



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN**

**COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

ESTUDIO DEL DESGASTE DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ DE ALUMINIO

Mario Roberto Rosenberger

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

Estudio del Desgaste de Materiales Compuestos de Matriz de Aluminio(*)

por Ing. Mario R. Rosenberger

Directores

**Dra. Elena Forlerer
Dr. Carlos E. Schvezov**

(*) Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales

República Argentina

2003

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores: **Dra. Elena Forlerer** y **Dr. Carlos Enrique Schvezov** por la constante orientación y apoyo durante las diversas etapas que llevó la confección de este trabajo.

Además, quiero agradecer al director del Instituto de Tecnología “Jorge Sabato” **Dr. José Rodolfo Galvele** y a la Directora Académica de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales **Dra. Alicia Sarce** por la confianza depositada y el estímulo constante durante estos dos años.

Agradezco también a la **Lic. Silvia Balart** por las sugerencias que permitieron resolver más de un problema; a la Sras. **Adriana Domínguez** y **Sara Novas** por el trabajo en el Microscopio de Barrido; a los Sres. **Ricardo Montero** y **Ramón Castillo Guerra** por la colaboración en los temas metalográficos.

Extiendo también mi agradecimiento al personal de la Biblioteca que colaboró en la búsqueda de material bibliográfico necesario para llevar a cabo este trabajo y al personal de la Secretaría del Instituto por su necesaria orientación en los trámites. También, a mis compañeros de la Maestría: **Lic. Marcela Mirandu**, **Ing. Carlos Esquivel**, **Lic. Javier Fava** y **Lic. Reinaldo Gaona**. A mis compañeros de tareas en los laboratorios de la CNEA: **Srta. Mariana Blanco**, **Sr. Dante Peix**; y en los laboratorios de la UnaM: **Srta. Laura Vera**, **Ing. Guillermo Pantiu** y **Prof. Aldo Zang**.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia por su apoyo inestimable y valioso.

Mario R. Rosenberger

Junio de 2003

RESUMEN

Se estudió el desempeño en el desgaste de materiales compuestos de matriz de AA6061 reforzados con:

5, 10 y 15% de B_2Ti , partículas de 10 μm ;

5, 10 y 15% de Al_2O_3 , partículas de 1 μm ;

5 y 10% de Ti_3Al , partículas de 25 μm ;

5% de B_4C , partículas de 10 μm ;

el material de la matriz, AA6061, sin reforzar;

Además, se ensayó un AA1060 reforzado con partículas de Al_2O_3 de 12 μm .

Los ensayos se realizaron en un equipo Pin on Ring en condiciones no lubricadas, a una velocidad de 2,7 m/s y con una carga aplicada de 32,4 N; desgastándose hasta una distancia de 2000 m, contra una contraparte de acero.

Se compararon las tasas de desgaste entre las distintas probetas para estudiar la influencia del tipo y proporción del refuerzo.

A fin de conocer el efecto del desgaste sobre los materiales se caracterizaron las superficies desgastadas, los fragmentos desprendidos y los cortes longitudinales de las probetas desgastadas mediante microscopía óptica y electrónica, y microanálisis dispersivo en energía, EDAX.

Las tasas de desgaste de los materiales compuestos fueron muy similares entre sí, pero fueron dos órdenes de magnitud menores que para el material sin reforzar. No se identificó una influencia del tipo o proporción del refuerzo en la tasa de desgaste.

Se encontraron en todos los materiales compuestos una superficie desgastada de similares características, diferentes a la observada en el material sin reforzar. Se destaca la presencia de hierro en la superficie desgastada de los materiales compuestos, proveniente de la contraparte.

En los cortes longitudinales de los materiales compuestos se encontró una Capa de material Mezclado Mecánicamente, la cual contenía Fe, Al y refuerzos fracturados. Esta capa se extiende sobre toda la superficie de desgaste reemplazando a los materiales originales y confiriendo al sistema tribológico una superficie de desgaste con propiedades mecánicas diferentes al material original, que contribuye en gran medida con la resistencia al desgaste. En el caso del material sin reforzar no se encontró dicha Capa.

ABSTRACT

The wear performance of AA6061 matrix composite materials was studied. The matrix was reinforced with:

5,10 and 15% of B₂Ti, 10 μ m in size;

5,10 and 15% of Al₂O₃, 1 μ m in size;

5 and 10% of Ti₃Al, 25 μ m in size;

5% of B₄C, 10 μ m in size;

matrix material, AA6061, without reinforcement;

In addition, AA1060 reinforced with Al₂O₃, particles 12 μ m in size was studied.

The tests were performed in a Pin on Ring machine, under non-lubricated conditions, at a velocity of 2.7 m/s and a load of 32.4 N. All the tests were run up to 2,000 m, against a steel counterface.

The wear rates of different samples were analyzed and the influence of the type and proportion of reinforcement were established.

The wore surfaces, debris and longitudinal sections of each sample were characterized by Optical and Scanning Electron microscopy and Energy Dispersive X-Ray microanalysis.

The results show that the wear rates of the composite materials were all very similar among them, however they were two orders of magnitude lower than the rates for non-reinforced materials. No significant influence on wear rate was found among the different type or proportion of reinforcement.

Similar characteristics of the wore surfaces were found in all the samples, they were different to the wore surface of the non-reinforced sample. The presence of Fe in the wore surfaces of composite materials, coming from of the counterface was identified.

A Mechanical Mixed Layer (MML), was found in the longitudinal sections of composite materials, containing Fe, Al and reinforcement. This layer is spread over the whole surface, replacing the original material and giving a wear surface with mechanical properties very different than the original composite. This layer is responsible for most of the wear resistance. On the other hand, this mechanical mixed layer was not found in the non-reinforced material.

INDICE DE TEMAS

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE TEMAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS Y DEFINICIONES BÁSICAS	1
1.1 Conceptos fundamentales sobre los materiales compuestos	1
1.2 Conceptos fundamentales sobre desgaste	3
1.2.1 Métodos experimentales de medición del desgaste	6
Máquinas de ensayo	6
Métodos de cuantificación	6
1.2.2 Métodos experimentales de caracterización del desgaste	8
1.2.3 Variables condicionantes del desgaste por fricción	9
1.2.4 Modos de desgaste	10
Desgaste por abrasión	11
Desgaste por adhesión	14
Desgaste oxidativo	15
Otros modos de desgaste	16
Deformación subsuperficial	16
1.2.5 Mapas de desgaste	17

CAPÍTULO 2

DESGASTE DE MATERIALES COMPUESTOS	
- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Efecto de las variables del sistema	22
2.2 Efecto de las variables introducidas por el material compuesto	25
2.3 Mapas de desgaste para materiales compuestos	27
2.4 La subsuperficie y la capa mezclada en materiales compuestos	28

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS DEL TRABAJO 33

Delineamiento del trabajo 33

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS EXPERIMENTALES 34

4.1. Ensayos de desgaste 34

4.1.1. Preparación del equipo y las probetas 34

4.2. Técnicas metalográficas 35

4.2.1. Microscopio óptico 36

4.3. Microscopio electrónico de barrido 36

4.4. Medidas de dureza 36

CAPÍTULO 5

MATERIALES 40

Microdureza de la Matriz de los Materiales Compuestos 43

Microdureza de los refuerzos 43

CAPÍTULO 6

RESISTENCIA AL DESGASTE 45

6.1. Determinación de las condiciones de ensayo 45

6.2. Repetibilidad y Controlabilidad del sistema -
en las condiciones seleccionadas 46

6.3. Medidas de desgaste 49

6.3.1. Resultados 49

6.3.2. Análisis de los resultados de desgaste 52

CAPÍTULO 7

CARACTERIZACIÓN DEL DESGASTE 55

7.1. La Superficie Desgastada 55

7.1.1. Materiales Reforzados con Alúmina, Al_2O_3 56

7.1.2. Materiales Reforzados con Intermetálico Ti_3Al 59

7.1.3. Materiales Reforzados con Diboruro de Titanio, B_2Ti 61

7.1.4.	Material Reforzado con Carburo de Boro, B ₄ C	63
7.1.5.	Material sin Reforzar, AA6061	65
7.1.6.	Análisis y Discusión sobre la superficie desgastada	66
7.2.	Capa Mezclada Mecánicamente	69
7.2.1.	Resultados	69
7.2.2.	Microestructura y Composición	69
7.2.3.	Medidas de microdureza en la capa mezclada	72
7.2.4.	Medidas de espesores de la capa mezclada	73
7.2.5.	Análisis y Discusión sobre la capa mezclada mecánicamente	74
7.3.	La Subsuperficie	76
7.3.1.	Resultados	76
7.3.2.	Morfología de las Subsuperficie	76
7.3.3.	Extensión de la Zona Deformada Plásticamente	80
7.3.4.	Medidas de Microdureza en la Subsuperficie	82
7.3.5.	Análisis y Discusión Sobre la Subsuperficie	84
7.4.	Fragmentos	86
7.4.1.	Materiales reforzados con Alúmina, Al ₂ O ₃ .	86
	Fragmentos de p1: AA1060/ Al ₂ O ₃ / 15p	86
	Fragmentos de p3: AA6061/ Al ₂ O ₃ / 15p	86
	Fragmentos de p4: AA6061/ Al ₂ O ₃ / 10p	87
	Fragmentos de p5: AA6061/ Al ₂ O ₃ / 5p	88
7.4.2.	Materiales reforzados con intermetálico, Ti ₃ Al	90
	Fragmentos de p6: AA6061/ Ti ₃ Al/ 5p	90
	Fragmentos de p7: AA6061/ Ti ₃ Al/ 10p	91
7.4.3.	Materiales reforzados con Diboruro de Titanio, B ₂ Ti.	92
	Fragmentos de p8: AA6061/ B ₂ Ti/ 15p	92
	Fragmentos de p9: AA6061/ B ₂ Ti/ 10p	92
	Fragmentos de p10: AA6061/ B ₂ Ti/ 5p	93
7.4.4.	Material reforzado con Carburo de Boro, C ₄ B	94
	Fragmentos de p11: AA6061/ B ₄ C/ 5p	94
7.4.5.	Material sin reforzar	95
	Fragmentos de p12: AA6061	95
7.4.6.	Análisis y Discusión sobre los fragmentos	96

CAPÍTULO 8:	
DISCUSIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS EN RELACIÓN CON LA TASA DE DESGASTE	99
 CAPÍTULO 9:	
CONCLUSIONES	105
Conclusiones sobre la superficie desgastada y los fragmentos	105
Conclusiones sobre la capa mezclada mecánicamente	105
Conclusiones sobre la subsuperficie	105
Conclusiones sobre la magnitud de la tasa de desgaste	106
Conclusiones sobre la relación entre las características morfológicas en la tasa de desgaste	106
 CAPÍTULO 10:	
TRABAJOS FUTUROS	107
 APÉNDICE A	
Microdureza de La MML y de la Subsuperficie versus la profundidad a la Superficie Desgastada	108
 APÉNDICE B	
Método para medir endurecimiento en la Subsuperficie	110

INDICE DE FIGURAS

Figura

1.1	Volumen crítico para la fracción de refuerzos	3
1.2	Superficies reales. a) Área real y Área aparente; b) capas superficiales sobre el metal original	4
1.3	Sistema Tribológico, partes que lo componen y efectos del desgaste	5
1.4	Máquinas de ensayo. a) Pin on Disc; b) Pin on Ring; c) Block on Ring.	7
1.5	Diferentes tipos de abrasión, a) y b) abrasión de dos cuerpos; c) abrasión por tercer cuerpo	11
1.6	Modelo empleado para deducir la expresión utilizada en desgaste por abrasión	12
1.7	Resistencia al desgaste de metales puros, en abrasión de dos cuerpos	13
1.8	Variación del volumen desgastado con la distancia recorrida. Acero sobre SiC de 220 mesh	13
1.9	Esquemmatización del mecanismo de desgaste adhesivo	14
1.10	Deformación plástica durante el desgaste a) Estructura deformada típica de un proceso de desgaste b) Superficie desgastada, AA6061 / B ₄ C / 5p, c) Detalle de la rebaba lateral	18
1.11	Mapa de desgaste para aceros	19
2.1	Mapa de Tasa de desgaste [mm ³ /m] vs. Carga [N], (○) AA6061, sin reforzar; (△) AA6061 / Al ₂ O ₃ / 10p; (■) AA6061 / Al ₂ O ₃ / 20p desgastados contra un acero SAE 52100 en una block on Ring.	23
2.2	Tasa de desgaste vs. Velocidad de deslizamiento para dos cargas diferentes. En aleaciones de aluminio.	24
2.3	Variación de la tasa de desgaste volumétrico con la temperatura.	25
2.4	Mapa de desgaste para AA356 / SiC / 20p	27
2.5	Esquema de las capas de materiales ubicadas debajo de la superficie.	30
4.1	Equipo Pin on Ring, utilizado para los ensayos de desgaste.	34
4.2	Esquema ilustrando el error en las medidas de microdureza al emplear la técnica del plano oblicuo.	38
5.1	Metalografías de los materiales utilizados	41
5.2	Microdureza de la matriz en los distintos materiales utilizados	44
6.1	Mapa de tasa de desgaste versus Carga, para AA1060 / Al ₂ O ₃ / 15p.	45

6.2	Comparación entre medidas de acortamiento y medidas de pérdida de peso, sobre tres probetas del mismo material ensayadas en las mismas condiciones.	47
6.3	Comparación entre modos <i>continuos</i> y <i>discontinuos</i> , efectuados sobre el mismo material en similares condiciones.	48
6.4	Comparación del desgaste total a los 2000 m. Entre los distintos materiales ensayados.	49
6.5	Gráficos de la evolución del desgaste en las probetas de materiales compuestos y de monolíticos.	51
7.1	Superficie desgastada de la probeta p1: AA1060/ Al ₂ O ₃ / 15 p	57
7.2	Superficie desgastada de la probeta p3: AA6061/ Al ₂ O ₃ / 15 p	57
7.3	Superficie desgastada de la probeta p4: AA6061/ Al ₂ O ₃ / 10 p	58
7.4	Superficie desgastada de la probeta p5 AA6061/ Al ₂ O ₃ / 5 p	58
7.5	Superficie desgastada de la probeta p6: AA6061/ Ti ₃ Al/ 5 p	60
7.6	Superficie desgastada de la probeta p7 AA6061/ Ti ₃ Al/ 10 p	60
7.7	Superficie desgastada de la probeta p10: AA6061/ B ₂ Ti/ 5p	62
7.8	Superficie desgastada de la probeta p9: AA6061/ B ₂ Ti/ 10 p	62
7.9	Superficie desgastada de la probeta p8: AA6061/ B ₂ Ti/ 15 p	63
7.10	Superficie desgastada de la probeta p11: AA6061/ B ₄ C/ 5p	64
7.11	Superficie desgastada de la probeta p12: AA6061	65
7.12	Esquema indicando la situación del corte longitudinal	69
7.13	Cortes transversales mostrando la MML, en diferentes probetas ensayadas.	71
7.14	Valores promedio y máximos de microdureza Vickers de la Capa Mezclada Mecánicamente, MML.	73
7.15	Dureza relativa de la MML respecto a al matriz de cada probeta.	74
7.16	Valor promedio del espesor de la Capa Mezclada, para cada probeta.	74
7.17	Imágenes de la subsuperficie donde se muestra la zona deformada plásticamente.	77 - 80
7.18	Espesor de la zona deformada plásticamente en la subsuperficie.	82
7.19	Comparación del tamaño de los poros en la zona deformada plásticamente de la subsuperficie, entre: AA1060/ Al ₂ O ₃ / 15 p y AA6061/ Al ₂ O ₃ / 15 p	81
7.20	Diferencia de microdureza en la subsuperficie.	83

Indice de Figuras

7.21	Comparación entre la dureza de la matriz y el espesor de la capa deformada plásticamente	85
7.22	Fragmentos de p1: AA1060/ Al_2O_3 / 15p	86
7.23	Fragmentos de p3: AA6061/ Al_2O_3 / 15p	87
7.24	Fragmentos de p4: AA6061/ Al_2O_3 / 10p	88
7.25	Fragmentos de p5: AA6061/ Al_2O_3 / 5p	89
7.26	Fragmentos de p6: AA6061/ Ti_3Al / 5p	90
7.27	Fragmentos de p7: AA6061/ Ti_3Al / 10p	91
7.28	Fragmentos de p8: AA6061/ B_2Ti / 15p	92
7.29	Fragmentos de p9: AA6061/ B_2Ti / 10p	93
7.30	Fragmentos de p10: AA6061/ B_2Ti / 5p	93
7.31	Fragmentos de p11: AA6061/ B_4C / 5p	94
7.32	Fragmentos de p12: AA6061	95
8.1	Comparación entre la tasa de desgaste y la dureza de la matriz en cada probeta	99
8.2	Comparación de la Tasa de desgaste con la dureza de la MML.	100
8.3	Comparación de la Tasa de desgaste con el espesor de la MML.	101
8.4	Comparación de la Tasa de desgaste con el espesor de la zona deformada plásticamente en la subsuperficie.	102
A.1	Gráficos de Microdureza de la MML y de la subsuperficie vs. la profundidad a la superficie desgastada	108 - 109

INDICE DE TABLAS

Tabla

1.1	Coeficientes de variación de ensayos no lubricados, utilizando equipos Block on Ring. Realizados en cuatro laboratorios homologados y certificados por la ASTM.	7
4.1	Resumen de las metodologías empleadas por otros investigadores para medir microdurezas	37
5.1	Composición química de las matrices utilizadas en los materiales compuestos	40
5.2	Composición y características de los materiales utilizados	41
5.3	Referencia de las probetas utilizadas y detalle de la carga utilizada en los ensayos	43
5.4	Dureza de los refuerzos utilizados	44
7.1	Referencia a las probetas reforzadas con Alúmina.	56
7.2	Referencia a las probetas reforzadas con Intermetálico Ti_3Al	59
7.3	Referencia a las probetas reforzadas con Diboruro de Titanio	61
7.4	Resumen de las características observadas en la superficie desgastada de las probetas	66
7.5	Resumen de las observaciones ópticas, SEM, EDAX sobre las probetas	67
7.6	Resumen de las características observadas en la Capa Mezclada Mecánicamente de las probetas.	72
7.7	Microdureza de la MML	73
7.8	Resumen de las características observadas en los fragmentos durante el desgaste.	96
B.1	Detalles del cálculo de la diferencia de dureza, entre la matriz del material original y el material deformado por el desgaste	110

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS Y DEFINICIONES BÁSICAS

1.1 Conceptos fundamentales sobre los materiales compuestos

Bajo la denominación de materiales compuestos, desde el punto de vista tecnológico, se hace referencia a aquellos constituidos por la unión de distintas partes preexistentes. Algunos autores proponen denominarlos *materiales compuestos extrínsecos*, para distinguirlos de aquellos cuyas segundas fases son formadas in situ, llamados *intrínsecos*^[1]

En la designación propuesta por la American Aluminium Association se destacan los constituyentes principales de estos materiales. Así, un material compuesto podría nombrarse de la siguiente manera:

Designación de la matriz / abreviatura del refuerzo / disposición y fracción en volumen en %, y un símbolo que es indicativo de la forma del refuerzo (p = partículas, f = fibras, s = fibras cortas, w = whiskers).

Además, la Aluminium Metal Matrix Composite Consortium propone adicionar al final, el tratamiento térmico y el proceso de fabricación utilizado.^[2]

Los materiales compuestos con refuerzos duros en matriz de aluminio son utilizados principalmente en la industria aeroespacial y en la industria del transporte automotor, principalmente por la buena relación peso – resistencia frente a los aceros, así por ejemplo:

- En la industria militar: mecanismos de transmisión de potencia y de suspensión.
- En la industria del transporte comercial: discos de freno, varillas de transmisión (Ford), pistones para motores de explosión (Toyota), blocks de motores (Honda)^[3].

En lo que respecta al proceso de fabricación, existen dos maneras de obtener materiales compuestos:

Procesos en estado sólido se sigue la ruta típica de la metalurgia de polvos, con etapas de mezclado, compactado y consolidación. Y la forma final se puede obtener mediante extrusión, forja, u otro proceso de conformado mecánico. Este proceso permite obtener materiales compuesto con alta concentración de refuerzos, pero tiene el inconveniente de ser más caro que otras alternativas. Respecto a los costos pueden lograrse mejoras realizando procesos en estado semisólido.

Procesos en estado líquido en este caso existen dos tendencias principales, una es mediante la infiltración de metal líquido en un molde previamente relleno con el material de refuerzo, otra manera es realizando un colado con agitación, para evitar la distribución heterogénea de los refuerzos

Se ha demostrado que no existe diferencia en la resistencia de los materiales fabricados por alguno de estos procesos en cuanto se comparen en iguales condiciones de: unión refuerzo / matriz, tamaño de refuerzo y distribución y porcentaje de refuerzo^[4]

Existen diferentes modelos teóricos utilizados para explicar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, los cuales podrían clasificarse en tres grupos principales: ^[5]

- modelos de transferencia de carga
- modelos de fortalecimiento de la matriz
- modelos que combinan los dos anteriores

En todos ellos se considera una unión bien consolidada entre refuerzo y matriz.

