



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CARACTERIZACION MECANICA Y METALOGRAFICA DE MATERIALES COMPUESTOS DEL TIPO AI-B4C(p) ELABORADOS POR EL METODO DE VORTICE

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA (AREA MECANICA) PRESENTA: VICTOR MANUEL CORDERO TERCERO

ASESOR: DR. JOSE GONZALO GONZALEZ REYES

281504



MEXICO, D.F.

1999
2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA
MECANICA E INDUSTRIAL

Asunto: Solicitud de Jurado para
Examen Profesional.

Director de la Facultad de Ingeniería
de la UNAM
Presente.

El (a) Señor (ita) Victor Manuel Cordero Tercero
registrado en esta facultad con el número de cuenta 8906421-2, en la carrera de
Ingeniero Mecánico Electricista (Área: Mecánica), habiendo satisfecho
los requisitos académicos necesarios para realizar sus trámites de examen profesional, le solicita
atentamente autorizarle el siguiente jurado:

PRESIDENTE : Ing. Ubaldo Márquez Amador

VOCAL : Dr. Gonzalo González Reyes

SECRETARIO : Dr. Arturo Barba Pingarron

1a. SUPLENTE: Ing. Magdalena Trujillo Barragan

2a. SUPLENTE: Ing. Alejandra Garza Vazquez

También se informa que la fecha del examen profesional se realizara: MIÉRCOLES 1 DE DIC. 99.

Atentamente.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México D.F., a 27 de octubre de 1999

COORDINACIÓN DE SEMINARIOS

ENTERADO

Dedicatoria

A mis padres Juana y Luis con mucho cariño, de quienes he recibido plena confianza, libertad y responsabilidad en todas las actividades que he realizado. Gracias por la vida y por su inmenso apoyo.

A la familia Tercero Mendoza por su valiosa ayuda incondicional, sin la cual hubiera sido muy difícil mi educación escolar.

A Sandra Pascual por los tiempos compartidos, lapsos de reflexión, aprendizaje y realización.

A mis hermanos María Guadalupe, José Luis y Blanca Alicia de quienes he aprendido los valores primarios del ser humano. Ellos han sido ejemplos de tesón y superación que he admirado siempre.

En memoria de mi abuelo, Sr. Jesús Tercero Miranda †, de quien tengo recuerdos de bienestar y felicidad que él nos ofreció a mi y a mis hermanos.

Agradecimientos

Quiero agradecer muy especialmente al Dr. José Gonzalo González Reyes, director de esta tesis, por haberme brindado la oportunidad de trabajar en el tema de los materiales compuestos; por el tiempo dedicado a la planeación, realización, redacción y conclusión de este trabajo; por su confianza y amistad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por los conocimientos adquiridos en el área de Ingeniería Mecánica; al Instituto de Investigaciones en Materiales por el uso de las instalaciones y equipos; a CONACYT por el importante apoyo económico recibido durante mi estancia.

A los sinodales: Ml. Ubaldo Márquez , Dr. Arturo Barba, Ing. Magdalena Trujillo e Ing. Alejandra Garza por la revisión del contenido del texto; por sus valiosos comentarios y sugerencias dirigidos hacia la obtención de un mejor trabajo.

A los profesores MC. Alejandro García de la Facultad de Química y Ml. Ubaldo Márquez de la Facultad de Ingeniería por las facilidades dadas para el uso de los equipos de pruebas mecánicas destructivas.

A los compañeros del Instituto por el apoyo recibido durante el trabajo experimental: Iván Montoya, Socorro Valdés, Gabriel Lara, Apuleyo Hernández, Omar Novelo.

Hago extensivo mi agradecimiento a todo el personal del Instituto de Investigaciones en Materiales por los servicios recibidos. En especial a los señores Martín Serrano e Ismael López del taller de máquinas y herramientas; al personal de la biblioteca por el apoyo durante la investigación documental; al Sr. Eduardo Caballero por su excelente trabajo en el revelado e impresión de las fotografías; a la Dra. Mirna Estrada por las enseñanzas en el manejo de los reactivos químicos; a la Sra. Rosario Santibañez, secretaria del departamento de metálicos y cerámicos, por su atención y ayuda.

Ante la cal de una pared que nada
nos veda imaginar como infinita
un hombre se ha sentado y premedita
trazar con rigurosa pincelada
en la blanca pared el mundo entero:
puertas, balanzas, tártaros, jacintos,
ángeles, bibliotecas, laberintos,
anclas, Uxmal, el infinito, el cero.
Puebla de formas la pared. La suerte,
que de curiosos dones no es avara,
le permite dar fin a su porfía.
En el preciso instante de la muerte
descubre que esa vasta algarabía
de líneas es la imagen de su cara.

Jorge Luis Borges

Índice.....	i
Lista de figuras.....	iii
Lista de tablas.....	vi
Lista de abreviaturas.....	vii

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

1.1. Introducción.....	4
1.2. Materiales compuestos.....	4
1.2.1. <i>Definición</i>	4
1.2.2. <i>Tipos y clasificación</i>	5
1.3. Materiales compuestos de matriz metálica (CMM).....	7
1.4. Los materiales compuestos particulados.....	9
1.4.1. <i>La matriz y el refuerzo</i>	9
1.4.2. <i>Métodos de fabricación</i>	14
1.4.3. <i>Materiales compuestos del tipo Al-SiC y Al-B₄C</i>	21
1.5. Aplicaciones.....	26

CAPÍTULO 2. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

2.1. Introducción.....	28
2.2. Equipo de dispersión de partículas reforzantes.....	29
2.2.1. <i>Diseño y acondicionamiento del equipo</i>	31
2.3. Equipo adaptado con molde giratorio.....	34
2.3.1. <i>Diseño y acondicionamiento del equipo</i>	35

CAPÍTULO 3. PREPARACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO Al-B₄C (PARTÍCULAS).

3.1. Introducción.....	40
3.2. Método de vórtice.....	40
3.2.1. <i>Descripción del proceso</i>	40
3.3. Sistema centrífugo.....	44
3.3.1. <i>Descripción del proceso</i>	44

CAPÍTULO 4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.

4.1. Introducción.....	46
4.2. Técnicas para el análisis metalográfico.....	47
4.2.1. Preparación de muestras.....	47
4.2.2. Microscopía óptica (MO).....	49
4.2.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	50
4.2.3.1. Espectrometría de rayos-X.....	51
4.2.3.2. Análisis EDS y WDS.....	52
4.3. Difracción de rayos-X (DRX).....	53
4.4. Técnicas para el análisis mecánico.....	54
4.4.1. Ensayo de microdureza.....	55
4.4.2. Ensayo de tracción.....	58
4.4.3. Prueba de impacto.....	61
4.4.4. Prueba de desgaste.....	63

CAPÍTULO 5. RESULTADOS.

5.1. Introducción.....	67
5.2. Caracterización metalográfica.....	68
5.2.1. Identificación de fases y elementos.....	68
5.2.2. Distribución de partículas.....	72
5.2.2.1. Incremento en fracción volumétrica (% f.v.).....	78
5.2.3. Tamaño de grano de la matriz.....	79
5.2.4. Fractografía.....	83
5.3. Caracterización mecánica.....	92
5.3.1. Introducción.....	92
5.3.2. Microdureza.....	93
5.3.3. Esfuerzo y Deformación.....	94
5.3.4. Tenacidad relativa.....	96
5.3.5. Desgaste.....	99

CONCLUSIONES GENERALES.....	103
------------------------------------	------------

BIBLIOGRAFÍA.....	107
--------------------------	------------

ANEXO. Equipo utilizado para la caracterización del material compuesto.....	111
--	------------

Lista de figuras.

Página

Figura 1.1. Diagrama ternario del Al-B-C. Isotermas experimentales a 1000 K.	14
Figura 1.2. Ruta de procesamiento por metalurgia de polvos.	16
Figura 1.3. Proceso de fundición a alta presión.....	17
Figura 1.4. Equipo convencional de fabricación por el método de vórtice.	19
Figura 1.5. Representación esquemática del proceso de atomización.....	21
Figura 2.1. Fases principales de un material compuesto particulado.	30
Figura 2.2. Ruta de fabricación del Al-B ₄ C _(p) con distribución homogénea de refuerzo: método de vórtice.	30
Figura 2.3. Fotografía que muestra el equipo de dispersión del refuerzo en forma de partículas.....	32
Figura 2.4. Fotografía que muestra los elementos de agitación mecánica para la dispersión del refuerzo.	33
Figura 2.5. Diagrama de fabricación del Al-B ₄ C _(p) con concentración de refuerzo: sistema centrífugo.	35
Figura 2.6. Fotografía que muestra el equipo adaptado con molde giratorio.	36
Plano número 1: Diseño del agitador.	38
Plano número 2: Diseño del molde giratorio.	39
Figura 3.1. Pieza en forma de cruz con concentración ideal de refuerzo.	45
Figura 4.1. Ley de Bragg.	54
Figura 4.2. Precipitado no coherente y coherente.	56
Figura 4.3. Marca del indentador tipo Vickers.	57
Figura 4.4. Esquema de la máquina de ensayos de tracción.	59
Figura 4.5. Probeta para el ensayo de tracción (material compuesto) con dimensiones normalizadas.	60
Figura 4.6. Probetas para la prueba de impacto tipo Charpy.....	62

Figura 4.7. Equipo utilizado en la prueba de desgaste.	64
Figura 4.8. Portamuestras y dimensiones de la probeta para la prueba de desgaste.	66
Figura 5.1. Difractograma de fases presentes en el material compuesto Al-B ₄ C _(P)	69
Figura 5.2. Acercamiento al intervalo de ángulo para buscar los picos de la fase Al ₃ BC.	71
Figura 5.3. Gráfica EDS. Análisis elemental del material compuesto Al-B ₄ C _(P)	72
Figura 5.4. Secciones obtenidas de la pieza en forma de cruz o de “X”.	74
Figura 5.5. (a) Distribución de partículas con el método de vórtice. (b) Representación esquemática de las partículas en el material compuesto.	74
Figura 5.6. (a) Distribución de partículas con el sistema centrífugo. (b) Representación esquemática de las partículas en el material compuesto.	75
Figura 5.7. Microfotografía que muestra una distribución adecuada de partículas. Imagen obtenida por MEB.	76
Figura 5.8. Microfotografía que muestra una distribución no adecuada de partículas. Imagen obtenida por MEB.	77
Figura 5.9. Microfotografía que muestra la densidad de partículas en un material compuesto elaborado con el sistema centrífugo.	79
Figura 5.10. Imagen de una muestra de aluminio atacada con reactivo tipo Tucker. Tamaño de grano.	80
Figura 5.11. Histograma de tamaño de grano de la muestra de aluminio.	81
Figura 5.12. Histograma del tamaño de grano del material compuesto Al-B ₄ C _(P) 10% f.v.	82
Figura 5.13. Imagen donde se observa la forma de los granos de una muestra preparada del material compuesto Al-B ₄ C _(P) 10% f.v.	82
Figura 5.14. Fotografía que muestra la fractura del tipo de copa y cono, resultado del ensayo de tracción, indicando ductilidad y tenacidad en el material compuesto.	85
Figura 5.15. Fractografía del material compuesto mostrando incrustaciones de partículas en zonas dúctiles y aglomeraciones en diferentes zonas.	86
Figura 5.16. Imagen que muestra el tipo de fractura dúctil (superficie con apariencia rugosa y cóncava) en el material compuesto.	87
Figura 5.17. Fractografía que muestra un poro de tamaño considerable.	88
Figura 5.18. Fractografía del aluminio A356.0. Fractura dúctil.	89

Figura 5.19. Fractografía del material compuesto. Fractura frágil.....	90
Figura 5.20. Fractura por impacto en donde se observan aglomeraciones de muchas partículas.....	91
Figura 5.21. Gráfica σ vs ϵ resultado del ensayo de tracción practicado sobre el material compuesto Al-B ₄ C _(p) 10% f.v.	95
Figura 5.22. Influencia de la muesca sobre la energía absorbida en el impacto de los diferentes materiales.	97
Figura 5.23. Fotografía de las probetas de impacto después de practicar el ensayo.	98
Figura 5.24. Gráfica que indica la relación entre el desgaste y la distribución del refuerzo en los materiales.	101
Figura 5.25. Fotografía de las probetas después de aplicar las pruebas de desgaste.....	102

Lista de tablas.

Página

Tabla 1.1. Características principales de metales usados como matriz.	10
Tabla 1.2. Suficiencia mundial de minerales estratégicos.	11
Tabla 1.3. Materiales compuestos fabricados con matriz de aluminio.	23
Tabla 1.4. Propiedades del Al-SiC a diferentes fracciones volumétricas.	24
Tabla 1.5. Propiedades mecánicas de algunos materiales compuestos particulados y de algunas aleaciones de aluminio sin reforzar.	25
Tabla 1.6. Elementos de la aleación de aluminio A356.0.	26
Tabla 5.1. Planos de difracción de fases presentes.	70
Tabla 5.2. Valores experimentales de dureza de la matriz (Al). Microdureza Vickers (DPH, diamond pyramid hardness).	93
Tabla 5.3. Resultados del ensayo de tracción. Se comparan las propiedades del material compuesto con las del aluminio (matriz sin reforzar).	96
Tabla 5.4. Pérdida de peso de los diferentes materiales sujetos a pruebas de desgaste...	100

Lista de abreviaturas.

Significado de las abreviaturas utilizadas en el texto.

CMM	Compuestos de Matriz Metálica.
CMC	Compuestos de Matriz Cerámica.
CMP	Compuestos de Matriz Polimérica.
M.E.B.	Microscopía Electrónica de Barrido.
M.O.	Microscopía Óptica.
E.D.S.	Espectroscopía de Dispersión de Energía.
D.R.X.	Difracción de Rayos-X.
%f.v.	Porcentaje en Fracción Volumétrica.

Introducción

INTRODUCCIÓN.

Los materiales compuestos de matriz metálica (CMM) están siendo desarrollados desde hace 30 años por el interés de conseguir nuevos materiales con características que superen, en propiedades mecánicas, a aquellas de los materiales convencionales tales como el acero, las aleaciones ferrosas como el hierro colado y algunas aleaciones de cobre (latones y bronces). Particularmente se desea lograr valores más altos en las propiedades mecánicas de interés en ingeniería, como el módulo de Young (E) y el límite de cedencia (σ_y), y al mismo tiempo se busca disminuir la densidad de los materiales (ρ). Con base en esta propuesta, se han seleccionado algunas aleaciones metálicas y refuerzos cerámicos cuyas combinaciones han ofrecido resultados muy alentadores.

Muchos de los trabajos realizados, enfocados principalmente a la industria aeronáutica y de automotores, se basan en aleaciones de aluminio porque es un material ligero ($\rho=2.7 \text{ g/cm}^3$ que es, aproximadamente, un tercio de la densidad del acero), con buenas propiedades, alta resistencia a la corrosión y estabilidad química. En estas investigaciones se ha encontrado que el aluminio como matriz metálica acepta, relativamente, diferentes tipos de agentes reforzantes como fibras de boro (B), óxido de aluminio (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC), carburo de boro (B_4C), y grafito en forma de partículas.

En el caso concreto de los materiales compuestos reforzados con partículas (también llamados "compósitos particulados") se han tenido algunos problemas, aún sin resolver totalmente, que tienen influencia sobre las propiedades mecánicas, entre los más importantes se encuentran: (a) la formación de fases no deseables en la interfase, (b) la inadecuada distribución de partículas en la matriz, y (c) la pobre cohesión entre refuerzos y matriz asociado con el fenómeno de humectación. De los problemas planteados, en éste trabajo se concentra la atención en los factores necesarios para la adecuada incorporación y distribución del refuerzo en la matriz implementando una nueva forma de

elaborar los materiales compuestos. No se consideran, sin embargo, los problemas de la interfase ni del mojado (humectabilidad).

Existen varios procedimientos para la fabricación de los CMM, siendo la técnica de fundición una de las más importantes debido a que su método es de relativa facilidad y de muy bajo costo. El método de vórtice pertenece a este grupo de procedimientos y está particularmente adaptado para obtener piezas coladas, sin embargo, uno de los inconvenientes encontrados en estudios previos, es la baja concentración de refuerzo, en forma de partículas, que permite incorporar a la aleación (entre 10 y 20% en fracción volumétrica, %f.v.). Por arriba de esta concentración, la mezcla de los elementos constituyentes produce alta viscosidad. Para solucionar el problema, se propone en este trabajo, un método de fabricación que ha sido llamado "sistema centrífugo" y que ofrecerá, al menos localmente, concentraciones mucho mayores al 20% f.v. Se sabe que con el incremento de refuerzo por unidad de volumen en un material compuesto se obtienen mejores propiedades, particularmente en la resistencia al desgaste.

En el presente trabajo se estudia el material compuesto del tipo $Al-B_4C_{(PARTICULAS)}$, se trata de un material poco tratado en comparación con otros sistemas con base aluminio y presenta características notables entre las que se destaca una ρ comparable al Al y características del B_4C semejantes al SiC, este último es ampliamente utilizado como material para reforzar las aleaciones de aluminio, según se reporta en la información bibliográfica. El estudio se realiza por medio de las técnicas experimentales que permiten un análisis completo desde el punto de vista microestructural y mecánico como lo son: observaciones por microscopía electrónica de barrido, análisis por difracción de rayos-X, espectros de dispersión de energía, histogramas de tamaño de grano por medio del analizador de imágenes y pruebas mecánicas destructivas.

Debido a los problemas que presenta un material compuesto reforzado con partículas y a las limitaciones del método de fabricación, se plantean los siguientes objetivos:

- 1) *Determinar los parámetros óptimos del método de vórtice para elaborar materiales compuestos reforzados con partículas con una concentración del 10% f.v.*
- 2) *Preparar materiales compuestos con alta concentración de refuerzo (superior al 10% f.v.), por medio de un "sistema centrífugo".*
- 3) *Caracterizar mecánica y microestructuralmente los diferentes materiales que resulten de los procesos de los puntos 1 y 2.*

Para su mejor comprensión, este trabajo fue organizado de la siguiente manera:

- *En el capítulo 1 se presentan los antecedentes relacionados con los materiales compuestos de matriz metálica particulados, en especial, los de matriz de aluminio con refuerzos cerámicos y los métodos de fabricación actualmente utilizados. Además, se mencionan los logros alcanzados en aleaciones de aluminio con partículas como refuerzo y algunas aplicaciones generales importantes.*
- *En el capítulo 2 se muestran los equipos experimentales de fabricación, puestos en funcionamiento en este trabajo, para la elaboración de materiales compuestos con base en los requerimientos del método de vórtice y del sistema centrífugo. Se incluyen los diseños de elementos.*
- *En el capítulo 3 se describen detalladamente las rutas de fabricación de los materiales compuestos de acuerdo con las secuencias del método de vórtice y del sistema centrífugo.*
- *En el capítulo 4 se explican detalladamente cada una de las técnicas experimentales para la caracterización mecánica y metalográfica de los materiales compuestos del tipo $Al-B_4C_{(PARTICULAS)}$.*
- *En el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos del estudio de los materiales, presentando una conclusión parcial en cada sección.*
- *Finalmente, se presentan las conclusiones generales y recomendaciones para trabajos posteriores.*

En el anexo se presenta una tabla con la descripción de los equipos utilizados para la caracterización de los materiales compuestos.

Capítulo 1

Antecedentes

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

1.1. Introducción.

Existen situaciones en la industria en donde ningún material es adecuado para satisfacer los requerimientos de un proceso en particular. Sin embargo, la mezcla de dos o más materiales puede poseer las propiedades deseadas y proporcionar una solución factible al problema de la selección de los materiales. Tales materiales reciben el nombre de materiales compuestos [1, 36].

En el presente capítulo se expone lo que son los materiales compuestos, el interés que se tiene sobre ellos y la clasificación general en donde se pueden agrupar.

En el punto 1.3 se concentra la atención en un tipo particular de materiales compuestos de matriz metálica (CMM) ya que el material que se estudia en este trabajo está incluido aquí. En el punto 1.4 se muestran de manera más específica los materiales compuestos reforzados por partículas (CMM_{PARTÍCULAS}), las partes constituyentes y la justificación de su selección; los métodos que se utilizan para su fabricación; y los trabajos previos que se tienen registrados en la información bibliográfica como punto de partida y comparación.

Finalmente, en la sección 1.5 se exponen algunos ejemplos de aplicaciones actuales de los CMM.

1.2. Materiales compuestos.

1.2.1. Definición.

Un material compuesto es el resultado de la combinación de por lo menos dos materiales de distintas características químicas y mecánicas, y es creado para obtener propiedades tales que no serían logradas por ninguno de los constituyentes individuales

[50]. Estos constituyentes se seleccionan para proporcionar combinaciones poco usuales de rigidez, alta resistencia, bajo peso, rendimiento a temperatura alta, resistencia a la corrosión, buena dureza y conductividad. Es por ello que estos materiales son interesantes y han sido estudiados ampliamente en las últimas décadas.

Los materiales compuestos de interés en ingeniería se basan en materiales metálicos, polímeros y cerámicos, en donde alguno de ellos se establece como la matriz y algún otro como el refuerzo. En una mezcla de elementos, se denomina “matriz” a la fase continua que usualmente está presente en mayor cantidad. El “refuerzo” es el material que se elige para modificar las propiedades mecánicas de la matriz. Usualmente el refuerzo es cubierto por la matriz.

1.2.2. Tipos y clasificación.

Existen tres tipos principales de materiales compuestos agrupados de acuerdo con la naturaleza de la matriz:

- 1) compuestos de matriz metálica (CMM),
- 2) compuestos de matriz polimérica (CMP),
- 3) compuestos de matriz cerámica (CMC).

Las propiedades de cada uno de estos, se modifican según la clase de refuerzo que es incorporado a través de todo el material. De acuerdo con ello, la mayoría de los autores coinciden en la siguiente clasificación general [1, 12, 18, 30, 34,38, 47, 49]:

Materiales compuestos reforzados por:

- 1) partículas, whiskers* y fibras cortas (refuerzo discontinuo),
- 2) fibras (refuerzo continuo),
- 3) láminas (refuerzo continuo).

* Whiskers. Fibras cortas con diámetros de 1µm aproximadamente.

Cuando se eligen las formas de cada uno de los componentes (matriz-refuerzo), se tiene una amplia variedad de materiales compuestos, por lo que se hace una distinción entre los *materiales compuestos estructurales* que se emplean principalmente debido a sus propiedades mecánicas, y los *materiales compuestos funcionales* que se emplean por tener características especiales de tipo eléctrico, químico, etc.

Los refuerzos continuos y discontinuos ofrecen sus propias ventajas y desventajas. En términos generales se puede mencionar lo siguiente:

Refuerzos discontinuos.

Ventajas:

- Métodos muy económicos.
- Propiedades isotrópicas, debidas a una distribución uniforme del refuerzo.

Desventajas:

- Propiedades mecánicas inferiores comparadas con los refuerzos continuos.

Refuerzos continuos.

Ventajas:

- Mejores en términos de propiedades mecánicas.

Desventajas:

- Más caros.
- Propiedades generalmente anisotrópicas. Para lograr propiedades cuasi-isotrópicas se requiere de complejas configuraciones de multicapas.

La mayoría de los materiales compuestos de uso industrial se basan en matrices poliméricas reforzados usualmente por fibras cerámicas (CMP), por su alta plasticidad y definitivamente su bajo peso. Sin embargo, presentan la desventaja de no poder operar a temperaturas mayores a 200 (°C).

Por otro lado, los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC), como por ejemplo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$, tienen su principal cualidad, en mantener buenas propiedades a elevadas temperaturas.

Durante los últimos 30 años se han estudiado los materiales compuestos de matriz metálica (CMM), principalmente en la industria aeroespacial, automotriz y electrónica, en donde se buscan obtener propiedades mecánicas particulares de las aleaciones metálicas como el peso, la estabilidad a altas temperaturas, la dureza y conductividad eléctrica [21].

El material compuesto utilizado para el desarrollo del presente trabajo pertenece a este último grupo de materiales, en donde la parte reforzante que se introduce está en forma de partículas. En los siguientes apartados se trata de manera particular y con más detalle los CMM.

1.3. Materiales compuestos de matriz metálica (CMM).

No es fácil predecir acertadamente las propiedades de un material compuesto metálico. Mucho del progreso en el campo de los CMM está estrechamente relacionado con el desarrollo de los refuerzos que se incorporan, por lo que las propiedades mecánicas de interés en los CMM dependen de los siguientes factores:

- propiedades específicas de la matriz, que puede ser un metal puro o una aleación,
- propiedades específicas de los refuerzos,
- cantidad adicionada de refuerzo (fracción volumétrica, %f.v.),
- forma de los elementos reforzantes,
- tamaño de los elementos reforzantes,
- distribución de los elementos reforzantes,
- enlace existente entre los elementos reforzantes y la matriz,
- procesamiento y producción de los materiales compuestos puede introducir defectos tales como porosidad y grietas.

A manera de ejemplo, se puede mencionar que para un material compuesto de SiC/Al-Si, reforzado con partículas, el coeficiente de expansión térmica lineal decrece con relación al tamaño y el incremento de la fracción volumétrica de las partículas. Además, las propiedades de desgaste para el mismo material se mejoran significativamente [58].

Los CMM, como una clase de materiales, ofrecen importantes ventajas comparadas con otros tipos de materiales, dependiendo de las aplicaciones específicas. Las principales ventajas y desventajas se resumen a continuación [21, 51].

Comparación con metales sin refuerzo.

Ventajas:

- más alta resistencia,
- más alta rigidez,
- mejoras en la resistencia al desgaste.

Desventajas:

- más baja ductilidad,
- más complicados y caros procesos de producción.

Comparación con compuestos de matriz polimérica.

Ventajas:

- incremento en la dureza,
- mejor conductividad eléctrica y térmica,
- más alta temperatura de operación.

Desventajas:

- menos desarrollo tecnológico,
- más altos costos.

Comparación con compuestos de matriz cerámica.

Ventajas:

- mejor ductilidad,
- menos problemas para fabricar piezas grandes,

- más bajos costos en general.

Desventajas:

- temperatura de operación inferior.

1.4. Los materiales compuestos particulados.

1.4.1. La matriz y el refuerzo.

En la producción de los materiales compuestos particulados, la matriz y el refuerzo se mezclan juntos [50]. Los refuerzos continuos y discontinuos, han sido introducidos en aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, hierro, titanio, níquel y zinc. Se ha considerado particularmente atractivo el uso de *refuerzos cerámicos* (carburos, óxidos y nitruros) porque ellos producen una reducción en la densidad del material así como un mejoramiento en las propiedades mecánicas [29, 51].

Las características sobresalientes de los metales como matrices se manifiestan de muchas maneras, en particular, una matriz de metal le da al material compuesto una naturaleza metálica en términos de conductividad eléctrica y magnética; y en su manufactura y conformado. El tipo de metal se selecciona normalmente con base en sus propiedades tales como: densidad, temperatura de fusión, dilatación térmica, módulo elástico, etc.

El aluminio (Al).

De los metales mencionados anteriormente, *el aluminio* ha sido empleado con más frecuencia en estudios realizados sobre materiales compuestos de matriz metálica (CMM), por su bajo precio y baja densidad. También se emplean otros metales estructurales como el magnesio y el titanio. En la tabla 1.1 se pueden comparar las propiedades de cada uno de estos materiales [2, 3, 10].

Aunque el magnesio tiene una densidad muy baja (1.73 g/cm^3), las aleaciones de magnesio son relativamente inestables y especialmente susceptibles a la corrosión en ambientes marinos. Por otro lado, el titanio posee un módulo de elasticidad muy elevado (107 GPa) y sus aleaciones son altamente dúctiles y fáciles de maquinarse, además pueden superar en resistencia a la corrosión al acero inoxidable. Sus principales aplicaciones se encuentran en la fabricación de turbinas, la industria aeroespacial, aeronáutica y armamentista. Sin embargo, la mayor limitación del titanio es su alta reactividad química con otros materiales a elevadas temperaturas, por lo que el proceso para obtener aleaciones de titanio es muy caro.

