que reditue en la implementación de la tecnología correspondiente.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. F. DELANAY, L. FROYEN, A. DERUYTTERE, The wetting of solids by molten metals and its relation to the preparation of metal-matrix composites, *Journal of Materials Science* v.22 (1987) pp. 1-16.
2. D. LOYD, The elevated temperature behavior of particle reinforced Al-matrix composites, *High performance composites: Commonality of Phenomena, TMMMS 1994*, PP 465-473.
3. W. HARRYGAN, Metal matrix composite applications, *Mechanical properties of metallic composites 1994*, pp 759-773
4. F. RANA, B. DHINAW, D. STEFANESCU, Optimization of SiC particle dispersion in Aluminium metal-matrix composites, *AFS transactions* V.41 (1989), pp 255-263.
5. A. LABIB, H. LIU, F. SAMUEL, Effect of cleanliness on the properties of an Al-10 wt pct. Si-10 vol. pct. SiC (p) composite, *Metallurgical Transactions A*, v. 24A (july 1993), pp 1631-1645.
6. T. REINHART, L. CLEMENTS, Introduction to composites, *Engineered Materials Handbook* v.1 (1989), pp 27-34
7. P. ROHATGI, R. ASTHANA, S. TEWARI, C. NARENDRANATHI, The role of particle pushing in solidification synthesis of composites with different types of matrices, *High performance composites; Commonality of phenomena, TMMMS (1994)*, pp 93-107.
8. R. BUI, R. OUELLET, D. KOCAEFE, A two phase flow model of the stirring of Al-SiC composite melt, *Metallurgical and Materials transactions B* v.24B (august 1994), pp 607-620.
9. D. LOYD, Particulate reinforced composites produced by molten metal mixing, *High performance composites for the 1990's, TMMMS (1991)*, pp 33-46.
10. P. ROHATGI, R. ASTANA, S. DAS, Solidification structures and properties of cast metal-ceramic particle composites, *International Metals Reviews* v.31 num. 3 (1986), pp 115-139.

11. J. MANSON, New demands on manufacturing of composite materials. High performance composites; Commonality of phenomena, TMMMS (1994), pp 3-19.
12. A. MORTENSEN, Solidification of reinforced metals, Solidification of metal matrix composites, TMMMS (1990), pp 1-21.
13. J. SEKHAR, A. TRIVEDI, S. HAN, J. SEKHAR, Microstructural development in interfiber regions of directionally solidified composites, Solidification of metal matrix composites, TMMMS (1990), pp 23-37.
14. J. SEKHAR, R. TRIVEDI, Solidification interface configurations during the processing of particulate composites, Solidification of metal matrix composites, TMMMS (1990), pp 39-49.
15. P. ROHATGI, R. ASTHANA, F. YARANDI, Formation of solidification microstructures in cast metal matrix particle composites. Solidification of metals matrix composites, TMMMS (1990), pp 51-75.
16. D. ESTEFANESCU, F. RANA, A. MOITRA, S. KACAR, Kinetics of gas-to liquid and liquid-to-solid transfer of particles in metals matrix composites. Solidification of metals matrix composites., TMMMS (1990), pp. 77-89.
17. A. MOITRA, B. DHINDAW, D. STEFANESCU, Directionally solidified Al / SiC and Al / Graphite composites, Solidification of metals matrix composites , TMMMS (1990), pp. 91-101.
18. H. POLLACK, Advanced composites (Cap. 19), Materials Science and Metallurgy, Prentice Hall (1988), pp, 505-512.
19. L. BROUTMAN, R. KROCK, Introduction and Review (Cap. 1) Composite materials, vol 1, Interfaces in metal matrix composites, Academic Press (1974), pp. 2-30.
20. G. BALDI, R. CONTI, E. ALARIA, Complete suspension of particles in mechanically agitated vessels, Chemical engineering Science, Pergamon Press (1977), pp 21-24
21. D. HULL, Materiales compuestos, Ed. Reverté (1987), pp 64-67.
22. R. SAIFULLIN, Physical chemistry of inorganic polymeric and composite materials, Ed. Ellis Horwood (1992), pp 78-79.
23. P. ROHATGI, Cast Metal Matrix Composites, metals Handbook, ASM, 9th Edition, Vol. 15 (1988).