Esencialmente el primer y tercer grupo utilizan un promedio pesado, conocido como regla de las mezclas, para obtener las propiedades del material compuesto. Y según estos modelos puede esperarse propiedades intermedias a las de la matriz y el refuerzo.

El segundo grupo considera mecanismos de endurecimiento atribuido a cambios microestructurales en la matriz motivados por la presencia de los refuerzos.

Es necesario tener en cuenta que los modelos postulados consideran la unión ideal, ya que no modelan la interfase, entre el refuerzo y la matriz, y esto es algo que no es muy frecuente en las condiciones reales, por lo tanto no es sorprendente que haya una merma en algunas propiedades del material compuesto al agregar refuerzo a la matriz, de allí la necesidad de introducir un volumen de refuerzo mayor al **volumen crítico** para obtener un material con mejores propiedades que la matriz sin reforzar^[1].

En la figura 1.1 se muestra la relación entre la tensión de fluencia y la fracción en volumen de refuerzo, en donde se aprecia primero una merma en la tensión de fluencia a medida que se aumenta la cantidad de refuerzo, hasta alcanzar un valor mínimo, donde se invierte la relación y la tensión de fluencia es directamente proporcional a la fracción de refuerzo. El valor de la fracción en volumen de refuerzo que corresponde con una similar resistencia en la matriz es llamado **volumen crítico**, el cual se considera que debe ser superado para tener un material compuesto con mejores características que las de la matriz.^[6]

En vista de la importancia de la interfase refuerzo/matriz, se realizan diferentes técnicas para mejorar la adherencia, que incluyen tratamientos previos del refuerzo para lograr mejor afinidad química con la matriz, evitando la disolución del mismo.

Las características que presentan los materiales compuestos en la resistencia al desgaste se ve en las diferentes aplicaciones, ya sean bujes autolubricados, discos de frenos, rellenos para reparaciones dentales, superficies de poleas, etc.

Una buena relación peso/resistencia se obtienen con materiales compuestos de matriz metálica liviana, en particular aleaciones de aluminio, reforzados con partículas duras, que permiten obtener materiales resistentes con pesos más bajos que los aceros.

Se emplean distintos tipos de refuerzo, los más utilizados son de tipo duro, por ejemplo: alúmina, carburo de silicio, carburo de boro, diboruro de titanio, etc. Y de diversas formas ya sea: partículas irregulares de aristas agudas o redondeadas, en forma de fibras largas alineadas o fibras cortas desorientadas, y en los mejores casos se utilizan whiskers.

Las situaciones de servicio a que son sometidas abarcan un amplio rango de cargas, siendo características en velocidades de deslizamiento moderadas, del orden de

1 m/s, o con disipadores de calor adecuados que pueden utilizarse a altas velocidades del orden de 10 m/s.

Muchos estudios se han realizado para determinar la resistencia al desgaste, en condiciones no lubricadas. Se ha encontrado que los refuerzos de partículas cerámicas duras pueden producir aumento en la resistencia al desgaste comparados con la del material sin reforzar, o monolítico^[7, 8, 9]. Aunque, otros investigadores encontraron que bajo ciertas condiciones los materiales compuestos tienen igual o peor resistencia al desgaste que los materiales sin reforzar^[10, 11].

Por lo tanto, debe decirse que los materiales compuestos presentan buenas características frente al desgaste no lubricado, en determinados intervalos; dentro de las

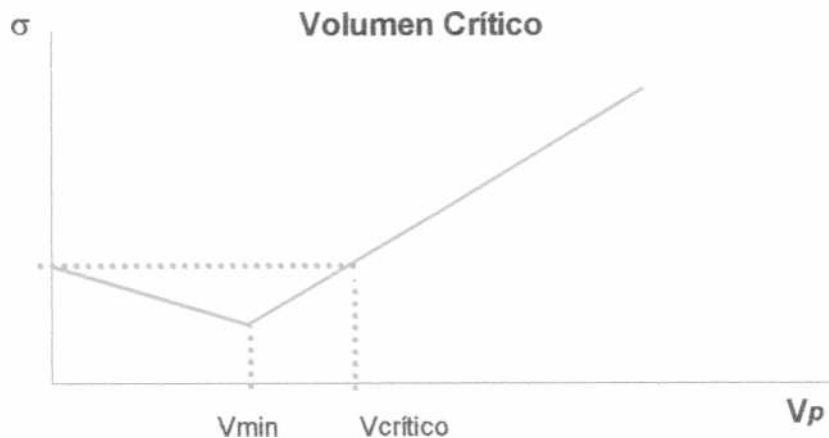


Figura 1.1: Volumen crítico para la fracción de refuerzos

amplias condiciones a que puedan someterse los materiales, respecto a las que presenta el material sin reforzar.

Ahora bien, distintos comportamientos pueden encontrarse según el tipo de material compuesto. Las variables más importantes que suelen manejarse son, además del tipo de refuerzo y matriz; el tamaño, la forma y el porcentaje en volumen de refuerzo.

1.2 Conceptos fundamentales sobre desgaste

Para situar al fenómeno de desgaste es necesario definir ciertos elementos que serán utilizados en su descripción. Cuando se tiene una superficie, normalmente se encuentran alteraciones, tales como: ondulaciones y relieves, provenientes del proceso utilizado para obtenerla, debido a estas irregularidades se dice que la superficie presenta *rugosidad*. Por lo tanto, cuando se consideren situaciones de superficies en contacto debe tenerse en claro que el contacto se da entre pequeñas porciones de material que sobresalen de cada superficie, llamadas **asperezas**, de una y otra superficie. Tal como se muestra en la figura 1.2.a.

Debido a eso se distingue entre área nominal, o aparente de contacto, y área real de contacto. El **área nominal** considera las dimensiones macroscópicas de las partes en contacto sin tener en cuenta la rugosidad de la superficie. El **área real** contempla la suma de las pequeñas zonas de contacto entre asperezas, como se muestra en la figura 1.2.b El área real tiene valores menores o a lo sumo iguales que el área nominal, es compleja de cuantificar, y depende de la carga aplicada, de la resistencia del material y de la forma promedio de las asperezas^[12, 13, 14, 15].

En la figura 1.2.b se puede ver que la superficie de un sólido suele estar formada por capas de materiales diferentes al del volumen, tales como: productos de reacción entre el material base y el medio ambiente al que fue expuesto, capas de gases adsorbidos, capas de óxidos o material modificado por trabajado. De allí que un material pueda mostrar diferentes respuestas cuando es puesto en contacto con otro según las características y propiedades de estas capas externas.

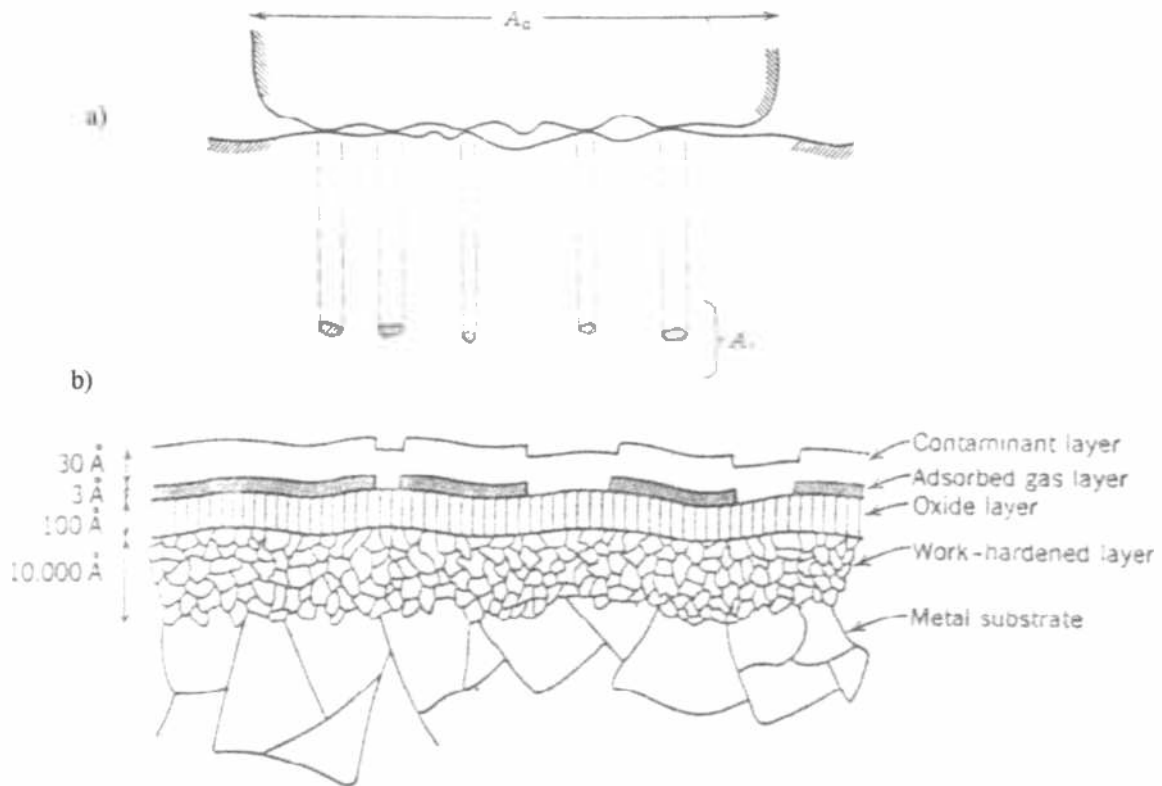


Figura 1.2: a) Área real y Área aparente
b) Capas superficiales sobre el metal original ^[12]

Con un criterio general puede considerarse que el desgaste, junto con la fractura y la corrosión es una de las maneras por las cuales se deterioran los materiales ^[12].

Decimos habitualmente que una pieza está desgastada cuando notamos algún cambio en sus dimensiones, debido al uso para la que fue diseñada. Aunque, técnicamente hablando, esta noción es muy ambigua, puede darnos una idea del problema.

Existen diferentes definiciones técnicas, entre ellas podemos citar dos:

Rabinowicz define desgaste como “la remoción de material de la superficie debido a una acción mecánica”. ^[12]

Otra definición aceptada lo considera como un “daño producido en una superficie sólida, generalmente involucrando pérdida progresiva de material, debido al movimiento relativo entre las superficies o sustancias en contacto”. ^[16]

De allí se puede extraer que:

- involucra al material de las superficies sólidas,
- implica pérdida progresiva de material,
- necesita del movimiento relativo entre dos superficies.

Otras características, que merecen tenerse en cuenta son:

- es afectado por el medio ambiente.
- afecta pequeñas cantidades de material, no sólo de la superficie sino que también del material ubicado debajo de ella, llamado *subsuperficie*.^[17]

La resistencia al desgaste está directamente involucrada en el tiempo de vida útil de los elementos de máquinas, con la implicancia que esto tiene en la preservación del medio ambiente y el impacto económico que acarrea. Además, es un punto importante cuando se pretenden partes livianas, por el ahorro energético, y mejor desempeño.

A los efectos de localizar el fenómeno y conocer las implicancias del mismo se define el sistema de análisis como: **sistema tribológico**, el cual, está conformado por dos materiales que interactúan, llamado par interactuante o de fricción; un tercer cuerpo que se ubica entre estos materiales y finalmente el medio ambiente que rodea a dichos cuerpos. En la figura 1.3 se indican las distintas partes del sistema y se mencionan algunos efectos del desgaste.

Como variables del sistema tribológico pueden mencionarse a la velocidad de deslizamiento, tipo de movimiento, la carga normal aplicada, la dureza de los materiales, temperatura, humedad ambiente, gases presentes, condiciones de lubricación, etc. Las cuales pueden fijarse para las condiciones de cada ensayo en particular, por lo cual son consideradas parámetros de los ensayos.

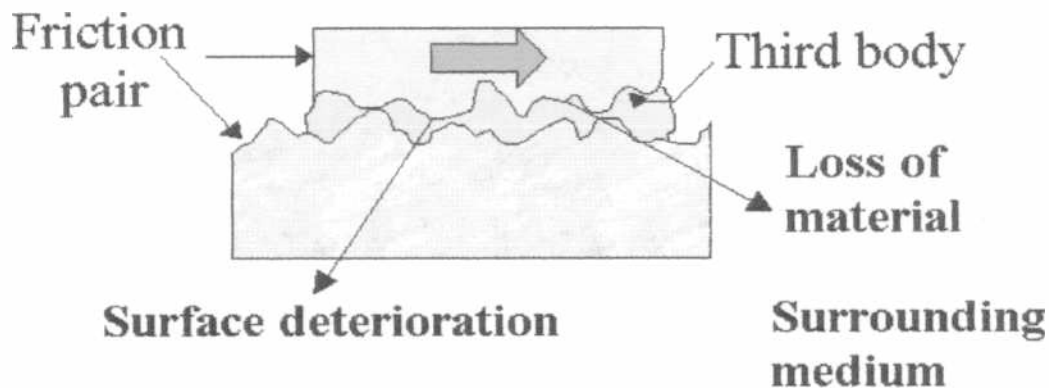


Figura 1.3: Sistema Tribológico, partes que lo componen y efectos del desgaste

1.2.1 Métodos Experimentales de Medición del Desgaste

Máquinas de ensayo

Para realizar ensayos de desgaste en laboratorio se han desarrollado máquinas especiales, en un principio con una configuración geométrica similar a la de funcionamiento real. Con el tiempo se mantuvieron solamente algunas de esas configuraciones, aquellas con las características más requeridas y se establecieron como estándares generales para los ensayos de desgaste.

Actualmente se emplean no más de una docena de configuraciones distintas, para estudiar desgaste. No obstante las más utilizadas son tres:

- Block on Ring
- Pin on Disk
- Pin on Ring

que se ilustran en la figura 1.4.

Gran parte de los ensayos de desgaste por deslizamiento no lubricado, se realizan con las dos primeras configuraciones, una fracción pequeña con equipos Pin on Ring y otra fracción similar se realiza con otros tipos de máquinas.

Los valores de desgaste, o tasa de desgaste, obtenidos por este tipo de máquinas no puede ser comparado directamente con otra sin una verificación rigurosa en similares condiciones. Esto hace que no se puedan comparar datos de la literatura tomados de diferentes autores, inclusive cuando se trate de configuraciones similares, pero donde cambian las dimensiones de las partes en contacto.

Sin embargo, estos ensayos tienen valor como medida relativa entre muestras porque nunca simulan un elemento de máquina real.

Métodos de cuantificación

Desde un principio se determinó la manera de medir el desgaste en función de la cantidad de material perdido. Por lo tanto, es posible utilizar cualquier método que permita cuantificar la cantidad de material presente en una muestra.

La manera más utilizada que se emplea para dar valores de desgaste es a través de la cantidad de material “perdido”, luego de someterlo a condiciones de funcionamiento o ensayo. Esa cantidad de material perdido es frecuente expresarla en unidades de volumen. Pero para medir ese cambio suele hacerse a través de pesadas o realizando medidas de longitud.

Medidas a través de pesadas: para esto se utilizan balanzas analíticas con apreciaciones de 10^{-4} g o aún menor. Es un método muy simple, pero es necesario desmontar las piezas y cuidar de no contaminarlas al manipularlas para realizar la pesada. Suelen tener inconvenientes cuando se presenta transferencia de material y cuando se tiene material adherido en forma de reborde, o rebaba. Véase la figura 1.10 b

Medidas de longitud: suelen realizarse a través de micrómetros, o por medios ópticos, puede tener inconvenientes cuando se tienen bordes muy irregulares. De todas maneras da una mejor medida de la pérdida de material útil, ya que distingue entre el

material extraído de la superficie y el material que fue desplazado sin desprenderse de la pieza (*rebaba*), Mientras que el método de pesadas lo incluye.

Otra técnica utiliza radiotrazadores, la cual es muy sensible cuando se tiene

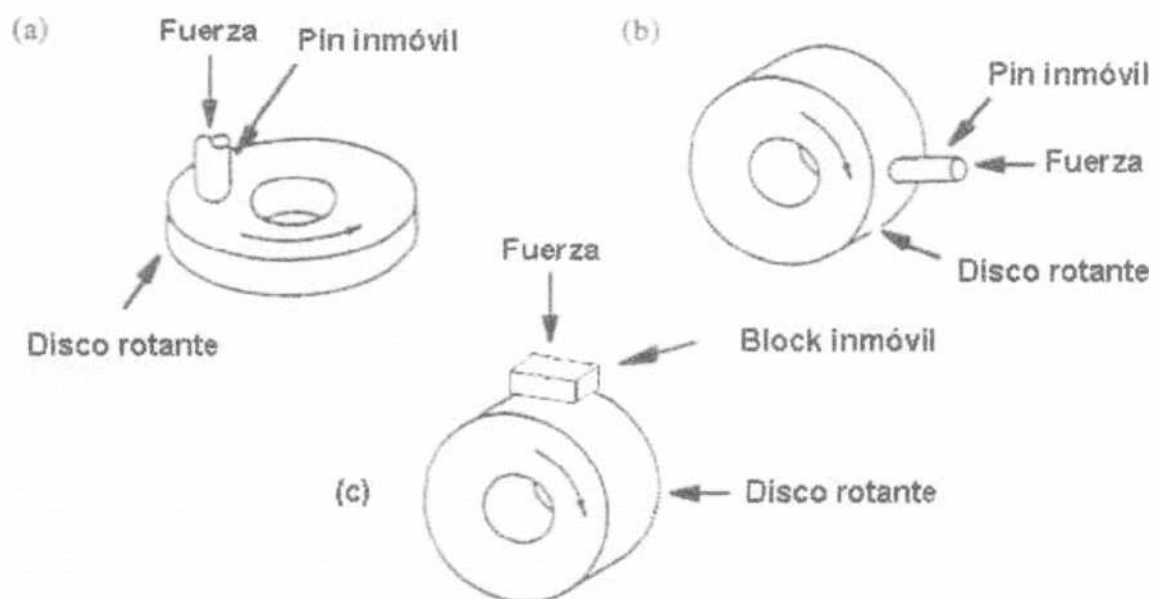


Figura 1.4: Máquinas de ensayo.
a) Pin on Disc; b) Pin on Ring; c) Block on Ring.

pequeña cantidad de material desgastado. Actualmente es muy poco utilizada debido a los riesgos de contaminación de los equipos y fluidos lubricantes

La conveniencia de las diferentes técnicas está ligada a la complejidad de los equipos de análisis necesarios, al tipo de información y las condiciones que interesen investigar.

Es necesario mencionar que las medidas de desgaste antes mencionadas suelen tener una dispersión elevada, dependiendo de las condiciones de funcionamiento o del ensayo, el tipo de equipo utilizado y, por supuesto, el control de los factores condicionantes durante el proceso de desgaste. Por lo tanto, valores de tolerancia más altos que los habituales son aceptados en este tipo de medidas. Al respecto las Normas ASTM considera aceptables valores con un Coeficiente de Variación del orden de 15%, en medidas de variación de longitud^[18], ver tabla 1.1.

Tabla 1.1. Coeficientes de variación de ensayos no lubricados, utilizando equipos Block on Ring. Realizados en cuatro laboratorios homologados y certificados por la ASTM, publicado en la norma ASTM G 77-99^[18]

Condiciones del ensayo	laboratorios	Cv %
$v = 0.13 \text{ m/s}$	A	2.3
$L = 134 \text{ N}$	B	13.0
deslizamiento no lubricado, distancia total 593 metros	C	15.0
	D	17.0
$v = 0.36 \text{ m/s}$	A	1.3
$L = 134 \text{ N}$	B	1.9
deslizamiento no lubricado, distancia total 593 metros	C	5.0
	D	4.0

Las magnitudes que se especifican para dar información del desgaste son: el desgaste total, la tasa de desgaste, el factor de desgaste y el *coeficiente k* de Rabinowicz.

El **desgaste total** se establece como la cantidad de material desgastado, expresada en unidades de masa, variación de longitud o de volumen.

La **tasa de desgaste** se establece como el cociente entre el desgaste total y la distancia deslizada, se expresa en unidades de masa / longitud, longitud (acortamiento)/ longitud, volumen / longitud.

El **factor de desgaste** expresa el volumen de material perdido, dividido la distancia total deslizada y dividido por la carga aplicada, generalmente se expresa en $\text{mm}^3/(\text{N m})$.