La combinación de peso ligero, alta resistencia a la corrosión atmosférica y de agua dulce, excelente conducción del calor y la electricidad, y propiedades mecánicas moderadas, hacen del aluminio un material con buenas condiciones para la matriz de un CMM. El punto de fusión del aluminio es tal que resulta económico el proceso de fabricación de materiales compuestos y además acepta una gran variedad de agentes reforzantes como fibras de boro, partículas de B_4C , Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , grafito en forma de partículas, y whiskers [31, 41].

Metal puro (comercial)	Densidad (g/cm^3)	Módulo elástico E (GPa)	Resistencia a la tensión UTS (MPa)	Coefficiente de dilatación térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$)	Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$)
Al (99.9%)	2.7	70	80	23.9	645 - 660
Mg (99.5%)	1.73	45	90	26	650
Ti (99.5%)	4.51	107	241	8.4	1668

Tabla 1.1. Características principales de metales usados como matriz [2, 3, 10].

La popularidad del aluminio como matriz se atribuye también al actual dominio en las aplicaciones sobre estructuras aeroespaciales, y a su introducción y aceptación en el mercado automotor. Por lo tanto, el aluminio, como una buena opción, se ha elegido para la matriz del compuesto que se estudia en este trabajo, en donde se utilizan *partículas de carburo de boro* como refuerzo.

Para complementar esta información, se presentan en la tabla 1.2 los datos de la situación mundial actual que se tiene sobre los metales empleados como matrices que fueron mencionados anteriormente [14].

Metal puro (comercial)	Miles de toneladas métricas			
	<i>Reservas</i>	<i>Producción 1989</i>	<i>Consumo anual de reservas (%)</i>	<i>Perspectivas de duración de reservas (años)</i>
Aluminio	21 559 000	105 029	0.5	205
Titanio	288 600	6 454	2.2	45
Hierro	64 648 000	923 600	1.4	70
Cobre	321 000	8 887	2.8	36
Níquel	48 660	872	1.8	56
Zinc	143 910	7 187	5.0	20

Tabla 1.2. Suficiencia mundial de minerales estratégicos. Los cálculos se hicieron tomando como constante la producción de 1989 y sin considerar reciclajes [14].

El carburo de boro (B₂C).

Las partículas como refuerzo de un material compuesto, tienen por objetivo el compartir con la matriz metálica el esfuerzo de la carga aplicada [24, 38], lográndose así un incremento en la resistencia a la deformación plástica, entre otras propiedades.

Los aspectos importantes que se toman en consideración para la elaboración de CMM reforzados con partículas son:

- 1) El tamaño de la partícula de refuerzo.
- 2) La fracción volumétrica (f.v.) de las partículas agregadas al material compuesto.
- 3) La capacidad de humectación en la interfase del CMM (el mojado), que depende de la tendencia de la matriz líquida a incrementar el área de contacto con la superficie sólida del material cerámico durante la consolidación del material compuesto, ocasionado por el ángulo de contacto.
- 4) La interfase; ya que las posibles reacciones químicas que se pudieran dar entre el cerámico y el metal pueden generar algunas deficiencias en las propiedades mecánicas [23, 45].
- 5) La densidad de los refuerzos particulados debe ser similar a la de la matriz metálica. Además deben contar con dureza y módulo elástico elevados.

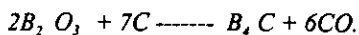
Los materiales de refuerzo en los CMM son frecuentemente *cerámicos*, como ya se mencionó, porque estos materiales tienen alta resistencia mecánica; bajo peso y bajo valor de elongación; alta dureza y resistencia a la alteración química.

Los *refuerzos cerámicos* típicos usados en forma de partículas (y también fibras) son:

- Óxidos: ZrO_2 , Al_2O_3 , ThO_2 , HfO_2 .
- Nitruros: AlN , BN , TaN , TiN , HfN , Sr_3N_4 , ZrN , ThN .
- Carburos: SiC , B_4C , WC , TiC , ZrC , HfC , ThC_2 , Zr_7C_3 , MoC , TaC .

De los cerámicos anteriores, el *carburo de boro* (B_4C), posee propiedades muy particulares. Entre las más importantes se pueden mencionar las siguientes (información sintetizada por Thévenot [52, 53, 54]):

- El B_4C se obtiene por sinterizado y reducción de óxido bórico con carbono, alrededor de $2500\text{ }^\circ\text{C}$.



- Tiene una gran estabilidad química, resiste bien los ataques químicos en frío.

- Mantiene una gran resistencia a la oxidación en donde, a partir de 600 °C, el incremento del óxido B₂O₃ se autolimita a causa del bajo coeficiente de difusión del oxígeno. Esto es importante para la elaboración de materiales compuestos, en donde el método de fabricación exige el precalentamiento a temperaturas alrededor de 400 °C (ver sección 1.4.2).
- Posee una densidad de 2.5 g/cm³, esto permite que el material compuesto sea más ligero que el material sin reforzar, porque la densidad del aluminio es de 2.7 g/cm³ (ver tabla 1.1). A diferencia del SiC con $\rho = 3.22 \text{ g/cm}^3$, refuerzo que es ampliamente usado (ver sección 1.4.3).
- Posee un coeficiente de dilatación térmica bajo ($5.73 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$), en comparación con el del aluminio ($23.9 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$).
- Cuenta con una dureza y módulo elástico excepcionales, que se pueden incrementar linealmente con el contenido de carbono (HV= 4950 y módulo elástico de 360 a 460 GPa.). Ambas características son mejores que otros refuerzos normalmente usados como SiC (HV de 3340 y módulo elástico de 379 GPa.) y TiC (HV de 3000 y módulo elástico de 316 GPa.).
- Por último, el *mojado* (es decir, la tendencia de la matriz metálica a incrementar su área de contacto con un material reforzante durante la formación del material compuesto), del carburo de boro por el aluminio es pobre, debido a que el ángulo de contacto entre el refuerzo y la aleación líquida, es mayor a los 90° para las temperaturas usuales de elaboración. Por lo que este punto se puede considerar como la única desventaja en la fabricación de materiales compuestos.

El uso principal del carburo de boro es como abrasivo, además tiene aplicaciones químicas, eléctricas y nucleares [54].

Para el caso particular de estudio del material compuesto Al-B₄C, se tiene que recurrir al diagrama ternario Al-B-C para conocer las fases en equilibrio que se formarían al mezclarlos a una temperatura cercana a 1000 (K). Del diagrama ternario [25], mostrado en la figura 1.1, se esperaría para una mezcla de Al y B₄C al 90 (%) at., la formación de Al₃BC y AlB₂ disperso en una matriz rica en aluminio.

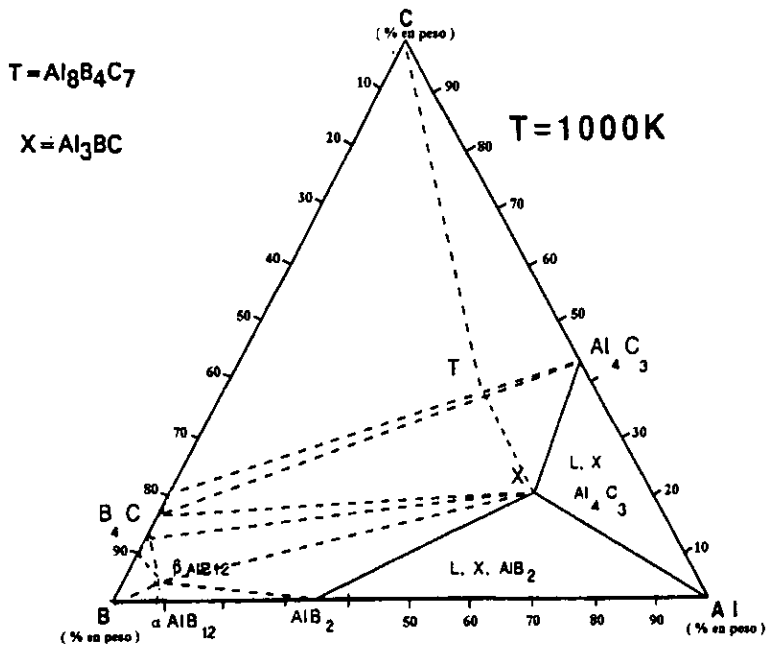


Figura 1.1. Diagrama ternario del Al-B-C, isothermas experimentales a 1000 K.

1.4.2. Métodos de fabricación.

Una variedad de procesos han sido y están siendo desarrollados para la manufactura de CMM. Cada técnica tiene sus propias ventajas y limitaciones en términos del tamaño y forma de los componentes y de las características microestructurales del producto.

Los factores involucrados en la producción de un CMM pueden tener una importante influencia en el costo final de la pieza, el tipo de pieza que puede ser elaborado y, por consiguiente, las aplicaciones para el cual el CMM se va a utilizar.

Las técnicas de fabricación de CMM con refuerzos discontinuos pueden ser divididos en dos categorías principales [35, 51, 55, 59]:

1) Procesamiento en estado sólido.

- Metalurgia de polvos.

2) Procesamiento en estado líquido.

- Infiltración a alta presión.
- Método de vórtice.
- Compocolada.
- Método de atomización.

Metalurgia de polvos.

(Powder Metallurgy)

Consiste básicamente en mezclar, compactar y sinterizar polvos de la aleación metálica y el refuerzo cerámico en forma de partículas, whiskers o fibras cortas. El compactado o presionado consiste en someter las mezclas de polvos adecuadamente preparadas, a temperatura normal o elevada, a presión considerable. El comprimido de polvo resultante se conoce como *aglomerado*, y se dice que en esta forma “es verde”, esto puede manipularse pero es relativamente frágil. El sinterizado es una operación en la que los aglomerados verdes se someten a una temperatura inferior al punto de fusión del metal líquido, en una atmósfera inerte. El sinterizado dará la resistencia mecánica adecuada al material.

Además del compactado y el sinterizado, pueden agregarse otras operaciones al proceso tales como presinterizado. Las rutas de producción por metalurgia de polvos tienden a ser más caras que cualquier método por vía líquida (ver figura 1.2.).

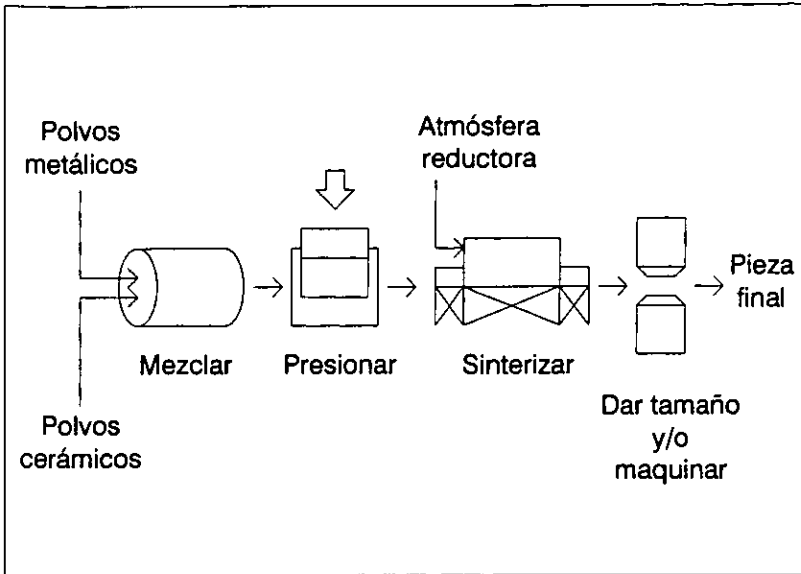


Figura 1.2. Ruta del procesamiento por metalurgia de polvos.

Infiltración a alta presión.

(Squeeze Casting)

Este es uno de los métodos más empleados comercialmente para la producción de autopartes y equipo aeroespacial. Se basa principalmente en la solidificación presurizada, en la que una cama del refuerzo cerámico previamente se calienta y se utiliza para contener la fracción volumétrica requerida. Después, el metal fundido se incorpora por medio de una prensa a través de un conducto que está bloqueado por el refuerzo. Así, la presión es mantenida hasta que se completa el proceso de solidificación para que posteriormente, la prensa se abra y el metal elaborado sea eyectado (ver figura 1.3).

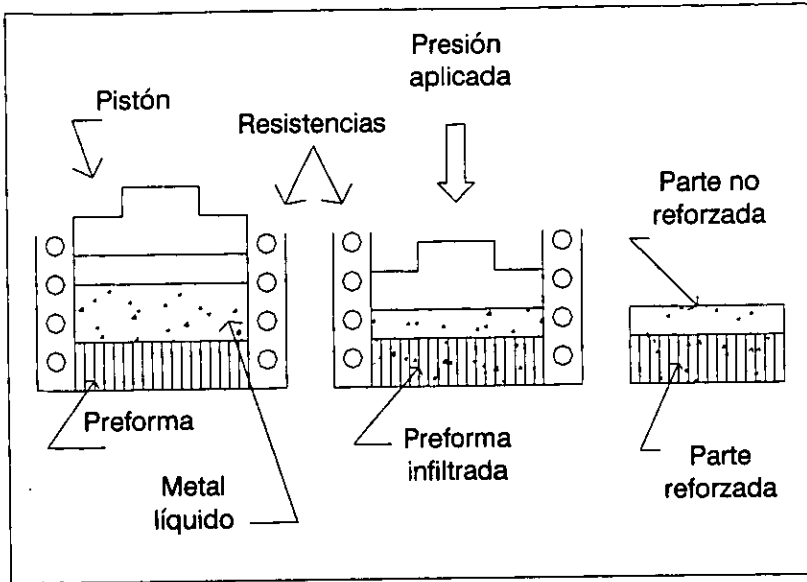


Figura 1.3. Proceso de fundición a alta presión.

Los parámetros tomados en cuenta durante este proceso son:

- 1) La temperatura del metal líquido.
- 2) La velocidad de infiltración.
- 3) La presión final de infiltración.

Este último es el más importante porque el proceso de solidificación se realiza justamente, bajo grandes presiones (alrededor de 100 MPa.).

Los CMM que se obtienen por este método tiene nula o muy baja porosidad, además la velocidad de enfriamiento (más de 10^0 C/s) evita una reacción entre la matriz líquida y el refuerzo (que también puede ser en forma de fibras) [15].

Método de vórtice.

(Melt Stirring Method)

Como una alternativa en los procesos de infiltración de refuerzos en metales líquidos, los refuerzos pueden ser removidos o agitados por medios mecánicos, electromagnéticos o inyecciones de gas, [51].

Actualmente, el método de vórtice es una de las formas menos caras, más simples y permite la producción de grandes cantidades de material [49]. En este método, el refuerzo se incorpora en forma aleatoria dentro de la matriz metálica, generalmente por medio de una agitación vigorosa. Debido a que la mayoría de los sistemas metal-refuerzo presentan pobre humectación (cohesión entre partículas y matriz), se necesitan fuerzas mecánicas para combinar las fases. Esta agitación produce la formación de un vórtice en el metal líquido, razón por la cual el método recibe el nombre (ver figura 1.4.).

Sin embargo el método también tiene limitaciones debido a la notable tendencia de aglomeración del refuerzo (que se encuentra en forma de partículas), y la posterior flotación o sedimentación dentro del metal en estado líquido (punto de fusión). Las posibles técnicas para superar estos problemas incluyen:

- Adición del refuerzo dentro del vórtice creado por la agitación.
- Tratamientos superficiales del refuerzo para mejorar la humectación por el metal líquido.
- Adición de elementos aleantes apropiados en el metal líquido justo antes o durante la incorporación del refuerzo.
- Precalentamiento del refuerzo antes de la adición.
- Uso de gas inerte.
- Una adición del refuerzo y de polvos de la matriz metálica en forma granular.

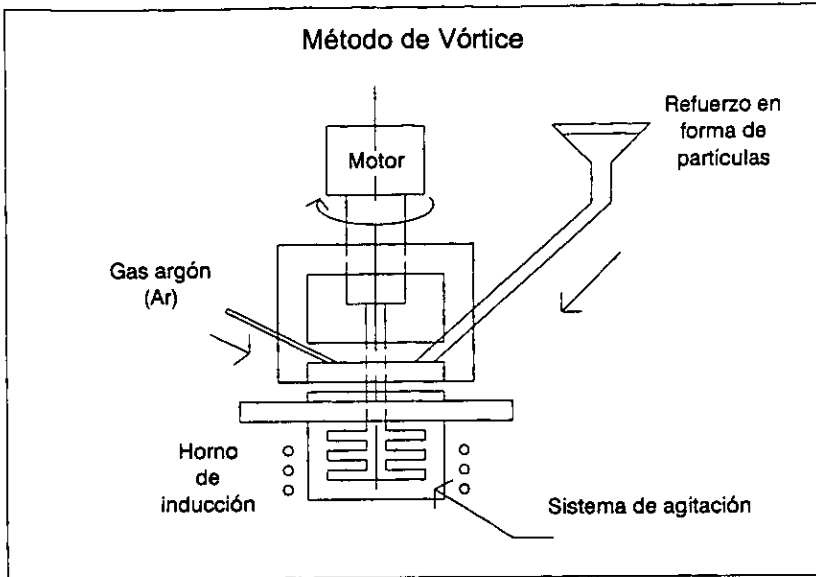


Figura 1.4. Equipo convencional de fabricación por el método de vórtice.

Los parámetros importantes del proceso que determinan la calidad y cantidad de dispersión lograda son:

- Temperaturas del metal líquido y del refuerzo.
- Velocidad del mezclado.
- Rapidez de solidificación.
- Tiempo de mezclado y de colada del material.

Finalmente, la fracción volumétrica del refuerzo que puede ser exitosamente incorporado por medio del método de vórtice está limitado en un rango de 10 a 20% [51].

Comocolada.

(Compcasting or Rheocasting)

Esta técnica consiste en incorporar el refuerzo cerámico en una matriz metálica en estado semisólido.

Para facilitar la incorporación, la matriz es agitada al mismo tiempo que se introducen los elementos reforzantes. Dicha técnica es normalmente empleada para partículas en donde la fracción volumétrica máxima estudiado hasta ahora es del 25 %, y para fibras cortas en la que la fracción volumétrica no puede exceder del 20 % ya que existirían problemas de viscosidad elevada. La matriz en estado semisólido tiene mejor atrapamiento de partículas, es decir, que se facilita la incorporación del refuerzo durante la mezcla, pero existen algunas desventajas. Una de ellas es que la alta viscosidad de la mezcla y la fuerte agitación empleadas pueden traer problemas de introducción de gases y consecuente porosidad en las piezas finales. Además, las reacciones entre el refuerzo y la matriz se ven favorecidas por el contacto durante periodos muy largos, ya que se necesita tiempo para la incorporación total.

Método de atomización.

(Spray Method)

En este proceso, un chorro de metal fundido es fragmentado por medio de un surtidor de alta velocidad de gas inerte frío, pasando a través de una pistola de rocío e inyectando simultáneamente polvos dispersos. Un flujo de gotas pequeñas fundidas y polvos dispersos son dirigidos hacia un sustrato colector donde las gotas (droplets) se recombinan y solidifican para formar un depósito de alta densidad. Las partículas dispersas se pueden combinar con las gotas durante el descenso, pero la mayoría son codepositadas. El rocío de partículas puede ser controlado independientemente y ser dirigido hacia áreas seleccionadas (ver figura 1.5.).

Por medio de este proceso el tamaño de grano del compuesto resultante es relativamente uniforme y la presencia de partículas durante la solidificación de las gotas refinan la microestructura de la matriz.

Una de las principales ventajas es su alta productividad, además de que el producto depositado puede ser usado directamente en el conformado en caliente como el forjado, rolado o extrusión. Sin embargo, el inconveniente de este método es, sin duda, su alto costo y la limitación de poder fabricar solamente piezas pequeñas.

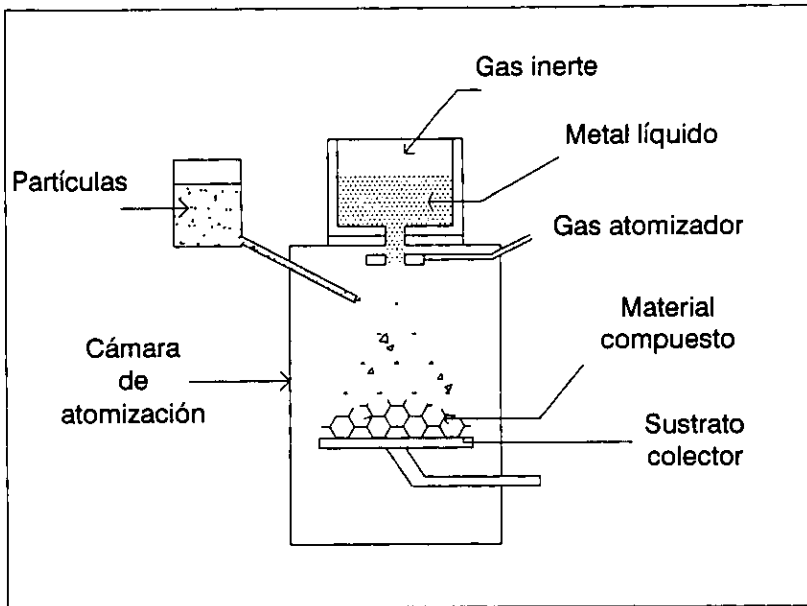


Figura 1.5. Representación esquemática del proceso de atomización.

1.4.3. Materiales compuestos del tipo Al-SiC y Al-B₄C.

La mayoría de los estudios que se hacen sobre materiales compuestos de matriz de aluminio se han enfocado hacia el desarrollo de materiales compuestos de alto rendimiento, y con características específicas tales como alta resistencia mecánica y módulo elástico muy

grande, para utilizarlos en componentes aeroespaciales y automotrices [13, 56]. El reemplazo de estructuras de aluminio, titanio o acero por materiales compuestos, ofrece algunas ventajas tales como bajo costo, peso ligero y buenas propiedades mecánicas.

Actualmente, se cuenta con mucha información acerca de los materiales compuestos fabricados con matriz de aluminio, en donde se describen los diferentes tipos de materiales compuestos, tipos de refuerzos y porcentaje de fracción volumétrica (%f.v.). También se mencionan los diversos métodos de elaboración, tal y como se resume en la tabla 1.3 [20].

El material compuesto más estudiado en la actualidad es el Al-SiC como se aprecia en la tabla 1.3., en donde el porcentaje de f.v. de refuerzo alcanza un 25% cuando está en forma de partículas, y un 49% cuando está en forma de fibras.

A continuación se describen en forma resumida, los aspectos principales de los materiales compuestos Al-SiC_(p) para conocer las propiedades mecánicas logradas con este material.

Material compuesto Al-SiC_(p).

Los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas de SiC, son materiales con características importantes. Las ventajas que poseen estos materiales compuestos como materiales estructurales son muy interesantes, como lo muestran sus propiedades mecánicas en la tabla 1.4 [21].

Los materiales compuestos Al-SiC_(p) ofrecen atractivas propiedades tales como bajo peso, alta dureza, buena resistencia al desgaste y bajo coeficiente de expansión térmica. Los resultados más relevantes del estudio de este material son:

- Los materiales compuestos Al-SiC proporcionan un incremento en el módulo elástico hasta en un 40 % comparado con el del aluminio puro, para un porcentaje de partículas del 20 % [38].

- La ductilidad del material depende del contenido de refuerzo y del tipo de matriz. Esto significa que, los materiales compuestos con matriz blanda y bajo contenido de refuerzo exhiben una fractura dúctil y por otro lado, cuando el contenido de refuerzo aumenta, su comportamiento se vuelve frágil [38].

Designación estándar del tipo de matriz	Tipo de refuerzo	Fración volumétrica f.v. (%)	Proceso de elaboración
A 356, A 357	B ₄ C, SiC _(P)	15-25	colada en molde permanente
1050, 8090, 2124	SiC _(P)	10-20	metalurgia de polvos
A 357	SiC _(P)	15	extrusión
6061	Al ₂ O ₃ _(P)	15, 20, 25	líquido semisólido
8090	SiC _(P)	20	metalurgia de polvos
1050	SiC _(F)	40-49	infiltración en estado líquido
2124	SiC _(P)	20	forjado
A 383	SiC _(P)	10-20	colada por presión
N 202	SiC _(P)	13	atomización
6061	Al ₂ O ₃ _(F)	5-30	metalurgia de polvos y extrusión

Tabla 1.3. Materiales compuestos fabricados con matriz de aluminio. Los subíndices indican la forma del refuerzo: (F) fibras, (P) partículas y (W) whiskers [20].

Tipo de matriz	Refuerzo partículas	Fración volumétrica f.v. (%)	Módulo elástico E (GPa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Elongación (%)	Resistencia a la tensión UTS (MPa)
6061 Al	SiC	0	68	308	15.1	326
6061 Al	SiC	10	79	321	7.5	351
6061 Al	SiC	20	97	343	2.8	377

Tabla 1.4. Propiedades del Al-SiC a diferentes fracciones volumétricas [21].

Material compuesto Al-B₄C [2].

Se observa claramente que los materiales compuestos de matriz metálica reforzados por partículas de SiC ocupan un lugar específico dentro del mercado actual, sin embargo, día a día surgen nuevos desarrollos tecnológicos enfocados a obtener materiales que mejoren las características mecánicas de los que ya existen.

En la tabla 1.5. se muestran las propiedades mecánicas que presentan los CMM reforzados con partículas de SiC y B₄C sobre aleaciones de aluminio, según se reportan en la información bibliográfica [38, 51]. También, en la tabla 1.5. se encuentran las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio sin reforzar para propósitos de comparación [2, 3]. Se pueden observar incrementos en la resistencia a la tensión y en el módulo elástico de los materiales compuestos reforzados con partículas.

Además, con base en los datos de la tabla 1.5., se observa que las propiedades mecánicas del material compuesto 6061-Al-B₄C resultaron ser mejores que las propiedades que presenta el 6061-Al-SiC a diferentes fracciones volumétricas (f.v.). Por supuesto se toma en cuenta que el %f.v. es un parámetro de mucha importancia (ver sección 1.3.). También es importante el tipo de aleación y el método de fabricación, ya que cada uno

incluye elementos que pueden influir en el comportamiento mecánico del material compuesto.

Material	Fracción volumétrica f.v. (%)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Resistencia a la tensión UTS (MPa)	Módulo elástico E (GPa)	Elongación (%)
1100Al-SiC	19	110	199	95	16
8081 Al-SiC	12	*	530	100	*
6061 Al-SiC	25	345	410	99	4.4
6061 Al-SiC	13	*	360	90	*
2014 Al-SiC	10	*	510	81	*
7091 Al-B ₄ C	20	*	667	105	*
6061 Al-B ₄ C	20	396	464	101	4.7
1100-Al	0	105	125	69	40
8081-Al	0	170	195	70	20
6061-Al	0	308	326	68	15.1
2014-Al	0	290	425	72.4	20
7091-Al	0	531	579	71	25

Tabla 1.5. Propiedades mecánicas de algunos materiales compuestos particulados y de algunas aleaciones de aluminio sin reforzar [2, 3, 38, 51].

En este trabajo se estudia el material compuesto del tipo Al-B₄C_(p), porque es un material de interés y poco tratado, de acuerdo con lo expuesto anteriormente. Se utiliza una aleación de aluminio A356.0 denominación según *Aluminum Association* (ver tabla 1.6.). El tamaño de las partículas de carburo de boro se encuentra en un rango de 10 y 50 μm .

Elemento	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Mn	Zn	Al
% en peso	6.50-7.50	0.25-0.45	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	Balance

Tabla 1.6. Elementos de la aleación de aluminio A356.0 (aleación SG70B según denominación ASTM) [3, 31, 41].

1.5. Aplicaciones.

Las aplicaciones de los CMM son tan diversos como las posibles combinaciones entre la matriz metálica y el refuerzo. Las áreas particulares de aplicación son: la industria automotriz, el sector aeroespacial y militar, y en equipos deportivos. Se exponen a continuación algunos ejemplos.