24. R. CARITY, Foundry experiences and variables in casting silicon carbide reinforced aluminium Alloys. AFS trans. (1989), pp 743-746.
25. M. ASHBY, Materials and shape, Acta Metalurgica et Materiala (1991) Vol 39 No. 6. pp 1025-1039.
26. G. SMITH, S. TOLL, J.A. MÅNSON, Integrated Processing of Multi-functional Composite structures, Proceedings of the 39th International SAMPE Symposium (1994) p. 2385
27. K. BUDINSKI, Engineering Materials Properties and Selection, (Cap. 1) Prentice Hall (1983) p. 16
28. H. LIU, T. SUZUKI, F. SAMUEL, On the wettability of ceramic fibers by metals in various metal matrix composite systems, Extraction, refining and fabrication of light metals (1991), vol. 24, pp. 83-98
29. M. GALLERNEAULT, M. KAYA, R. SMITH, G. DELLAMORE, Ultimate sediment concentration in directionally solidified AlSi-SiC particulate metal matrix composites, Extraction, refining and fabrication of light metals (1991), vol. 24, pp. 69-81.
30. A. GARCIA, M. MENDEZ, A. FLORES, Desarrollo y aplicaciones de materiales compuestos metal cerámico, 3er. panel internacional del procesamiento del aluminio (1994), pp. 241-254.
31. DURALCAN, Composites of casting, Mechanical and physical properties data of foundry composites, Technical information (1990).
32. K. MARSDEN, Comercial potencial for composites, Journal of metals (june 1985), p-59.
33. V. LAURENT, D. CHANTAIN, N. EUSTATHOPOULOS, Wettability of SiC by aluminium and Al-Si alloys, Journal of Materials Science (1987) vol. 12, pp.
34. A. LABIB, H. LIU, F. SAMUEL, Effect of Remelting, Casting and Heat Treatment on Two Al-Si SiC-Particle Composites, AFS Transactions (1993) vol. 123, pp. 1033-1041.

8. ANEXOS

8.1 Procedimientos de fabricación para productos plásticos reforzados.²¹

Procedimiento	Resumen de los métodos de procesado y fabricación
<i>Procesos en molde abierto</i>	
1. Método de contacto manual (Hand lay-up)	Se colocan sobre el molde capas de fibra enrollada, mechas trenzadas y otros tejidos de fibras y se impregnan con resina, pasando un rodillo sobre ellas. Se ponen capas hasta que se llegue al espesor del diseño. El moldeado cura sin calor ni presión.
2. Proyección (spray-up)	Se proyectan simultáneamente hilos cortados y resina a un molde preparado y se pasa el rodillo antes que el molde endurezca.
3. Saco de vacío, Saco de presión, Autoclave	Se preimpregnan capas de fibras, normalmente hojas unidireccionales, con resina y se curan parcialmente (estado β) para formar un pre-impregnado. Las hojas de pre-impregnado se colocan en la superficie del molde en orientaciones determinadas, se cubren con un saco flexible y se consolidan con otro de vacío o de presión en autoclave a la temperatura de curado requerida.

4. Arrollamiento de filamentos

Mechas o hilos continuos se pasan sobre rodillos y guías y pasan por un baño de resina y se enrollan después, usando una maquina controlada por programa, sobre un mandril con ángulos preestablecidos. la resina cura parcial o totalmente antes de sacar el componente, normalmente un tubo, del mandril.

5. Moldeo por centrifugación

Se introducen mezclas de fibras y resina en un molde giratorio y se dejan curar *in situ*.

ESTA TESIS NO PUEDE
SER PRESTADA A LA BIBLIOTECA

7.1 Procedimientos de fabricación para productos plásticos reforzados (continua)

Procedimiento	Resumen de los métodos de procesado y fabricación
<i>Procesos en molde cerrado</i>	
6. Moldeo por compresión en caliente	Las matrices o útiles, calientes y acoplados, se cargan con materia prima (compuestos de hojas continuas SMC, Premix o pasta DMC, tejido o pre-impregnado unidireccional) y se comprimen para que se adapten a la cavidad y curen.
7. Moldeo por inyección, moldeo de transferencia.	Se inyectan polímeros fundidos o en estado plástico mezclados con fibras cortas, normalmente a alta presión, en la cavidad de un molde ranurado y se deja solidificar o curar.
8. Pultrusión.	Una alimentación continua de fibras en una orientación preseleccionada se impregna con resina y se comprime a través de un útil calentado (trefila) para darle la forma de la sección final. (p. ej., tubos o perfiles en Y). Durante el paso por la matriz se produce un curado parcial o total.
9. Moldeo por prensado en frío.	Es un proceso a baja presión y baja temperatura en el que las fibras se impregnan con resina y se comprimen entre dos útiles macho y hembra. El

10. Inyección de resina.

calor se genera durante el curado.