El **coeficiente de desgaste k**, es adimensional, también es ampliamente utilizado y proviene de la expresión general:

$$k = \frac{W \times H}{L \times N}$$

Donde: **k** es el coeficiente de desgaste

W es el volumen de material desgastado

H es la dureza del material

N es la carga aplicada sobre el par interactuante

L es la distancia total deslizada

La cual es una forma muy simplificada de las expresiones fenomenológicas propuestas para las diferentes situaciones reales.

Debe tenerse en cuenta que los valores de tasa de desgaste, factor de desgaste y coeficiente de desgaste dependen de las condiciones del ensayo, las cuales se mencionarán en los siguientes párrafos.

Además de cuantificar el desgaste, necesario para conocer la vida útil de una pieza, es posible realizar un análisis de las alteraciones producidas en el material, para lograr el diseño más apropiado de las piezas sometidas a desgaste, asegurando estabilidad dimensional y mayor vida útil. Por ejemplo: materiales desprendidos pequeños o grandes, o ausencia de los mismos cuando se adhiere en la rebaba, baja o alta rugosidad en el estado estacionario de desgaste, etc.

1.2.2 Métodos Experimentales de Caracterización del Desgaste

Las técnicas empleadas para caracterizar el desgaste se pueden reunir en dos grupos: ^[17]

- Análisis in situ, realizada durante el ensayo
- Análisis post ensayo, realizada después de realizado el ensayo.

Cada uno de los cuales aportan distinto tipo de informaciones, en el primero se enfatiza en el aspecto dinámico del proceso, y en el segundo es mayormente empleado para medidas de resistencia de desgaste y para caracterización de mecanismos. De la contribución de ambos se obtiene un análisis muy completo del proceso de desgaste y

de las alteraciones producidas. Muchas veces se combinan estas técnicas en el estudio de una misma muestra

Análisis in situ: Este tipo de análisis se realiza durante el ensayo de desgaste y permite seguir la evolución de alguna característica, tales como: cambios morfológicos de la superficie o de la subsuperficie, reacciones químicas o transformaciones de fase.

En los equipos convencionales de ensayo se realizan:

- Mediciones de temperatura.
- Medición de desplazamientos,
- Mediciones de fuerza, para determinar la fuerza de fricción.

En máquinas de ensayos sofisticadas se utilizan, además:

- Observación de cambios morfológicos, mediante Microscopía electrónica u óptica^[19, 20].
- Seguimiento de cambios químicos en las partes involucradas en el desgaste, mediante Ramman, Mossbauer, etc.

Análisis post ensayo: Este tipo de análisis, es muy utilizado ya que se realiza una vez concluido el ensayo y no necesitan un equipo montado especialmente en la máquina de ensayo de desgaste, que suelen ser equipos muy sofisticados en algunos casos. Se obtiene información relevante que puede ser utilizada para caracterizar el proceso de desgaste y cotejarlas con situaciones reales.

Para realizar estos estudios se utiliza Microscopía electrónica de barrido (SEM), Microscopía electrónica de transmisión (TEM), Microsonda electrónica, Microscopía óptica, Mossbauer, XPS, Ramman, entre otras herramientas de análisis.

Los tipos de análisis más relevantes, son:

- Medidas de pérdidas de peso y variación de la longitud, para cuantificar el desgaste.
- Estudio de la morfología de la superficie de desgaste.
- Análisis de composición química de la superficie desgastada del par interactuante.
- Análisis de los **fragmentos** producidos por desgaste, debris.
- Análisis morfológico y químico de la subsuperficie.

1.2.3 Variables Condicionantes del Desgaste por Fricción

Además de la naturaleza del par interactuante existen otros factores que influyen sobre el comportamiento frente al desgaste de un dado sistema.

Las variables tribológicas considerados como **parámetros del ensayo**, pues se fijan para cada ensayo, son:

- carga aplicada,
- velocidad de deslizamiento,
- distancia total deslizada,
- temperatura,

- rugosidad de las superficies
- condiciones de lubricación,
- humedad relativa ambiente
- naturaleza de los gases presentes

Ellos tienen influencia en la tasa de desgaste de los materiales, en algunos casos es muy compleja pero se han logrado avances que permiten conocer el comportamiento ante estas variables, aunque las causas no están muy claras en algunos casos.

Se ha logrado encontrar situaciones en donde las influencias de estas variables son sencillas y se plantearon diversos modelos de mecanismos de desgaste para explicarlos. En el siguiente párrafo se describirán los Modos, o mecanismos, de desgaste más relevantes y aceptados, donde se indicarán las variables más importantes y su influencia en el desgaste.

Además, existen variables geométricas en el sistema, que introducen diferencias en las cantidades desgastadas e incluso, en el tipo de comportamiento de un mismo material. Esto se ve reflejado en los distintos tipos de máquinas utilizadas para realizar el desgaste.

Todas estas variables deben ser controladas o registradas durante el proceso de desgaste para realizar un análisis más preciso del mismo

1.2.4 Modos de Desgaste

Debido a su complejidad, el fenómeno de desgaste se categoriza según las características más relevantes que se han observado bajo diferentes condiciones experimentales.

Los tipos de desgaste establecidos actualmente son: ^[12]

- desgaste por abrasión
- desgaste por adhesión
- desgaste oxidativo
- desgaste por fatiga de contacto
- otros mecanismos de desgaste (fretting, erosión).

Aún los criterios más aceptados no están muy bien definidos, por lo tanto, esta clasificación no debe tomarse de una manera rígida. ^[21]

A continuación se describirán los mecanismos más aceptados y otros que se han propuesto y son relevantes a este trabajo, consignando cuáles son las posibles superposiciones.

Otra forma de clasificarlos es a través de las consecuencias prácticas que predice el fenómeno, por ejemplo según la magnitud de la tasa de desgaste se acostumbra diferenciar entre desgaste moderado, severo y de atascamiento; o según el aspecto de la superficie de desgaste. Siendo ambos criterios muy subjetivos, aun así muy utilizados en la calificación de los efectos del desgaste. En ciertos casos puede encontrarse un criterio para definir las transiciones de moderado a severo considerando cambios abruptos en la resistencia al desgaste.

Más adelante se verán las ventajas de ordenar y clasificar los datos de tasa de desgaste en función de los parámetros principales, en la forma de mapas de mecanismos de desgaste, permitiendo un análisis más simple de la información.

Desgaste por abrasión

Este tipo de desgaste predomina cuando se deslizan una superficie dura y rugosa sobre otra superficie más blanda, o bien cuando una superficie blanda que contiene partículas duras se desliza sobre otra superficie blanda. Ambos casos son llamados abrasión de dos cuerpos, ver figura 1.5.a, y 1.5 b, para distinguirlo del caso donde existe un material duro que se mueve libremente entre superficies que al menos una de ellas es más blanda que las partículas sueltas, llamada abrasión por tercer cuerpo, ver figura 1.5.c.

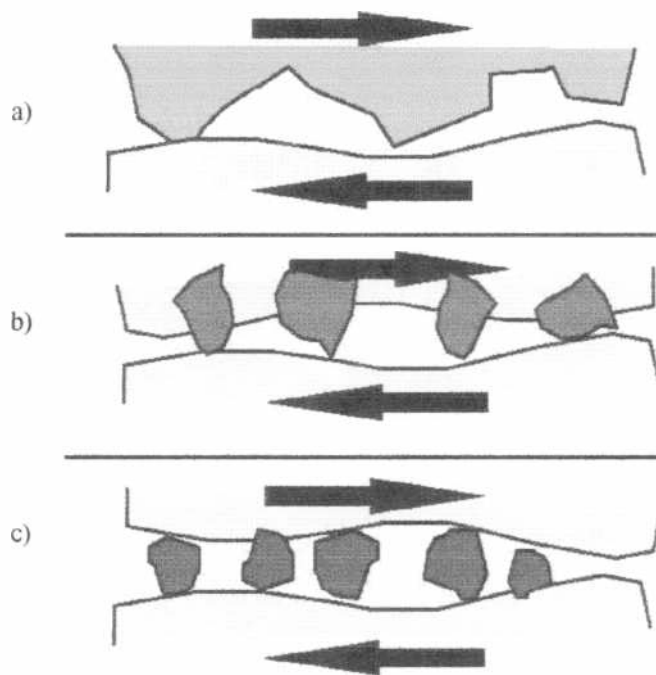


Figura 1.5: diferentes tipos de abrasión. a) y b) abrasión de dos cuerpos; c) abrasión por tercer cuerpo

La principal característica de este tipo de desgaste es una diferencia de dureza entre los cuerpos y un ángulo de ataque adecuado para producir el fenómeno de corte a escala microscópica ^[22, 23].

La superficie de desgaste presenta surcos paralelos siguiendo la dirección del movimiento de las partes duras.

Fenomenológicamente se ha establecido que: la tasa de desgaste es proporcional a la carga aplicada, directamente proporcional a la distancia deslizada e inversamente proporcional a la dureza del material.

$$V = \frac{k_{ahr} \cdot L \cdot x}{H} \quad H < 0,8 H_{aspereza}$$

Donde: V es el volumen desgastado (L^3)

L es Carga aplicada (F)

H es la dureza del material abrasionado (F/L^2)

x es la distancia deslizada (L)

k_{abr} es el coeficiente de desgaste abrasivo, relacionado con la rugosidad de la superficie

Además, se ha propuesto un modelo muy simple para explicar las observaciones empíricas. En el cual se considera que una aspereza dura con forma de un cono invertido, cuya directriz forma un ángulo ϕ con la base, abrasiona a un material blando,

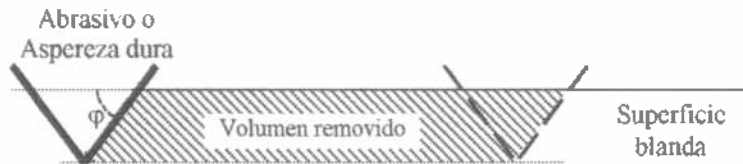


Figura 1.6: modelo empleado para deducir la expresión utilizada en desgaste por abrasión

y el producto de la sección de la aspereza por la distancia deslizada es igual al volumen del material removido, ver la figura 1.6.

Es necesario decir que k_{abr} no es una constante del material, sino que depende de características geométricas de las asperezas, y de otras propiedades de los materiales interactuantes, excepto la dureza del material blando. Se encuentra en la literatura expresiones que definen al k_{abr} igual a $(\tan \phi) / 3$ o bien, igual a $(\tan \phi) / \pi$.^[12]

El efecto de la dureza fue demostrado muy claramente en muchos trabajos, ya sea en casos de abrasión de dos cuerpos o de tres cuerpos, ver figura 1.7

El efecto de la distancia deslizada es más complejo pues las partes más duras, las que producen la abrasión, pueden llegar a desgastarse y por lo tanto a disminuir la cantidad de volumen desgastado a medida que transcurre el ensayo y alcanzar un valor prácticamente nulo, ver figura 1.8.

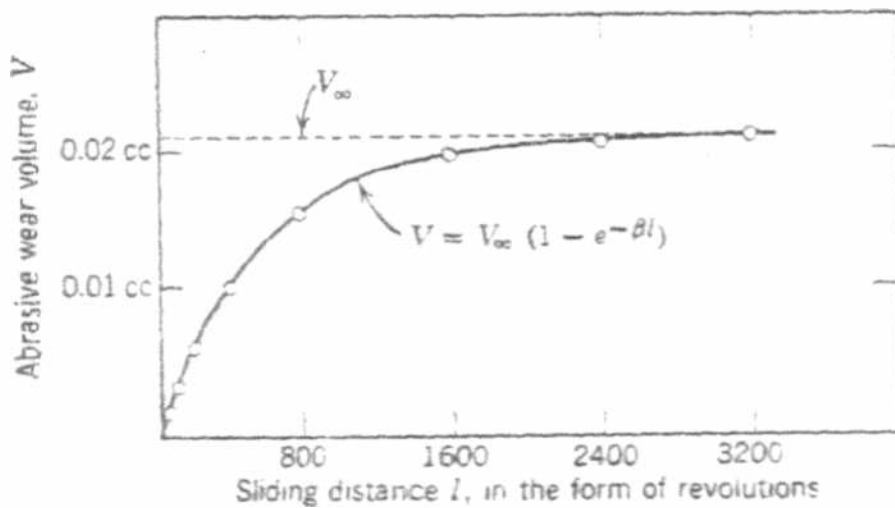
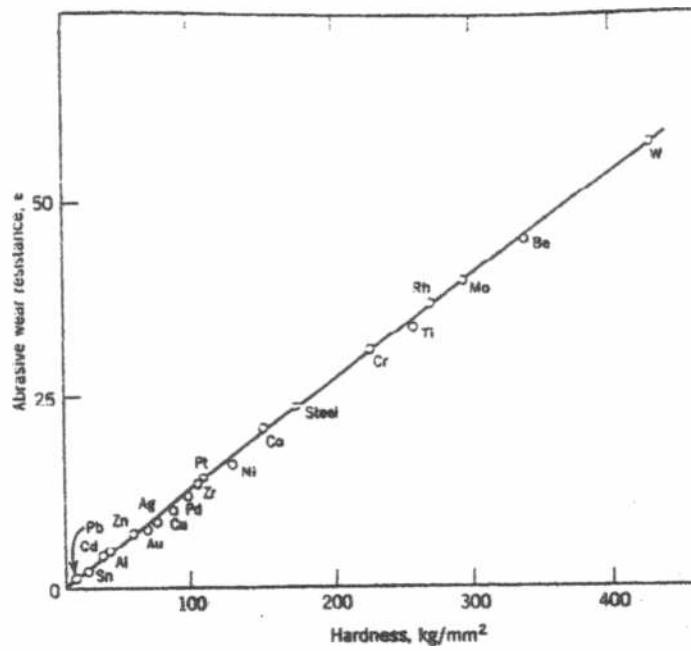
El efecto de la carga fue poco estudiada pero las evidencias experimentales indican concordancia con lo expresado más arriba^[12].

El modelo anterior es muy simple y adecuado para muchos casos reales, aunque en ciertas condiciones sean necesarios modelos más complejos, tal como el modelo de micromecanismos de abrasión propuesto por Kato et al.^[19, 24] En este modelo, Kato distingue tres mecanismos diferentes para modificar la superficie plana de un material cuando es sometido a un proceso de abrasión por una punta dura:

- *Cutting* o corte, que produce remoción de material en forma de viruta que se separa de la punta que abrasiona.
- *Wedge* o cuña, que remueve el material de la superficie acumulándolo en el frente de la punta que abrasiona.
- *Ploughing* o surcado, que desplaza material hacia los costados y debajo del surco, sin provocar desprendimiento de material.

Los tres mecanismos producen surcos de abrasión. El *cutting* es el mecanismo que produce mayor remoción de material, el *wedge* remueve menos y el *ploughing*

prácticamente no elimina material de la superficie. Como estos mecanismos fueron propuestos de la observación de abrasión provocada en la primer pasada, no pueden extrapolarse fácilmente a casos de multiples pasadas.



Desgaste por adhesión

En este tipo de desgaste el mecanismo principal es la adhesión de los materiales puestos en contacto. La adhesión está presente en muchas situaciones, dependiendo de la solubilidad mutua de los materiales puestos en contacto, pero es más importante en casos donde las superficies que deslizan no son muy rugosas y la diferencia de dureza es pequeña.

Muchas veces se considera al desgaste por deslizamiento (*sliding wear*) como desgaste por adhesión, debido a la contraposición entre deslizamiento y abrasión, esto es incorrecto ya que en el desgaste por deslizamiento, pueden coexistir. También intervienen otros fenómenos tales como deformación plástica de la subsuperficie.^[25]

El fenómeno de adhesión provoca una transferencia de material de una

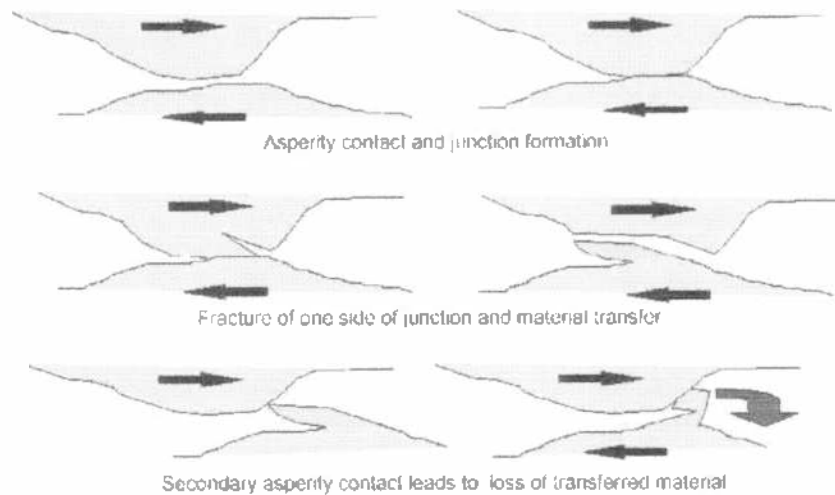


Figura 1.9: Esquemización del mecanismo de desgaste adhesivo

superficie a otra. En general cuando se tienen dos materiales de dureza diferente la transferencia suele ser del material más débil al más resistente, aunque también puede haber transferencia en sentido inverso.^[12] En la figura 1.9 se esquematiza las etapas propuestas para el desgaste adhesivo, en primer lugar es necesario que las asperezas de ambas superficies se pongan en contacto y se suelden, luego alguna de las asperezas se fractura, por un lugar diferente a la unión formada, dejando una porción de material sobre la otra aspereza. Este mecanismo se repite entre diferentes asperezas, dado lugar a transferencia de material en ambos sentidos.

Existe un gran número de teorías para explicar el micromecanismo de desgaste por adhesión. Una teoría bastante aceptada y de aplicación práctica es que los materiales de baja solubilidad mutua no se adhieren, minimizando así el desgaste, por ejemplo el par Pb-Fe.^[12]

Experimentalmente se encontró que el volumen de material desgastado está directamente relacionado a la distancia deslizada y la carga aplicada, y es inverso a la dureza del material. En 1946 Holm, propuso una ecuación que describe el comportamiento del material en estas condiciones:

$$V = \frac{cLx}{H}$$

Donde: V es el volumen desgastado (L^3)
 L es Carga aplicada (F)
 H es la dureza del material (F/L^2)
 x es la distancia deslizada (L)
 c es un coeficiente de proporcionalidad

En 1953 Archard propuso un modelo adecuado para el desgaste por adhesión, que da un sentido al coeficiente “ c ”. Archard asume que cada dos asperezas en contacto hay una probabilidad k de que se forme una unión por adhesión.

Puede verse la similitud entre las ecuaciones propuestas para desgaste por abrasión y desgaste por adhesión. De ahí que no se pueda asumir un mecanismo a partir del cumplimiento de las mismas. De todos modos, esta ley lineal puede ser utilizada como una aproximación en las etapas de diseño.^[21]

Desgaste oxidativo

Cuando se habla de desgaste oxidativo se considera que es un caso de desgaste promovido por la oxidación de los materiales que se encuentran en las superficies que deslizan. Bajo esta denominación se han propuesto dos mecanismos basados en hechos diferentes.

Por un lado, Quinn, en 1971, reunió evidencia convincente relacionada a deslizamiento de aceros, que en ciertas condiciones a altas velocidades de deslizamiento los puntos en contacto, alcanzaban altas temperaturas, *flash temperature*, que promovían la oxidación del material en la superficie, el cual era desprendido subsecuentemente en forma de laminillas delgadas, a este tipo de comportamiento lo denominó desgaste por oxidación moderada, *mild oxidation wear*.

El segundo mecanismo se aplicó cuando se consideraba mayores velocidades de deslizamiento. Las evidencias encontradas sugieren que la película de óxido es más gruesa, provocando que la temperatura de flash fuese aún mayor que el caso anterior, y produciendo deformación plástica e incluso fusión local del óxido. Esta condición fue llamada desgaste por oxidación severa, *severe oxidation wear*, y puede presentar tasas de desgaste menores que el desgaste por oxidación moderada.

Además del caso específico del acero, el desgaste de otros materiales en presencia de oxígeno provoca que se formen óxidos, los cuales pueden tener efectos beneficiosos o nocivos, dependiendo de la dureza relativa con el material sin oxidar. Se ha encontrado que aquellos óxidos que sean por lo menos tres veces más duros que su metal en estado puro, presentarán abrasión sobre el mismo, aumentando así el daño por abrasión. Existen casos en que los óxidos que se forman son blandos y brindan un efecto lubricante al sistema. En casos donde haya varios óxidos posibles de formarse, siempre tendrá mayor preponderancia el que se encuentre termodinámicamente favorecido, tal es el caso del hierro donde la hematita, Fe_2O_3 es dura y provoca aumento en el desgaste del material por abrasión de tercer cuerpo, y por otro lado la magnetita, Fe_3O_4 , es más blanda y tiene características lubricantes.^[26]

Otros modos de desgaste

Los mecanismos descritos anteriormente son los más estudiados y verificados, sin embargo otros mecanismos han sido propuestos, alguno de los cuales no suelen encontrarse aislados y son más difíciles de estudiar.