Los CMM tienen un gran número de aplicaciones industriales, usualmente como materiales de antifricción y antiabrasión. Una de las aplicaciones más promisorias parece estar en soportes (cojinetes) donde un material compuesto como el de Al-grafito sería considerablemente más barato, ligero y autolubricante, que los actuales soportes hechos de aleaciones de Cu, Pb, Sn y Cd. Estos materiales pueden ser usados en soportes automotrices, máquinas herramientas, motores marinos diesel, camiones, líneas de transmisión, secadoras, procesadoras de comida, ventiladores y bombas.

El pistón *Toyota Motor Company* anunciado en 1983, consiste de refuerzos de Al_2O_3 , con forma de fibras cortas en aluminio (5% o 12% en fracción volumétrica), fabricado por infiltración a alta presión (ver sección 1.4.2.). El componente se introduce en el área de los anillos del pistón reemplazando a la aleación hierro-níquel usado previamente. Con esto se consigue una reducción en peso de 5 a 10 % y una reducción en la transferencia de calor, lo que permite que la cámara de combustión opere a más alta temperatura. Además, se consigue una mayor resistencia al desgaste [22].

Los materiales usados para contactos eléctricos de interruptores y relevadores deben tener una buena combinación de resistencia al desgaste y conductividad eléctrica. Los compuestos de partículas, tales como la plata reforzada con tungsteno, proporcionan materiales que tienen una combinación adecuada de dureza y conductividad [1].

Los insertos de carburo de tungsteno sobre cobalto, utilizados para herramientas de corte en operaciones de maquinado, son ejemplos de carburos cementados, es decir, de materiales que contienen partículas cerámicas dispersas en una matriz metálica. El carburo de tungsteno (WC) es extremadamente duro y tiene una temperatura de fusión muy alta, de modo que puede cortar aceros templados y revenidos, pero también es muy frágil, por lo que el cobalto sirve como pegamento de partículas y proporciona adecuada resistencia al impacto [1]. Otros materiales compuestos usados como herramientas de corte, cubiertas de maquinarias o propulsores, son el Zirco-Al, SiC-Al, y SiO₂-Al, que son materiales resistentes a la abrasión y muy duros.

Fibras de grafito, con un módulo alto, reforzando aluminio o magnesio, permiten la construcción de estructuras con alta dureza y resistencia específicas, además con gran estabilidad dimensional. Como las fibras tienen coeficientes negativos de expansión térmica y combinadas con aleaciones metálicas ligeras, permiten la producción de materiales con un coeficiente de expansión térmica cerca de cero. Esta capacidad es de gran beneficio en un satélite artificial donde el calor del sol puede causar distorsión en sus componentes como en los espejos ópticos y antenas de comunicación [17].

Alyn Corp. ha hecho trabajos para los clubes de golf en California. El más reciente consistió en reforzar aluminio con partículas de carburo de boro, logrando una óptima distribución del peso en el material, para fabricar mangos largos (shafts) que se usan en este deporte [18].

Estos son algunos ejemplos en donde se han utilizado los CMM, pero es de esperarse que el campo de aplicación de los materiales compuestos sea cada vez más extenso.

Capítulo 2

Construcción del equipo experimental

CAPÍTULO 2. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

2.1. Introducción.

Las técnicas de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas, fueron clasificadas en el capítulo uno como: procesos de fase líquida y procesos de fase sólida (ver sección 1.4.2.). El método de vórtice pertenece a los primeros y fue seleccionado para la elaboración del material compuesto del tipo Al-B₄C_(P) porque el metal líquido (a temperatura de fusión) generalmente es menos caro y más fácil de manejar que, por ejemplo, en el proceso por metalurgia de polvos. Además, el material compuesto puede ser producido en una amplia variedad de formas haciendo el vaciado en moldes, por lo que es el proceso más simple utilizado actualmente [47].

Para elaborar los materiales compuestos se diseñó y preparó el equipo de fabricación experimental con base en dos objetivos:

- 1. Obtener materiales compuestos con una distribución homogénea de refuerzo (equipo de dispersión de partículas reforzantes). Es decir, se busca que las partículas de carburo de boro se encuentren situadas uniformemente en todo el volumen del material (propiedades isotrópicas), con el propósito de realizar pruebas cuyos resultados sean confiables.*
- 2. Obtener materiales compuestos con una distribución concentrada de refuerzo (equipo adaptado con molde giratorio). Es decir, se busca que la mayor concentración de refuerzo sea colocada en un volumen determinado de la pieza. La razón de realizar esto se debe a la limitación que tiene el método de vórtice para incorporar solamente entre 10 y 20% en fracción volumétrica (% f.v.) de partículas. De tal forma que lograr mayor concentración del refuerzo equivale a conseguir incrementar el % f.v. en el*

material compuesto y de esta manera superar la limitante. El material fabricado con el equipo adaptado con molde giratorio podrá tener diferentes aplicaciones.

Cada uno de estos equipos se describen en el presente capítulo, mientras que en el capítulo tres, se explica detalladamente el proceso de preparación del material compuesto Al-B₄C_(p) con base en los objetivos y, por supuesto, haciendo uso de los equipos.

2.2. Equipo de dispersión de partículas reforzantes.

En el método de vórtice, el material cerámico en forma de partículas utilizado como reforzante, es adicionado a un baño metálico (metal fundido) sujeto a una agitación vigorosa. La agitación se lleva a cabo mecánicamente provocando que la superficie del metal fundido se deforme para dar lugar a la formación de un vórtice [46, 58].

Los parámetros más importantes en este método son:

- Parámetros de la matriz: densidad, punto de fusión y naturaleza física y química de la interfase matriz-cerámico.
- Parámetros del refuerzo cerámico: densidad, tamaño, forma y el % fracción volumétrica incorporada de partículas.
- Parámetros del proceso: rapidez de adición de partículas al baño metálico, velocidad de agitación del baño y temperatura de colada.
- Reacciones interfaciales: Los compuestos de matriz metálica se fabrican a elevadas temperaturas (por vía líquida), por lo que puede ocurrir la difusión de las fases en condiciones favorables, y reacciones químicas complejas entre la matriz y el refuerzo. En general, se piensa que las reacciones de este tipo deterioran el comportamiento mecánico del compuesto, por lo cual se eligen componentes cuya reacción química sea mínima (ver figura 2.1.).

Es conveniente conocer la ruta de fabricación del material compuesto antes de hacer la descripción del equipo para saber la función de cada una de las partes. La figura 2.2. muestra, esquemáticamente, el proceso de fabricación de acuerdo con el método de vórtice.

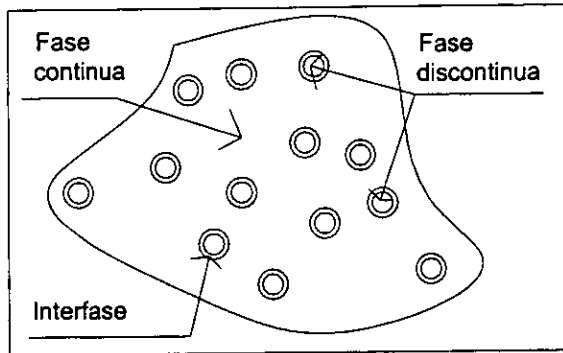


Figura 2.1. Fases principales en un material compuesto particulado.

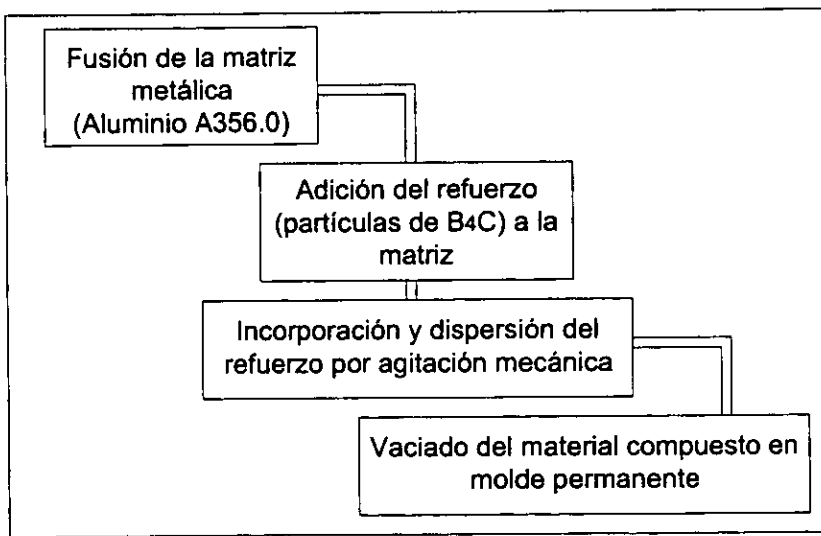


Figura 2.2. Ruta de fabricación del Al-B₄C_(p) con distribución homogénea de refuerzo: método de vórtice.

2.2.1. Diseño y acondicionamiento del equipo.

El equipo consiste de los siguientes elementos (ver figura 2.3.):

- 1) Horno eléctrico; con el que se obtiene el metal fundido. Este horno tiene la particularidad de ser inclinado hacia adelante lo que permite vaciar el material de manera fácil y segura.
- 2) Soporte; que mantiene fija la cubierta del horno y al mismo tiempo sujeta el taladro.
- 3) Taladro; cuyo motor hace girar el agitador hasta 1600 r.p.m.
- 4) Controlador de velocidad; para incrementar gradualmente la velocidad de agitación durante la parte de incorporación del refuerzo en la matriz.
- 5) Agitador; cuya función es distribuir las partículas dentro del metal fundido cuando se introduce y remueve la mezcla.

Además, se cuenta con un molde permanente usado en la colada del material (6), un horno de menor capacidad o mufla (7) para precalentar el molde antes de hacer la colada y un tanque de gas argón para desgasificar el material compuesto con lo que es posible eliminar impurezas.

El horno de inducción.

El horno fue diseñado con el propósito de hacer más fácil la colada del compuesto en un molde, porque está soportado sobre un eje sobre el cual puede girar e inclinarse. Esto evita sacar el crisol del horno con pinzas y vaciar manualmente, lo que puede tener cierto riesgo.

Las características de operación son: $V=220$ volts C.A., $I=12$ amperes y temperatura máxima= 5000°C .

El taladro y el controlador de velocidad.

Las r.p.m. del motor del taladro fueron manipuladas por un controlador de velocidad, con el fin de aumentar paulatinamente la velocidad del agitador hasta conseguir la incorporación y distribución de las partículas, es decir, se obtuvo experimentalmente el

rango de velocidad a la cual debe girar el agitador para evitar tanto la sedimentación como la flotación de las partículas.

Las características de operación del motor son: Velocidad máxima=1600 r.p.m., W=400 watts, V=127 volts C.A. e I=3.1 amperes.

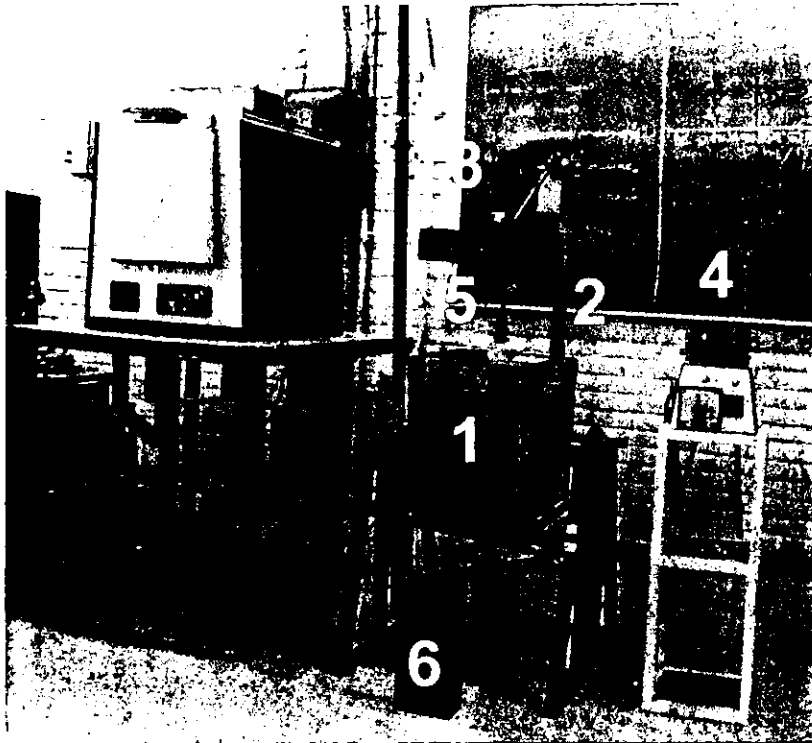


Figura. 2.3. Fotografía que muestra el equipo de dispersión del refuerzo en forma de partículas.

El agitador.

El agitador se tuvo que fabricar de un material que soportara altas temperaturas ya que es parte del equipo que está en contacto directo con la matriz líquida. Se utilizó el grafito para este fin porque no se disuelve a la temperatura de fusión del aluminio. Algunas

de las propiedades del grafito son: resistencia a la tensión de 1.8 Mpa, densidad de 2.3 g/m³ y temperatura de fusión de 3650 a 3695 °C.

El agitador (1) fue diseñado según las dimensiones del horno y del crisol, está unido a un eje de acero inoxidable (2) que va colocado a su vez en las mordazas del taladro (3) como se muestra en la figura 2.4.

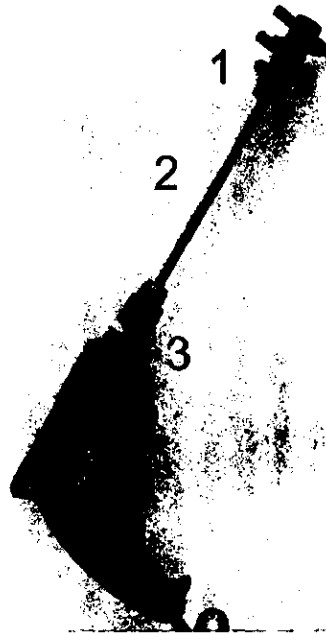


Figura 2.4. Fotografía que muestra los elementos de agitación mecánica para la dispersión del refuerzo.

El punto más importante es agitar fuertemente la matriz para procurar la infiltración del refuerzo. Como se puede observar en la figura 2.4 y en el plano número 1 (ver al final del capítulo), el agitador es un cilindro con cuatro pernos atravesados puestos a 90° uno con respecto al otro, que funcionan propiamente como aspas de secciones circulares. Este tipo de sección genera turbulencia procurando el mezclado más homogéneo. El agitador

tiene una forma geométrica sencilla lo que permite cambiar las aspas cuando sea necesario y también es de fácil maquinado.

Cabe mencionar que antes de utilizar este modelo de agitador, se probó otro modelo que tenía tres aspas cuadradas de 3 cm. de lado colocadas en dirección radial sobre un eje a 120° una con respecto a la otra. Este agitador fue hecho de acero inoxidable. A pesar de que el modelo generaba un vórtice, el material fue fundido por el tiempo de permanencia dentro del aluminio líquido y por la velocidad de agitación. Por esta razón se diseñó el agitador de grafito descrito anteriormente.

El molde permanente.

Las piezas obtenidas por colada directa en el molde, son probetas para el ensayo de tracción, que es una de las pruebas mecánicas más importantes para la caracterización del material compuesto Al-B₄C_(P). Las probetas tienen dimensiones estandarizadas con sección circular y diámetro nominal de 12.5 mm. (ver sección 4.4.2.).

2.3. Equipo adaptado con molde giratorio.

Para cubrir el segundo objetivo planteado en la introducción de este capítulo, se utilizó un sistema centrífugo como aglomerador de partículas. En este proceso, un molde se mantiene a ciertas r.p.m. mientras se realiza la colada. Bajo estas condiciones, las partículas de refuerzo cerámico pueden ser llevadas y concentradas en la periferia de las piezas fabricadas (ver sección 3.3.). En la figura 2.5., se muestra la ruta de fabricación de los materiales compuestos según el sistema centrífugo.

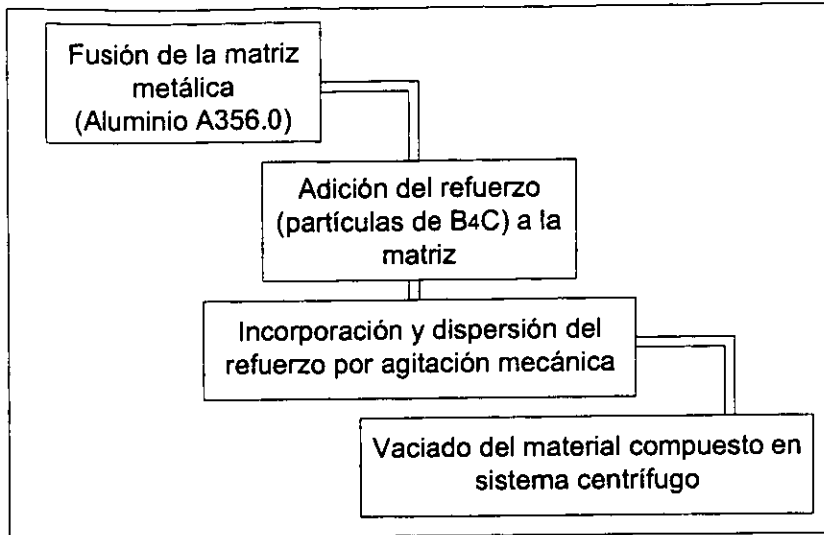


Figura 2.5. Diagrama de fabricación del Al-B₄C_(p) con concentración de refuerzo. Se puede notar que el procedimiento es similar al empleado para la fabricación con distribución homogénea de refuerzo, pero con una etapa diferente al final: sistema centrífugo.

2.3.1. Diseño y acondicionamiento del equipo.

El equipo consiste de los siguientes elementos (ver figura 2.6.):

- 1) Una mesa metálica; que es el soporte del sistema centrífugo.
- 2) El sistema de transmisión del movimiento del molde; constituido por un motor al que se aclopan dos catarinas de paso 40, 12 dientes, y una cadena de igual número de paso.
- 3) El molde permanente; que se coloca sobre un eje unido al motor por medio de la cadena.

Mesa metálica.

La mesa puede ser colocada fácilmente debajo del horno, de tal manera que la colada sea directa sobre el molde que soporta.

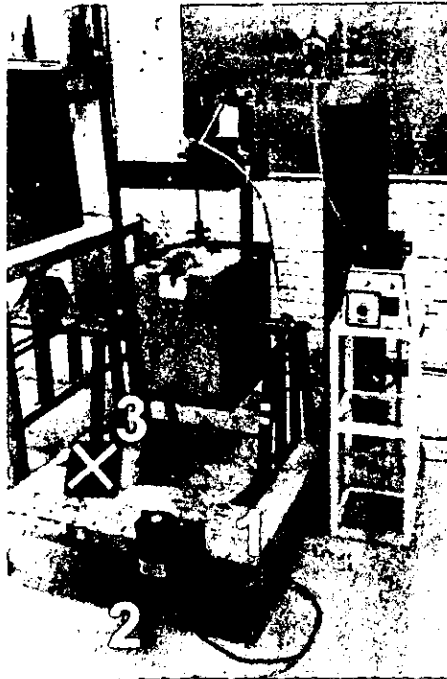


Figura 2.6. Fotografía que muestra el equipo adaptado con molde giratorio.

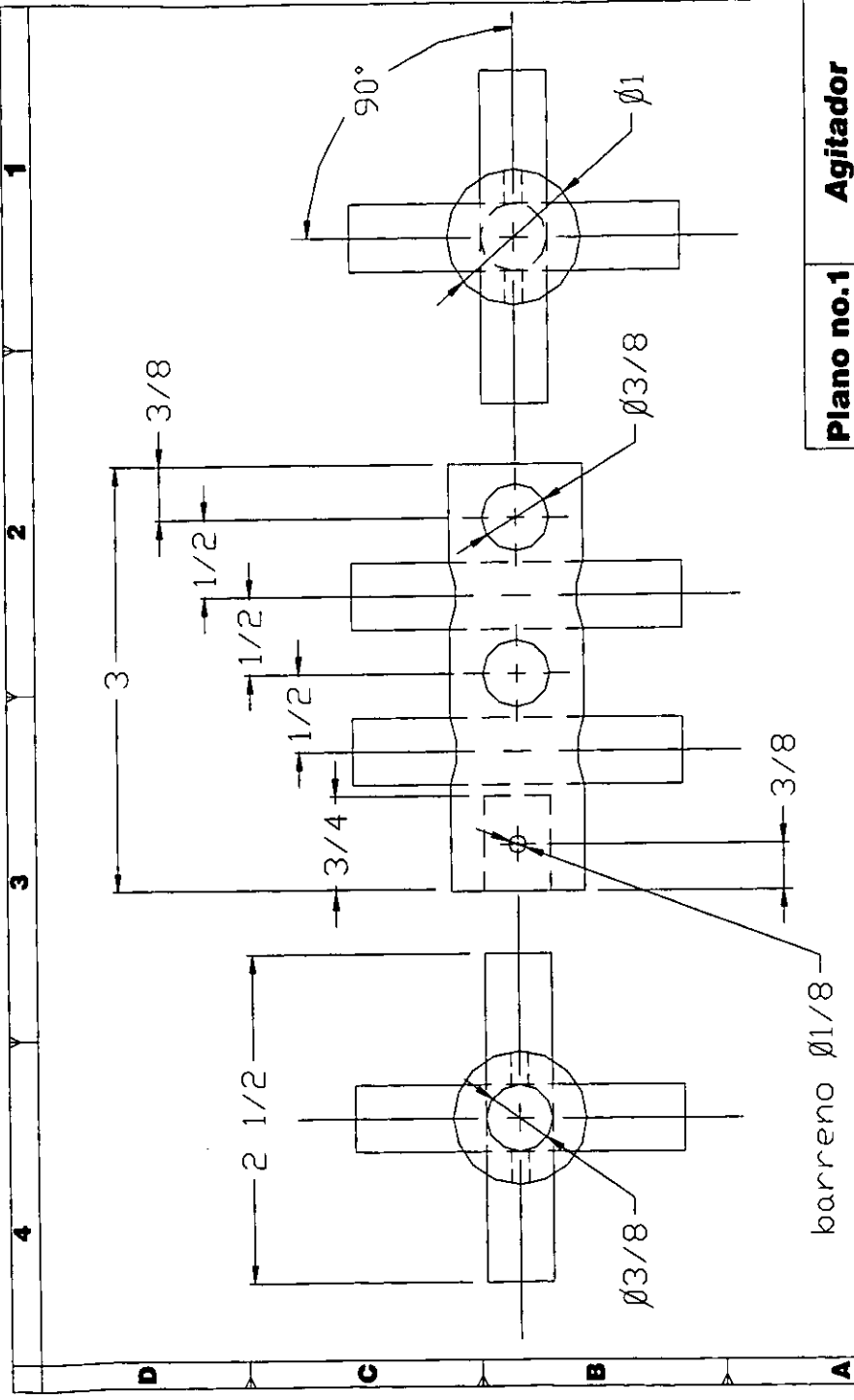
El sistema de transmisión.

El sistema diseñado de esta forma evita el calentamiento excesivo por el uso de cadena, procurando que el motor no se dañe por el calor desprendido y transmitido desde el molde, ya que la mezcla se vierte adentro a temperaturas elevadas; es decir, el sistema se auto enfría por la acción del giro de la cadena a la intemperie.

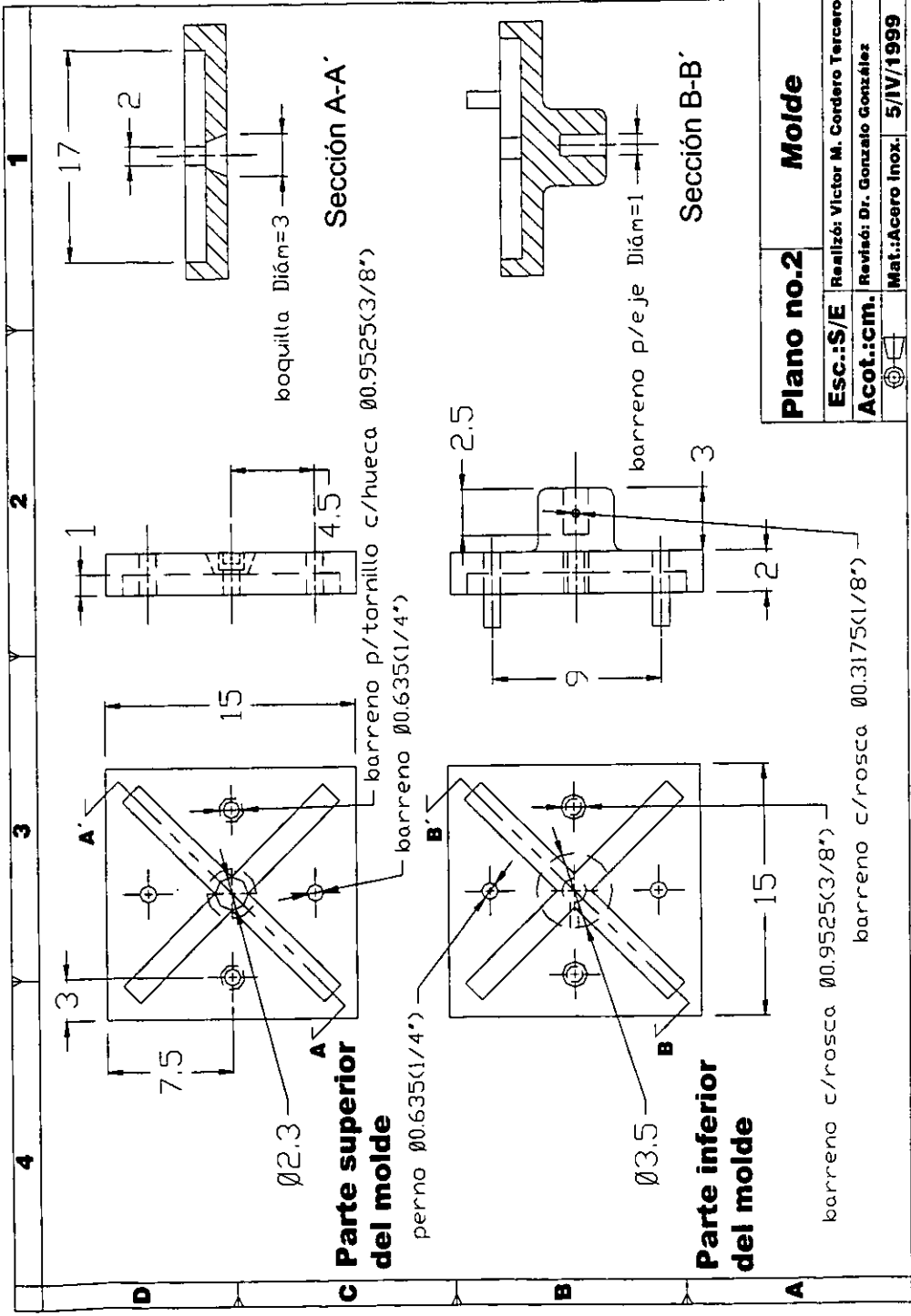
Cabe señalar que el motor que hace girar al molde es controlado por un variador de velocidad, por lo que se encontró experimentalmente el rango de velocidad a la cual las partículas fueron forzadas a desplazarse hacia la parte externa de la pieza del molde.

Molde permanente.

Con este molde se obtienen piezas en forma de cruz o de "X" en donde se sabe que el refuerzo es llevado, con cierta distribución, a determinadas caras. De estas piezas se prepararon algunas muestras para la caracterización del material (ver sección 3.3.1.). En el plano número 2 se muestra el diseño del molde.



Plano no.1		Agitador
Esc.:S/E	Realizó: Victor M. Cordero Tercero	
Acot.:plg.	Revisó: Dr. Gonzalo González	
	Mat.:Grafitto. 5/IV/1999	



Capítulo 3

Preparación del material
compuesto

$\text{Al-B}_4\text{C}$ (PARTÍCULAS)

CAPÍTULO 3. PREPARACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO Al-B₄C_(P)(PARTÍCULAS).