Se ponen fibras en forma de tejido en el útil, el cual se cierra después. Entonces se inyecta la resina a baja presión en la cavidad y fluye entre las fibras hasta llenar el espacio del molde.

**11. Moldeo por inyección con
relación reforzada (RRIM).**

Un sistema de resina de curado rápido que consta de dos componentes que se mezclan inmediatamente antes de la inyección. Las fibras, o se ponen en el molde cerrado antes de inyectar la resina o se añaden cortadas en trozos y desordenadas a uno de los componentes de la resina para formar una mezcla antes de la inyección

8.2 Propiedades Físicas y Químicas del SiC²³

Existen dos formas conocidas de SiC; la forma β cristaliza con una estructura de tipo diamante ($a = 435.96$ pm) y la forma α tiene una estructura hexagonal ($a = 307.8$, $c = n \cdot 251.8$ pm, donde $n > 2$). La transformación $\beta \rightarrow \alpha$ es monotrópica y tiene lugar en el rango de 2000-2100 °C.

8.2.1 Características de algunos politipos comunes de α -SiC

Patrón cristalográfico	Notación después de Ramsdale	Notación Tradicional	Z	c (pm)
AB	2H	hex	2	504.8
ABAC	4H	SiC III	4	1008.1
ABCACB	6H	SiC II	6	1511.83
ACABCBABCCACBCAB	15R	SiC I	15	3781.7
ABCACBACBCBACBCABCB	21R	SiC IV	21	5289
etc.	33R	SiC VI	33	8310
	51R	SiC V	51	12843

Los numerales árabes denotan el número de capas (n) y, correspondientemente, el número de unidades fórmula Z (o moléculas de SiC) en un cristal unitario. Las letras H y R denotan los sistemas hexagonal o romboedral.

7.2 Propiedades Físicas y Químicas del SiC (continua)

En la síntesis industrial de SiC, cuyo nombre comercial es carborundum, se obtienen varios politipos de la forma α , los diferentes grados comerciales se distinguen por su color, el cual depende de la presencia de impurezas isomorfas e intersticiales.

8.2.2 Tipos industriales de α -carborundum

Tipo	Negro	Verde	Amarillo
ρ (g cm ⁻³) [*]	3.217	3.214	3.219

Composición (%)

SiC	95.0-96.4	97.7-99.8	98.6
Al ₂ O ₃	0.31	0.18	0.17
Fe	0.22	0.21	0.09
CaO	0.21	0.63	0.32
Si	0.09	0.09-0.6	0.43

*La densidad teórica del α -SiC puro es 3.166 g cm⁻³.

La temperatura de descomposición del SiC es de $2840 \pm 40^\circ\text{C}$ a una presión de 3.5 Mpa. La oxidación en aire comienza en el rango de 600 a 800 °C y la velocidad de reacción se acelera en presencia de CuO, V₂O₅ y K₂O. Es resistente a la mayoría de los ácidos pero se oxida en presencia de cloro o de álcalis fundidos, en presencia de KNO₃, O₂ y otros oxidantes.

7.2 Propiedades Físicas y Químicas del SiC (continua)**8.2.3 Propiedades Físicas y Térmicas.**

$$\alpha_T = 180 \text{ Gpa}$$

$$\alpha_L = 250 \text{ Gpa}$$

$$E = 370 \pm 30 \text{ Gpa}$$

Rango de Temperatura (K)	$C_{p\text{promedio}} \text{ (KJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$
298-1670	150
1670-2000	54

Tipo de SiC	CET (K^{-1})
α -SiC	4.7 E-6
β -SiC	5.94 E-6

8.3 Propiedades Físicas de la aleación A356

$$\rho = 2.685 \text{ g cm}^{-3} \text{ (a } 20^\circ\text{C)}$$

$$\lambda = 389 \text{ KJ kg}^{-1}$$

$$C_p = 963 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\nu = 0.33$$

Rango de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	CET ($\mu\text{m m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
20-100	21.5
20-200	22.5
20-300	23.5

TT y procesamiento	K ($\text{w m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T51, arena	167
T6, arena	151
T7, arena	155
T6, molde permanente	159