El **desgaste por fatiga de contacto** se da en los casos donde una de las superficies que sufren desgaste está sometida a un proceso cíclico de cargas y descargas. La propagación por fatiga de fisuras subsuperficiales hace que se desprendan fragmentos de material. Estas fisuras pueden originarse en la superficie, en discontinuidades o en el interior del material en la región subsuperficial. La nucleación de fisuras a cierta distancia debajo la superficie se debe a que allí se manifiestan las mayores tensiones sometiendo a compresión al material ubicado delante de las asperezas en contacto y tracción al material ubicado detrás.^[12, 15] También se ve afectada la capacidad del material para resistir la propagación de fisuras, según trabajos de Rosenfield la resistencia alcanza un valor mínimo a una determinada profundidad debajo de la superficie.^[27]

El **desgaste promovido por corrosión** se presenta cuando las partes involucradas en el desgaste se encuentran en un medio corrosivo. En este caso el medio suele aumentar la tasa de desgaste, debido al cambio o transformaciones del material ubicado en la superficie. En ausencia de deslizamiento los productos de corrosión permanecerían sobre la superficie.

El **fretting** es una forma de desgaste que ocurre cuando dos superficies en contacto sufren una oscilación tangencial de pequeña amplitud, es muy difícil de anticipar y los métodos de lubricación en general no resultan efectivos.

El **desgaste por fusión** puede darse bajo condiciones muy severas de: temperatura, velocidades, cargas o en condiciones menos agresivas si se combinan esos factores. Básicamente consiste en la fusión del material situado en la zona de contacto^[14]. La presencia de metal líquido produce un efecto de lubricación que reduce notablemente el coeficiente de fricción, de todos modos la tasa de desgaste es extremadamente alta. La situación de **atascamiento** se da en la práctica cuando se produce una soldadura entre las partes en contacto, que puede ser en estado sólido o involucrando la fusión local de asperezas, de tal manera que produce la detención repentina del sistema en movimiento.

La **erosión** es el proceso de eliminación de material provocado por el impacto de partículas que son transportadas por un fluido. La tasa de desgaste es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de las partículas.

Deformación Subsuperficial

La deformación subsuperficial, si bien no es considerada como un mecanismo de desgaste, es necesario tenerla en cuenta, pues es un fenómeno muy frecuente en situaciones de deslizamiento, en casos de corte mecánico^[17, 27-35]. Este fenómeno puede afectar directamente a las medidas de desgaste cuando se miden variaciones de longitud, véase figura 1.10.a.

En particular, Rigney y Hirth^[31] han estudiado la influencia de la deformación subsuperficial como factor de disipación que contribuye al fenómeno de fricción en los materiales. En estudios de mecánica de fractura aplicados a desgaste realizados por Rosenfield^[27] propone un modelo que contempla la propagación de fisuras en la

subsuperficie, tal como lo sugirió Suh en su teoría de desgaste por delaminación^[36]. Según este modelo el material tiene menor resistencia a la propagación de fisuras a cierta profundidad debajo de la superficie. Kuo y Rigney^[35] han encontrado evidencia experimental, que apoyaría el modelo, cuando observan bandas de deslizamiento localizadas en la subsuperficie, al estudiar desgaste por deslizamiento en aluminio de pureza comercial mediante microscopía electrónica de transmisión.

Un efecto observado es que la deformación plástica de la subsuperficie produce la acumulación de material en la zona del borde de salida de la pieza desgastada, llamada **rebaba** o reborde. Esta rebaba suele quedar muy bien adherida a la pieza y es material que se encuentra fuera de la zona de contacto, y que no tiene ninguna función útil directa, véase figura 1.10.b.

En algunos casos la cantidad de material adherido que forma rebaba puede ser considerable, tanto que introduce errores en las medidas de desgaste obtenidas a través de pesadas.^[37]

1.2.5 Mapas de desgaste

En 1987, Lim y Ashby^[14], haciendo un paralelismo con los mapas de deformaciones que se utilizaban desde una década atrás, propusieron un mapa de desgaste para aceros en condiciones de deslizamiento no lubricado. Fue confeccionado utilizando datos experimentales y por medio de modelos teóricos, con el objetivo de ordenar y clarificar los datos obtenidos, y mostrar las relaciones y competencias entre los mecanismos. Para ello abordó el problema mediante el análisis dimensional. Obteniéndose resultados útiles que permitieron agrupar y distinguir distintos mecanismos de desgaste según los parámetros principales, y la variación de las velocidades de desgaste en cada región.

En la figura 1.11 se muestra el mapa propuesto por Ashby, el cual tiene por coordenadas:

- Presión Normalizada =
$$\frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Área nominal de contacto} * \text{Dureza del material desgastado}}$$
- Velocidad Normalizada =
$$\frac{\text{Velocidad de deslizamiento} * \text{radio del área nominal}}{\text{Difusividad térmica}}$$

donde se ubican los diferentes mecanismos de desgaste en regiones bien diferenciadas. También se indican los valores de igual tasa de desgaste, wear rate. Las regiones de transición de moderado a severo están sombreadas, y los valores de la tasa de desgaste en el régimen moderado se da entre paréntesis. Como se puede ver si nos movemos sobre una línea de igual presión normalizada, manteniendo la carga constante, digamos de 10^{-2} , comenzando a baja velocidad adimensional, digamos a 10^{-1} , estará en un régimen de desgaste por delaminación severo con valores de la tasa de desgaste de $5*10^{-3}$ prácticamente constante hasta alcanzar una velocidad adimensional de aprox. 70, a partir de allí se produce un cambio en el mecanismo a desgaste por oxidación moderada y la tasa de desgaste aumenta rápidamente de 10^{-6} a 10^{-4} , en esa región un acero austenítico puede sufrir una transformación martensítica y disminuir la tasa de desgaste de 10^{-4} a 10^{-6} , si continuamos aumentando la velocidad adimensional a unos $5*10^2$ nuevamente habrá una transición a un régimen de desgaste por oxidación severa y la tasa de desgaste cambiará de 10^{-6} , antes de la transición, a 10^{-7} en el nuevo régimen.

A partir de la propuesta de Ashby se han confeccionado mapas de desgaste para los pares de desgaste más usuales.

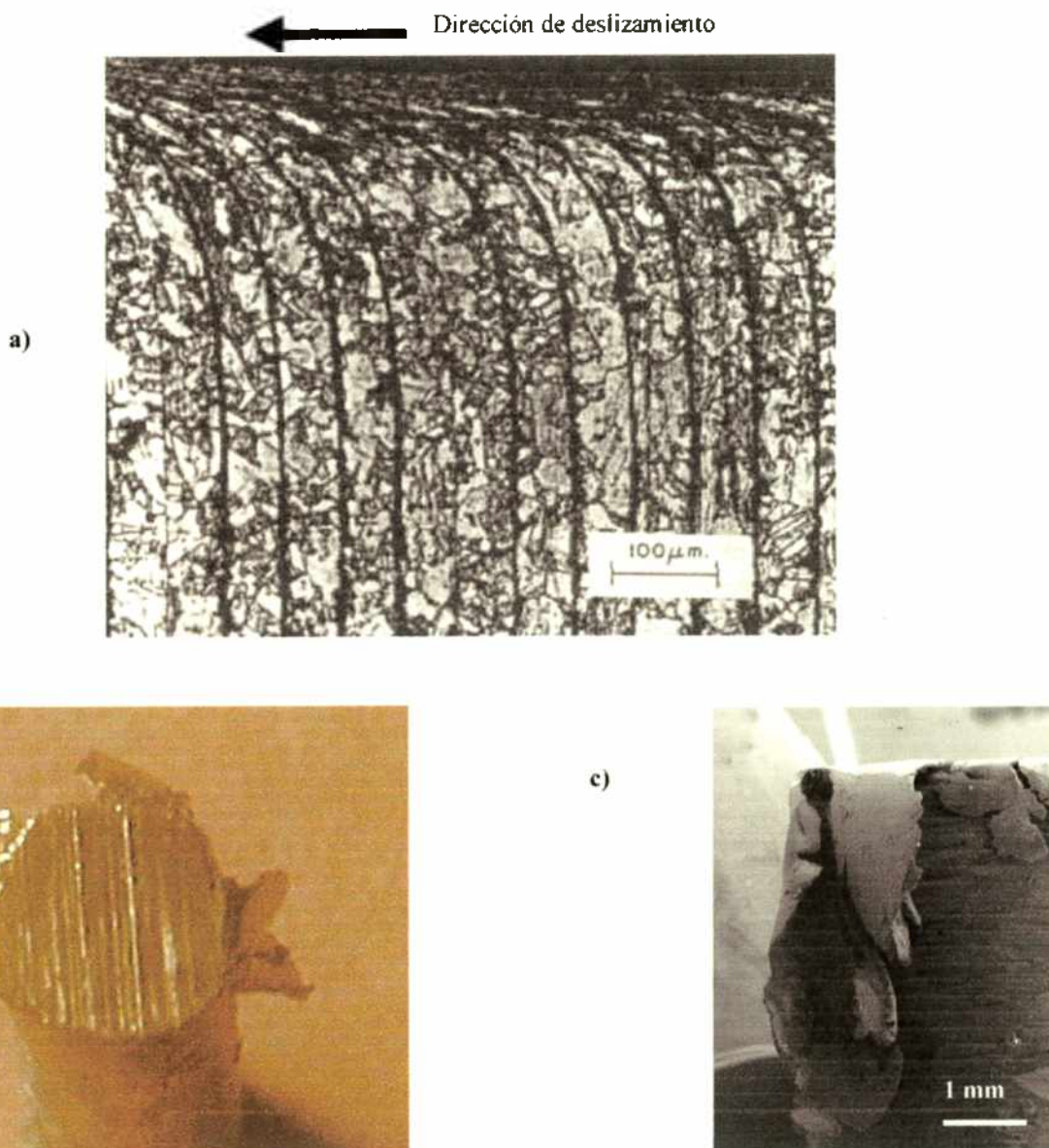


Figura 1.10: a) Estructura deformada típica de un proceso de desgaste, en un material compuesto por chapas de cobre soldadas con plata, ubicadas perpendicularmente a la superficie desgastada. ^[30]

b) Superficie desgastada, AA6061 / B₄C / 5p, que sufrió gran deformación plástica, rebaba.

c) Detalle de la rebaba lateral en la probeta desgastada de la figura (b), vista desde el borde de salida.

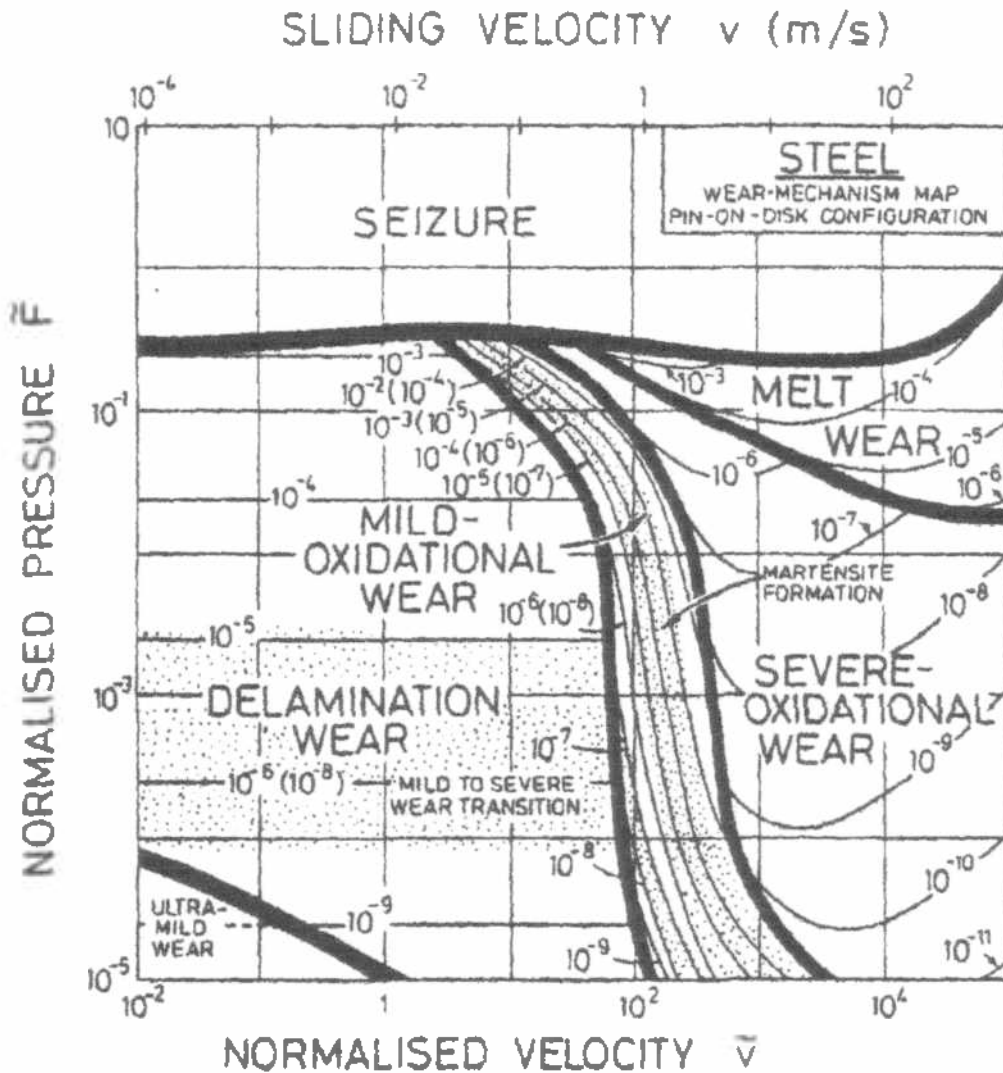


Figura 1.11: Mapa de desgaste para aceros.^[14]

Se dibujaron también líneas de iguales valores de tasa de desgaste. La región sombreada indica la transición de moderado a severo, los valores entre paréntesis dan la tasa de desgaste cuando el régimen es moderado

Referencias de este Capítulo

- [1] Hertzberg, R.W. – Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 3º Ed., John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [2] <http://alnmnc.ncms.org/UserResCtr.htm>
- [3] Aluminium Metal Matrix Composite Technology Roadmap, May 2002 – TR Co., ALMMC and US Department of Energy, Michigan, USA.
- [4] Arsenault, R.J.; Wu, S.B. - A comparison of PM vs. Melted SiC/Al composites – Scr. Metallurgica, vol 22 (1988) 767-772.
- [5] Wu, Y.; Lavernia, E.J. - Strengthening behavior of particulate reinforced MMCs – Scr. Metall. Mater., vol 27 (1992) 173-178.

- [6] Qin, S.; Gupta, M. – The minimum volume fraction of SiC reinforcement required for strength improvement of an Al-Cu based composite – *J. Mat. Sci.*, 30 (1995) 5223-5227.
- [7] Hosking, F.M., Folgarportillo, F., Wunderlin, R. and Mehrabian, R. - Composites of aluminum alloys: fabrication and wear behavior. - *J. Mater. Sci.*, 17 (1982) 477-498.
- [8] Lee, C.S.; Kim, Y.H.; Han, K.S.; Lim, T. - Wear behavior of aluminium matrix composite materials – *J. Mat. Sci.*, 27 (1992) 793-800.
- [9] Smith, A.V.; Chung, D.D.L. - Titanium diboride particle-reinforce aluminium with high wear resistance – *J. Mat. Sci.*, 31 (1996) 5961-5973.
- [10] How, H.C.; Baker, T.N. - Dry Sliding Wear Behavior of Saffil-reinforced AA 6061 Composites - *Wear*, 210 (1997) 263-272.
- [11] Alpas, A.T.; Zhang, J. - Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites – *Metall. Mater. Trans. A*, 25 (1994) 969-983.
- [12] Rabinowicz, E. - *Friction and Wear of Materials*, - John Wiley & Sons, New York, (1995), 2^o Ed.
- [13] Kragelskii, I. V. - *Friction and Wear* - Butterworths, London (1965)
- [14] Lim, S. C.; Ashby, M. F. - Wear - mechanism maps, (Overview N° 55) - *Acta metallurgical*. Vol 35, N° 1 (1987) 1-24.
- [15] Bhushan, B. - Contact mechanics of rough surfaces in tribology multiple asperity contact – *Trib. letters*, 4 (1998) 1-35
- [16] Standard Terminology Relating to Wear and Erosion - ASTM G 40 _ 95 (1999) Annual Book of ASTM Standards, vol 03.02
- [17] Rigney, D.A. - Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials - *Wear*, 245 (2000) 1-9.
- [18] Standard Test Methods for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block - on - Ring Wear Test. - ASTM G 77 _ 99. (1999) Annual Book of ASTM Standards, vol 03.02.
- [19] Kato, K. - Micro-mechanisms of wear - wear modes - *Wear*, 153 (1992) 277-295.
- [20] Mishina, H. - Surface deformation and formation of original element of wear particles in sliding friction - *Wear*, 215 (1998) 10-17.
- [21] Rigney, D. - The roles of hardness in the sliding behavior of materials - *Wear*, 175 (1994) 63-69
- [22] Kayaba, T; Kato, K; Hokkirigawa, K - Theoretical analysis of the plastic yielding of a hard asperity sliding on a soft flat surface - *Wear*, 87(1983) 151-161.
- [23] Kayaba, T; Kato, K; Hokkirigawa, K - Experimental analysis of the yield criterion for a hard asperity sliding on a soft flat surface - *Wear*, 96 (1984) 255-265.
- [24] Kayaba, T; Kato, K; Hokkirigawa, K - Analysis of the abrasive wear mechanism by successive observations of wear processes in a scanning electron microscope - *Wear*, 110 (1986) 419-430.
- [25] Rigney, D.A.; Chen, L.H.; Naylor, G.S.; Rosenfield, A.R. - Wear processes in sliding systems - *Wear*, 100 (1984) 195-219.
- [26] Leduma, K.C. - A review of scuffing and running-in of lubricated surfaces, with asperities and oxides in perspective - *Wear*, 100 (1984) 315-331.
- [27] Rosenfield, A.R. - A shear instability model of sliding wear - *Wear*, 116 (1987) 319-328
- [28] Bowden, P. F.; Tabor, D. - The influence of surface films on the friction and deformation of surfaces. - 197-212.
- [29] Dautzenberg, J.H.; Zaat, J.H. - Quantitative determination of deformation by sliding wear - *Wear*, 23 (1973) 9-19.
- [30] Moore, M.A.; Douthwaite, R.M. - Plastic Deformation Below worn surfaces – *Met. Trans. A*, 7 (1976) 1833-1839.

- [31] Rigney, D.A.; Hirth, P. - Plastic deformation and sliding friction of metals - *Wear*, 53 (1979) 345-370.
- [32] Alpas, A.T.; Hu, H.; Zhang, J. - Plastic deformation and damage accumulation below the surfaces - *Wear*, 162-164 (1993) 188-195.
- [33] Rice, S.L.; Nowotay, H.; Wayne, S.F. - Characteristic of metallic subsurface zones in sliding and impact wear. - *Wear*, 74 (1981) 131-142.
- [34] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites II. The characterization of subsurface deformation and correlation with behavior - *Acta Materialia*, 44, n:2(1996) 461-473.
- [35] Kuo, S.M.; Rigney, D. - Sliding behavior of aluminium - *Mat. Sci. Eng. A* 157 (1992) 131-143.
- [36] Suh, N.P. - The delamination theory of wear - *Wear*, 25 (1973) 111-124.
- [37] Sundberg, M.; Sundberg, R.; Hogmark, S.; Otterberg, R.; Lehtinen, B.; Hornstrom, S.E.; Karlsson, S.E. - Metallographic aspects on wear of special brass - *Wear*, 115 (1987) 151-165.

CAPÍTULO 2

DESGASTE DE MATERIALES COMPUESTOS - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el caso de materiales monolíticos, es decir, no-compuestos, los tipos de desgaste, descritos en 1.3.4, pueden darse aisladamente en las condiciones adecuadas, aunque generalmente se da una combinación de ellos.