3.1. Introducción.

En los capítulos anteriores se mencionaron los problemas que presenta el método de vórtice y las posibles maneras para superarlos, así como sus ventajas con respecto a otros métodos. Además, se expusieron los parámetros del proceso más importantes que determinan la calidad de dispersión y los aspectos más trascendentes cuando se elaboran CMM_(P).

Cabe señalar que, para la preparación de los materiales compuestos Al-B₄C_(P), se siguió el método en la forma convencional [42, 48] con algunos cambios de acuerdo con las condiciones de un experimento de laboratorio en particular, pero sin perder los procesos básicos del método de fabricación. De tal forma que todos los parámetros se establecieron con base en los trabajos que anteceden a éste y en la experiencia.

En el presente capítulo se describen los procedimientos de los experimentos llevados a cabo para obtener los materiales compuestos.

3.2. Método de vórtice.

3.2.1. Descripción del proceso.

Considerando la ruta de fabricación de la figura 2.2, presentado en el capítulo anterior, se pueden distinguir cuatro etapas principales que se describen a continuación: (1) fusión de la matriz, (2) Adición del refuerzo, (3) dispersión del refuerzo por agitación mecánica y (4) vaciado en moldes.

1) Fusión de la matriz.

Se colocó aproximadamente ½ kilogramo de aleación de aluminio (Al: A356.0) en el interior del horno eléctrico a una temperatura de 780 °C durante 1 ½ horas hasta conseguir el metal en estado líquido. La temperatura de fusión de la aleación es de aproximadamente 560-610 °C [3, 31, 41].

2) Adición del refuerzo.

Las partículas de carburo de boro (B₄C) se colocaron en un paquete con 10% en fracción volumétrica (f.v.) con referencia a la matriz. Dichas partículas se obtuvieron comercialmente de la malla 320, en donde el tamaño oscila entre 10 y 50 μm. Las partículas ya han sido caracterizadas en trabajos previos [23, 42].

El porcentaje de refuerzo se obtuvo como indica el siguiente desarrollo:

La densidad ρ se define como la cantidad de masa M que hay en un determinado volumen V en el espacio:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3-1)$$

$$V = \frac{M}{\rho} \quad (3-2)$$

Se sabe que:

$$V_c = V_m + V_r \quad (3-3)$$

Donde V_c es el volumen del material compuesto; V_m es el volumen de la matriz; V_r es el volumen del refuerzo.

Como V_r debe ser de 10% del volumen total:

$$\frac{V_r}{V_m + V_r} = 0.1 \quad (3-4)$$

$$\frac{\frac{Mr}{\rho}}{\frac{Mm}{\rho_m} + \frac{Mr}{\rho}} = 0.1 \quad (3-5)$$

Despejando Mr se encontró la masa de las partículas de carburo de boro que se deben incorporar a la matriz, conociendo la masa del aluminio Mm . Se consideró la densidad del B_4C de $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ y del Al de $\rho_m=2.7 \text{ g/cm}^3$:

$$Mr = \frac{0.10}{0.90} * \frac{\rho}{\rho_m} * Mm \quad (3-6)$$

Por ejemplo, si el peso inicial del aluminio sólido es de 524 gramos, el peso de las partículas de B_4C es de 53.91 gramos equivalente a 10% f.v.

3) Incorporación y dispersión del refuerzo.

La mezcla de los elementos matriz-refuerzo se consiguió por medio de la fuerte agitación mecánica. Se colocó el paquete de partículas alrededor del agitador antes de ser introducido al metal líquido, por lo que, a diferencia de los procedimientos tradicionales, no se realizó el calentamiento previo de aquellas, esto tiene la ventaja de no oxidar excesivamente las partículas.

El agitador se introdujo con una velocidad pequeña de 20 a 40 r.p.m. y se incrementó gradualmente hasta 1100 r.p.m. El tiempo de agitación fue de 2 a 3 minutos. Con estas condiciones se evitó la aglomeración excesiva y flotación de las partículas. Se observó la formación de un vórtice con buena incorporación y dispersión. Se observó también, buena viscosidad de la mezcla al final de esta etapa.

Se sabe que cuando partículas sólidas son dispersas en un metal líquido, pueden ocurrir dos tipos de interacción: una interacción hidrodinámica entre el líquido y la

partícula, y una interacción no hidrodinámica entre las partículas mismas. Ambas interacciones producen un aparente incremento en la viscosidad de la mezcla, tal efecto ha sido confirmado con estudios experimentales que muestran que la viscosidad aparente de varios materiales compuestos es significativamente más alta que la viscosidad de las aleaciones no reforzadas.

4) Vaciado en molde permanente.

Es importante saber que en todos los procesos de manufactura en donde una aleación líquida con reforzantes es fundida por técnicas convencionales, como el vaciado en moldes de arena o permanentes, a menudo hay distribuciones heterogéneas de partículas, defectos como atrapamiento de gases o inclusiones de óxido. Las inclusiones son debidas a la falta de fluidez y presencia de burbujas en el metal. La fluidez está altamente relacionada con la viscosidad, y ésta es función de la velocidad de enfriamiento, temperatura de colada y cantidad de partículas en un sistema dado.

En procesos de dispersión, las aleaciones fundidas o semifundidas deben ser agitadas para mezclar los reforzantes, la íntima interacción entre la aleación fundida y los gases, debido a la agitación, causa la disolución de los gases. Además, si hay un vórtice creado por la agitación, puede causar succión de burbujas de aire-partículas dentro de la matriz fundida (atrapamiento de hidrógeno, principalmente). Para minimizar este efecto se desgasificó la mezcla con burbujeo de gas argón (Ar) a flujo lento, durante 1 minuto, antes de vaciar el material compuesto.

El molde fue precalentado a 500°C antes de hacer la colada porque se encontró que esto producía materiales compuestos con mejor acabado superficial. Después se dejó enfriar el molde a temperatura ambiente para extraer la pieza.

El procedimiento anterior permitió tener materiales compuestos con distribución homogénea de refuerzo, según se mencionó en el capítulo dos. El material compuesto del tipo Al-B₄C_(P) se caracteriza utilizando las técnicas que se describen en el capítulo cuatro.

3.3. Sistema centrífugo.

3.3.1. Descripción del proceso.

Con el procedimiento que se realizó en este caso, se obtuvieron materiales compuestos en donde el refuerzo es concentrado en la periferia de la pieza en forma de cruz o de "X".(propiedades anisotrópicas). Se utilizó también el método de vórtice para la fabricación de estos materiales compuestos, en donde la colada fue hecha en el molde del sistema centrífugo (ver sección 2.3).

Se consideró la velocidad del molde de 1200 r.p.m. porque es la velocidad necesaria para concentrar las partículas reforzantes en ciertas caras de la pieza. A esta velocidad, mantenida constante, se vertió el material compuesto en el interior del molde y se mantuvo girando por un lapso de 3 a 5 minutos. El molde se precalentó a 500 °C antes de la colada para proporcionar un medio todavía en estado semilíquido por donde las partículas pudieran moverse y concentrarse, es decir, se evitó una "solidificación rápida". En el capítulo cinco, se comentará este efecto sobre las muestras estudiadas (ver sección 5.2.2.).

La pieza obtenida se muestra en la figura 3.1 con una distribución ideal del refuerzo.

Para caracterizar este material compuesto se realiza lo siguiente:

- *Metalografía.* Se hace un análisis metalográfico para observar la distribución real del refuerzo y determinar también el incremento en el %f.v. logrado con el sistema centrífugo. De esta manera, se halla la cantidad de partículas reforzantes que fueron concentradas por unidad de volumen en el material compuesto (ver sección 4.2.).
- *Desgaste.* Uno de los principales propósitos de buscar la alta concentración de las partículas de B₄C, es poder incrementar la resistencia al desgaste y buscar posibles aplicaciones de este tipo de materiales compuestos.

Se espera, por lo tanto, que el material conseguido con el sistema centrífugo tenga mayor resistencia al desgaste con respecto al material compuesto fabricado según el método de vórtice y también con respecto al aluminio A356.0. La prueba de desgaste se realiza sobre la cara densa de partículas (ver sección 4.4.4).

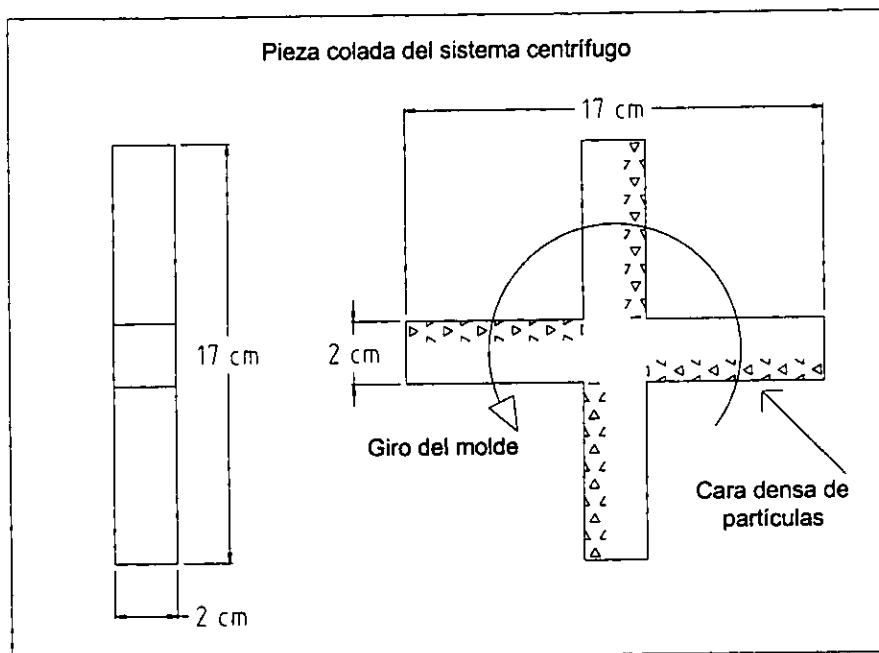


Figura 3.1. Pieza en forma de cruz con concentración ideal de refuerzo.

Capítulo 4

Técnicas de caracterización

CAPÍTULO 4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.

4.1. Introducción.

Para realizar el estudio de los materiales compuestos descritos en el capítulo anterior, se necesitan técnicas adecuadas. Las técnicas de caracterización, enlistadas a continuación, permiten el análisis metalográfico y el análisis de tipo mecánico, cuyos resultados se pueden interpretar para comprender el comportamiento del material compuesto.

Técnicas para el análisis metalográfico.

- *Microscopía óptica (MO). Se usa para el análisis metalográfico que revela detalles importantes de la microestructura del material como son: la morfología, el tamaño de grano y las fases presentes.*
- *Microscopía electrónica de barrido (MEB). Esta técnica permite obtener imágenes de superficies rugosas aprovechando la gran profundidad de campo (hasta de 40 μm), por lo que se emplea en el estudio de fractografía. Además, el MEB tiene una función llamada espectroscopía de rayos-X (EDS), con la que se podrá cuantificar la cantidad de un elemento químico dentro del material.*
- *Difracción de rayos-X (DRX). Es una técnica que permite identificar fases cristalinas del material, por lo que se espera diferenciar entre las fases primarias y las que surgieron de reacciones químicas entre los elementos presentes.*

Técnicas para el análisis mecánico:

- *Ensayo de microdureza. Se realiza para comprobar la resistencia nominal de los materiales compuestos. En caso de tener una precipitación coherente en la matriz, la microdureza se vería incrementada.*
- *Ensayo de tracción. Los resultados que ofrece esta prueba son parámetros importantes en el diseño mecánico (módulo elástico, resistencia de fluencia, etc.) por lo que se desean obtener las propiedades mecánicas del material compuesto y conocer la influencia del refuerzo sobre éste.*
- *Prueba de impacto. Es otra de las pruebas importantes hecha bajo condiciones diferentes de operación, que provee información sobre la tenacidad del material compuesto.*
- *Prueba de desgaste. En aplicaciones particulares, se busca minimizar el desgaste de piezas metálicas sujetas a fricción. Se espera que las partículas de carburo de boro tengan un efecto directo sobre este fenómeno, disminuyendo el deterioro según la forma en que fueron fabricados los materiales compuestos (ver capítulo tres).*

Enseguida, se presenta la información que se requiere conocer acerca de cada una de las técnicas.

4.2. Técnicas para el análisis metalográfico.

4.2.1. Preparación de muestras.

La microestructura de un material compuesto se revela sobre una superficie que es desbastada y pulida hasta conseguir un “acabado espejo”. Las muestras se preparan

cuidadosamente para tener una correcta observación e interpretación de las mismas. El proceso es como sigue:

Se selecciona una parte de la pieza (pieza que se obtuvo del vaciado en molde) y se corta. La superficie que deja la herramienta de corte sobre la pieza, es dañada hasta una profundidad de 0.5 mm aproximadamente. La profundidad del daño depende del tipo de cortador utilizado, la velocidad de corte y la dureza del material. La capa dañada se remueve mediante un desbaste realizado por abrasión de la superficie con papel abrasivo de SiC del número 100 seguido por 240, 320, 400 y 600, girando la muestra a 90° entre uno y otro. El procedimiento anterior permite que el daño hecho sobre la superficie por cada abrasivo sea eliminado por el paso siguiente del desbaste más fino. Después, se pule la superficie en un paño giratorio con pasta de alúmina en suspensión que también es cada vez más fina: 1 μm , 0.5 μm , 0.1 μm y 0.05 μm .

La muestra quedará pulida a “espejo”, cuando no se observen marcas de rallado a través del microscopio óptico.

La microestructura de la muestra, preparada de esta manera, puede observarse en el microscopio óptico (MO) y en el microscopio electrónico de barrido (MEB), y también pueden hacerse pruebas de difracción de rayos-X y ensayos de microdureza.

Un ataque químico incluye cualquier proceso usado para revelar la microestructura de un metal puro o aleación. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química por disolución.

En las aleaciones compuestas de dos o más fases, los componentes se revelan durante la acción química al atacar, preferencialmente, el reactivo a una o más de estos constituyentes debido a la diferencia en composición química de las fases. La selección del reactivo de ataque está determinada por el metal o aleación y la estructura específica que se desea ver [7].

4.2.2. Microscopía óptica (MO).

La microscopía óptica es una herramienta importante para el estudio microestructural de los materiales. Es posible determinar el tamaño de grano, y el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del material. El límite de aumentos del microscopio óptico es de aproximadamente 2000x.

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El microscopio más costoso no revelará la estructura de una muestra que haya sido preparada en forma deficiente. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es comparativamente sencillo y requiere de una técnica desarrollada sólo después de práctica constante. El último objetivo es obtener una superficie plana, sin ralladuras, semejante a un espejo [7]. Las etapas necesarias para preparar adecuadamente una muestra se explicaron en la sección 4.2.1.

Los principales elementos del microscopio óptico son los sistemas ópticos y de iluminación. Este instrumento utiliza la luz visible que debe ser usada en reflexión para estudiar la microestructura, en donde las distintas regiones originan diferencias en la reflexión y éstas producen contrastes en la imagen.

El propósito del ataque químico, como ya se mencionó, es hacer visibles las características estructurales del material por medio de reactivos.

Con base en la información obtenida de la norma ASTM E 407-70 [6], se determinaron dos tipos diferentes de reactivos que se utilizan generalmente como reveladores de grano de aluminio puro: reactivo tipo *Tucker*, sirve para revelar la estructura general; y reactivo tipo *Keller*, revela la estructura de grano bajo luz polarizada. Estos reactivos se usaron para observar la microestructura del compuesto $\text{Al-B}_4\text{C}_{(p)}$. Su composición es:

Reactivo para aluminio tipo Keller:

2 ml. de ácido fluorhídrico HF (48%)
3 ml. de ácido clorhídrico HCl (conc.)
20 ml. de ácido nítrico HNO ₃ (conc.)
175 ml. de agua H ₂ O

Reactivo para aluminio tipo Tucker.

15 ml. de ácido fluorhídrico HF (48%)
45 ml. de ácido clorhídrico HCl (conc.)
15 ml. de ácido nítrico HNO ₃ (conc.)
25 ml. de agua H ₂ O

La muestra debe ser sumergida en estos reactivos durante un tiempo aproximado de 10-20 segundos y posteriormente enjuagarse en agua.

4.2.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB).

La microscopía electrónica de barrido es un medio muy versátil para investigar la microestructura de materiales metálicos. Básicamente, el procedimiento es como sigue: la superficie de la probeta a examinar se barre con un haz de electrones, el haz que se refleja es recibido en un tubo de rayos catódicos formando una imagen que aparece en la pantalla, en donde se observan las características de la muestra. La superficie de la probeta debe ser eléctricamente conductora, independientemente de que esté o no pulida y atacada; es decir, la muestra no requiere de una preparación previa para su observación, si así se desea, lo que constituye un factor importante para estudiar la fractura en materiales (fractografía) o estudios específicos en superficies rugosas en general.

Con esta herramienta es posible utilizar aumentos de 10 a 50 000 x, con gran profundidad de campo hasta de 40 μm . Equipado con accesorios, se consigue el análisis químico elemental cualitativo y semicualitativo de áreas superficiales muy localizadas. Para mayor detalle acerca de esta técnica se recomienda consultar las siguientes referencias: [32, 33].

Todas las señales que son enviadas desde la muestra pueden ser detectadas y amplificadas por medio de dispositivos adecuados a cada caso. La importancia de esto es que cada uno de los fenómenos provee distinta información acerca del material estudiado.

Hay dos maneras de obtener esta información: (1) por electrones retrodispersados y (2) por electrones secundarios. Los electrones retrodispersados son utilizados sobre todo para obtener un contraste químico en la muestra, y los electrones secundarios son utilizados cuando se requiere un contraste topográfico.

4.2.3.1. Espectrometría de rayos-X.

La espectrometría se define como un método de análisis cualitativo y cuantitativo de elementos químicos basados en la relación existente entre la energía de emisión de un fotón de RX (proveniente de una desexcitación electrónica) –eje X-, y el número de eventos del mismo tipo que ocurren por unidad de tiempo –eje Y-.

Como toda irradiación electromagnética, los rayos-X están formados por unidades indivisibles llamadas fotones, los cuales tienen bien definida su energía (0.1 – 100 KeV), la generación de estos fotones puede ser derivada por las transiciones electrónicas dentro del átomo.

Por medio de la desexcitación electrónica de cada elemento químico contenido en una muestra, se puede identificar ese elemento a partir de su longitud de onda característica o de su energía, en el primer caso la técnica se denomina WDS y en el segundo caso EDS. Cada elemento de la tabla periódica posee energías particulares y son una consecuencia de sus

niveles de energía atómicos (capas electrónicas). También, a partir de las intensidades se pueden inferir las concentraciones máxicas de estos elementos mediante métodos ya estandarizados (método ZAF*).

Las ventajas y desventajas de este análisis son:

Ventajas:

- 1) La técnica intuye la composición química del material compuesto de manera rápida sin importar el carácter cristalino o amorfo de la muestra en tan sólo algunos minutos, e incluso detecta elementos ligeros a partir de $Z=5$
- 2) Puede ser utilizada para complementar métodos de difracción de rayos-X.
- 3) La preparación de la muestra no requiere de un cuidado específico para su análisis, siempre y cuando su tamaño no exceda a 3 cm^3 .
- 4) El tamaño de la sonda medida es menor a $1 \mu\text{m}^2$, pero en realidad el volumen de emisión es mucho más grande y depende del número atómico del material

Desventajas:

- 1) El método no es aplicable a todo elemento químico por debajo del número atómico $Z=5$.
- 2) Los elementos químicos vecinos de acuerdo su número atómico, pueden tener sus líneas espectrales traslapadas, tal es el caso del boro y el carbón, lo que puede influir en la adecuada cuantificación química del material compuesto.

4.2.3.2. Análisis EDS y WDS.

En cualquier método de análisis químico basado en mediciones características de las líneas espectrales de rayos-X, se debe tener establecida la posición de las líneas espectrales de cada elemento. Estas líneas corresponden a energías o longitudes de onda que son producto del "salto" de un electrón de órbita superior a una inferior. La detección de esa

* ZAF. Es un método de corrección de intensidades fotónicas X, utilizado durante las mediciones por EDS.

señal puede hacerse por difracción selectiva (dispersión de longitud de onda o WDS), o conteo selectivo (discriminación de amplitud de señal, dispersión de energía o EDS).

Estos tipos de análisis permiten, como ya se mencionó, cuantificar la composición y la cantidad de un elemento químico dentro del material. Para más información sobre el método referirse a la bibliografía. [9, 32, 33, 43].

4.3. Difracción de rayos X (DRX).

La difracción de rayos-X es la herramienta más útil para caracterizar y determinar la estructura de un sólido cristalino.

Como los rayos-X tienen una longitud de onda aproximadamente igual a la distancia de separación de los átomos en sólidos, cuando aquellos se dirigen hacia un material cristalino los difractarán los planos de los átomos en el cristal. Si un haz de rayos-X choca a algún ángulo arbitrario contra un conjunto de planos cristalinos, generalmente no habrá un haz reflejado, porque los rayos reflejados de los planos del cristal deben viajar diferentes longitudes y tenderán a estar “fuera de fase” o a cancelarse entre sí; sin embargo, a un ángulo específico, conocido como *ángulo de Bragg* θ , los rayos reflejados estarán en fase porque la distancia viajada será un número entero de las longitudes de onda [7]. Por lo tanto, para acceder a la información sobre la estructura cristalina de la muestra, se debe tomar en cuenta la siguiente relación entre el ángulo de incidencia del haz de rayos-X, θ , la longitud de onda de la radiación, λ , y la distancia entre planos del cristal, d , (ver figura 4.1.). Estos datos se expresan en la ecuación de Bragg como:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (4-1)$$

Los rayos difractados se detectan en un contenedor y se transforman en pulsos eléctricos los cuales se registran análogamente; con los datos obtenidos y con la ayuda de una computadora se obtienen gráficas de intensidad relativa en función de 2θ , conocidas

como *difractogramas*, en donde los picos más intensos corresponden a un mayor número de planos orientados en esa dirección. Para más detalles de esta técnica se recomiendan las siguientes referencias [9, 28].

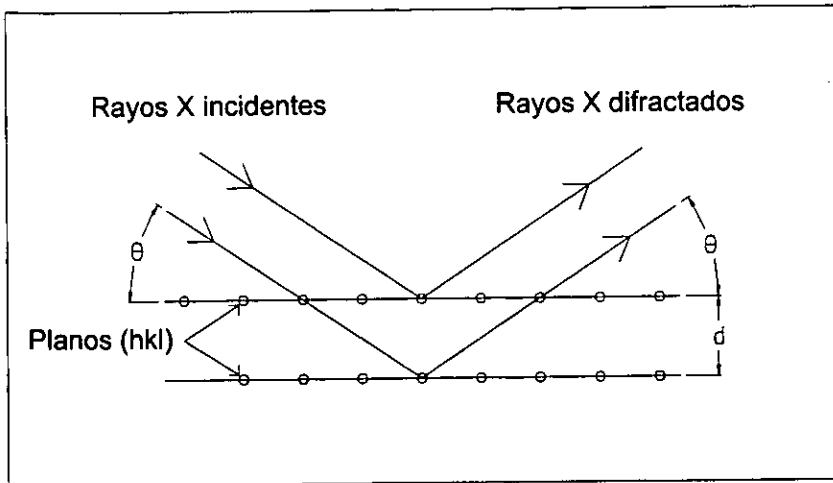


Figura 4.1. Ley de Bragg: $n\lambda=2dsen\theta$

4.4. Técnicas para el análisis mecánico.

La selección de los materiales se realiza con base en la aplicación requerida, es decir, se establece por ejemplo si el material debe ser dúctil; si debe ser rígido; si estará sometido a grandes esfuerzos o a una fuerza intensa repentina; si se mantendrá en un ambiente a elevadas temperaturas o a condiciones de abrasión, etc. Las propiedades mecánicas indican cual es el material más adecuado para esas condiciones de operación.

Las propiedades mecánicas son obtenidas a partir de ensayos practicados sobre probetas normalizadas. Tanto el procedimiento de la prueba como las formas de las probetas se diseñan para representar idealmente diferentes condiciones de carga.

4.4.1. Ensayo de microdureza.

La dureza se define como la resistencia que opone un material al tratar de ser penetrado. Cualquier técnica de dureza se basa en el principio mediante el cual un material supuesto duro (indentador) penetra al material usado como muestra, formándole una huella. Por consiguiente, cuanto más pequeña sea la huella obtenida en condiciones normalizadas, más duro será el material ensayado.

En este trabajo se realizan ensayos de dureza para comprobar la resistencia nominal de los materiales compuestos $\text{Al-B}_4\text{C}_{(p)}$, en particular, para verificar los posibles cambios de composición en la matriz.

Debido al proceso de fabricación, se desea averiguar si se formaron en la matriz (primera fase o fase continua) precipitados coherentes (terceras fases) por los cuales haya aumentado la resistencia del material. Esto quiere decir que, cuando se forma un precipitado coherente, los planos de átomos en la red del precipitado están relacionados continuamente con los planos en la red de la matriz, con esto se crea una interrupción extensa en toda la red de la matriz y se obstaculiza el movimiento de una dislocación, aún si la misma sólo pasa cerca del precipitado coherente.

Si no hay una variación apreciable en la dureza de la matriz del material compuesto $\text{Al-B}_4\text{C}_{(p)}$ con respecto a la aleación de aluminio, se concluirá que de haber precipitados, éstos no son coherentes, es decir, que el precipitado puede interrumpir de manera no apreciable la estructura de la matriz circundante. En consecuencia, el precipitado impide el deslizamiento sólo si se encuentra directamente en la trayectoria de las dislocaciones [7] (ver figura 4.2.). Por el contrario, se deducirá que existen precipitados coherentes si la dureza se ve incrementada.

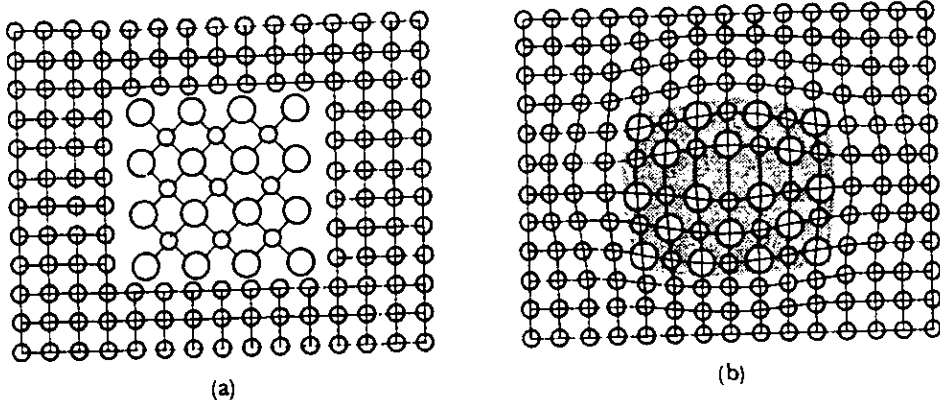


Figura 4.2. (a) Precipitado sin relación con la estructura cristalina de la matriz (no coherente). (b) Precipitado coherente.

En la caracterización del material compuesto, se utiliza la técnica de microdureza *Vickers*, porque la separación entre las partículas de carburo de boro es tal que resulta imposible hacer una medición exclusiva de la matriz con los durómetros convencionales (Rockwell y Brinell), ya que las dimensiones de las huellas dejadas por los indentadores son demasiado grandes lo que falsearía los resultados. El ensayo de microdureza no se refiere a pequeños valores de dureza sino mas bien al uso de impresiones pequeñas debidas a bajas cargas que abarcan desde 1 a 1000 gramos.

El método consiste en penetrar el indentador (pirámide cuadrada de diamante con caras de 136° como se muestra en la figura 4.3.) sobre la superficie pulida del material bajo una carga (en gramos), determinada previamente, que se aplicará por un tiempo de 10 a 25 segundos.