Cuando se consideran materiales compuestos, especialmente con refuerzos duros, es importante el efecto de abrasión de la contraparte producido por el refuerzo, de abrasión por tercer cuerpo cuando aparecen partículas sueltas del refuerzo en la zona de contacto, ver figura 1.5.c, también puede suceder que partículas del refuerzo, fracturadas o muy pequeñas, se adhieran al material de la contraparte y abrasionen al MMC (*Metal Matrix Composite*), ver figura 1.5.b. Además, puede presentarse el fenómeno de adhesión cuando hay solubilidad mutua entre el material en estudio y la contraparte y si las partículas de refuerzo son muy pequeñas y permiten grandes áreas de contacto. Por todo esto el proceso de desgaste es más complejo que en un material monolítico, es necesario tener en cuenta la superposición de estos fenómenos y considerar la presencia de nuevos eventos, tales como: la transferencia de materiales en ambos sentidos, entre la probeta y la contraparte, y el mezclado en forma mecánica.^[1,2]

Estos nuevos eventos producen lo que se ha llamado Capa Mecánicamente Mezclada, o *MML*, por sus siglas en inglés: *Mechanical Mixed Layer*. Esta capa de material se aloja en la zona de contacto, adherida a una o ambas piezas en contacto, por lo que cambia las características del sistema deslizante. Godet por otro lado ha estudiado la presencia y los efectos de un **tercer cuerpo** en la zona de deslizamiento, y dependiendo de las propiedades mecánicas de este tercer cuerpo puede producir una reducción en la tasa de desgaste.^[2] Esta capa de material mecánicamente mezclado es formada en los primeros estadios del proceso de desgaste y luego es destruida y renovada constantemente alcanzándose una condición de equilibrio dinámico. Los beneficios que puede acarrear son, una mejor distribución y transmisión de la carga protegiendo al material ubicado debajo de ella.

A raíz de la combinación de estos fenómenos la influencia de las variables del sistema es más compleja que la observada en un material monolítico, además se suman las variables introducidas por el propio material compuesto, las cuales se considerarán en el parágrafo 2.2

2.1 Efecto de las variables del sistema

De las variables del sistema mencionadas en 1.3.3 se describirán los efectos de:

1. carga aplicada,
2. velocidad de deslizamiento,
3. distancia total deslizada,
4. temperatura,
5. variables ambientales

en la resistencia al desgaste de materiales compuestos:

1).-La influencia de la carga en el desgaste es siempre directamente proporcional, por lo tanto al aumentar la carga es de esperar un aumento en el desgaste y la tasa de desgaste.^[3 - 9] Existe alguna controversia sobre la relación precisa con la carga en la tasa de desgaste. Para materiales monolíticos se ha observado que existen rangos de cargas en donde predomina un mismo mecanismo de desgaste. En cambio, para materiales compuestos, estudios realizados por Alpas et al. evidenciaron por lo menos tres regímenes diferentes en donde se mantiene la proporcionalidad entre carga y tasa de desgaste, pero la relación no es linealmente proporcional, sino que sigue una ley potencial, según el modelo propuesto por Alpas^[4, 6]:

$$W = k.N^x$$

donde: **W** es la tasa de desgaste
N es la carga aplicada
k y **x** son los parámetros de ajuste del modelo

Este comportamiento se muestra en la figura 2.1, donde se dan los valores de la tasa de desgaste para tres materiales, AA6061-sin reforzar, AA6061 reforzado con 10%

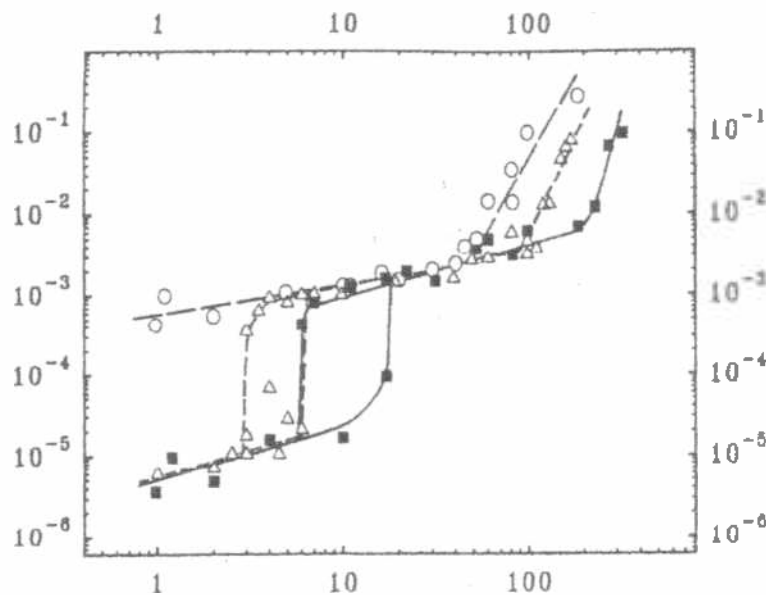


Figura 2.1: Mapa de Tasa de desgaste [mm^3/m], en ordenadas. vs. Carga [N], en abscisas.
(O) AA6061, sin reforzar; (Δ) AA6061 / Al_2O_3 / 10p. ($\blacksquare$) AA6061 / Al_2O_3 / 20p desgastados contra un acero SAE 52100 en una block on Ring, de Alpas y Zhang,^[6]

de alúmina y AA6061 reforzado con 20 % de alúmina. En los materiales compuestos se observan 3 regiones diferenciadas por la relación entre la tasa de desgaste y la carga. En el material monolítico se observan sólo dos regiones diferentes. En la primera región del material compuesto con 20 % de Alúmina, llamada "Régimen I", ubicada a bajas cargas, se observa una gran diferencia entre la tasa de desgaste del material monolítico y la del compuesto, con dos órdenes de magnitud a favor del material compuesto. Luego, entre 6 y 20 N, hay una transición con un salto en la tasa de desgaste de dos órdenes de magnitud hasta el régimen II. En dicho régimen, que es el primero para el monolítico, prácticamente no hay diferencia entre las tasas de desgaste del material monolítico y del compuesto. Luego hay una segunda transición, al régimen III, donde vuelve a haber

diferencias entre las tasas a favor del material compuesto. La carga a la que se produce la transición del régimen II al III, es más baja en el material monolítico (60 N) que en los materiales compuestos (100 y 200 N). Alpas encontró que la carga de transición del régimen II al III, llamada carga crítica del material, era directamente proporcional a la fracción en volumen de refuerzo.^[6]

2).-Se entiende por velocidad de deslizamiento a la velocidad de movimiento relativo entre dos superficies puestas en contacto que deslizan una sobre otra. Su influencia en el desgaste se evidencia por un comportamiento que presenta un valor mínimo, de la tasa de desgaste, a velocidades intermedias.^[10, 11, 12] A pesar de eso, algunos autores solamente encontraron un aumento en la tasa de desgaste, es posible que estén comprendiendo un rango de velocidades de menor extensión.^[5] El comportamiento con un valor mínimo intermedio también se evidencia en bronce y en algunos aceros,^[10] véase la figura 2.2.

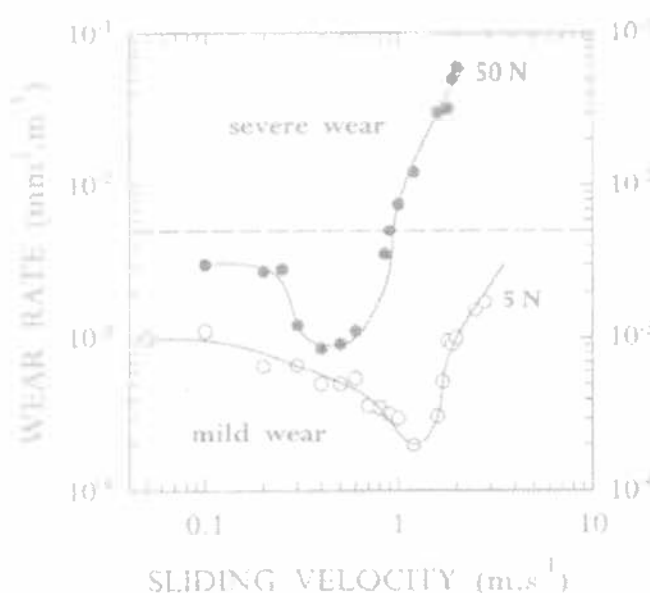


Figura 2.2: Tasa de desgaste vs. velocidad de deslizamiento realizado para dos cargas diferentes. En aleaciones de aluminio.^[10] El límite entre desgaste Moderado (mild wear) y Severo es arbitrario y esta representado por la línea de trazos.

3).-Al analizar la influencia de la distancia deslizada debe separarse el ensayo de desgaste en dos etapas. La primera llamada de "running in" o transitorio, en donde el sistema aún no alcanza un estado de equilibrio y se producen fenómenos de transferencia de material que pueden incluso superar en cantidad al material perdido.^[5, 13] Una segunda etapa, donde se alcanza un equilibrio entre los procesos que participan del desgaste. Luego de esta etapa, que puede durar desde algunos pocos hasta cientos de metros, se alcanza la etapa estacionaria, donde puede esperarse una relación lineal entre el desgaste total acumulado y la distancia recorrida.^[11, 12, 13]

4).-Varios trabajos estudian la influencia de la temperatura en la tasa de desgaste. Uno de los más completos es el de Wilson y Alpas^[14] realizado en materiales compuestos de matriz de aluminio, donde se encuentran dos intervalos en los que la tasa de desgaste se comporta de manera diferente, en uno de ellos, a bajas temperaturas, según se muestra en la figura 2.3, la tasa de desgaste es prácticamente constante y

llegada cierta temperatura, llamada crítica, variable para los distintos materiales estudiados, la tasa de desgaste aumenta constantemente.

5).-La influencia del medio ambiente es muy variable, debido a que producen

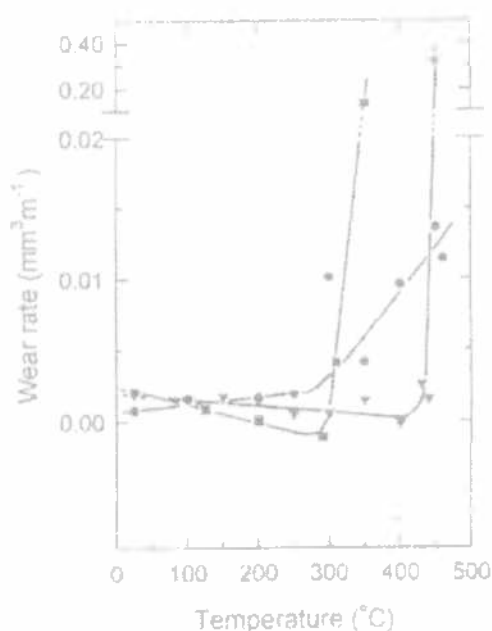


Figura 2.3: Variación de la tasa de desgaste volumétrico con la temperatura, para diferentes materiales compuestos. ^[14]

principalmente nuevas fases o alteraciones moleculares en las últimas capas atómicas, los cuales pueden tener propiedades completamente diferentes del material base. Si el aire forma parte del sistema se formarán óxidos, en cambio una atmósfera rica en H_2 puede provocar uniones de hidrógeno en la superficie. La humedad puede producir corrosión electroquímica

También pueden actuar en combinación con otros mecanismos simultáneamente, por ejemplo Wilson y Alpas,^[15] en 1997, propusieron un modelo de oxidación y mezclado, basado en observaciones experimentales, para el caso de aleaciones aluminio y silicio, donde los productos de oxidación promovidos por altas temperaturas no son eliminados del sistema sino que son mezclados mecánicamente con material del interior y esto provoca cambios en la respuesta respecto a la del material original

2.2 Efecto de las variables introducidas por el material compuesto

En materiales compuestos se adicionan otros factores, propios de la estructura de los mismos. Tales factores son:

1. proporción en volumen del refuerzo,
2. tamaño de las partículas,
3. dureza relativa entre las fases,
4. forma de las partículas,

5. propiedades del material de la matriz,

Se expondrá más detalladamente su influencia en la tasa de desgaste, considerando en condiciones no lubricadas.

1).- Al aumentar la proporción de refuerzos se han encontrado efectos diferentes en la tasa de desgaste: en algunos casos disminuye ^[3, 8, 12, 16], en otros casos no cambia ^[7, 11] o bien, es variable dependiendo de las condiciones del sistema ^[4, 6]. Debido a lo complejo del fenómeno, y al gran intervalo de error en las medidas de desgaste, como se mencionó antes, la relación entre la tasa de desgaste y el volumen de refuerzo puede considerarse inversamente proporcional, cuando se manifieste diferencia. En la figura 2.1 se aprecia que la tasa de desgaste del material compuesto es diferente a la del material monolítico a bajas carga y altas cargas, también se ve que no hay diferencia entre tasas de desgaste para diferentes proporciones de refuerzo a bajas cargas, en cambio si la hay a altas cargas. A cargas medias (6-50 N), no se observan diferencias entre los materiales reforzados o no

2).- El tamaño de las partículas y su influencia en la tasa de desgaste fue estudiado, entre otros por Hosking et al. ^[16] quienes estudiaron el desgaste por deslizamiento no lubricado de AA2024 y AA2014 reforzado con partículas de Al_2O_3 , con diámetros promedios de 5, 16, 63, 142 μm , aplicando cargas desde 0,5 a 10 N y una velocidad constante de 0,1 ms^{-1} . Ellos encontraron que un aumento en el tamaño de las partículas del refuerzo produce un aumento en la resistencia al desgaste.

Un comportamiento similar fue reportado por Liang et al. ^[17] al estudiar la resistencia al desgaste por deslizamiento sin lubricación de AA2024 reforzado con SiC de diámetros promedios: 3,5; 10 y 20 μm , a una presión de 2,2 Mpa y una velocidad de 0,01 ms^{-1} .

Por otro lado Alpas y Zhang, ^[6] ensayando AA2124 y AA2014 reforzado con SiC de 2,5 y 15,8 μm , en condiciones no lubricadas, a la misma velocidad, 0,2 ms^{-1} , y para un amplio rango de cargas, 1 a 350 N, encontraron diferentes comportamientos frente al desgaste según la carga aplicada. En cierto intervalo de cargas hubo diferencia en la resistencia al desgaste según el tamaño de las partículas de refuerzo y en otro intervalo no. Cuando hubo diferencias los materiales con partículas de refuerzo de menor tamaño mostraron la menor resistencia al desgaste.

3).- Respecto a la dureza relativa entre la matriz y los refuerzos, esta relación permite subdividir a los refuerzos en duros o blandos, esperando una respuesta totalmente diferente en cada caso. Los refuerzos duros pueden producir abrasión sobre la matriz por parte del refuerzo, debido a tercer cuerpo o por adherencia de refuerzos a la contraparte, por otro lado, contribuyen con un aumento general de las propiedades mecánicas. En el caso de refuerzos blandos, se esperaría un efecto lubricante.

4).- La forma de las partículas es un tema que frecuentemente no se tiene en cuenta y se han encontrado pocos informes al respecto. Bricout et al. ^[18] han comparado la influencia de la forma entre refuerzos esféricos y refuerzos de aristas filosas, encontraron mayor resistencia al desgaste con refuerzos esféricos.

5).- Como matriz se han utilizado distintos tipos de materiales, así AA1100, AA6061, AA356, entre otras aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre y titanio. Su elección depende principalmente de consideraciones de costo, corrosividad del medio o peso. Se han encontrado pocas comparaciones entre materiales diferentes.

En cambio, se han realizado comparaciones con respecto al efecto del tratamiento térmico, varios estudios muestran que tiene poca influencia en las propiedades de desgaste de materiales compuestos, estas experiencias fueron realizadas por diferentes investigadores.^[7, 12] Aunque, en trabajos realizados por Straffelini et al.^[19] han encontrado que, cuando se produce una reducción grande en la ductilidad de la matriz, a causa de tratamientos térmicos de envejecimiento, se ve perjudicada la resistencia al desgaste.

Respecto a la influencia de la porosidad, Yilmaz y Buytoz^[20] han encontrado que los efectos beneficiosos del refuerzo, de partículas de Al_2O_3 en aleaciones de aluminio, pueden superar completamente la influencia negativa de las porosidades en materiales sinterizados.

2.3 Mapas de desgaste para materiales compuestos

Antoniou y Subramanian, en 1988^[21] publicaron un trabajo donde, utilizando los mismos grupos adimensionales que Ashby, presentan los datos para aleaciones Al-Si y realizan una clasificación según las características de los materiales desprendidos durante el desgaste y de la superficie desgastada. Pero en ningún momento detallan información sobre la tasa de desgaste de los materiales. Por lo tanto su utilidad es limitada.

Wilson y Alpas, en 1997, desarrollaron un mapa de mecanismos de desgaste para AA356/SiC/20p^[15], donde representa la tasa de desgaste en diferentes condiciones de carga y velocidad de deslizamiento, no se presenta en forma adimensional pues

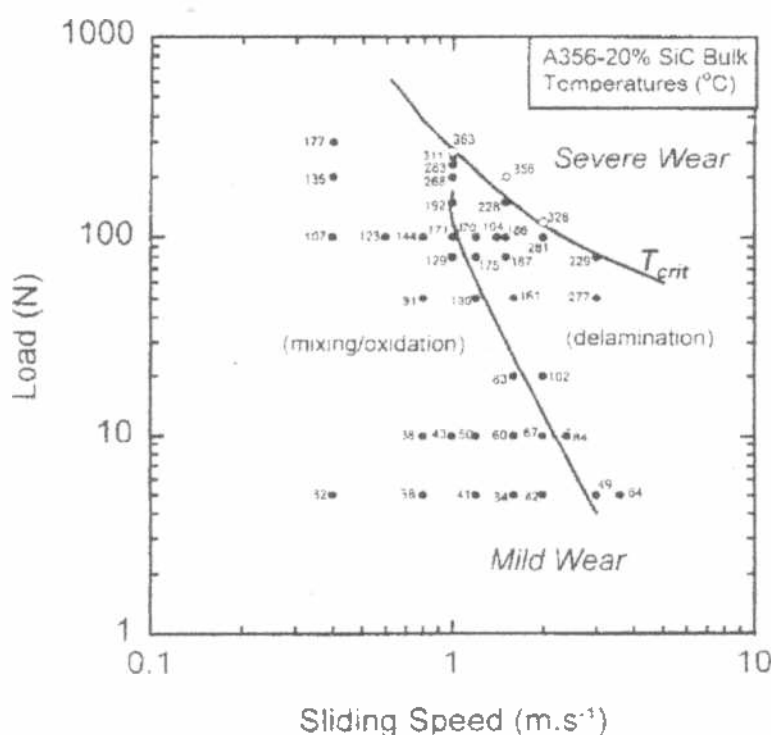
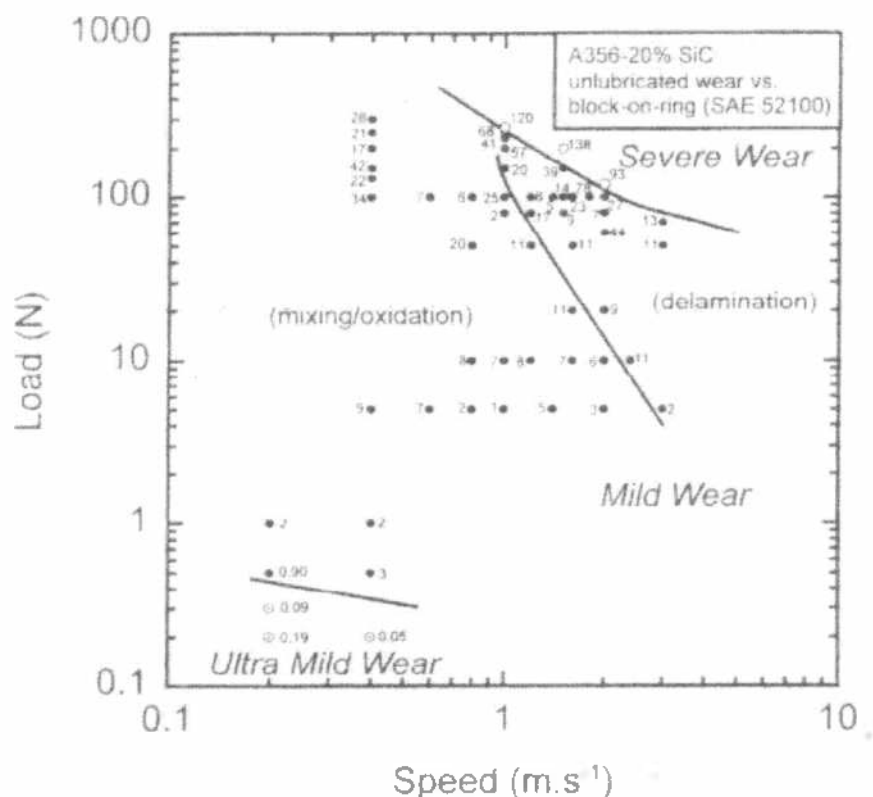


Figura 2.4: Mapa de desgaste para AA356 / SiC / 20p con demarcación entre los regímenes moderado (mild) y severo además se muestra la isoterma por la temperatura crítica, que indica la transición de moderado a severo. Además, se indican los mecanismos de desgaste^[15]

- a) se dan los valores de las temperaturas alcanzadas por el material [°C]
- b) se dan los valores de Tasa de desgaste multiplicada por $10^4 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-1}$

mantuvo la misma geometría para todos los casos. Se pone énfasis en dos mecanismos de desgaste: delaminación y oxidación-mezclado. Y se remarca la importancia de la influencia de la temperatura en la zona de contacto con la transición entre los regímenes de desgaste moderado a severo. Ver la figura 2.4 a y b. El conocimiento de la temperatura de transición es importante para evitar que se alcance un régimen de desgaste severo.



Continúa la figura 2.4 (b)

b) se dan los valores de Tasa de desgaste multiplicada por $10^4 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-1}$

2.4 La subsuperficie y la capa mezclada en materiales compuestos

Diversos efectos del desgaste se manifiestan en la subsuperficie de los pares interactuantes, tales como la nucleación de fisuras y huecos, y la deformación plástica independientemente del tipo de materiales. En materiales compuestos, además, se ha encontrado material transferido de la contraparte a la probeta y viceversa, mezclado en forma mecánica y consolidando una capa ubicada en la zona de contacto.

La nucleación de fisuras y huecos en la subsuperficie fue considerada por Suh et al., quienes desarrollaron una teoría que explicaba el proceso de desgaste, llamada teoría de desgaste por delaminación, postulada en 1973^[22] y revalidada por el mismo equipo en 1977.^[23] Se basó en la observación de la morfología de la subsuperficie del material desgastado, y explica el desgaste considerando que las fisuras y huecos, preexistentes en la subsuperficie, pueden unirse mediante tres mecanismos diferentes: crecimiento de huecos, propagación de fisuras y deformación plástica por corte del material ubicado

entre los huecos. Esos procesos formarían los fragmentos en forma de laminillas observadas durante el desgaste, en que se irían desprendiendo de la superficie. Estas laminillas pueden introducirse en la zona de contacto enrollarse o romperse en fragmentos más pequeños y en ciertos casos provocar más daño en los materiales. Esta teoría explica el desgaste que sufre un material duro deslizándose sobre otro más blando.

La deformación plástica de la subsuperficie, provocada por efecto de la fricción fue estudiada en 1979, por Rigney y Hirth^[24] quienes determinaron mediante cálculos teóricos comparados con datos experimentales, que el gasto energético por deformación se ve reflejado en la fuerza de fricción.

Apoyado las conclusiones de Suh y de Rigney, en 1987, Rosenfield^[25] desarrolló un modelo para explicar el desgaste debido a la propagación de fisuras en materiales dúctiles, donde no asume la preexistencia de fisuras en el material, pero considera una microestructura heterogénea donde hay regiones de material de menor resistencia, y obtiene como resultado que los efectos de corte son favorecidos sobre planos paralelos a la superficie y ubicados a cierta distancia de ella. Con el incremento de la carga, el corte puede ocurrir a mayor profundidad. Este efecto tendería a aumentar la tasa de desgaste. Se han encontrado evidencias experimentales y teóricas de que los materiales compuestos la presencia de refuerzos de mayor rigidez, produce un campo no uniforme de deformación plástica en la subsuperficie. Con acumulación de deformación en las zonas cercanas a la interfase matriz-partícula^[26, 27, 28].

En 1992, Rigney y Kuo^[29] realizan estudios de la deformación de la subsuperficie en Aluminio de pureza comercial. Donde observan que el desgaste de materiales dúctiles ocurre principalmente por extrusión de material hacia el borde de salida, y que los procesos de transferencia de materiales tienen influencia a largo tiempo. También encuentran evidencia de recrystalización pero no puede distinguir si ocurre durante o después del desgaste. Encuentran resultados que concuerdan con el modelo desarrollado por Rosenfield en 1987. Zhang y Alpas^[10] encontraron evidencia de recrystalización al desgastar AA6061, y dicen que el régimen severo se establece por un proceso de ablandamiento térmico, es decir, por recrystalización dinámica

En 1992, Rainforth et al.^[30], estudiaron el desgaste de un acero inoxidable 316 contra Zirconia parcialmente estabilizada, en un equipo pin on disk con cargas de 2 a 55 N y velocidad de 0,24 m/s. Observaron que el desgaste era producido por abrasión, evidenciado por surcos en la superficie de desgaste, por transferencia de material a la contraparte, y por desplazamiento de material al borde de salida del pin de acero, debido a los altos niveles de deformación plástica en la subsuperficie. También encontraron una correlación entre la profundidad de la deformación y la tasa de desgaste, pero consideraron que dicha correlación debe ser indirecta pues los tres mecanismos mencionados anteriormente indican un proceso más complejo.

Alpas y Zhang en 1993,^[31] realizan un estudio muy completo de la deformación plástica producida durante el desgaste sobre AA356 - 7% Si, desgastado contra un acero SAE 52100 a 0.2 m/s en un rango de cargas de 1 a 200 N. Colocaron una guía o trazador, que les permitió determinar la deformación plástica. Encontraron que la zona deformada se establece antes de los 30 m de distancia deslizada, y que la profundidad de la zona deformada aumenta al aumentar la distancia y la carga aplicada. También encontraron endurecimiento por trabajado determinado mediante medidas de microdureza Vickers. También encontraron evidencia que concuerdan con la teoría de delaminación de Suh.^[22] En este par de desgaste no encontraron material transferido

Rigney et al., en 1984,^[32] presentan evidencia recopilada de diversos trabajos de la existencia de una capa mezclada compuesta por los dos materiales del par interactuante y se refleja en el material de los fragmentos producidos por desgaste.

Modi et al., en 1993,^[8] ensayaron un Al-4.5 Cu reforzado con 10% de SiC, desgastado contra un acero EN25 a 2.68 m/s con cargas del orden de 50 N. Encontraron evidencia de material transferido, de deformación plástica subsuperficial y de endurecimiento en la subsuperficie.

En 1995, Venkataraman y Sundararajan^[33], estudiaron aluminio reforzado con SiC, desgastando contra un acero de HV 532, en distintas proporciones a una velocidad de 1 m/s con cargas de 52 y 122 N. Realizaron un intenso examen de la subsuperficie y

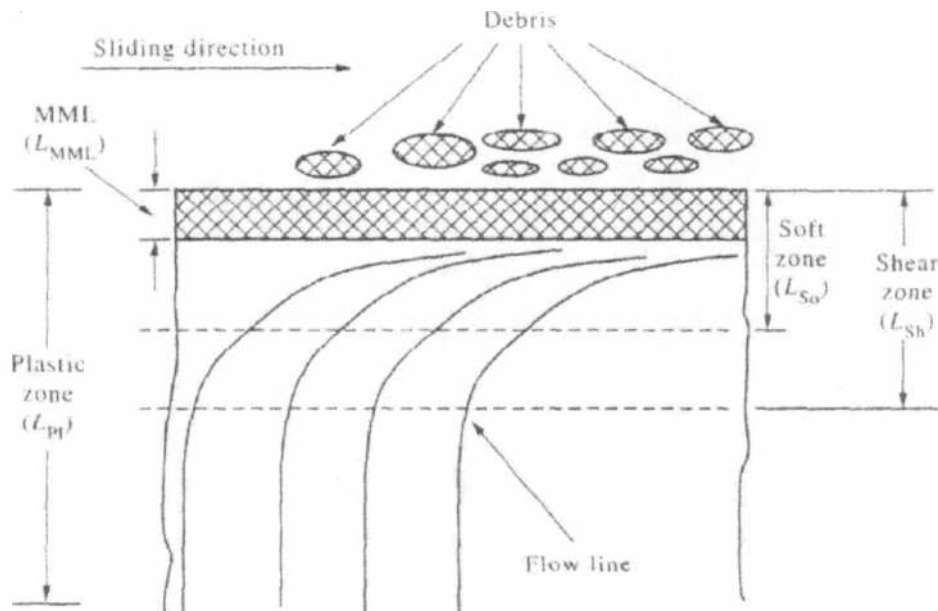


Figura 2.5: Esquema de las capas de materiales ubicadas debajo de la superficie, propuesto por Venkataraman y Sundararajan.
debris = fragmentos

resumieron sus observaciones en un esquema ilustrado en la figura 2.5. La región subsuperficial puede dividirse en capas: la capa mezclada mecánicamente (MML), la capa sometida a corte (*shear layer*) y una capa de deformada sin flujo en la dirección de deslizamiento (*bulk deformed*), tal como se ilustra en la figura 2.5. La MML fue determinada por la presencia de hierro. La *Shear zone* se determinó mediante las líneas de flujo, indicadas mediante el desplazamiento sufrido por las partículas de refuerzo. Y la *Plastic zone* se determinó mediante medidas de microdureza Vickers, así dentro de la *Plastic zone*, se encontró un aumento de la microdureza al acercarse a la superficie hasta alcanzar una zona cercana donde se produce un reversión y comienza a disminuir, esta zona la llamaron *Soft zone*, este efecto lo explicaron considerando que los poros producidos por efecto del desgaste reducen la resistencia del material.

Sobre la MML, Venkataraman y Sundararajan, observaron que su espesor aumenta con el incremento en la fracción en volumen de refuerzos, y con el incremento de la carga aplicada. También encontraron que su dureza es aproximadamente 6 veces la dureza de la matriz de los materiales compuestos.

How y Baker, en 1999^[34], presentaron las observaciones encontradas a estudiar la subsuperficie de AA6061 reforzado con fibras cortas de alúmina en proporciones de 5, 10 y 20% en volumen, ensayadas en una máquina pin on disc a una velocidad de 0,19 m/s con cargas de 1,1 a 48,3 N. Encontraron en todas las probetas las zonas detalladas por Venkataraman, con una MML gruesa y uniforme. También observaron que la zona deformada plásticamente y la zona deformada por corte prácticamente tuvieron el mismo espesor y se encontró que un aumento de la carga aplicada produce un aumento en el espesor de ambas. Los refuerzos fueron fracturados en la zona deformada por corte y re-orientados siguiendo la dirección de deslizamiento, llegando a ubicarse paralelos a la superficie. Encontraron evidencia de fisuras que produjeron los fragmentos en forma de laminillas.

Rainforth^[35] recopiló las diferentes observaciones realizadas en distintos materiales, entre ellas las siguientes:

- El mezclado mecánico puede ser un efecto beneficioso o un efecto perjudicial.
- Son comunes las observaciones de fragmentación de partículas en desgaste a altas cargas.
- En algunos materiales la tasa de desgaste es proporcional a la profundidad de la zona deformada.
- Medidas de microdureza como función de la profundidad sugieren que se alcanza la saturación de la tensión de flujo, flow stress, en la superficie. Se necesitan más datos para predecir una ley de endurecimiento por trabajado durante el desgaste.
- En aleaciones de aluminio parecería ser que el mezclado mecánico de óxidos basadas en hierro del material de la contraparte conduce a un aumento de la fisuración de la subsuperficie y el correspondiente aumento en la tasa de desgaste.

Referencias de este Capítulo

- [1] Rigney, D.A. - Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials - *Wear*, 245 (2000) 1-9.
- [2] Godet, M. - The third-body approach: a mechanical view of wear - *Wear*, 100 (1984) 437-452.
- [3] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites I. Macrobehaviour - *Acta Materialia*, 44, n:2 (1996) 451-460
- [4] Zhang, J.; Alpas, A.T. - Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum alloys - *Mat. Sci. Eng.*, A161 (1993) 273-284.
- [5] Ceschini, L.; Daehn, G.S.; Garagnani, G.L.; Martini, C. - Friction and wear behavior of C4-Al₂O₃/Al composites under dry sliding conditions - *Wear*, 216 (1998) 229-238.
- [6] Alpas, A.T.; Zhang, J. - Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites - *Metall. Mat. Trans. A*, 25 (1994) 969-983.
- [7] How, H.C.; Baker, T.N. - Dry Sliding Wear Behavior of Saffil-reinforced AA 6061 Composites - *Wear*, 210 (1997) 263-272.
- [8] Modi, O.P.; Prasad, B.K.; Yegneswaran, A.H.; Vaidya, M.L. - Dry sliding wear behavior of squeeze cast aluminium alloy - silicon carbide composites - *Mat. Sci.Eng.* A151 (1992) 235-245
- [9] Chen, R.; Iwabuchi, A.; Shimizu, ; Shin, H.S.; Mifune, H. - The sliding wear resistance behavior of NiAl and SiC particles reinforced aluminium alloy matrix composites - *Wear*, 213 (1997)

175-184

- [10] Zhang, J.; Alpas, A.T. - Transition between mild and severe wear in aluminium alloys - *Acta Mater.* Vol 45, n 2 (1997) 513-528.
- [11] Wang, A.; Rack, H.J. - Transition wear behavior of SiC -particulate- and SiC -whisker-reinforced 7091 Al metal matrix composites - *Mat. Sci. Eng., A147* (1991) 211-224.
- [12] Lee, C.S.; Kim, Y.H.; Han, K.S.; Lim, T. - Wear behavior of aluminium matrix composite materials - *J. Mat. Sci.*, 27 (1992) 793-800.
- [13] Rabinowicz, E. - *Friction and Wear of Materials* - John Wiley & Sons, New York, (1995), 2° Ed.
- [14] Wilson, A.; Alpas, A.T. - Effect of temperature on the sliding wear performance of al alloys and Al matrix composites - *Wear*, 196 (1996) 270-278.
- [15] Wilson, S.; Alpas, A. - Wear mechanism maps for metal matrix composites - *Wear* 212(1997) 41-49.
- [16] Hosking, F.M.; Folgarportillo, F.; Wunderlin, R. and Mehrabian, R. - Composites of aluminum alloys: fabrication and wear behavior. - *J. Mater. Sci.*, 17 (1982) 477-498.
- [17] Lian, Y. N.; Ma, Z.Y.; Li, S.Z.; Bi, J. - Effect of particle size on wear behavior of SiC particulate-reinforced aluminum alloy composites - *J. Mater. Sci. Letters* 14 (1995) 114-
- [18] Laden, K.; Guerdon, J.D.; Watremez, M.; Bricout, J.P. - Frictional characteristics of Al-SiC composite brake discs - *Trib. letters*, 8 (2000) 237-247.
- [19] Sraffellini, G.; Bonollo, F.; Molinari, A.; Tiziani, A. - Influence of matrix hardness on the dry sliding behavior of 20 vol.% Al₂O₃ -particulate-reinforced 6061 Al metal matrix composite - *Wear*, 211 (1997) 192-197.
- [20] Yilmaz, O.; Buytoz, S. - Abrasive wear of Al₂O₃ -reinforced aluminium-based MMCs. - *Comp. Sci. Tech.* vol 61, n 16 (2001) 2381-2392
- [21] Antoniou, R.; Subramanian, C. - Wear mechanism map for Aluminium alloys - *Scripta Metallurgica*, vol 22 (1988) 809-814
- [22] Suh, N.P. - The delamination theory of wear - *Wear*, 25 (1973) 111-124
- [23] Suh, N.P. - An overview of the delamination theory of wear - *Wear*, 44 (1977) 1-15.
- [24] Rigney, D.; Hirth, P. - Plastic deformation and sliding friction of metals. - *Wear* 53 (1979) 345-370
- [25] Rosenfield, A.R. - A shear instability model of sliding wear - *Wear*, 116 (1987) 319-328.
- [26] Wu, Y.; Lavernia, E.J. - Strengthening behavior of particulate reinforced MMCs - *Scr. Metall. Mater.*, vol 27 (1992) 173-178.
- [27] Christman, T.; Needelman, A.; Suresh, S. - An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites. - *Acta Metall.* vol 37 n 11 (1989) 3029-3050.
- [28] Shen, Y.-L.; Finot, M.; Needelman, A.; Suresh, S. - Effective elastic response of two-phase composites - *Acta Metall. Mater.*, vol 42 n 1 (1994) 77-97.
- [29] Kuo, S.M.; Rigney, D.A. - Sliding behavior of aluminium - *Mat. Sci. Eng. A* 157 (1992) 131-143
- [30] Rainfoth, W.M.; Stevens, R.; Nutting, J. - Deformation structures induced by sliding contact. *Phil. Mag. A*, vol 66, n° 4 (1992) 621-641.
- [31] Alpas, A.T.; Hu, H.; Zhang, J. - Plastic deformation and damage accumulation below the surfaces - *Wear*, 162-164 (1993) 188-195.
- [32] Rigney, D.A.; Chen, L.H.; Naylor, G.S.; Rosenfield, A.R. - Wear processes in sliding systems - *Wear*, 100 (1984) 195-219.
- [33] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites_ II. The characterization of subsurface deformation and correlation with behavior - *Acta Materialia*, 44, n:2(1996) 461-473.
- [34] How, H.C.; Baker, T.N. - Characterization of sliding friction-induced subsurface deformation of saffil-reinforced AA6061 composites. - *Wear*, 232 (1999) 106-115.
- [35] Rainfoth, W.M. - Microstructural evolution at the worn surface: a comparison of metals and ceramics. *Wear*, 245 (2000) 162-177.

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS DEL TRABAJO

Como se expuso en los capítulos anteriores se sabe que:

1. La resistencia al desgaste de los materiales compuestos, reforzados con partículas duras, no se ve afectada por la proporción de refuerzos cuando se encuentra en un régimen moderado.
2. Durante el desgaste se producen cambios estructurales en la superficie y subsuperficie de los pares interactuantes.
3. Estudiando las características morfológicas de la superficie desgastada y de los fragmentos se puede identificar los mecanismos de desgaste operantes.

Además, considerando de que:

1. Los datos reportados en diferentes publicaciones generalmente se encuentran en diferentes condiciones de ensayo y por lo tanto no son comparables.
2. No hay resultados claros sobre la ventaja de un tipo de refuerzo sobre otro en la resistencia al desgaste.

Por lo tanto, se propusieron como objetivos de este trabajo.

Estudiar el desgaste de diferentes tipos de materiales compuestos, de matriz de aluminio reforzados con partículas duras sometido a desgaste, en idénticas condiciones de ensayo, comprendidas en un régimen moderado.

Comparar las tasas de desgaste evaluando la influencia del refuerzo.

Determinar los mecanismos de desgaste operantes en los diferentes materiales y los cambios estructurales ocurridos en ellos.

Delineamiento del trabajo

En el capítulo 4 se presentan las técnicas y metodología empleadas en para ensayar los materiales, utilizando una máquina de configuración Pin on Ring, y su caracterización.

En el capítulo 5 se presentan los materiales utilizados en este trabajo.

En el capítulo 6 se presentan los ensayos previos para establecer las condiciones adecuadas a un régimen de desgaste moderado, en el cual se realizarán los ensayos, y el desgaste obtenido en los diferentes materiales.

En el capítulo 7 se presentan los resultados de los diversos estudios morfológicos su comparación entre las diferentes probetas y su comparación con la bibliografía.

En el capítulo 8 se correlacionan las características morfológicas estudiadas en el capítulo 7 y se comparan con los valores de tasa de desgaste de cada material.

En el capítulo 9 se presentan las conclusiones extraídas de los diferentes análisis.

CAPÍTULO 4 TÉCNICAS EXPERIMENTALES

4.1. Ensayos de desgaste

Los ensayos de desgaste fueron realizados en un equipo Pin on Ring, mostrado en la figura 4.1.^[1] El cual consta de un disco de fundición de acero de dureza 272 HB, de 170 mm de diámetro, que rota alcanzando una velocidad de 2,7 m/s en su periferia. Sobre la superficie cilíndrica del disco se apoya la probeta del material compuesto que se desea ensayar, el disco es siempre el mismo. La probeta cilíndrica, de material compuesto, es presionada por una carga estática ubicada en la parte superior.

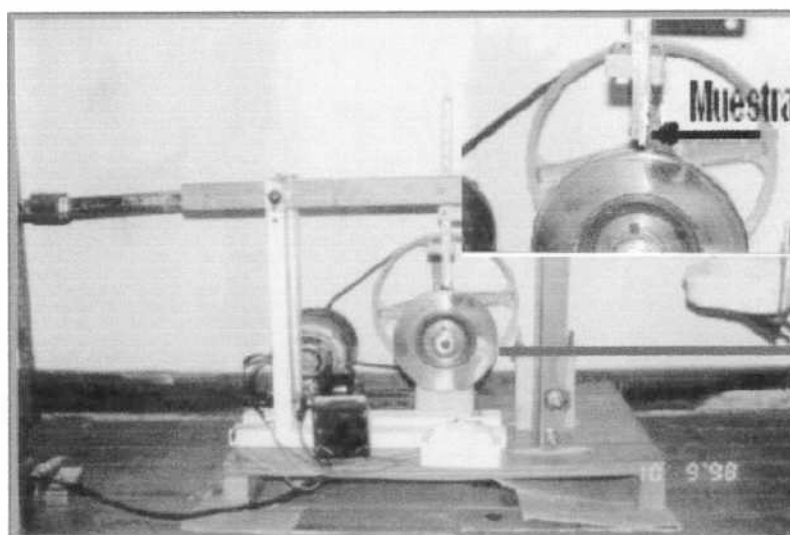


Figura 4.1: Equipo Pin on Ring, utilizado para los ensayos de desgaste.^[1]

Se registra la temperatura superficial de la probeta mediante una termocupla puesta en contacto a una distancia de 10 mm de la zona de contacto. Se controla y registra la velocidad de rotación del disco mediante una PC.