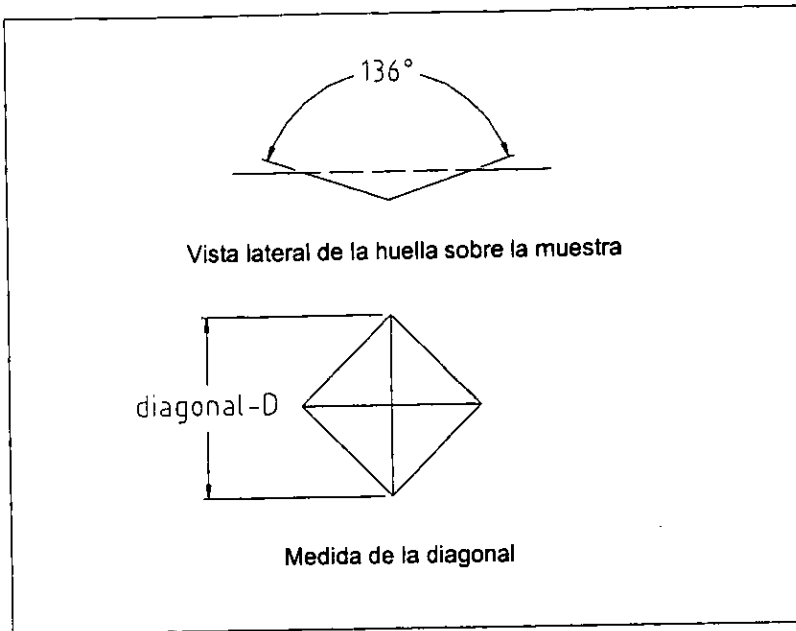


Figura 4.3. Marca del indentador tipo Vickers.

A continuación se hace uso de un microscopio óptico y se calcula el área superficial de la huella por la medida de sus dos diagonales D y de su valor medio. Finalmente, se divide la carga aplicada por el área superficial de la huella para obtener el número de dureza Vickers, como sigue:

$$HV = \frac{2F \operatorname{sen} \theta / 2}{d^2} * 1000 \quad (4-2)$$

Donde F es la carga en gramos, θ es 136° y d es la longitud de la diagonal media de la huella en μm . Esto da como resultado la siguiente ecuación:

$$HV = \frac{1854.4F}{d^2} \quad (4-3)$$

Por otra parte se dispone de tablas de conversión con la finalidad de poder interpretar las lecturas del ocular del microscopio y así obtener la medida directamente en números de dureza [57].

4.4.2. Ensayo de tracción.

Si a un material se le aplica una fuerza externa y éste tiende a cambiar su forma o tamaño el material presentará una resistencia a esa fuerza. La resistencia interna del cuerpo se conoce como *esfuerzo* y los cambios en las dimensiones del cuerpo que la acompañan se llaman *deformaciones* o alargamientos [7].

El ensayo mecánico esfuerzo vs deformación más común es el de *tracción*, en donde una probeta se coloca por sus extremos en las mordazas de la máquina de ensayo y se somete a una carga de tracción uniaxial y gradual, usualmente hasta la ruptura (ver figura 4.4.).

La fuerza que produce la deformación depende de las formas geométricas de las probetas. Sin embargo, los resultados de un ensayo pueden aplicarse a todos los tamaños y formas de probeta para un material dado si se determina el esfuerzo nominal σ y la deformación nominal ε de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4-4)$$

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} \quad (4-5)$$

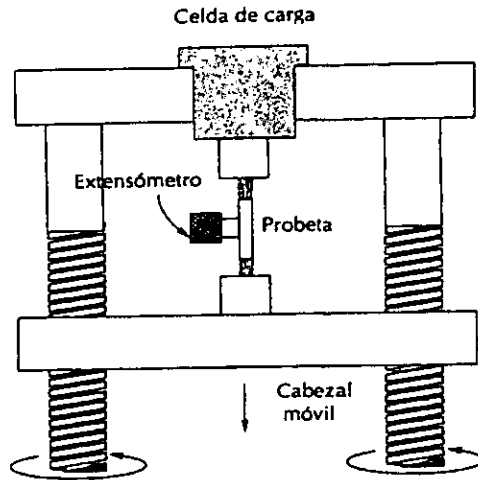


Figura 4.4. Esquema de la máquina de ensayo de tracción.

en donde A_0 es el área de la sección transversal de la muestra antes de la prueba, l_0 y l son las longitudes original y final de la zona de prueba, respectivamente, antes y después de aplicar la carga F . Las unidades en el Sistema Internacional del esfuerzo σ están en MPa = 10^6 (N/m²) y de la deformación ϵ en (mm/mm), generalmente se expresa como porcentaje multiplicando la ecuación (4-5) por 100 [13].

El ensayo de tracción dura varios minutos y es de tipo destructivo, cuyos resultados se registran en una computadora que proporciona la información en forma de datos y gráficas.

Hay varios tipos de probetas según las formas geométricas (dimensiones y secciones transversales) de cada una de ellas. En la figura 4.5. se muestra la probeta normalizada de

sección circular (12.5 mm de diámetro nominal) que fue empleada en la prueba de acuerdo con la norma ASTM B557M-84 [4].

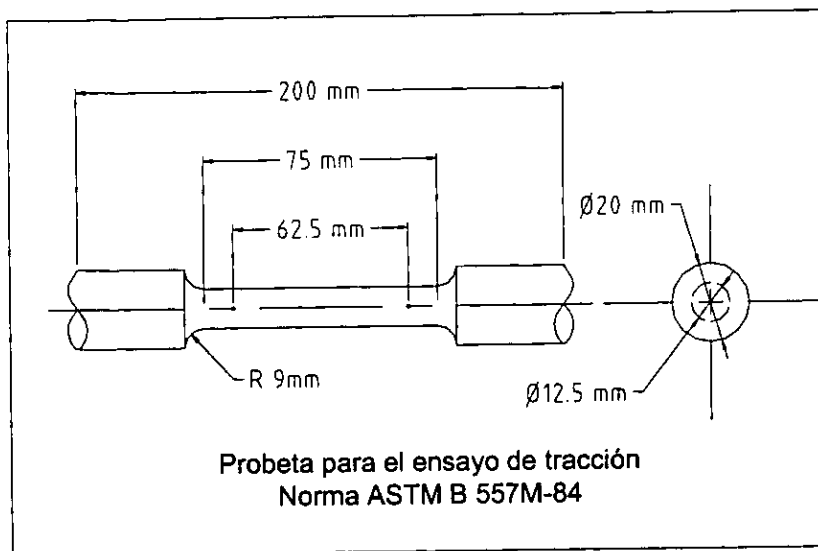


Figura 4.5. Probeta para el ensayo de tracción (material compuesto) con dimensiones normalizadas.

De acuerdo con el proceso explicado en el capítulo anterior, las probetas se fabricaron por colada directa en molde. El principal problema que se tiene aquí es el atrapamiento de gases durante la solidificación del material compuesto, lo que da como resultado la existencia de porosidades en la pieza. Por otro lado, se sabe que los esfuerzos que se aplican en los diferentes materiales, tienden a propagar aquellas grietas que tienen una orientación perpendicular al eje de tracción. En el caso particular de estos materiales compuestos, el razonamiento sigue siendo válido pero tendrá que ser matizado por el hecho de que las partículas deben ser barreras a la propagación de las fisuras. Por estas razones, se espera una repercusión importante sobre las propiedades mecánicas del material compuesto.

Las propiedades que se pueden determinar con una prueba de tracción son:

- *Esfuerzo de fluencia.* Es el esfuerzo al cual cambian los materiales de comportamiento elástico a comportamiento plástico.
- *Resistencia a la tensión.* Es el esfuerzo resultante de la mayor fuerza aplicada y por ello es el esfuerzo máximo que ocurre en la curva esfuerzo vs deformación. Es el esfuerzo en el que se inicia la *estricción* o *garganta* en la probeta durante el ensayo.
- *Módulo de elasticidad.* También se conoce como módulo de Young, está definido como $E = \sigma/\epsilon$ y es una medida de la *rigidez* del material. Ésta es una propiedad muy importante para el diseño en ingeniería.
- *Ductilidad.* Mide el grado de deformación que un material puede soportar sin romperse.

4.4.3. Prueba de impacto.

Para poder seleccionar un material que resista un choque o golpe intenso y repentino, debe medirse su resistencia a la ruptura mediante una prueba de impacto. Dicha prueba provee información sobre la *tenacidad relativa* del material compuesto, que puede definirse como la capacidad que tiene el material de absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. Las condiciones de la prueba son las más severas con respecto a la fractura como lo son: velocidad de deformación elevada y estado triaxial de tensiones, que es introducido por la presencia de una muesca [13].

Los materiales que presentan alta resistencia y alta ductilidad tienen alta tenacidad. Los cerámicos, por ejemplo, tienen escasa tenacidad debido a que son quebradizos y virtualmente no presentan ductilidad.

Se han diseñado muchos procedimientos de ensayo. El *ensayo Charpy* se emplea en este trabajo con base en la norma ASTM E 23-93a [5], usando probetas con muesca en V y probetas sin muesca (ver figura 4.6.). Las probetas con muesca en V miden de mejor manera la resistencia del material a la propagación de la fractura [1], sin embargo, se

realizarán pruebas con ambas formas de probetas para determinar la variación que exista sobre la tenacidad del compuesto $Al-B_4C_{(P)}$, comparando resultados que se obtengan con respecto a la aleación de aluminio A356.0. En el ensayo, la probeta se coloca en un tornillo de banco de manera semejante a una viga sencilla soportada en ambos extremos.

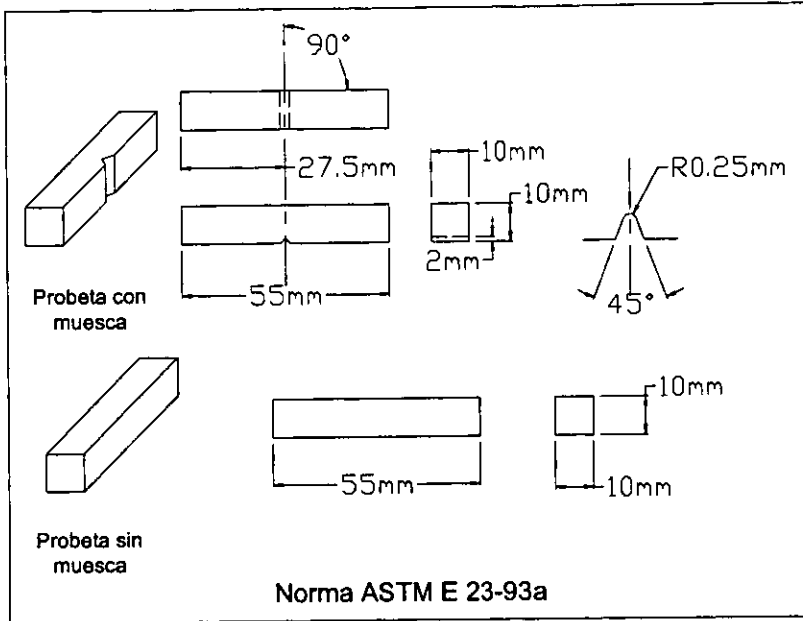


Figura 4.6. Probetas para la prueba de impacto tipo Charpy.

La máquina de impacto consta de un péndulo oscilante de peso fijo, que es elevado a una altura estándar. A esa altura, con referencia al tornillo de banco, el péndulo tiene una cantidad definida de energía potencial. Cuando el péndulo se libera, esta energía se convierte en energía cinética hasta que golpea a la muestra (la muestra Charpy se golpeará atrás de la muesca en V). Una parte de la energía del péndulo se utilizará para romper la muestra, el resto de la energía impulsará a el péndulo hacia el lado opuesto con respecto a su punto de partida. Por lo tanto, la altura que alcanza el péndulo después de romper la muestra, será menor que la altura que tenía al inicio de la prueba.

Debido a que el péndulo no es ideal, existe pérdida de energía por la fricción del brazo del péndulo y la altura que alcanza al final de una oscilación es menor con respecto al punto inicial de su movimiento libre. Esto se toma en consideración para calcular la energía de impacto.

La energía absorbida en el impacto se puede calcular como:

$$\Delta E = mgH(s.p.) - mgH(c.p.) \quad (4-6)$$

Donde:

ΔE , es la energía absorbida por el material; [Joules].

m , es la masa del péndulo; [26.06 kg].

g , es el valor de la de la gravedad; [9.81 m/s²].

$H s.p.$, es la altura alcanzada por el péndulo sin probeta.

$H c.p.$, es la altura alcanzada por el péndulo después de golpear la probeta.

4.4.4. Prueba de desgaste.

La resistencia al desgaste se correlaciona de modo estrecho con la dureza, por ejemplo, los dientes de un engrane en una transmisión de un vehículo automotor deben ser lo suficientemente duros para que no se desgasten rápidamente.

El desgaste se puede definir como el deterioro no intencional resultante del empleo o del ambiente; puede considerarse esencialmente como un fenómeno de superficie [7]. El desgaste es una de las influencias más destructivas a que están expuestas los metales, porque generalmente involucra pérdidas progresivas en el material. El desplazamiento y la separación de las partículas mecánicas de una superficie mecánica puede producirse por contacto con: (a) otro metal (desgaste adhesivo metálico), (b) un abrasivo metálico o uno no metálico (abrasión), o (c) líquidos o gases en movimiento (erosión).

Debido a la importancia de este fenómeno, se sometieron muestras del compuesto $\text{Al-B}_4\text{C}_{(P)}$ a pruebas de desgaste. Como el carburo de boro es un material muy duro empleado generalmente como material abrasivo, se espera que el material compuesto posea una superficie altamente resistente al desgaste respecto a la aleación de aluminio A356.0. Esta prueba se aplicará a cada uno de los compuestos según su proceso de fabricación, descritos en el capítulo tres.

Existen en el mercado diferentes tipos de máquinas para evaluar el desgaste, todas ellas requieren el diseño de un par metálico, el cual provee la interfase friccionante. Para este trabajo, dicha interfase friccionante consiste de un cilindro que gira a ciertas r.p.m. sobre su eje horizontal, en cuya superficie se coloca la probeta mantenida en contacto durante la prueba (ver figura 4.7.).

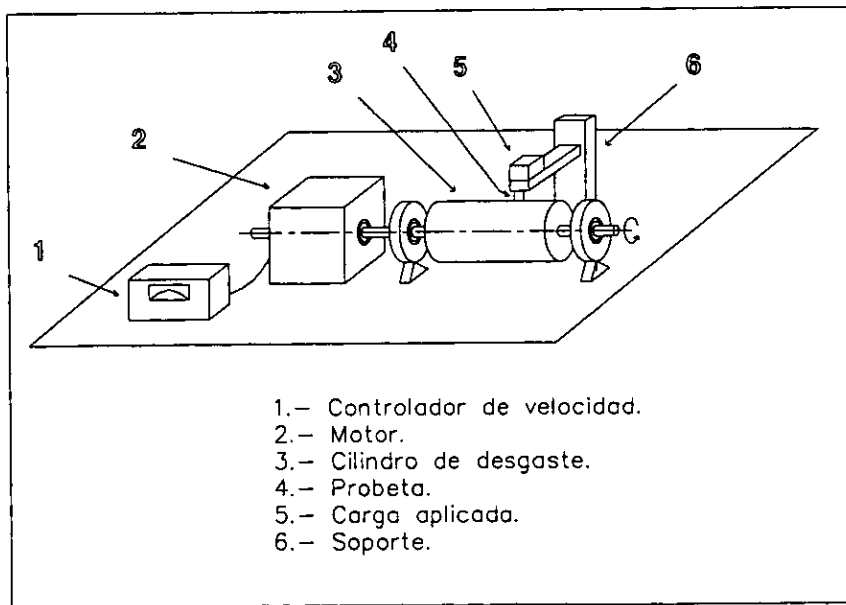


Figura 4.7. Equipo utilizado en la prueba de desgaste.

El procedimiento de la prueba, al igual que en las pruebas anteriores, se tiene normalizado según ASTM G83-90, en donde las variables más importantes son: la carga nominal, la velocidad de deslizamiento, las condiciones atmosféricas y la temperatura del medio ambiente. Es muy importante trabajar, además, bajo condiciones estrictas de limpieza [46].

La cantidad de desgaste puede ser establecida pesando la muestra del material con una balanza analítica antes de iniciar la prueba y a intervalos de tiempo determinados. Los resultados de las pruebas son de carácter comparativo entre los diferentes materiales.

Las condiciones de trabajo son las siguientes:

- Se utiliza una balanza analítica BP 310 P con una precisión de milésimas de gramo y una capacidad máxima de 350 gramos.
- Máquina de desgaste. Consta de un motor eléctrico de 1/4 HP conectado a un sistema de transmisión para hacer girar el cilindro de desgaste. Otras características del motor son: $I=2.5$ amperes, $V=90$ volts, y 2400 r.p.m.
- Cilindro de desgaste. El cilindro es fabricado de acero norma SAE 4140, templado y revenido, con dureza de 53 HRc y cuya superficie está pulida. La dureza del cilindro es mayor que la dureza de los constituyentes del material compuesto. El cilindro de desgaste ha sido probado en experimentos anteriores y se sabe que ofrece resultados confiables [23].
- Velocidad del cilindro de desgaste. Las velocidades se determinan según el tipo de material y a su comportamiento mecánico. Para el caso particular del experimento, se considera la velocidad de 900 r.p.m.
- Carga aplicada. Se considera una carga de 1.4 kg.
- Probeta. Las probetas son de 0.7 plg. de largo con sección cuadrada de 0.35 plg. de lado. Dichas probetas se obtienen de la pieza en forma de "X" (o de cruz) que se elaboró de acuerdo con el proceso explicado en el capítulo tres. Las probetas se cortaron con un disco.

Para esta prueba, se diseñó un portamuestras de acero inoxidable (ver figura 4.8.).

- Temperatura. Las pruebas se realizan a temperatura ambiente.

- Lubricante. No se emplea ningún lubricante debido a que el cilindro de desgaste no presenta calentamiento durante la prueba.
- Intervalos de tiempo. Las probetas se pesan a intervalos de 1, 5, 10, 15, 30, 60 minutos, cuidando que el cilindro quede completamente limpio después de cada prueba. El tiempo total de la prueba para cada probeta se considera de aproximadamente una hora.

Todas las condiciones de la prueba de desgaste se establecieron experimentalmente. Bajo estas condiciones, la probeta de aluminio A356.0 (matriz sin reforzar) sufrió severas pérdidas de material (ver sección 5.3.5.). Tomando como punto de referencia este material, se espera que el material compuesto tenga mayor resistencia debido a la presencia de las partículas reforzantes.

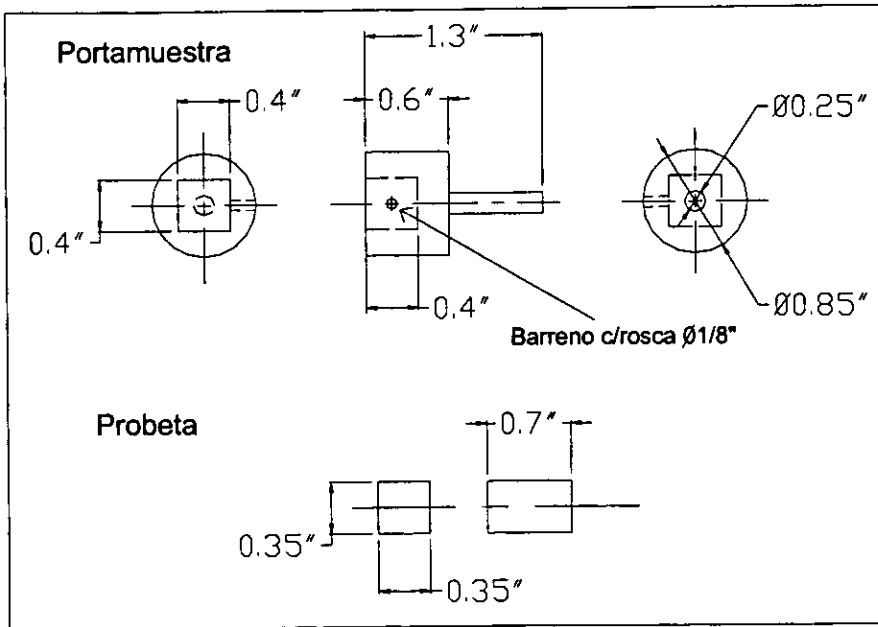


Figura 4.8. Portamuestras y dimensiones de la probeta para la prueba de desgaste.

Capítulo 5

Resultados

CAPÍTULO 5. RESULTADOS.

5.1. Introducción.

El estudio del material compuesto del tipo Al-B₄C_(P) a 10% f.v., se realizó con base en las técnicas experimentales de caracterización descritas con detalle en el capítulo anterior. Los resultados que se exponen en el presente capítulo, permiten comparar las características y propiedades del material compuesto con las correspondientes de la aleación de aluminio A356.0 (material que fue elegido como la matriz). Con esto, será posible conocer la influencia del refuerzo sobre el comportamiento mecánico del material compuesto.

Se sabe que las características de la microestructura de un material compuesto de matriz metálica dependen de la historia mecánica (trabajo en frío) y térmica (tratamientos térmicos) a la que éste sea sometido [1, 7, 30]. En este trabajo, se realizó un estudio metalográfico para conocer los cambios en la microestructura de la matriz que pudieron ocurrir por la reacción de ésta con el carburo de boro durante el proceso de fabricación únicamente. No se aplicaron procesos de conformado por deformación como laminado, forjado o extrusión, ni tampoco se realizaron tratamientos térmicos al material compuesto. Las modificaciones que se determinaron en la matriz fueron causadas solamente por la adición del carburo de boro en forma de partículas y por el método de fabricación.

Se investigaron los cambios en la microestructura de la matriz mediante las técnicas de difracción de rayos-X (DRX), los análisis de tipo elemental (EDS) y los histogramas de tamaño de grano. El estudio se complementó por medio de fractografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB), con el que se deducen los modos de fractura en materiales compuestos sujetos a pruebas mecánicas destructivas y los defectos de porosidad en las piezas elaboradas.

Debido a que el material compuesto Al-B₄C_(P) es clasificado como un material estructural se requiere obtener sus propiedades mecánicas, las cuales se determinaron mediante un estudio de tipo mecánico. Para este fin, se realizaron varias pruebas con las que se obtuvieron, principalmente, el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, la ductilidad y la tenacidad. También se hicieron pruebas de microdureza sobre la matriz para seguir, de manera indirecta, la formación de precipitados coherentes.

Se trataron en forma conjunta los resultados obtenidos para los casos del material compuesto elaborado con el método de vórtice y del material compuesto elaborado con el sistema centrífugo, únicamente en los puntos donde fue posible hacer una comparación directa entre estos materiales. Estos puntos incluyen: (1) la distribución de partículas de carburo de boro, que es expuesto en la sección 5.2.2. y (2) la pérdida de material cuando los materiales compuestos son sometidos a pruebas de desgaste, como se puede ver en la sección 5.3.5. Además, en este último punto se incluyeron muestras de la matriz sin reforzar para obtener resultados más completos.

En cada una de las secciones del capítulo se explica el porqué se aplica la técnica, cómo se realizó, los resultados obtenidos y finalmente se exponen las conclusiones parciales hasta ese momento. Más adelante se presentan las conclusiones generales del trabajo.

5.2. Caracterización metalográfica.

5.2.1. Identificación de fases y elementos.

A) Identificación de fases cristalinas.

La *difracción de rayos-X* (DRX) es una técnica que permite detectar las fases cristalinas presentes en un material (ver sección 4.3.). Se trata de un análisis global del

material para hallar las nuevas fases cristalinas formadas después de elaborado el material compuesto.

Se midieron espectros de DRX sobre una muestra del material compuesto Al-B₄C_(P) al 10% f.v. para obtener el espectro del material. En la figura 5.1. se observa la presencia de aluminio con los cinco picos más intensos; y el carburo de boro en 2θ=37.68 con una intensidad más baja. Existen otros picos de B₄C en las posiciones de 2θ=22.038 y 23.579 [26], pero no son visibles a esta escala. En la tabla 5.1. se indican los datos correspondientes al espectro.

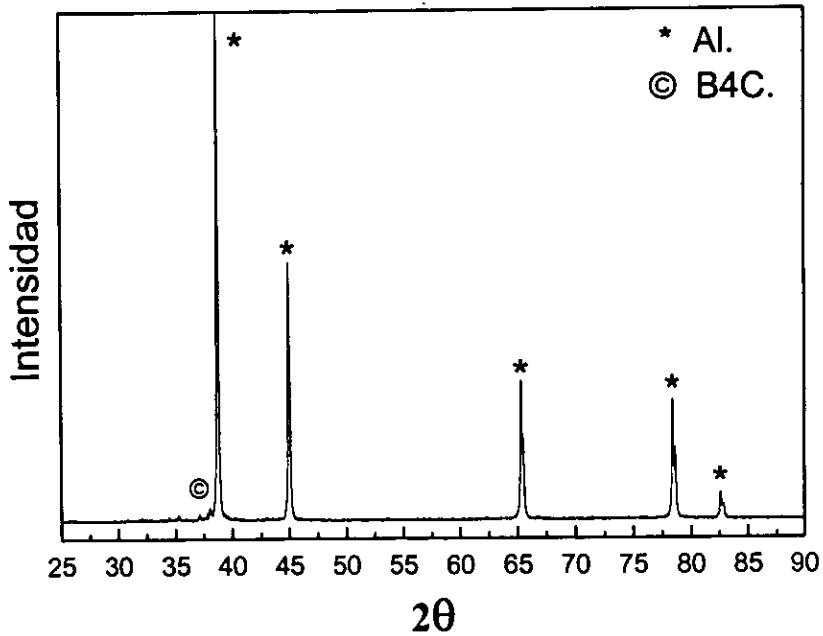


Figura 5.1. Difractograma de fases presentes en el material compuesto Al-B₄C_(P).

Fase	Ángulo 2θ	Distancia Angstroms (10^{-8} cm)	Plano (hkl)	Intensidad (%)
Al	38.47	2.33	111	100
	44.73	2.02	200	47
	65.13	1.43	220	22
	78.22	1.22	311	24
	82.43	1.16	222	7
B ₄ C	37.68	2.38	0221	100
	23.6	3.77	0112	50
	22.04	4.03	0003	40

Tabla 5.1. Planos de difracción de fases presentes.

Se tiene reportado la fase Al₃BC en ángulos 2θ de 30.5° , 37.82° y 52.40° , siendo el primero, el pico de intensidad de 100% [26]. Por esta razón se obtuvo una imagen más cerca del difractograma, como se muestra en la figura 5.2., en donde se puede observar el pico de 30.5° con un corrimiento. Se identificó también Al₂O₃ en ángulo 2θ de 35° con un corrimiento.

Con base en estos resultados, se puede mencionar que no existen otras fases cristalinas en el material compuesto que puedan ser apreciables utilizando esta técnica en donde las concentraciones menores de 5% no son detectables (este valor está calculado para un $Z=20$).

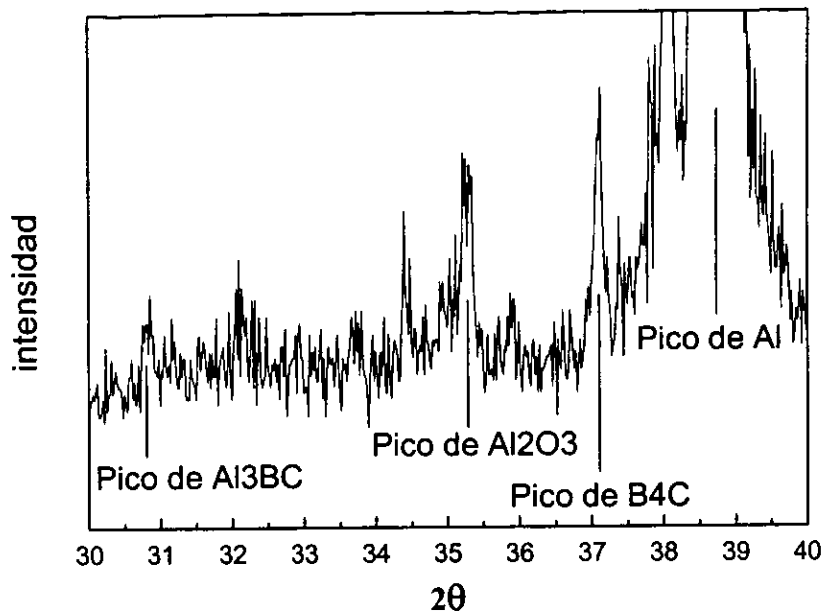


Figura 5.2. Acercamiento al intervalo de ángulo para buscar los picos de la fase Al_3BC .