4.1.1. Preparación del equipo y las probetas

La superficie circular de las probetas se desbastó y se pulió con papel abrasivo # 220, 320, 400, 600 y 1200; asegurándose que permaneciera paralela a la cara opuesta de la probeta para evitar desviaciones en las medidas. Posteriormente se pulió con una suspensión de alúmina de 1 μm .

La superficie cilíndrica del disco de acero se desbastó y se pulió con papel abrasivo de # 150, 220, 320, 400, 600 y 1200; con el disco montado en el equipo y girando. Finalmente se pulió con una suspensión de alúmina de 1 μm . Este procedimiento se repitió cada vez que se ensayó una probeta nueva.

Una vez pulidas las probetas y el disco se desengrasaron con Acetona de calidad técnica y se registraron el peso y longitud iniciales de cada probeta. Luego se montó la

Las probetas se desmontaron una vez finalizado el ensayo, se limpiaron y se registro su peso y longitud. Y fueron guardadas para su posterior análisis y caracterización.

Debido a que es complicado obtener una superficie plana, adecuada para estudiar la dispersión de las partículas de refuerzo y la microestructura, en materiales compuestos por una matriz blanda reforzado con partículas duras, se ensayaron varias técnicas de pulido mecánico y electrolítico [2, 3]

Previamente las probetas debieron ser incluidas en una montura de *Metacrilato de metilo* con una superficie mayor a 700 mm², ya que una menor superficie no dió buen resultado. La técnicas de pulido electrolítico con Butylcellosolve 90-10 y con cátodo de acero inoxidable y 27 V, no fue aceptable pues provocaba que las partículas de refuerzo se desprendieran.

a) HF al 0.5 %, «1 ml HF_(c) + 200 ml de H₂O» atacando con un algodón impregnado.

b) Reactivo de Keller, «1 ml $\text{HF}_{(c)}$ + 1.5 ml de $\text{HCl}_{(c)}$ + 2.5 ml de HNO_3 (c) + 95 ml de H_2O » atacando con un algodón impregnado.

c) NaOH 2.5 N, 1) sumergiendo la probeta

Finalmente se optó por el Reactivo de Keller ya que revela satisfactoriamente los bordes de grano y delineaba adecuadamente las dendritas, dependiendo del tipo de material atacado, sin producir desprendimiento de los refuerzos.

4.2.1. Microscopio óptico

Las dispersión de los refuerzos y la microestructura fue observada en el microscopio óptico, empleándose el modelo MBX60 de la firma Olympus, con aumentos de 50x, 100x, 200x y 500x. Además, se adquirieron imágenes digitales mediante el sistema de captura incorporado al equipo.

Se emplearon lupas de bajo aumento, de 3x a 40x, para la observación macroscópica de la superficie desgastada de las probetas, así como los bordes de entrada y salida, de las cuales se capturaron de imágenes digitales representativas.

4.3. Microscopio electrónico de barrido

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo PSEM-500 de la firma Philips. El cual permite captura de imágenes digitales y fotografías con aumentos de 12x a 80000x. También dispone de un analizador de energías de RX de marca EDAX DX-4 para determinación semicuantitativa de los elementos de número atómico mayores a 10 (= Na)

En este equipo se realizaron las observaciones y análisis químicos de las superficies desgastadas y de los cortes longitudinales de las probetas, adquiriéndose imágenes, espectros EDX y mapas de composición representativos de las mismas.

4.4. Medidas de dureza

Para determinar la metodología a emplear en este trabajo se realizó una revisión de los diferentes métodos empleados y mencionados en la literatura para medir microdureza en la subsuperficie de las probetas sometidas a desgaste. En la tabla 4.1 se resumen los datos encontrados, los cuales se describen a continuación.

Alpas, Hu y Zhang^[4] utilizaron medidas de microdureza Knoop para buscar endurecimiento por trabajado en la subsuperficie de Cu OFHC sometido a desgaste. Para ello realizaron un corte perpendicular a la dirección de deslizamiento y con un ángulo de 10° con la superficie desgastada, de esta manera se amplificó en seis veces la profundidad de la subsuperficie. Se realizaron tres improntas a cada profundidad las cuales arrojaron una dispersión máxima de 30% del valor medio.

Zhang y Alpas^[5] emplearon un procedimiento similar al mencionado en el párrafo anterior. En este caso el ángulo fue de 5° y permitió amplificar once veces la escala de profundidad. El tamaño de las improntas fue del orden de los 15 μm lo que indicaría que abarca matriz y refuerzos simultáneamente.

Las medidas de dureza realizadas por Venkataraman y Sundararajan^[6, 7] comprendieron tres variantes, en una de ellas midieron la macrodureza del material compuesto con una impronta de 500 μm , la cual abarca la refuerzos y matriz del material compuesto. Por lo tanto puede tomarse como medida de dureza global del material compuesto. También realizaron medidas de microdureza Knoop a dos cargas diferentes, 10 y 50 gramos, la menor carga se empleo para medir sobre la MML y la de mayor carga se empleó sobre la subsuperficie. Cuando se tomaron las medidas de microdureza de la MML las improntas Knoop fueron del orden de 8 a 20 μm en su diagonal mayor, por lo tanto debió abarcar diferentes fases. Las improntas realizadas en

la subsuperficie fueron del orden de 40 a 80 μm , por lo tanto debieron abarcar partículas de refuerzo y matriz simultáneamente, ya que el tamaño de las partículas fue de 1 a 6 μm con un espaciado entre partículas de 5 μm aproximadamente.

Tabla 4.1: Resumen de las metodologías empleadas por otros investigadores para medir microdurezas

Investigadores	Material y tamaño del refuerzo	Región donde se realiza la impronta	Numero de dureza utilizado	Cantidad de lecturas a promediar	Rango de valores	Dispersión de las lecturas, Cv
Alpas, Hu y Zhang [4]	Cobre OFHC	Subsuperficie. Sobre un plano con un ángulo de 10° con la sup. desgastada	HK 0,025	3	80 - 200	30%
Zhang y Alpas [5]	Al/ 7% Si(p) - 1.8+0.9 μm	Subsuperficie. (matriz + refuerzos) Sobre un plano con un ángulo de 5° con la sup. desgastada.	HV 0,015	3	70 - 120	20%
Straffelini [8]	Al/ 60% Al_2O_3 (p) - 1 a 5 μm	No Esp.	HV 0,010	No Esp.	95 - 145	No Esp.
Venkataraman y Sundararajan [7]	Al/ 10, 20, 30 y 40% SiC(p) - 1 a 6 μm	MML	HK 0,010	No Esp.	300 - 500	25 a 33 %
		Subsuperficie, (matriz + refuerzos)	HK 0,050	No Esp.	100 - 500	No Esp.
		Matriz + Refuerzos	HV 5.0	No Esp.	38 - 78	No Esp.
How y Baker [9]	AA6061/ 5, 10 y 20 % Al_2O_3 (sf) ; 5 a 20 μm de longitud y relación l/r = 3 (aprox)	Subsuperficie. (matriz + refuerzos) Sobre un plano con un ángulo de 7° con la sup. desgastada.	HV 0,010	No Esp.	100 - 150	No Esp.
No Esp: No se especifica. - HV: Dureza Vickers - HK: dureza Knoop - Cv: coeficiente de variación ($100 \cdot \sigma / \bar{x}$) - (sf): fibras cortas						

How y Baker ^[9] emplearon medidas de microdureza Vickers para determinar el endurecimiento de la subsuperficie. Para ello emplearon la misma técnica que Alpas et al, con un plano que forma un ángulo de 7° con la superficie desgastada, tal como se muestra en la figura 4.2. En esta figura se ilustra como las irregularidades en la MML influye en las medidas de microdureza aumentando la dispersión. Las improntas, de unos 13 μm , se realizaron sobre la matriz, evitando los refuerzos, en los materiales compuestos. Las medidas de microdureza en la MML se realizaron también con HV y cargas de 10 gramos, en este caso las improntas fueron del orden de 6 μm , y según ilustran los autores en su trabajo las partículas presentes en la MML están muy aglomeradas, tanto, que las improntas podrían abarcar las distintas fases presentes.

Como se vió en el Capítulo 1 en los problemas de deslizamiento la zona de contacto es rugosa y el contacto real se realiza a través de asperezas de tamaño pequeño, por lo tanto, es más adecuado conocer el valor de dureza local, con medidas de

microdureza de las diferentes fases presentes y no un valor promedio como el que surge de una medida de macrodureza.

En este trabajo se emplearon medidas de microdureza Vickers, con una carga de 25 gramos en todos los casos. En los materiales compuestos se realizaron las improntas en la matriz de aleación de aluminio evitando en lo posible tocar los refuerzos. Las medidas de microdureza de la MML se realizaron con la misma carga y en los casos que fue posible se evitó tocar los refuerzos de gran tamaño. El número de improntas tomado para promediar los valores de microdureza se indicará cuando se expongan los resultados en los próximos capítulos.

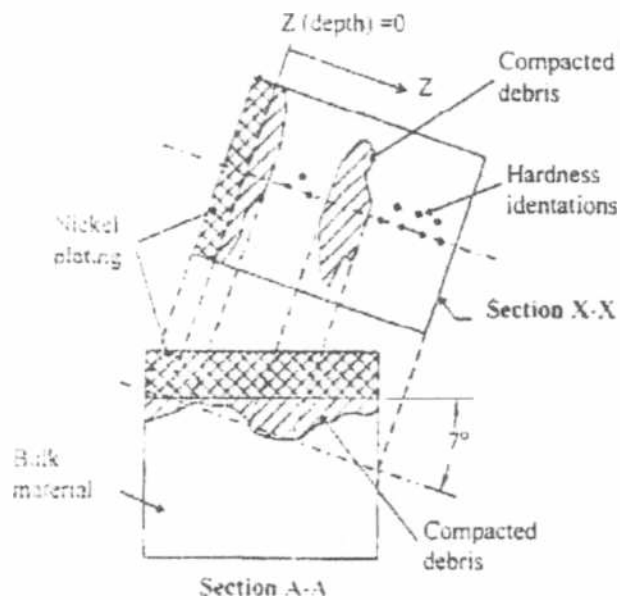


Figura 4.2: Esquema ilustrando el error en las medidas de microdureza al emplear la técnica del plano oblicuo, debido a irregularidades en la capa mezclada. ^[9]

Se empleó un microdurómetro Leitz modelo Durimet con dispositivo óptico de 400 aumentos para observar la impronta el cual permitió alcanzar una apreciación de 0.5 μm en la medida de la diagonal de la impronta. En todos los casos se midieron ambas diagonales de la impronta y se registró el valor promedio.

Referencias de este Capítulo:

- [1] Auras, R.A.: Mg. Thesis "Producción y propiedades de compuestos de base Al-Zn y partículas de alúmina y SiC" Universidad Nacional de San Martín. CNEA, 1999
- [2] Günter Petzow. - Metallographic Etching. 38-43.
- [3] Kehl, G.L. - Reactivos de ataque para el aluminio y sus aleaciones - Fundamentos de la práctica metalográfica. Aguilar ediciones, Madrid, (198-) 419
- [4] Alpas, A.T.; Hu, H.; Zhang, J. - Plastic deformation and damage accumulation below the surfaces - Wear, 162-164 (1993) 188-195.

- [5] Zhang, J.; Alpas, A.T. - Delamination wear in ductile materials containing second phase particles - *Mat Sci Eng. A160* (1993) 25-35.
- [6] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behaviour of Al-SiC particulate composites I. Macrobehaviour - *Acta Mater.*, 44, n:2(1996) 451-460.
- [7] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behaviour of Al-SiC particulate composites II. The characterization of subsurface deformation and correlation with behaviour - *Acta Mater.*, 44, n:2(1996) 461-473.
- [8] Straffelini, G. - Experimental observations of subsurface damage and oxidative wear in Al-based metal-matrix composites - *Wear.* 245 (2000) 216-222.
- [9] How, H.C.; Baker, T.N. - Characterisation of sliding friction-induced subsurface deformation of saffil-reinforced AA6061 composites. - *Wear.* 232 (1999) 106-115.

CAPÍTULO 5 MATERIALES

En este trabajo se utilizaron una variedad de materiales compuestos, empleando cuatro tipos de refuerzos diferentes: Al_2O_3 , Ti_3Al , B_2Ti y C_4B . La matriz empleada en la mayor parte de ellos fue una aleación AA6061 y en un caso en particular se utilizó una matriz de la aleación AA1060, las composiciones químicas de las mismas se detallan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Composición química de las matrices utilizadas en los materiales compuestos

Aleaciones	Composición, expresada en peso					
	% Fe	% Si	% Mg	% Cu	% Cr	% Al
AA6061	0,04	0,63	1,04	0,23	0,21	Rem
AA1060	-	-	-	-	-	99.60 min

Con la matriz de AA6061 se emplearon diferentes proporciones de refuerzos: 5, 10 y 15% en volumen, aunque en el caso del refuerzo de Ti_3Al se dispuso de dos proporciones diferentes: 5 y 10%, y con C_4B solamente se obtuvo una sola proporción de refuerzo, del 5%. Para su fabricación se partió de polvos de la matriz y de los refuerzos, los cuales fueron mezclados en un molino de bolas y posteriormente compactado. El proceso de consolidación final fue diferente según el tipo de refuerzo empleado. Así para las probetas reforzadas con Ti_3Al , B_2Ti , C_4B se empleó la fusión del compactado y colado por centrifugación, y para las probetas reforzadas con Al_2O_3 se empleó un proceso de extrudado. Todas las probetas fueron obtenidas con geometría cilíndrica, de 5 mm de diámetro y 20 mm de longitud. En la tabla 5.2 se detalla cuales fueron los procesos de fabricación empleados para cada uno de los materiales, así como tamaño y forma de los refuerzos. Estos materiales fueron fabricados en el Departamento de Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia.

Con la matriz de AA1060 se empleó Al_2O_3 como refuerzo en una sola proporción, del 15 % en volumen. En la tabla 4.2 se da más detalle de los métodos de fabricación y características del refuerzo. Para las probetas con matriz de AA1060 el proceso partió de polvos de la matriz que fueron mezclados con los refuerzos, seguido de un extrudado continuo, obteniéndose varillas cilíndricas con 6.35 mm de diámetro.

La microestructura de los distintos materiales utilizados se muestran en la figura 5.1. En ella se observan la dispersión de las partículas de refuerzo en la matriz de aleación de aluminio.

La contraparte utilizada para desgastar todos los materiales fue un disco de fundición de acero.

En total se trabajaron con 11 materiales diferentes, con los cuales se confeccionaron las probetas para desgaste. Las diferentes probetas utilizadas se detallan en la tabla 5.3, junto al tipo de ensayo a que fue sometido.

Tabla 5.2: Composición y características de los materiales utilizados

Material, contenido de Refuerzo expresado en volumen	Tratamiento	Morfología del refuerzo	Proceso de obtención
6061	As fabricated	-sin reforzar-	Poivos mezclado en molino de bolas y compactado; Fundido y Colado
6061 + 5 % B_4C		4 a 10 μm , nodulares	Polvos mezclado con los refuerzos en molino de bolas y compactado; Fundido y colado por centrifugación
6061+ B_2Ti 5%, 10%, 15%		4 a 10 μm , irregulares	
6061 + Ti_3Al 5%, 10 %		20 a 30 μm esféricas	
6061 + Al_2O_3 5%, 10%, 15%		1 a 2 μm	
1060 + 15 % Al_2O_3		8-12 μm angulares	Ídem, compactado y extrudado

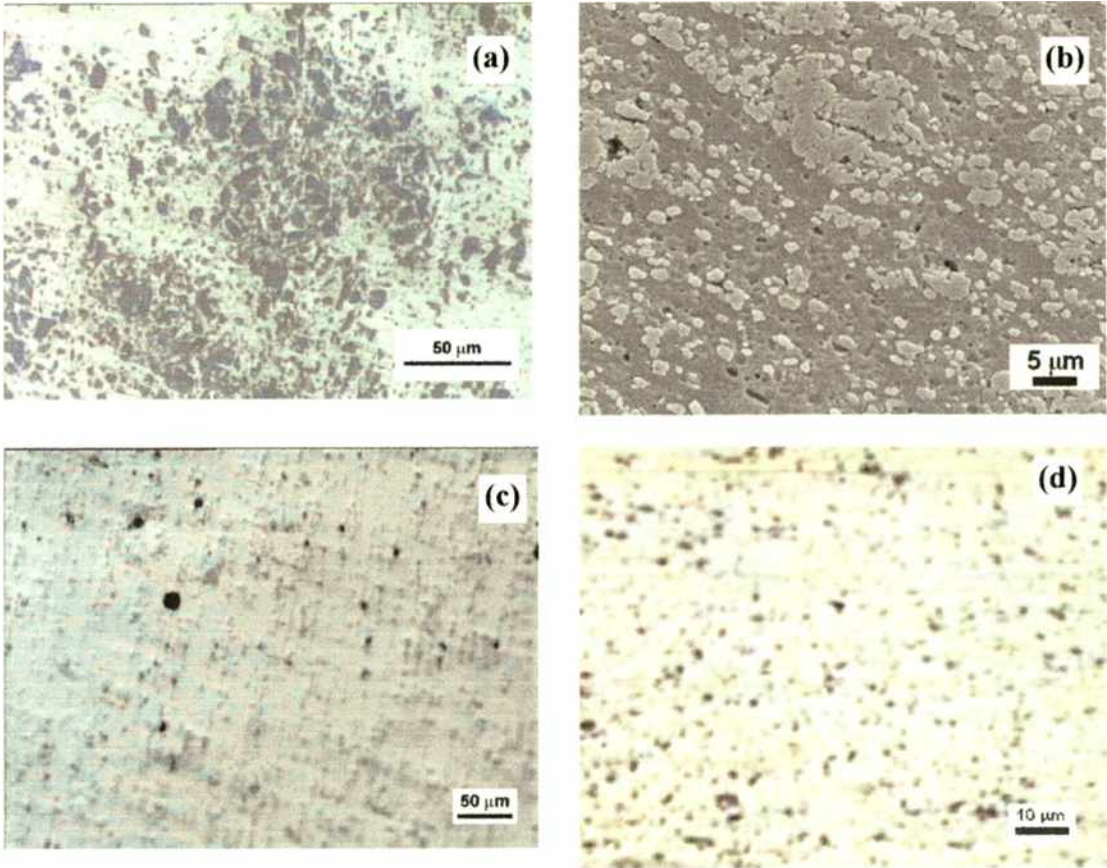


Figura 5.1: Metalografías de los materiales utilizados (continua...)