B) Identificación de elementos.

Se realizó el *análisis elemental de espectroscopía de dispersión de energía* –EDS– (ver sección 4.2.3.), para averiguar el tipo de elementos químicos que existen dentro del material compuesto. Con esta técnica se consigue un análisis de tipo “puntual” sobre una muestra, por lo que los resultados se complementan a los obtenidos por DRX. De hecho, ambas técnicas se complementan porque, mientras que una técnica determina los elementos químicos de una muestra (EDS), la otra técnica determina si esos elementos forman una fase cristalina en el material compuesto (DRX).

Se realizaron análisis puntuales en zonas dendríticas y en zonas de la interfase encontrándose los siguientes elementos: *Al* en mayor proporción, seguido por *O*, *Si*, *B*, *C*, tal y como se observa en la figura 5.3.

Este análisis permitió verificar la presencia de *Al*, *B* y *C*, en forma de B_4C , tal y como se observó con DRX, además se muestra que existen otros elementos químicos. Uno de ellos es el *O* que posiblemente forme óxidos en concentraciones pequeñas, y el otro es el *Si* que se puede explicar su presencia debido a una posible reacción de la matriz con el crisol (carburo de silicio) por la agitación de los elementos durante 3 minutos aproximadamente, según el proceso de fabricación explicado en el capítulo tres.

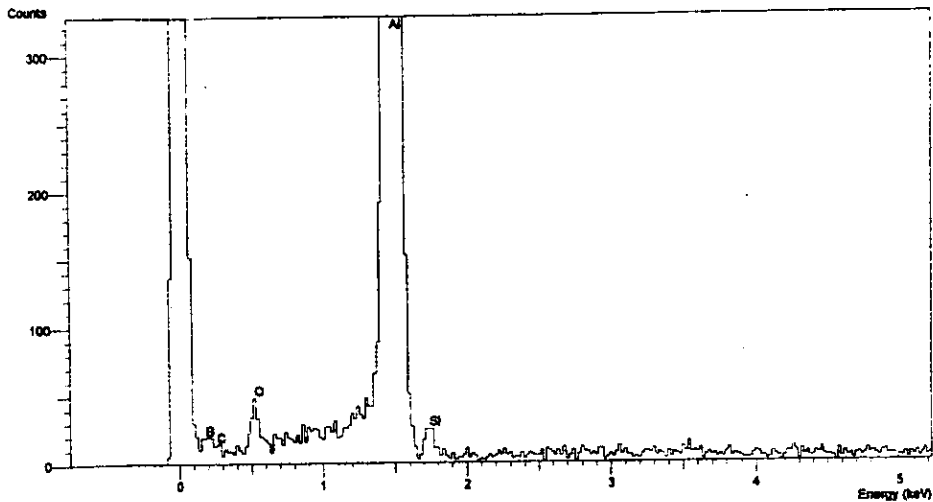


Figura 5.3. Gráfica EDS. Análisis elemental del material compuesto $Al-B_4C(p)$.

5.2.2. Distribución de partículas.

Por la forma en cómo fueron elaborados los materiales compuestos $Al-B_4C(p)$, se obtuvieron dos maneras de colocar las partículas de refuerzo dentro de la matriz, con el

propósito de tener materiales con diferentes características para diferentes usos, de acuerdo a como se explicó en el capítulo tres.

En esta sección se comparan los dos procesos de fabricación de materiales compuestos en lo que se refiere a la distribución de las partículas reforzantes. Recordemos que una de las limitaciones del *método de vórtice*, es el porcentaje en fracción volumétrica (% f.v.) del refuerzo que permite incorporar a la matriz, que es entre 10 y 20%. Con el *sistema centrífugo* se pretende incrementar ese porcentaje concentrando mayor cantidad de partículas por unidad de volumen de material con respecto al logrado con el método de vórtice.

Los resultados de las pruebas hechas con los equipos de fabricación experimental, indican que se logró la distribución de partículas de acuerdo con lo que se esperaba. Esta distribución se observó en secciones preparadas de las piezas que se fabricaron según el caso. Dichas secciones fueron seleccionadas, cortadas, desbastadas, pulidas y atacadas con el reactivo tipo Tucker (ver figura 5.4). Para respaldar lo dicho anteriormente, a continuación se muestran algunas fotografías.

En la figura 5.5.(a) se observa un material compuesto elaborado con *el método de vórtice* en donde las partículas se distribuyen en toda la superficie de la muestra. Las partículas se ven en la fotografía como las zonas más oscuras. Por otro lado, en la figura 5.6.(a) se observa la diferente distribución en un material compuesto elaborado con *el sistema centrífugo*.

Imaginemos una línea de simetría vertical dividiendo en dos partes iguales cada una de las muestras, la parte derecha de la figura 5.6.(a) aloja más partículas que la parte correspondiente de la figura 5.5.(a). Lo anterior indica que el refuerzo fue puesto en mayor cantidad en esa región, es decir, las partículas fueron “obligadas” a concentrarse en esa zona por la acción de la fuerza centrífuga a la que fueron sometidas durante la elaboración de las piezas.

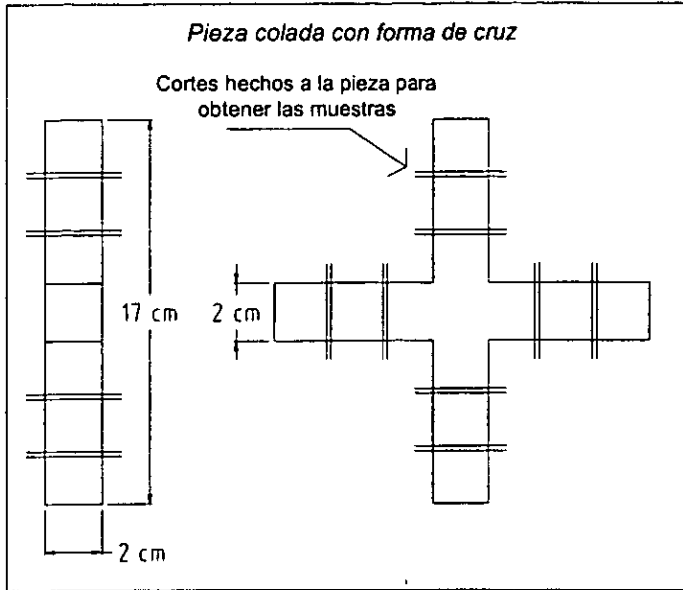


Figura 5.4. Secciones obtenidas de la pieza en forma de cruz o de "X".

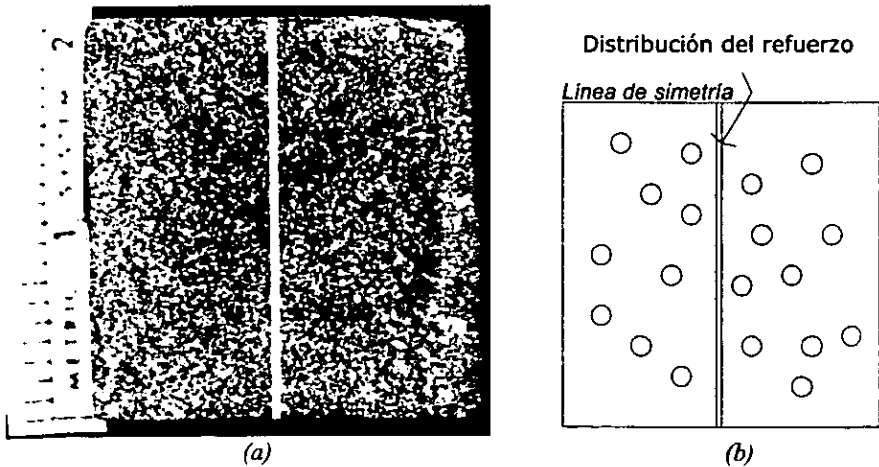


Figura 5.5. (a). Distribución de partículas con el método de vórtice. (b). Representación esquemática de las partículas en el material compuesto.

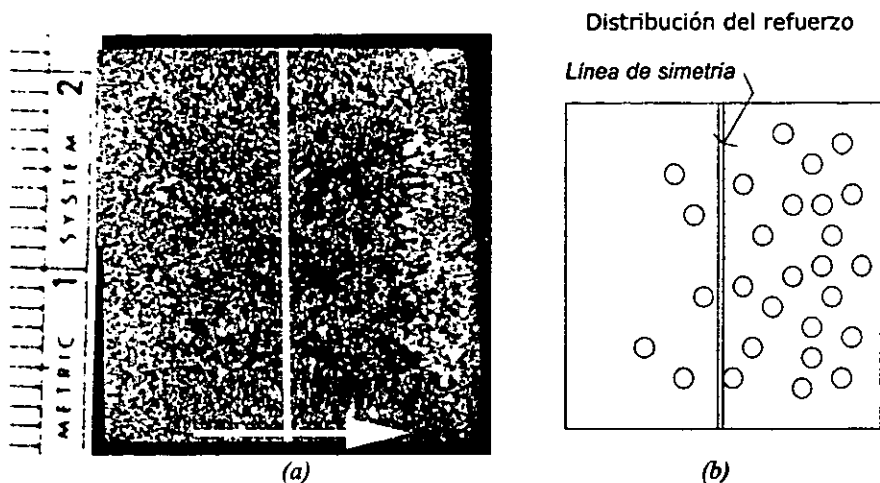


Figura 5.6. (a). Distribución de partículas con el sistema centrifugo. La flecha indica el perfil de concentración de las partículas, de menor a mayor. (b). Representación esquemática de las partículas en el material compuesto.

Para saber en qué proporción se ha incrementado el porcentaje en la f.v., se utiliza el analizador de imágenes con el que es posible obtener la relación de! área de las partículas con respecto al área total que ocupan en el material compuesto, tal y como se explica en el apartado 5.2.2.1.

La observación por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), ofrece detalles a nivel microscópico acerca de la distribución de partículas en el material compuesto elaborado con el método de vórtice. En la figura 5.7. se observa buena distribución de partículas en esta área seleccionada, sin embargo, existen otras zonas con mala distribución como se aprecia en la figura 5.8. en donde, en la parte central, casi no hay partículas, mientras que en los extremos hay muchas partículas aglomeradas. Ambas imágenes fueron obtenidas con la misma magnitud (803 X) para propósito de comparación. El tamaño de las partículas oscila entre 10 y 50 μm .

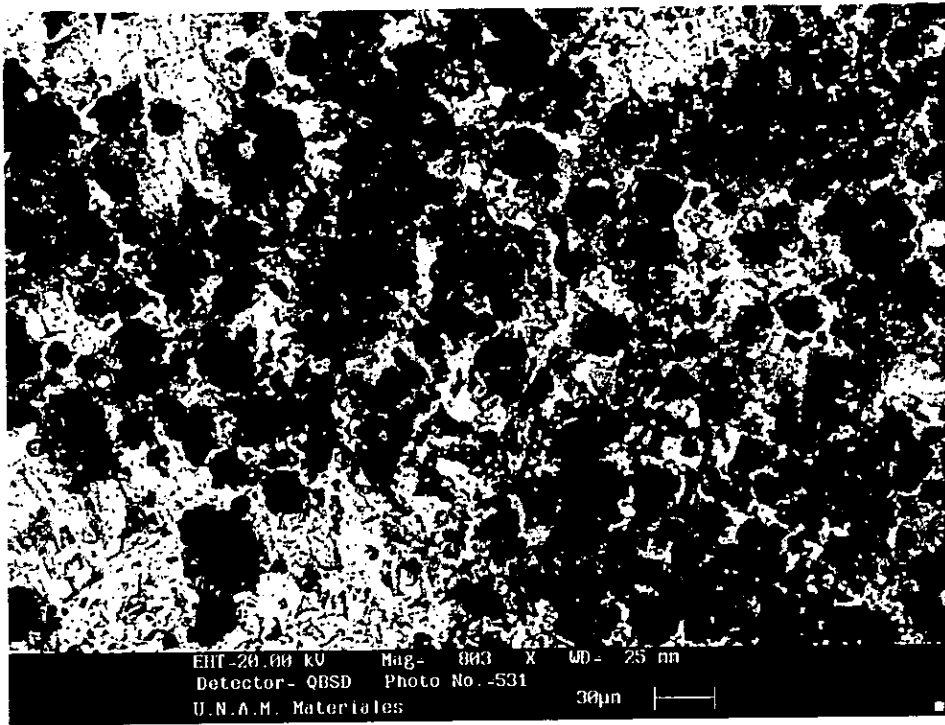
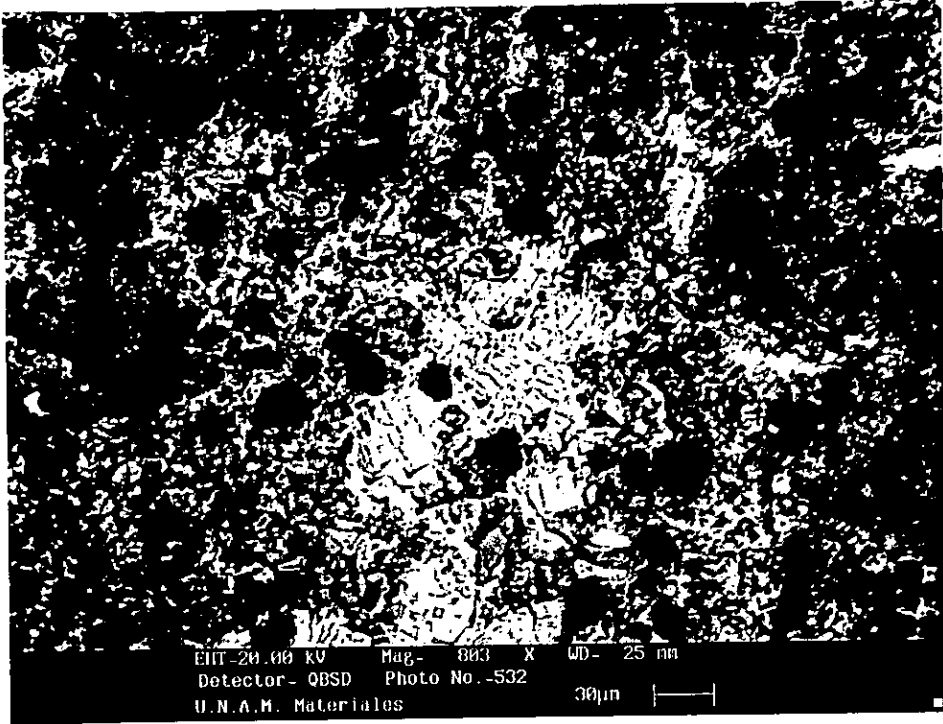


Figura 5.7. Microfotografía que muestra una distribución adecuada de las partículas.

Imagen obtenida por MEB.

Se puede apreciar también, en estas microfotografías que las partículas quedaron atrapadas durante el crecimiento de las dendritas, porque están rodeadas por éstas. La distribución de partículas en CMM, por las técnicas de fundición, depende en gran medida de la naturaleza de la interacción entre las partículas de cerámica y el frente de solidificación [44]. Cuando una partícula de refuerzo, que es dispersada en metal líquido, encuentra un frente de solidificación creciente, puede ser rechazada y empujada a lo largo y adelante del frente que avanza, o bien, se puede adherir al sólido y ser atrapada por él, permaneciendo estacionaria hasta que el frente de solidificación la arrastre a través de la matriz. En el caso particular que se tiene cuando se realiza una colada de un CMM en un

molde permanente, este frente de solidificación estará en la forma de un brazo creciente de dendrita, el cual crece continuamente en todas direcciones [39]. Si el rechazo de las partículas ocurre, entonces la fase de refuerzo se volverá segregada dentro de las regiones interdendríticas solidificadas hasta el final.



*Figura 5.8. Microfotografía que muestra una distribución no adecuada de partículas.
Imagen obtenida por MEB.*

La interacción entre la partícula y una interfase de solidificación ha sido estudiada para frentes de solidificación planares, tomando en cuenta algunos factores como el radio de la partícula, energía de superficie, conductividad térmica, difusividad de calor,

viscosidad, y concentración de soluto. Sin embargo, este es un tema que está fuera del alcance de los objetivos de este trabajo.

En términos generales, se sabe que las propiedades mecánicas del material compuesto son muy dependientes de la distribución del refuerzo, y como ya se mostró, no fue posible conseguir la misma distribución en toda la pieza, éste es uno de los problemas expuestos como típicos de este modo de fabricación.

5.2.2.1. Incremento en fracción volumétrica (%f.v.).

El incremento logrado en fracción volumétrica de partículas de B_4C en el material compuesto fabricado con el sistema centrífugo, se obtuvo de la siguiente manera: se prepararon muestras sobre la cara densa de partículas de las piezas fabricadas y se tomaron imágenes de esas superficies por medio de MEB, como se observa en la figura 5.9. Con el analizador de imágenes se obtuvo el área total de todas las partículas encontradas (el área de las partículas es de $7331.614 \mu m^2$), y se midió también el área total de la imagen (el área de la imagen es de $18319.337 \mu m^2$). Con esto se puede averiguar la proporción de área ocupada del refuerzo.

En primera aproximación, la fracción en área de las partículas es igual a la fracción volumétrica. Con esta suposición se obtuvo un % f.v. de 40%.

Se puede concluir que, con el equipo adaptado con molde giratorio, se obtuvieron materiales compuestos con alta concentración de refuerzo, incrementando el porcentaje en fracción volumétrica de B_4C de 10%, antes de hacer la colada en el molde, hasta 40% sobre la cara densa de las piezas fabricadas. Esta condición será acentuada durante las pruebas de desgaste, en donde se espera que el material compuesto con 40% f.v. sea más resistente (ver sección 5.3.5.).

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

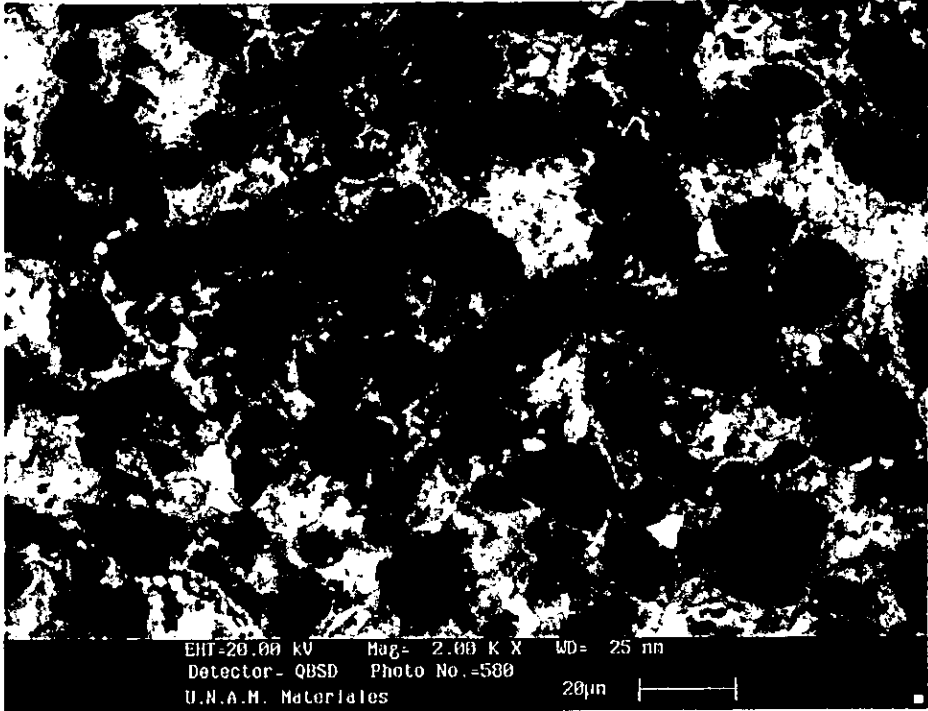


Figura 5.9. Microfotografía que muestra la densidad de partículas, en una muestra representativa, del material compuesto elaborado con el sistema centrífugo.

5.2.3. Tamaño de grano de la matriz.

Las propiedades mecánicas de los materiales dependen en gran medida de la forma y tamaño de grano. Reduciendo el tamaño de grano se incrementa el número de granos por unidad de volumen, y por consiguiente la cantidad de fronteras o bordes de grano se incrementan también. Cualquier dislocación encontrará un límite de grano al sólo moverse un poco, incrementándose la resistencia del material al obstaculizar el movimiento de las dislocaciones [1]. Disminuir el tamaño de grano se llama *refinar el grano*. Debido a la

importancia de ésto, se realizaron estudios sobre el tamaño de grano en la matriz sin reforzar y en el material compuesto.

El análisis macroscópico en muestras de aluminio indica una estructura de grano característico de fundición [27]. Este tipo de microestructura se manifiesta cuando un material vaciado en molde inicia un proceso de enfriamiento que comienza desde el exterior de la muestra (ya que entre las paredes del molde y el material existe una diferencia de temperatura, dando origen a la nucleación) y continua hacia el centro de la misma. Esto produce granos alargados y en forma de lancetas o columnas (ver figura 5.10.).

Se realizó un histograma de tamaño de grano con el fin de establecer el área promedio de los granos, el cual oscila entre 1.125 mm^2 (dato reportado en estudios anteriores [42]), como se aprecia en la figura 5.11.

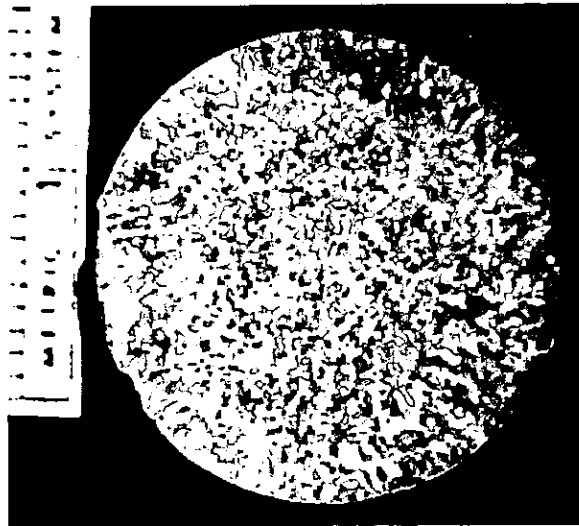


Figura 5.10. Imagen de una muestra de aluminio atacada con reactivo tipo Tucker.

Tamaño de grano.

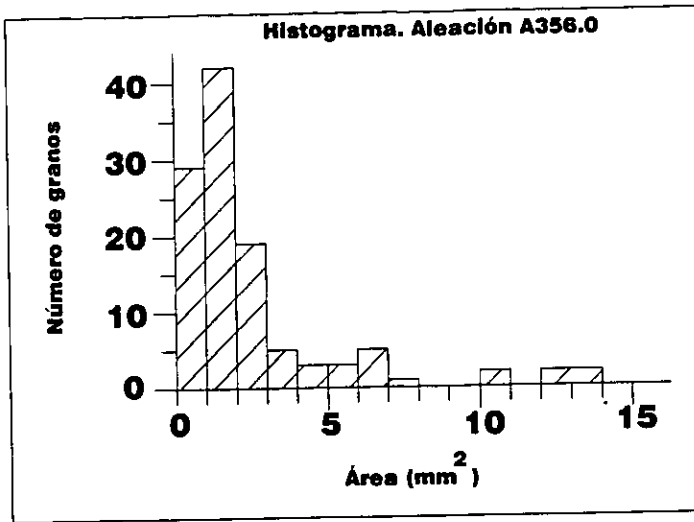


Figura 5.11. Histograma de tamaño de grano de la muestra de aluminio.

También, se realizó un muestreo de tamaño de grano del material compuesto $Al-B_4C_{(P)}$ a 10% f.v. y se determinó que existe un refinamiento de grano en este material. El histograma de tamaño de grano del material compuesto indica que el área promedio oscila entre 0.25 y 0.5 mm² [42], como se observa en la figura 5.12.

Es posible que los responsables de este hecho sean pequeñas cantidades de boro disueltas en la matriz que proviene de las partículas. Se sabe que el boro (B) es un agente refinador de grano [26] y este tamaño de grano más fino influye en la ductilidad y resistencia del material compuesto. También existe la posibilidad de que hayan partículas finas de B_4C inferiores a 1 μm o partículas de AlB_2 formadas por reacción con la matriz, y que éstas sirvan como sitios de nucleación durante la solidificación del material permitiendo así el refinamiento de grano con cierta uniformidad y orientación (ver figura 5.13.).

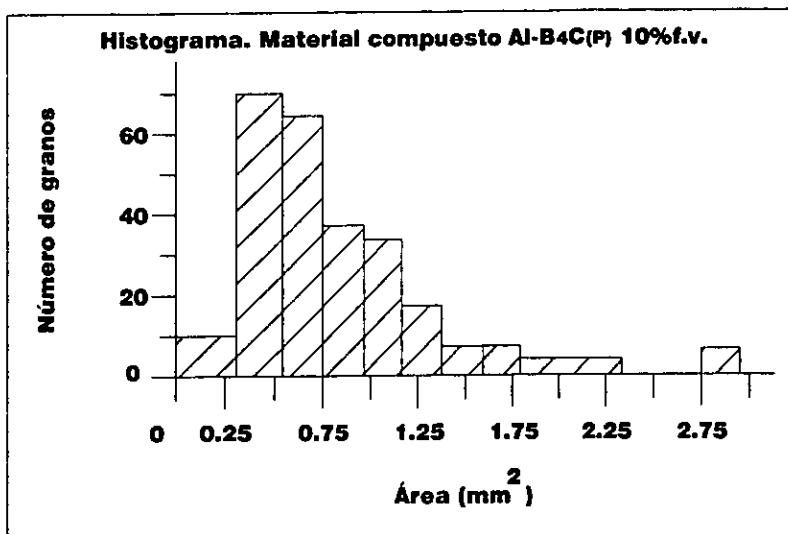


Figura 5.12. Histograma de tamaño de grano del material compuesto Al-B₄C(P) 10% f.v.

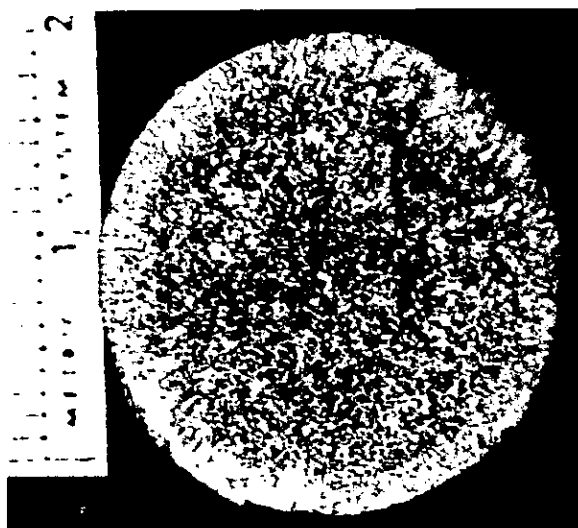


Figura 5.13. Imagen donde se observa la forma de los granos en una muestra preparada del material compuesto Al-B₄C(P) 10% f.v.

Los procesos de solidificación en el interior del molde ocurren, en una primera aproximación, de la siguiente manera. Primeramente, un núcleo sólido aparece en el líquido en las zonas cercanas al molde. Estos núcleos crecen de manera paralela y opuesta a la dirección del flujo de calor formando granos de forma columnar. Este tipo de crecimiento impide el atrapamiento de partículas, por lo que éstas son rechazadas hacia el interior del molde. Esto se aprecia en la periferia de la muestra de la figura 5.13.

En una etapa posterior, el crecimiento se vuelve equiaxial, las dendritas empiezan a expandir sus ramas mucho más y es, en los sitios dejados entre una rama y otra, en donde las partículas se alojan [19, 60].

5.2.4. Fractografía.

La fractografía se realizó por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB), porque es la técnica más adecuada para entender el modo de fractura que presentaron los materiales compuestos con matriz de Al , que es claramente dúctil, reforzada por un material duro pero frágil como son las partículas de B_4C , una vez que se aplicaron los ensayos mecánicos destructivos. Se hace una comparación con las fractografías obtenidas de la matriz sin reforzar.

También, fue posible observar por medio de las imágenes, la distribución de las partículas en el material y su influencia en los mecanismos de fractura, así como la existencia de porosidad en la pieza. Además, se tuvo una idea general acerca de la humectabilidad de la matriz de acuerdo con la información que ofrecieron las fractografías.

Es importante mencionar que, cuando el aluminio es fundido, el hidrógeno aumenta su solubilidad en él al aumentar su temperatura, y es expulsado durante la solidificación del material formando burbujas. Un cierto porcentaje de esas burbujas sale al exterior, pero existe cierta cantidad de éstas que permanece en el aluminio causando defectos de

porosidad en la pieza sólida [48]. De ahí la importancia del burbujeo de *Ar*, empleado antes de efectuar la colada.

En los materiales compuestos, la porosidad por gases puede nuclear heterogéneamente sobre la superficie de los reforzantes durante la solidificación y provocar la flotación de los mismos. La succión de partículas y burbujas juntas en el vórtice, puede resultar en combinaciones de burbuja-partícula flotando en la aleación fundida. Las partículas se pueden adherir a las burbujas durante su movimiento dentro del metal fundido. Estos mecanismos son responsables de la creación de la porosidad en la interfase matriz-partícula.

Existen varios factores que pueden generar hidrógeno, entre los que destacan:

- (1) Humedad atmosférica.
- (2) Productos químicos presentes en el metal.
- (3) La agitación y formación del vórtice en el proceso de fabricación.

Por lo tanto, la presencia de hidrógeno resulta un problema propio del proceso de fabricación. Es posible verificar lo dicho anteriormente con las imágenes obtenidas por medio de la técnica de MEB.

La primera observación de la fractura del material compuesto $Al-B_4C_{(P)}$, después de realizar el ensayo de tracción, indicó la formación de una estricción con deformación plástica antes de la fractura final, y una apariencia de copa y cono en esta zona. Por lo tanto, se puede identificar la falla como una *fractura dúctil* (ver figura 5.14.).

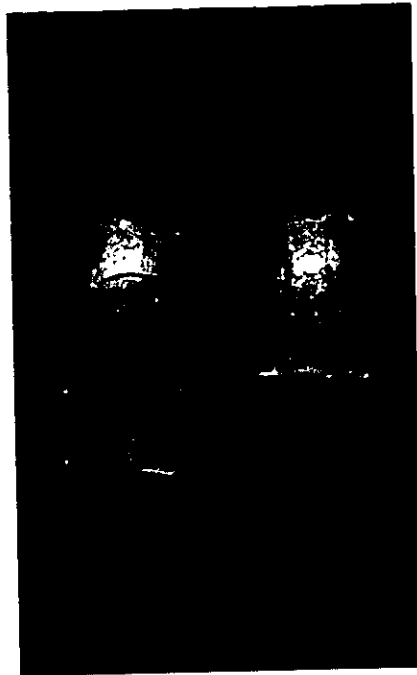


Figura 5.14. Fotografía que muestra la fractura del tipo de copa y cono, resultado del ensayo de tracción, indicando ductilidad y tenacidad en el material compuesto.

La observación más detallada por medio de MEB de la superficie de la fractura, muestra partículas aglomeradas en algunas zonas y partículas incrustadas en los nódulos (partes con la apariencia de semiesferas), en donde se presume que la fractura es distintiva de un material dúctil [11, 37, 40]. El tamaño de los nódulos es de aproximadamente $130\ \mu\text{m}$ de diámetro y el de las partículas entre 10 y $50\ \mu\text{m}$ (ver figura 5.15.).

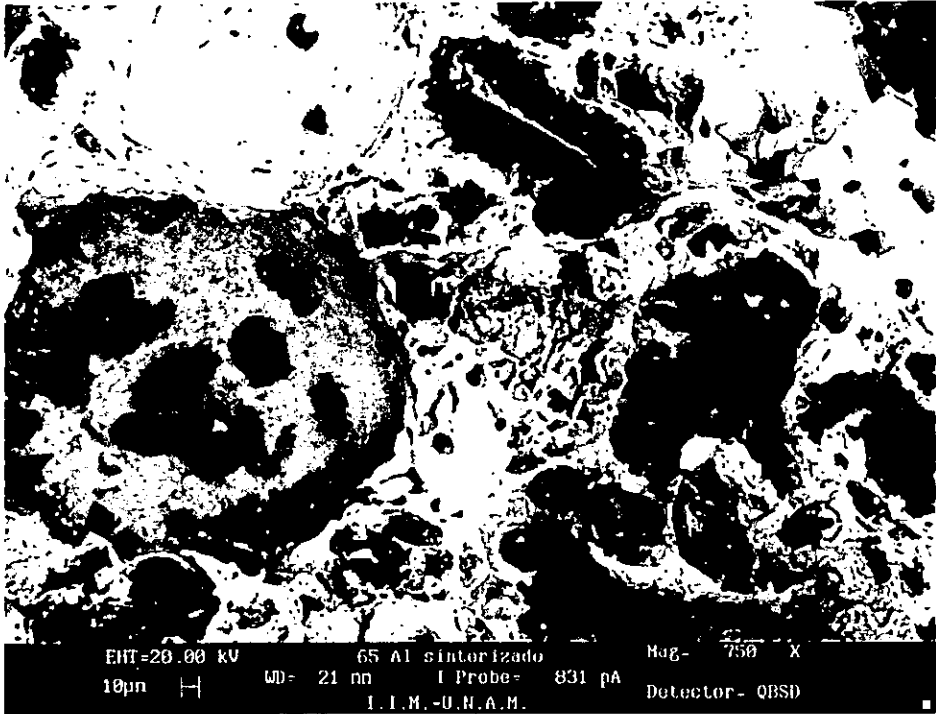


Figura 5.15. Fractografía del material compuesto mostrando incrustaciones de partículas en zonas dúctiles y aglomeración en diferentes zonas. Se utilizó un detector de electrones retrodispersados.

De esto se puede deducir lo siguiente:

- 1) Por un lado, la buena distribución de las partículas de carburo de boro contribuye en buena medida a aumentar la resistencia a la tracción. Como se discutirá más adelante, la resistencia lograda con este material compuesto casi es el doble del valor registrado para el aluminio sin reforzar. Esto permite pensar que hay una buena cohesión entre matriz y refuerzo en esa región.
- 2) Por otro lado, la aglomeración de partículas crea zonas frágiles dispuestas en forma aleatoria, lo que puede influir en el deterioro de las propiedades mecánicas del material.

Recordemos que la distribución de los elementos reforzantes es uno de los factores importantes que hay que considerar (ver sección 1.3.).

En la figura 5.16. se puede ver otra imagen con la típica superficie rugosa, que son huellas de microhuecos con formas redondeadas o equiaxiales, producidas cuando un esfuerzo de tracción alto provoca la separación del material en los límites de grano [1]. La imagen se obtuvo a mayor magnitud (1.50K X).

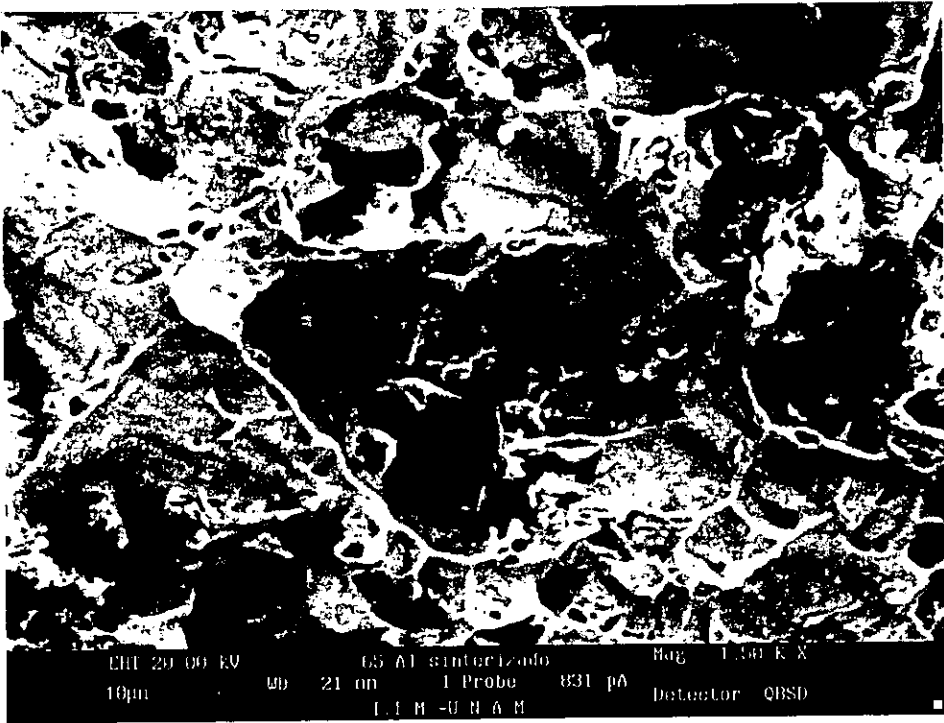


Figura 5.16. Imagen que muestra el tipo de fractura dúctil (superficie con apariencia rugosa y concava) en el material compuesto.

Se puede notar, también, que la fractura se propaga alrededor de las partículas y no a través de ellas y en zonas donde no existen partículas, que son las trayectorias de fractura comunes en los materiales compuestos particulados [16].

La presencia de porosidad en el material compuesto, cuyo origen se mencionó anteriormente, se puede distinguir claramente en la figura 5.17. como una zona oscura redondeada de 230 μm de extensión aproximadamente. Este poro es el de mayor tamaño encontrado en la fractografía y posiblemente existan otros de menor tamaño.

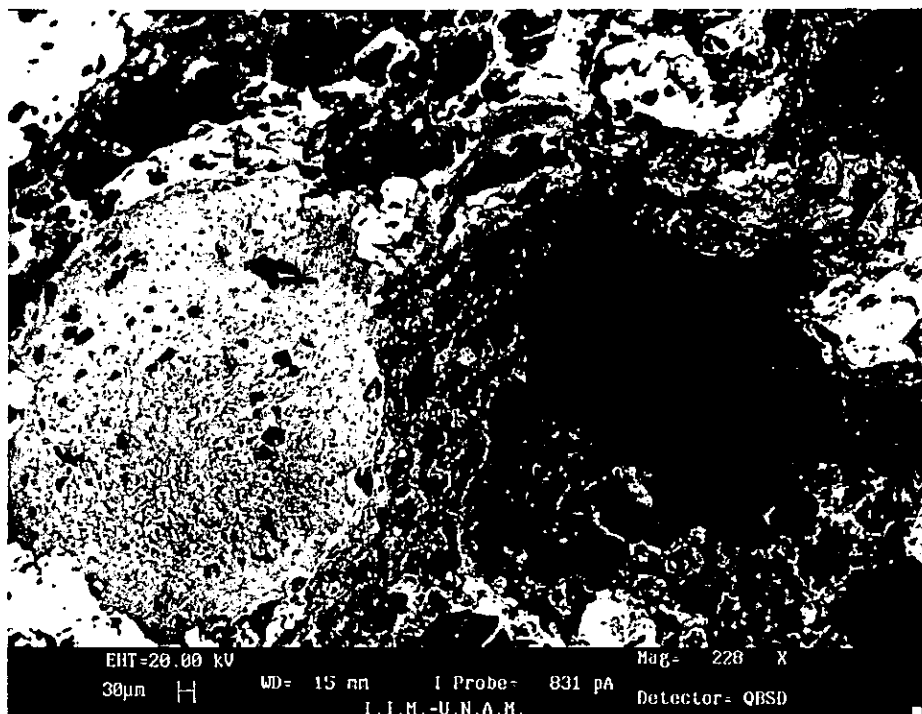


Figura 5.17. Fractografía que muestra un poro de tamaño considerable. La porosidad es un defecto intrínseco del proceso de fabricación.

Las *fracturas frágiles* se observan, con frecuencia, cuando la falla es causada por un impacto en lugar de una sobrecarga. La fractura frágil, generalmente, comprende la rápida propagación de una grieta con el mínimo de absorción de energía y de deformación plástica. Normalmente, la grieta se propaga más fácilmente a lo largo de planos cristalográficos específicos, por agrietamiento o clivaje. En los materiales policristalinos, la

superficie de fractura frágil muestra una apariencia granular debida a los cambios en orientación de los planos de clivaje de un grano a otro [7, 11, 16].

Las figuras 5.18. y 5.19. muestran fracturas de ensayos de impacto practicados en aluminio y en el material compuesto Al-B₄C_(p), respectivamente. Las imágenes se tomaron a la misma magnitud (48 X) para fines de comparación. En aluminio, la superficie indica buena ductilidad, mientras que en el material compuesto, la fractura tiene una apariencia granular, lo que indica que se trata de una fractura frágil. Los puntos oscuros son concentraciones de partículas que se pueden observar más claramente en la figura 5.20.

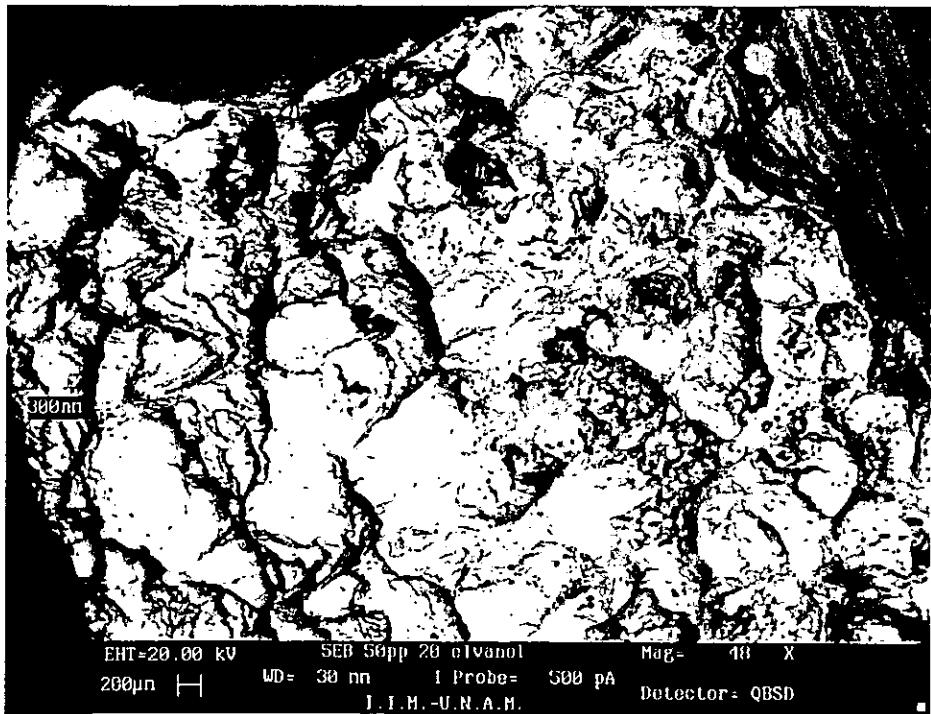


Figura 5.18. Fractografía del aluminio A356.0. Fractura dúctil.

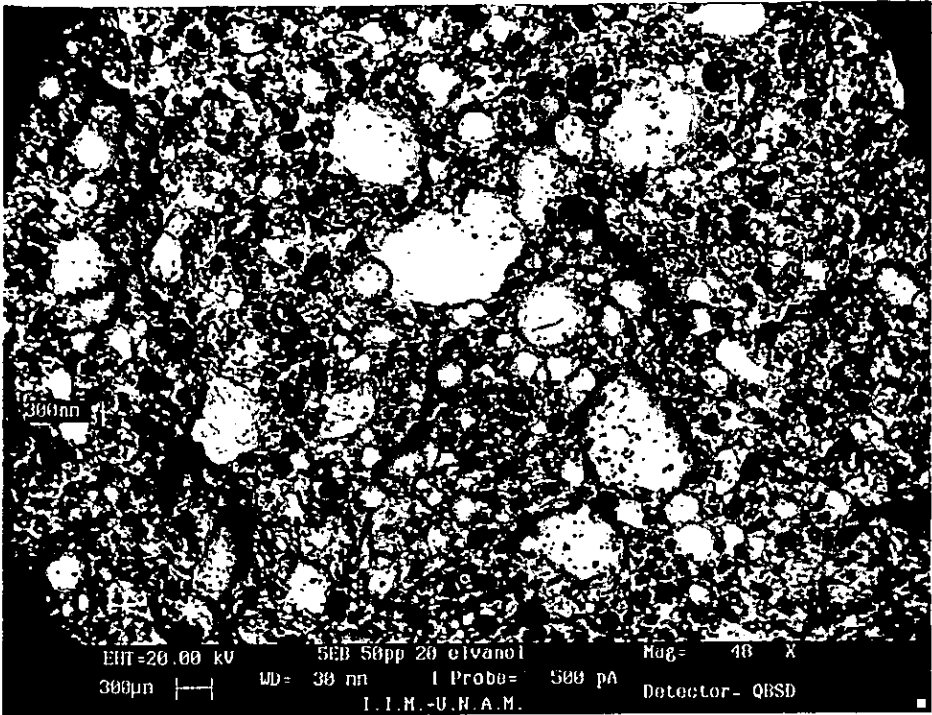


Figura 5.19. Fractografía del material compuesto. Fractura frágil.

Los defectos creados por la mala distribución de partículas de B_4C pueden ser asociados al proceso de fabricación, particularmente, durante la etapa de incorporación y agitación (ver sección 3.2.), porque el vórtice que se genera no es suficientemente fuerte para romper la unión física entre las partículas. Como se mencionó, esta aglomeración produce zonas frágiles lo que puede causar un deterioro en las propiedades mecánicas, sin olvidar que también las porosidades causadas por el atrapamiento de gases de la atmósfera influyen en este aspecto.

Por otro lado, las fracturas frágiles pueden tener su origen también en una deficiente humectabilidad por parte de la matriz. Para mejorarlo, se sugiere aplicar presiones

relativamente altas, como en el caso del proceso de infiltración a alta presión (ver sección 1.4.2.), y además se pueden adicionar agentes humectantes, como el magnesio [26].

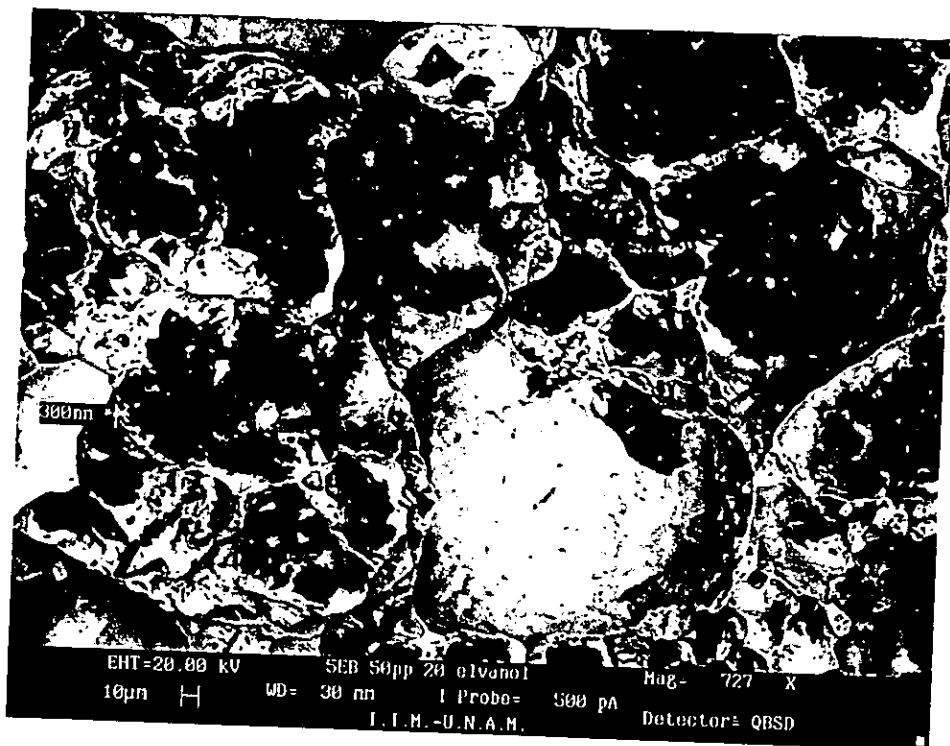


Figura 5.20. Fractura por impacto en donde se observan aglomeraciones de muchas partículas.

En la siguiente sección se exponen los resultados de las pruebas mecánicas (incluyendo tracción e impacto) que fueron realizadas a estos materiales.

5.3. Caracterización mecánica.

5.3.1. Introducción.

El comportamiento mecánico de un material compuesto depende de sus constituyentes y de las etapas de producción, tales como: fundición, conformado y tratamientos térmicos. Dichos procesos pueden influir en el tamaño de grano, en la concentración de partículas, en la densidad de dislocaciones, en la porosidad y en las reacciones químicas que puedan ocurrir entre los elementos.

De acuerdo con Davidson [16], el comportamiento mecánico de un material compuesto particulado se debe a tres factores principales:

- 1) Los procesos de manufactura. Estos procesos determinan los posibles defectos que puede tener el material, tales como poros o una mala distribución del refuerzo en la matriz.*
- 2) El tamaño de partícula. La adhesión de partículas pequeñas (menores de 1 μm) incrementan los valores de dureza y de esfuerzo de la matriz metálica, debido a que el refuerzo cerámico particulado impide el deslizamiento entre planos cuando se intenta deformar plásticamente el material. Las partículas entre 10 y 15 μm comparten y soportan mayoritariamente la carga aplicada al compuesto.*
- 3) La distribución de las partículas. La mala distribución de las partículas en la matriz metálica genera aglomeraciones por parte del refuerzo, provocando de esta manera, que el material tienda a fragilizarse en determinadas zonas.*

Los resultados que se obtienen por medio de las distintas pruebas mecánicas (ver sección 4.4.), permiten conocer:

- (a) la eficiencia del método de vórtice y del equipo experimental puesto en funcionamiento para este trabajo;*
- (b) la calidad de los materiales compuestos fabricados, es decir, el grado de cohesión refuerzo-matriz (humectabilidad); y*

(c) la influencia de las características encontradas en la parte metalográfica sobre las propiedades mecánicas del material compuesto, tales como: porosidades, mala distribución del refuerzo y reacciones de los elementos químicos con la matriz.

Los resultados son comparativos con respecto a las propiedades mecánicas de la matriz sin reforzar que es la aleación de aluminio A356.0.

5.3.2. Microdureza.

Los ensayos de microdureza se realizaron para verificar los cambios en la matriz debido al endurecimiento por precipitación de terceras fases, dada una posible reacción entre el aluminio y el carburo de boro.

Se efectuaron 15 ensayos de microdureza con una carga de 25 gramos, aplicada durante 10 segundos, sobre muestras preparadas de los siguientes materiales: (1) aluminio A356.0, y (2) material compuesto Al-B₄C_(P) a 10% f.v. (ver sección 4.4.1.). Los resultados se encuentran en la tabla 5.2. donde se muestran los valores promedio de las pruebas y su desviación estándar como criterio de error.

Tipo de muestra	Microdureza Vickers (DPH*)	Desviación estándar
Al (A356.0)	31.1	2.31
Al-B ₄ C _(P)	43.1	3.53

Tabla 5.2. Valores experimentales de dureza de la matriz (Al). Microdureza Vickers.

*DPH, Diamond Pyramid Hardness.

Con base en los datos de la tabla 5.2, se tiene que la matriz del material compuesto resultó ser más dura que la matriz de aluminio en un 27% aproximadamente, este

incremento se considera importante. Lo anterior indica, de manera indirecta, la presencia de precipitados coherentes probablemente de la fase AlB_2 , porque hubo una reacción con la matriz dando origen a la fase, creando un efecto de endurecimiento, de acuerdo como se explicó en la sección 4.4.1. El resultado coincide con el refinamiento de tamaño de grano observado en el material compuesto (ver sección 5.2.3.).

5.3.3. Esfuerzo y Deformación.

Se aplicaron ensayos de tracción para comprobar la resistencia del material compuesto $Al-B_4C_{(P)}$ cuando es sometido a una carga de tracción unidireccional y gradual para así obtener las propiedades del material de más interés en el diseño mecánico. Los resultados que normalmente ofrece la máquina de ensayos, son curvas de Esfuerzo (σ) vs Deformación (ϵ), y valores de desplazamiento, deformación, carga y esfuerzo en los siguientes puntos de la prueba: (a) en el punto de cedencia al 0.2% de deformación permanente, (b) en el punto de esfuerzo máximo soportado por la probeta, y (c) en el punto de ruptura. Además, se proporciona el módulo de elasticidad (E).

Se realizó una serie de diez ensayos con la finalidad de tener una muestra importante en el experimento. La figura 5.21. muestra la curva σ vs ϵ de una prueba representativa. Las gráficas de todos los ensayos se formaron con la toma de cinco datos por segundo consecutivos de carga y desplazamiento durante la prueba, en donde la probeta se llevó hasta la ruptura (las probetas no tiene ningún tratamiento térmico previo). La conversión a σ y ϵ se hace automáticamente por el equipo (ver sección 4.4.2.).

Los resultados de los ensayos se resumen en la tabla 5.3. El valor de cada propiedad es el promedio de los valores obtenidos de los diez ensayos. Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente de 20 °C. Los resultados indican que el límite de cedencia y la resistencia a la tracción del material compuesto, tienen valores por arriba de los valores para la matriz sin reforzar. Sin embargo, el módulo de elasticidad, medida de la rigidez del material, es muy bajo pues el módulo de elasticidad del aluminio A356.0 es del orden de

$E=72.4$ GPa (dato obtenido de referencia [3]), incluso, si se compara también con el módulo elástico de los materiales compuestos registrados en la información bibliográfica (ver tabla 1.5.).

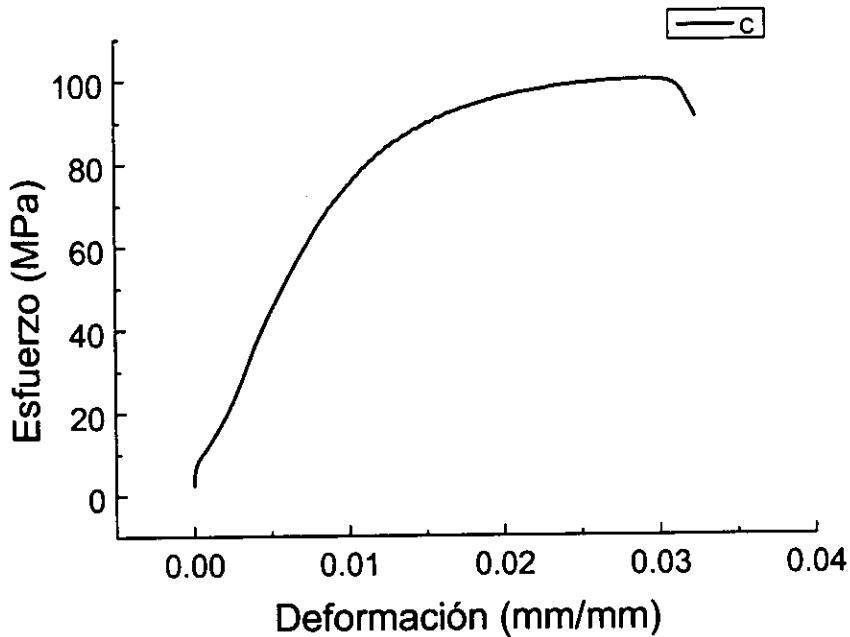


Figura 5.21. Gráfica σ vs ϵ resultado del ensayo de tracción practicado sobre el material compuesto Al-B₄C(P) 10% f.v.

Los resultados obtenidos son particulares del material compuesto y coinciden con los resultados obtenidos anteriormente, es decir, debido a que se encontró un refinamiento de grano y un aumento en la dureza de la matriz las propiedades mecánicas del material compuesto se vieron favorecidas. Por otro lado, el módulo de elasticidad indica que el material compuesto no es un material rígido, las principales causas son los defectos de aglomeración de partículas y porosidades, por lo que el material no es totalmente sólido, y

el efecto real es de aplicar la carga sobre un área mucho menor a la medida macroscópicamente.

Material	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Resistencia a la tensión UTS (MPa)	Elongación (%)	Módulo de elasticidad E (GPa)
Matriz sin reforzar (*)	29	68.79	7.28	**
Al-B ₄ C _(P) 10% f.v.	52.33	98.79	2.98	9.65

Tabla 5.3. Resultados del ensayo de tracción. Se comparan las propiedades del material compuesto con las del aluminio (matriz sin reforzar). () datos obtenidos de referencia [42], que es el trabajo más reciente sobre este material. (**) No se registra el dato.*

5.3.4. Tenacidad relativa.

La tenacidad es una medida cualitativa de las propiedades al impacto (alta velocidad de deformación) de un material; o también se puede entender como la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura, dicha energía se mide en Joules (J). Un material que resiste a la fractura por impacto es tenaz [1]. Para que un material sea tenaz, debe poseer tanto alta resistencia como ductilidad.

La prueba de impacto ofrece resultados de tenacidad relativa de los materiales para propósitos de comparación, nuevamente, entre el material compuesto y la matriz sin reforzar.

Para la prueba de impacto, se prepararon probetas con muesca en V y probetas sin muesca. La finalidad es observar el comportamiento del material compuesto en ambas situaciones, por supuesto, bajo las mismas condiciones de operación (ver sección 4.4.3.). Se formaron cuatro lotes con diez probetas cada uno de la siguiente manera: lotes no.1 y no.3 son de aluminio A356.0 con y sin muesca respectivamente; mientras que los lotes no.2 y no.4 son de material compuesto Al-B₄C_(P) con y sin muesca respectivamente. Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente de 20 °C.

Los valores promedio de la energía absorbida en el impacto, para cada uno de los lotes, se indican en forma gráfica en la figura 5.22.

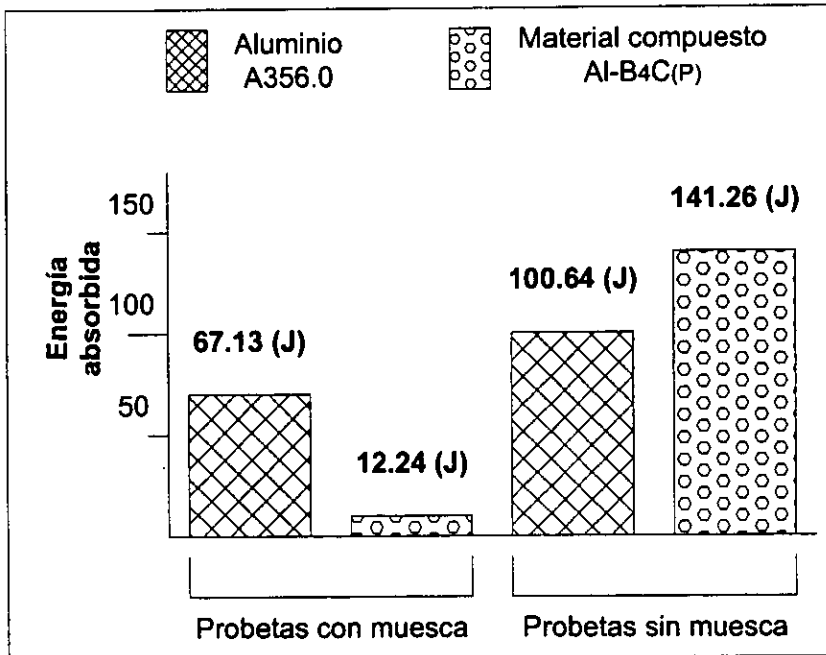


Figura 5.22. Influencia de la muesca sobre la energía absorbida en el impacto de los diferentes materiales.

Se puede observar en la figura 5.22. que la presencia de una muesca en las probetas de impacto determina un cambio considerable en la energía absorbida. Cuando no hay muesca, el material compuesto es más tenaz que la aleación de aluminio porque aumenta la energía absorbida en el impacto en un 40% aproximadamente. Por otro lado, la tenacidad del material compuesto disminuye aproximadamente 81% con respecto al aluminio cuando existe una muesca. Esto sugiere que el material compuesto es más sensible a muescas que el aluminio, es decir, es poco resistente a la fractura sin deformación plástica. En la figura 5.23. se observa esta diferencia en las probetas de impacto, en donde el corte de la zona fracturada indica también mayor deformación plástica en aluminio. Las probetas sin muesca de la parte inferior de la figura 5.23. no presentan fractura, sin embargo, el material compuesto es más resistente como se mencionó anteriormente.



Figura 5.23. Fotografía de las probetas de impacto después de practicar el ensayo. Las probetas de la fila izquierda son de aluminio y de la fila derecha son de material compuesto Al-B₄C_(P).

Comparando con otros materiales, el material compuesto Al-B₄C_(P), tiene un valor de energía de impacto similar al de un acero 0.2% C, que es del orden de 140 J [3, 13], lo cual es un resultado muy interesante para sus posibles aplicaciones.

5.3.5. Desgaste.

El carburo de boro se utiliza comercialmente como material abrasivo, por lo que se espera que el incremento logrado en la f.v. de refuerzo (del orden de 40% f.v.) tenga una influencia directa sobre la resistencia del material al desgaste.

Se practicaron tres experimentos para cada uno de los siguientes materiales (ver sección 4.4.4.): (1) aluminio A356.0; (2) material compuesto Al-B₄C_(P) fabricado con el método de vórtice; y (3) material compuesto Al-B₄C_(P) fabricado según el sistema centrífugo. En la tabla 5.4. se indican los valores obtenidos en los lapsos de 1, 5, 10, 15, 30, 60 minutos. Los intervalos se establecieron de esa manera porque es importante conocer cómo se presenta el proceso de desgaste durante los primeros momentos y al final de un largo periodo.

Se puede observar, de acuerdo con los datos de la tabla 5.4., que el material compuesto fabricado con el sistema centrífugo es bastante más resistente al desgaste que los otros dos materiales desde el inicio de la prueba, tal y como se esperaba por la presencia de una mayor cantidad de partículas de refuerzo (ver sección 5.2.2.1.). Tan sólo a los 60 minutos se tiene que este material perdió 1.3% de su peso inicial aproximadamente, mientras que el material compuesto fabricado con el método de vórtice y el aluminio perdieron 14.5% y 22% respectivamente.

La influencia de la distribución del refuerzo en las pérdidas de material se puede apreciar también en la figura 5.24., en donde se realizó la regresión lineal para ajustar a una

recta los valores obtenidos experimentalmente. Las ecuaciones de cada una de estas rectas son:

$$P_1 = 0.0206 + 0.01114 T. \quad SD=0.0194.$$

$$P_2 = 0.021 + 0.0075 T. \quad SD=0.0263.$$

$$P_3 = 9.277 \cdot 10^{-4} + 6.645 \cdot 10^{-4} T. \quad SD=0.0020.$$

Material	Peso inicial (gramos)	Pérdida de peso (gramos)					
		1 minuto	5 minutos	10 minutos	15 minutos	30 minutos	60 minutos
Aluminio A356.0	3.066	0.017	0.070	0.132	0.207	0.333	0.635
	3.275	0.021	0.085	0.163	0.244	0.389	0.718
	2.952	0.023	0.066	0.140	0.211	0.348	0.686
Al-B ₄ C _(P)	3.061	0.007	0.053	0.110	0.160	0.238	0.438
Método Vórtice	3.221	0.005	0.055	0.120	0.204	0.273	0.460
	3.172	0.008	0.048	0.109	0.167	0.258	0.473
Al-B ₄ C _(P)	2.867	0.001	0.004	0.006	0.011	0.022	0.038
Sistema centrífugo	3.006	0.002	0.003	0.005	0.012	0.022	0.034
	3.031	0.001	0.003	0.008	0.016	0.030	0.047

Tabla 5.4. Pérdida de peso de los diferentes materiales sujetos a pruebas de desgaste.

También fue posible observar la resistencia al desgaste de los materiales directamente de las probetas puestas a prueba. En la figura 5.25. se aprecia menos material removido sobre la zona de prueba en la probeta no. 3, en donde se sabe que hay 40% f.v. de refuerzo.

Los resultados obtenidos fueron muy claros: el material compuesto, con alta concentración de partículas, es aproximadamente 11 veces más resistente al desgaste que el material compuesto fabricado con el método de vórtice y 17 veces más resistente al desgaste que el aluminio sin reforzar. Esta característica puede emplearse para elaborar piezas en donde el principal requerimiento sea bajo peso y alta resistencia al desgaste adhesivo metálico o a la abrasión.

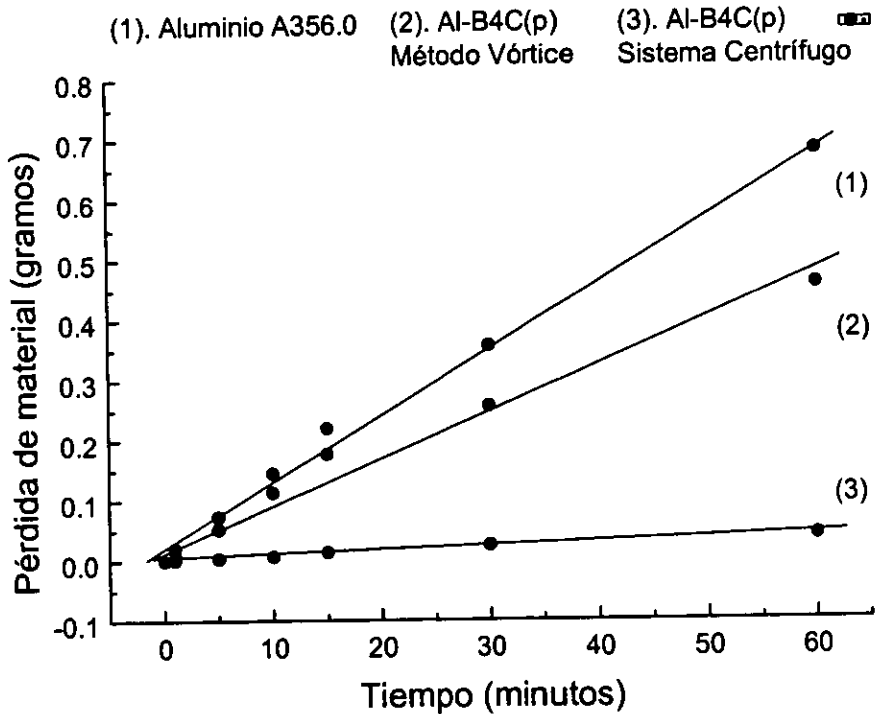


Figura 5.24. Gráfica que indica la relación entre el desgaste y la distribución del refuerzo en los materiales. Hay mayor pérdida de material en aluminio sin refuerzo (recta número 1).

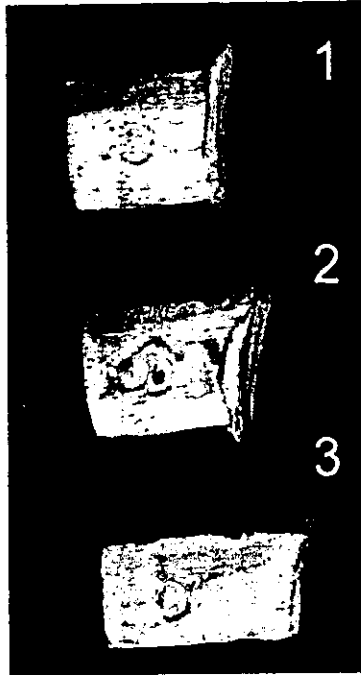


Figura 5.25. Fotografía de las probetas después de aplicar las pruebas de desgaste.

Conclusiones generales

CONCLUSIONES GENERALES.

A continuación se exponen los hallazgos y aportaciones más importantes de este trabajo, sin entrar en los detalles ya mencionados en el capítulo cinco. Además, se proporcionan algunas recomendaciones para posteriores trabajos.

Los equipos experimentales de fabricación de materiales compuestos del tipo $Al-B_4C_{(PARTICULAS)}$ cubrieron los objetivos planteados. Por un lado, el “equipo de dispersión de partículas reforzantes” permitió elaborar materiales compuestos de acuerdo con los parámetros del proceso del método de vórtice, como lo son: la temperatura del baño metálico líquido ($600^{\circ}C$ a $700^{\circ}C$), el % f.v. de partículas incorporadas (10% f.v.), la velocidad angular del agitador que produjo el vórtice (1100 r.p.m.) y el tiempo de agitación (2 a 3 minutos). Por otro lado, con el “equipo adaptado con molde giratorio” se logró incrementar la fracción volumétrica del refuerzo de 10% a 40% f.v. siguiendo los parámetros del proceso del sistema centrífugo, como lo son: la velocidad angular del molde (1200 r.p.m.), la temperatura de colada ($600^{\circ}C$ a $700^{\circ}C$), la temperatura del molde ($500^{\circ}C$) y el tiempo de permanencia del giro del molde (3 a 5 minutos). Los parámetros de ambos procesos se determinaron experimentalmente y se encontró que éstos son los óptimos para elaborar materiales compuestos con los equipos diseñados de esa manera.

Las pruebas de desgaste permitieron comparar los dos procesos de elaboración de materiales compuestos. Los resultados indican que el sistema centrífugo genera materiales compuestos con alta resistencia al desgaste en comparación con el aluminio A356.0 (17 veces más resistente), mientras que los obtenidos con el método de vórtice sufren pérdidas de material casi igual que el aluminio A356.0. Entonces, se puede concluir que el mejor proceso es el llevado a cabo con el sistema centrífugo y las piezas obtenidas tienen las siguientes cualidades: más ligeras que el aluminio y mayor resistencia al desgaste metálico o abrasivo. Sus posibles aplicaciones se pueden encontrar en:

- Paletas de molino para mezclar las arenas que se usan en moldes para fundición.

- Engranajes, cremalleras y poleas con alta concentración de refuerzo en la periferia de las piezas.

Se determinó, en la matriz, un efecto de refinamiento de tamaño de grano y un incremento en la dureza con respecto al aluminio sin reforzar. Esto se puede explicar por la existencia de una reacción química entre las partículas de B_4C con la matriz metálica dando origen a las fases AlB_2 , Al_3BC , que probablemente sirvieron como sitios de nucleación durante la transformación de fase de la matriz, trayendo como consecuencia dichos efectos que son deseables en un material estructural porque mejoran sus propiedades mecánicas. Se puede mencionar que este fenómeno se presentó de manera natural, porque no se realizaron trabajos posteriores que modificaran la microestructura del material compuesto.

Las propiedades mecánicas del material compuesto se vieron favorecidas. Comparando con la matriz sin reforzar, se encontró que el esfuerzo de cedencia se incrementó en un 80% y la resistencia a la tracción resultó ser 44% mayor, aproximadamente. Sin embargo, el material compuesto es menos rígido que el aluminio A356.0, siendo las principales causas: los defectos de porosidad y las regiones con aglomeración de partículas. En cuanto a la resistencia al impacto se determinó que el material compuesto es más tenaz que el aluminio (aproximadamente 40% mayor). El valor de la energía absorbida en el impacto del material fabricado, es similar a la de un acero 0.2%C (del orden de 140 J a temperatura ambiente [1, 13]), lo que representa un resultado interesante para sus posibles aplicaciones.

Todas las propiedades mecánicas obtenidas de este material compuesto y las modificaciones en su microestructura, tienen relación directa con el 10% f.v. de partículas. Esto quiere decir que el diez por ciento en volumen de B_4C produce el efecto suficiente, sobre el aluminio, para proveer las características ya descritas.

El método de vórtice genera piezas pequeñas debido a las condiciones mismas del proceso. Básicamente se trata de un problema de agitación en donde un mayor volumen de la matriz requiere un agitador más grande y, probablemente, otros diseños del mismo, de tal

manera que no se presenten los mismos problemas que se tienen a pequeña escala. Aunque esto representa una limitación en el campo de las aplicaciones, el material compuesto del tipo $Al-B_4C_{(p)}$ se puede utilizar en:

- Armazones para lentes, relojes, cuchillos y armas de fuego.
- Equipo para tiro con arco, bate de baseball, equipo para pescar, palos de golf y de hockey, raquetas, esquís y equipo para surf.
- Brazos pequeños automatizados (robots), componentes de bicicletas y motocicletas.

En la actualidad, no es factible la industrialización de los procesos llevados a cabo en este trabajo porque todavía se encuentran en las etapas de investigación y desarrollo. Como ya se discutió, todavía existen problemas en la fabricación de materiales compuestos que provocan que su calidad disminuya con relación a otros materiales compuestos comerciales con base aluminio. Los materiales, fabricados y estudiados aquí, requieren ser mejorados desde el punto de vista mecánico y microestructural.

Por lo dicho anteriormente, se pueden considerar las siguientes recomendaciones para un próximo trabajo en esta línea de investigación:

- 1) Mejorar la humectación entre partículas mediante la adición de agentes humectantes como el magnesio (Mg).
- 2) Para minimizar los problemas de porosidad se puede aplicar presión en estado líquido durante la colada del material compuesto.
- 3) Depurar el proceso de fabricación por el método de vórtice para mejorar la incorporación y dispersión de las partículas con el fin de evitar, al máximo, las aglomeraciones. Se pueden diseñar y probar otros modelos de agitadores. También, se puede modificar la velocidad de agitación, quizás a más altas r.p.m. pero en un lapso menor de 3 minutos.
- 4) Se puede lograr todavía una mayor concentración volumétrica de refuerzo (% f.v.) incrementando las r.p.m. del molde del sistema centrífugo. Para esto, se puede diseñar otro sistema de transmisión del movimiento evitando al máximo las vibraciones

causadas por el motor. Las vibraciones pueden tener un efecto no deseable en la distribución de las partículas.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- **Askeland R.** *La ciencia e ingeniería de los materiales*. Ed. Iberoamérica, 1987.
- 2.- **ASM.** *Engineering Materials Reference Book*. 2nd edition. USA, 1994.
- 3.- **ASM.** *Metals Handbook*. 9th edition. Vol. 2. USA, 1979.
- 4.- **ASTM B557-84.** *Standard Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum and Magnesium-Alloy Products*. Annual Book of ASTM Standards. 1993. Vol. 03.01.
- 5.- **ASTM E 23-93a.** *Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Annual Book of ASTM Standards 1993. Vol. 03.01.
- 6.- **ASTM E 407-70.** *Standard Test Methods for Microetching Metals and Alloys*. Annual Book of ASTM Standards. Vol.03 #1, 1993.
- 7.- **Avner S. H.** *Introducción a la metalurgia física*. Segunda Edición. Mc. Graw-Hill. USA, 1988.
- 8.- **Barostow W.** *The Science and Engineering of Materials*. 2nd edition. Chapman and Hall. USA, 1990.
- 9.- **Bertin E. P.** *Principles and practice of X-Ray Spectrometric Analysis*. Plenum Press. New York, 1975.
- 10.- **Brady G. S., Clauser H. R.** *Materials Handbook*. 30th edition. Mc. Graw-Hill. USA, 1991.
- 11.- **Broek D.** *Elementary engineering fracture mechanics*. Kluwer Academic Publishers. 1991.
- 12.- **Broutman L. J., Krock R. H.** *Modern Composite Materials*. Addison Wesley. USA, 1967.
- 13.- **Callister W. D.** *Materials science and engineering, an introduction*. John Wiley and Sons. Inc. USA, 1994.
- 14.- **Ceceña A. E., Barreda M. A.** *Producción estratégica y hegemonía mundial*. Siglo Veintiuno. Madrid, 1995.
- 15.- **Cook C. R., Yun D. I., Hunt W. H.** *System optimization for squeeze cast composites*. Proceedings on International Symposium on Advances in Cast Reinforced Metal Composites. Chicago, USA, 1988.

- 16.- Davidson D. L. *Fracture Characteristics of Al-4 pct Mg Mechanically Alloyed with SiC*. Metallurgical Transactions A, 1987. Vol 18A.
- 17.- De Luccia J. J. *Materials Peace Aerospace Technology. Advanced Materials & Processes*. May 1989.
- 18.- Dellow N., Bunsell A. R., Murakama A. *Advanced Composites. Sports and Leisure*. USA. November, 1998.
- 19.- Dutta B., Sucheta M., Surappa M. K. *Solidification Studies in Aluminum Matrix Composites*. Inorganic Matrix Composites. (TMS) USA, 1995.
- 20.- Eliasson J., Sandstrom R. *Analysis of the coherence of published data aluminum matrix composites*. J. of Testing and Evaluation, 1995, Vol. 23.
- 21.- Everett R. K., Arsenault R. J. *Metal matrix composites: Processing and Interfaces*. Academic Press Inc. USA, 1991.
- 22.- Feest E. A. *Metal Matrix Composites. Developments in Japan – Report on “OSTEM” Visit to Japan*. Harwell laboratory, Oxforshire, UK. November, 1986.
- 23.- Flores C. R. *Estudio e influencia de la interfase metal-cerámico sobre las propiedades mecánicas del compuesto Al-B₄C*. Tesis IME-UNAM, 1996.
- 24.- Girot F. A., Quenisset J. M., Nallain R. *Discontinuously Reinforced Aluminum Matrix Composites*. Composites Science and Technology. Vol 30, 1987.
- 25.- González G. *Reactive et caracterisation microestructurale a L'Interfacxe B₄C-Al: Aplicacion aux Composites a Fibres de Carbone*. Tesis doctoral del INSA, 1993.
- 26.- González G., Esnouf C., Epicier T. *Structural study of a new aluminium-rich boron-carbide at the case of a reactional interface B₄C-Al*. Proc.11b 92, Thessaloniki Greece juin 1992, (à paraitre en 1993).
- 27.- Granger D. A. *Solidification structures of aluminum alloy ingots*. Metals Handbook ASM 8th edition. Vol. 8.
- 28.- Guinier A. *Theorie et technique de la radiocristallographite*. Segunda edición. Paris, Dunod, 1956.
- 29.- Hanumanth G. S., Irons G. A. *Particle incorporation by melt stirring for the production of Metal Matrix Composites*. Journal of Materials Science. Vol. 28, 1993.
- 30.- Harris B. *Engineering composite materials*. The institute of metals, 1986.

- 31.- Hatch J. E. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. ASM (American Society for Metals), 1984.
- 32.- Hearle J. W. S., Sparrow J. T., Cross P. M. *The use of the Scanning Electron Microscope*. Pergamon Press LTD. Great Britain, 1973.
- 33.- Henrich K. F. J. *Electron Beam X-Ray Microanalysis*. Van Nostrand Reinhold Company. USA, 1981.
- 34.- Hull D., Clyne T. W. *An Introduction to Composite Materials*. 2nd edition. Cambridge University Press. USA, 1996.
- 35.- Isacc D. *Engineering Mechanics of Composites Materials*. Oxford University, 1994.
- 36.- John B. V. *Conocimiento de los materiales de ingeniería*. Gustavo Gil. México, 1972.
- 37.- Kim G. H., Sarikaya M., Milius D. *Microstructural and Fractographic Characterisation of B₄C-Al Cermets Tested Under Dynamic and Static Loading*. Proceeding of the 47th annual meeting of the electron microscopy soc. of America, 1989.
- 38.- Lee S. M. *International encyclopedia of composites*. VCH; publisher. Vol.3, 1988.
- 39.- Mc Coy J., Waulner F. *Dendritic Segregation in Particle-Reinforced cast Aluminum Composites*. Materials Science, 1988.
- 40.- Mc Daniels D. L. *Analysis of Stress-Strain, Fracture and Ductility Behaviour of Aluminum Matrix Composites Containing Discontinuous Silicon Carbide reinforcement*. Metallurgical Transactions A. Vol. 16A, 1985.
- 41.- Mondolfo L. F. *Aluminum and Alloys: Structure and Properties*. London Butterworth. 1976.
- 42.- Montoya P. I. *Propiedades mecánicas y estudio microestructural de compuestos de la familia Al-B₄C a fracción volumétrica de partícula variable*. Tesis IM UNAM, 1997.
- 43.- Pouchou J. L. *Un Nouveau modele de calcul pour la microanalyse quantitative par spectrometrie de Rayons X*. La Recherche Aerospatiale, #3, 1984.
- 44.- Rohatgi P. K., Asthana R. *Das: Solidification, Structure, and Properties of cast Metal-Ceramic Particles Composites*. International Metals Review. 1988 Vol. 31. No. 3.
- 45.- Salvo L., Espérance G. L., Suéry M., Legoux J. G. *Interfacial reactions and age hardening in Al-Mg-Si metal matrix composites reinforced with SiC particles*. Mat. Sci. And engineering. August, 1993.
- 46.- Sarkar A.D. *Desgaste de metales*. Limusa. México, 1990

- 47.- **Schwartz M. M.** *Composite Materials Handbook*. Graw-Hill, 1984.
- 48.- **Solorzano L. J.** *Fabricación de compósitos Al/Si-SiC por el proceso rotor-inyector*. Tesis IQM. UNAM, 1995.
- 49.- **Suresh S., Mortensen A.** *Fundamentals of metal matrix composites*. Butterworth-Heinemann. USA, 1993.
- 50.- **Taya M., Arsenault R.** *Metal Matrix Composites: Thermomechanical behavior*. Pergamon Press. Great Britain, 1989.
- 51.- **Terry B., Jones G.** *Metal Matrix Composites*. Elsevier Science Publishers. England, 1990.
- 52.- **Thevenot F.** *Boron carbide: a comprehensive review*. Journal of the European Ceram Society, 1990. Vol 6, p.205-225.
- 53.- **Thevenot F., Bouchacourt M.** *Le carbure de bore: matériau industriel performant partie I*. L'Industrie Ceramique, 1979. Vol. 732, p. 655-661.
- 54.- **Thevenot F., Bouchacourt M.** *Le carbure de bore: matériau industriel performant partie II*. L'Industrie Ceramique, 1979. Vol. 734, p. 603-610.
- 55.- **Totht I. J., Brentnall W. D., Menke G. D.** Fabricating aluminum matrix composites. Journal of metals. September, 1972. p. 19-25.
- 56.- **Van Vlack L. H.** *Elements of materials science and engineering*. Addison Wesley. Publish Company, 1989.
- 57.- **Vernon J.** *Testing of materials*. Hampshire: Macmillan Education LTD, 1992.
- 58.- **Wenlong W.** *SiC particle reinforced aluminum composites*. Institute of composites materials. Shanghai, China.
- 59.- **Zhang Z.** *A literature survey on fabrication methods of cast reinforced metal composites*. Proc. Int. Symp. on Advances in Cast Reinforced Metal Composites. Chicago, USA, 1988.
- 60.- **Z. W. Kurz, D. J. Fisher.** *Fundamentals of solidification*. Trans Tech Publications Ltd. Switzerland. 3th edition, 1992.

Anexo

ANEXO.

Equipo utilizado para la caracterización del material compuesto del tipo Al-B₄C_(P).

Equipo	Modelo
Analizador de imágenes.	Leica-Cambridge Quantiment 500.
Difractómetro.	Siemens D5000.
Impactómetro.	Brazo: $\theta_i = 119^\circ$; $m = 26.06$ Kg; $L = 0.8024$ m.
Máquina para pruebas de desgaste.	Interfase friccionante cilíndrica.
Máquina universal para pruebas mecánicas.	INSTRON 1125.
Microdurómetro.	Zhimadzu 4464.
Microscopio electrónico de barrido.	Leica-Cambridge. Stereoscan 440.
Microscopio óptico.	Olympus Vanox-AHMT3.