- a) 1060 / Al_2O_3 / 15p
- b) 6061 / Al_2O_3 / 15p
- c) 6061 / Al_2O_3 / 10p
- d) 6061 / Al_2O_3 / 5p

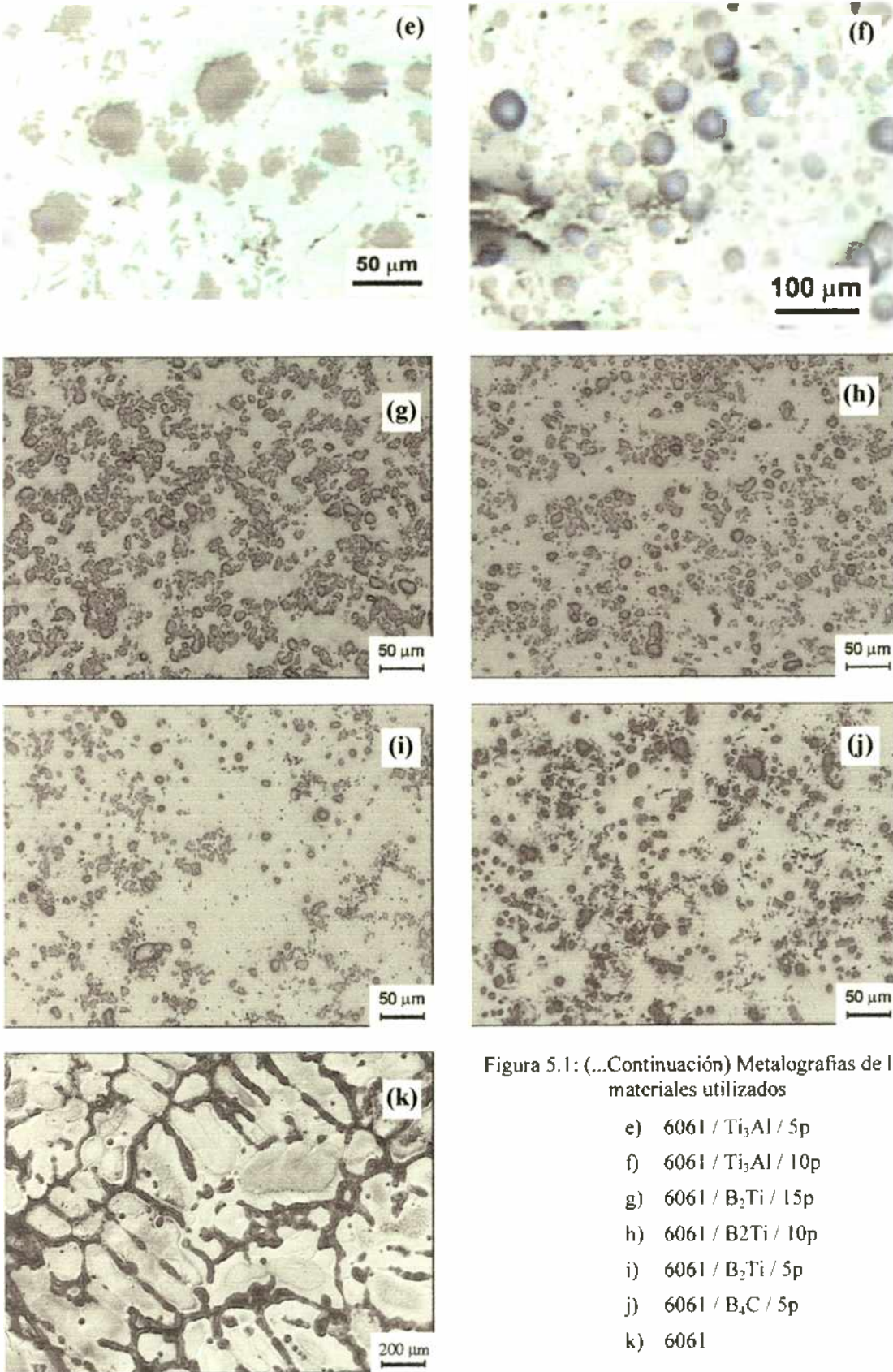


Figura 5.1: (...Continuación) Metalografías de los materiales utilizados

- e) 6061 / Ti_3Al / 5p
- f) 6061 / Ti_3Al / 10p
- g) 6061 / B_2Ti / 15p
- h) 6061 / B_2Ti / 10p
- i) 6061 / B_2Ti / 5p
- j) 6061 / B_4C / 5p
- k) 6061

Tabla 5.3: Referencia de las probetas utilizadas y detalle de la carga utilizada en los ensayos

Probetas	Material	Ensayos de desgaste		
		Carga		Número de ensayos
		32,4 N	Otra	
p1	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	si		1
p2	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p		52 N	1
p3	6061 / Al ₂ O ₃ / 15p	si		2
p4	6061 / Al ₂ O ₃ / 10p	si		2
p5	6061 / Al ₂ O ₃ / 5p	si		2
p6	6061 / Ti ₃ Al / 5p	si		2
p7	6061 / Ti ₃ Al / 10p	si		2
p8	6061 / B ₂ Ti / 15p	si		2
p9	6061 / B ₂ Ti / 10p	si		2
p10	6061 / B ₂ Ti / 5p	si		2
p11	6061 / B ₄ C / 5p	si		2
p12	6061	si		2
p13	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p		82 N	1
p14	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p		4,9 N	1
p15	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	hasta 100 m		1
p16	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	hasta 200 m		1
p17	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	hasta 500 m		1
p18	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	hasta 1000 m		1
p19	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	hasta 2000 m		1
p20	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	si		1
p21	1060 / Al ₂ O ₃ / 15p	si		1

Microdureza de la Matriz de los Materiales Compuestos

Sobre la matriz de los materiales compuesto se realizaron medidas de microdureza, los valores promediados de 5 mediciones diferentes se muestran en la figura 5.2, donde las barras de error indican el intervalo de error con una confianza del 95%

Microdureza de los refuerzos

La microdureza de los refuerzos se muestra en la tabla 5.4, la cual fue extraída del CRC Materials Science and Engineering Handbook publicadas en Internet^[1], salvo para el Ti₃Al el cual se midió expresamente en las probetas y se promedió de 4 lecturas en diferentes partículas

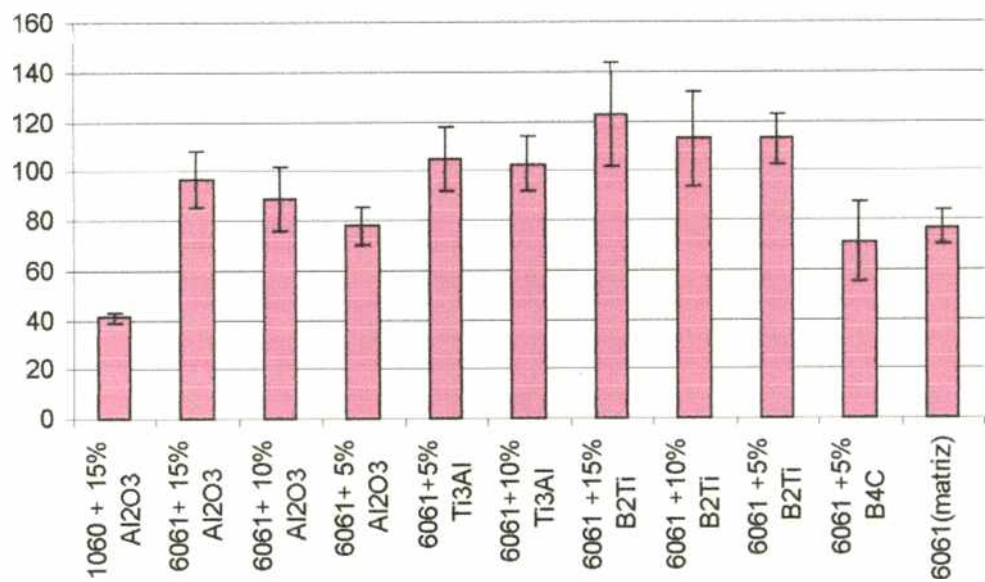


Figura 5.2: Microdureza de la matriz en las distintos materiales utilizados, HV (0.025)
 La barra de error fue construida para un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 5.4: Dureza de los refuerzos utilizados

Material del Refuerzo	HK. 100g. Ceramics	HV	Referencia
B ₄ C	2800	-	[1]
Al ₂ O ₃	2000 – 2050	2600 HV (20 g)	[1]
B ₂ Ti	2710 - 3000	3370 HV (30 g)	[1]
Ti ₃ Al	-	530 HV (25 g)	Este trabajo

Referencias de este Capítulo

[1] www.memsnet.org/material/ , CRC Materials Science and Engineering Handbook.

CAPÍTULO 6 RESISTENCIA AL DESGASTE

6.1. Determinación de las condiciones de ensayo

Debido a la relación entre comportamiento de los materiales y las condiciones del ensayo se realizaron ensayos a diferentes cargas para conocer la magnitud del desgaste de estos materiales.

Los ensayos se realizaron con un material compuesto estándar, 1060/ Al_2O_3 /15p, para las cargas de: 4,9; 32,4; 52 y 81,4 N. Manteniéndose las distancia total en 2000 m, condiciones ambientales similares y velocidad de deslizamiento de 2,7 m/s. Se grafican los resultados en la figura 6.1, donde las medidas de desgaste obtenidas a través de pesadas y a través de medidas de variación de longitud fueron convertidas en variación de volumen para ser comparadas, para la cual se utilizaron valores de densidad y diámetro de las mismas. Este gráfico puede interpretarse como un mapa en el sentido que le da Alpas, ver figura 2.1.

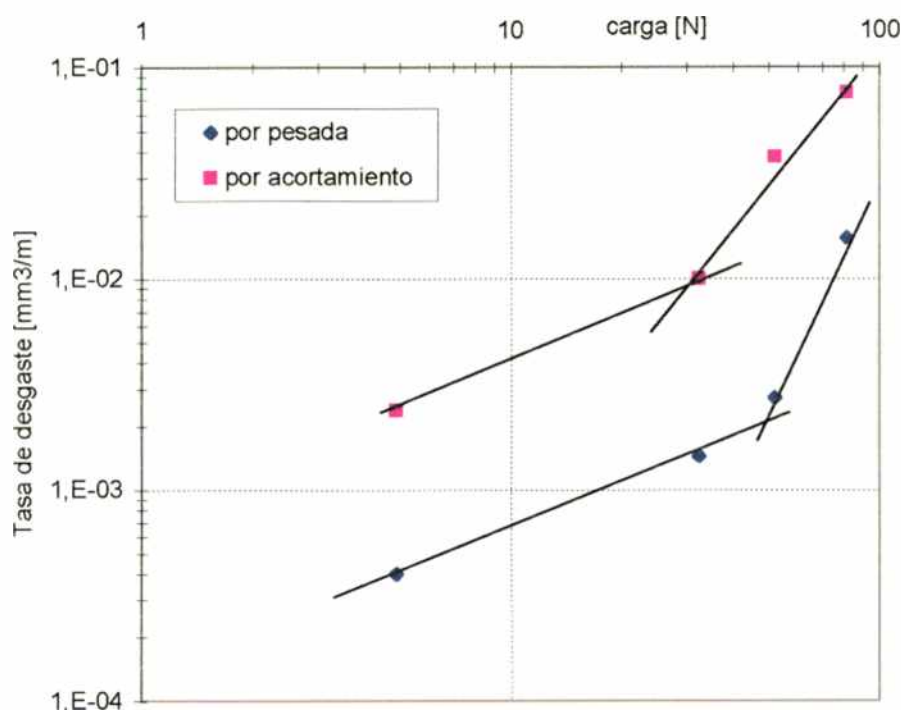


Figura 6.1: Mapa de tasa de desgaste versus Carga, para AA1060 / Al_2O_3 / 15p.
Tasa de desgaste obtenida por: (◆) diferencia de peso; (■) por acortamiento
En ambos casos se trasformaron a variación de volumen, en el caso de las medidas de pérdida de peso se empleo una densidad de 2880 kg/m^3

Este mapa permitió decidir la carga a la que se realizaron los ensayos con todos los materiales, con la premisa de comprender un régimen moderado para permitir repeticiones de los ensayos sobre la misma probeta del material, y en condiciones adecuadas para que todos los materiales presenten mecanismos similares y puedan ser comparados. El criterio utilizado para distinguir entre moderado y severo se basa, en

este caso, en las distintas tendencias observadas en el gráfico anterior, definiendo la transición en el lugar donde se produce el cambio de tendencia.

Así, con 81,4 N se observa un régimen severo, régimen III según Alpas, como puede verse en la figura 6.1, y puede confirmarse con el análisis de la superficie desgastada. El ensayo con 52 N puede considerarse como la carga crítica en la transición de moderado a severo. En cambio la carga de 32,4 N puede considerarse ya en el régimen II de Alpas, régimen moderado. Y la respuesta obtenida con una carga de 4,9 N también puede considerarse comprendida en un régimen de desgaste moderado.

Por lo tanto, para comparar los materiales y que ocurran, en lo posible, mecanismos de falla similares se seleccionó una carga de 32,4 N para realizar los ensayos en todos los materiales compuestos.

6.2. Repetibilidad y Controlabilidad del sistema en las condiciones seleccionadas

Debido a las características que poseen estos materiales es necesario evaluar qué magnitudes será utilizadas para medir el desgaste. Se pueden considerar dos tipos de medidas, la variación del peso y el acortamiento de la probeta. Debido a la ductilidad que poseen ambas matrices utilizadas, la medida de la variación de peso no distingue entre el material eliminado y aquel que es deformado plásticamente y conforma una rebaba. Rebaba que en estos materiales es muy variable en cuantía, y puede alcanzar valores de hasta cinco veces el valor de variación de peso medido. Por lo tanto, un fragmento de esta rebaba que se desprendiese podría influir apreciablemente en esta medida.

En cuanto a la variación de longitud o acortamiento, puede estar influenciada por la adherencia de material, ya de la contraparte o del mismo pin que vaya colocándose entre ellos. De hecho puede observarse en algunas probetas material incrustado en la zona del "borde de ataque". El material adherido conforma la denominada MML que contribuye a la resistencia al desgaste, pues forma una capa de elevada dureza en la superficie deslizante. El espesor de esta capa es variable en una misma probeta. En casos excepcionales alcanzó 200 μm , y en otras regiones era mas bien escasa o nula.

Considerando la importancia que tienen ambos fenómenos, la variación de masa y el cambio en las dimensiones, parece razonable tener en cuenta la dispersión de las medidas realizadas en cada caso.

Para ello se realizaron tres ensayos con un mismo material, AA1060/Al₂O₃/15p, en las condiciones de carga, distancia y velocidad de ensayo seleccionadas previamente y con la misma preparación que se utilizará en todas las probetas. Se midió la variación de peso con una balanza analítica con una apreciación de 0,0001 gramos y medidas de cambio de longitud con un calibre de 0,05 mm de apreciación.

En el caso de la variación de peso el error introducido por el instrumento es del 1,2 %, considerando el valor medio y la apreciación del instrumento; para la variación de longitud dicho error ascendía a 7,9 %.

La dispersión de los datos obtenidos se calcularon y cuantificaron a través del coeficiente de variación (cv).^[1, 2] Así, las medidas de variación de peso tuvieron un cv = 27,6 % y para las medias de variación de longitud el cv = 9,65 %, para un intervalo de confianza del 95 %, véase la figura 6.2. Por lo tanto hay menos dispersión en las medidas de variación de longitud frente las de pérdida de masa. Esto, junto con el

problema de las rebabas llevó a decidir que la medida y seguimiento del desgaste se realizará a través de medidas de variación de longitud.

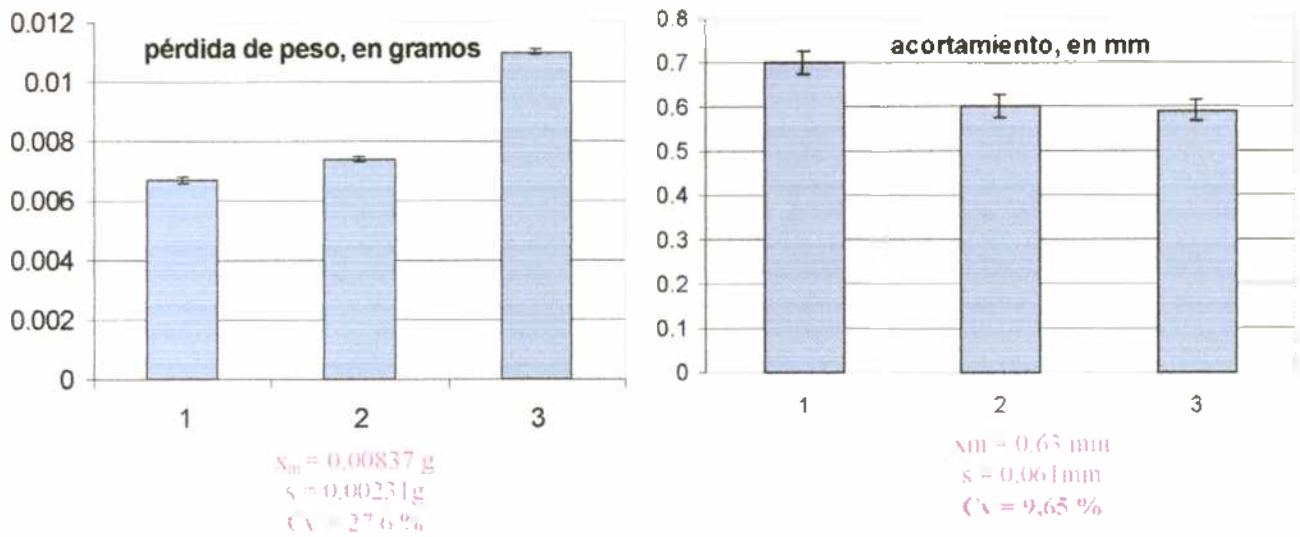


Figura 6.2: Comparación entre medidas de acortamiento y medidas de pérdida de peso, sobre tres probetas del mismo material ensayadas en las mismas condiciones.

$\bar{x}_m$: valor medio; s : desvío estándar; Cv : coeficiente de variación.

Las barras de error indican la apreciación del instrumento.

Dos métodos se utilizaron para realizar los ensayos, uno de ellos consiste en someter la probeta a un ensayo en forma continua hasta alcanzar la distancia total deseada, llamado *modo continuo*. El otro consiste en realizar interrupciones a distancias intermedias para tomar medidas y continuar hasta la distancia final, para hacer un seguimiento del desgaste, llamado *modo discontinuo*. Por lo tanto, se realizaron ensayos para determinar cuál de estos dos métodos se emplearán en los ensayos con todos los materiales, especialmente buscando diferencias en los resultados obtenidos por uno u otro método.

Se realizaron cinco ensayos adicionales en modo *continuo* hasta cinco distancias diferentes, un ensayo para cada distancia, sobre probetas diferentes del mismo material, AA1060 /Al₂O₃ /15p. Dichos ensayos se contrastaron con los tres ensayos realizados en modo *discontinuo*, mencionados anteriormente, utilizados para conocer la repetibilidad del sistema. Las comparaciones se muestran en la figura 6.3, donde ya se adopta como medida de desgaste la variación de longitud de las probetas.

En la figura 6.3 se observa que para las probetas desgastadas en modo discontinuo se obtienen diferentes curvas de progresión del desgaste. Estas variaciones pueden deberse a que se utilizaron diferentes probetas en cada caso. A pesar de esto, las diferencias tienden a minimizarse a los 2000 m, donde se indicó en el gráfico el valor promedio de los tres ensayos, con una (x). En el desgaste sufrido por las probetas en modo continuo, representado por círculos llenos (●), se refleja el distinto comportamiento de las probetas observados en los ensayos discontinuos, especialmente son más notorias a distancias deslizadas menores a 300 m. En cambio, para distancias mayores a los 300 m se observa una tendencia similar en el comportamiento de las probetas, que muestran una relación lineal entre el desgaste y la distancia deslizada. A los 2000 m se observa que el desgaste tiene un valor cercano al obtenido por el modo

discontinuo y comprendido en el intervalo de error considerando un intervalo de confianza del 95%.

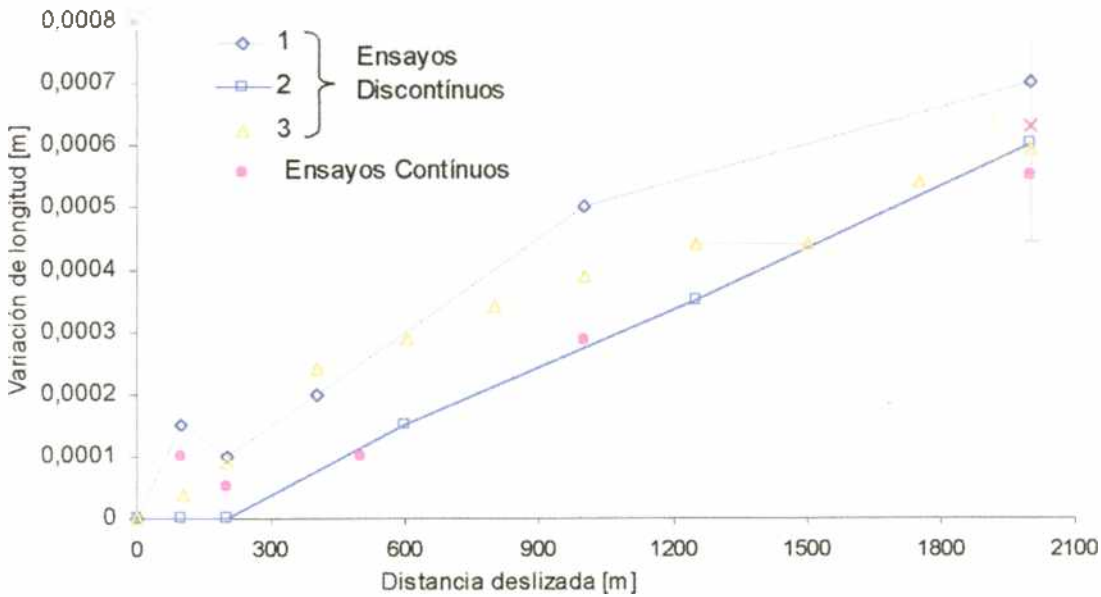


Figura 6.3: Comparación entre modos *continuos* y *discontinuos*, efectuados sobre el mismo material en similares condiciones.

Se indica, con una (x) el valor del desgaste promediado de las tres probetas en ensayos discontinuos a 2000 m, y su intervalo de error.

En vista que las diferencias entre ambos modos son debidas a las probetas, y que a los 2000 m se minimizan las diferencias, se decidió realizar los ensayos en modo discontinuo para hacer un seguimiento de la evolución del desgaste y utilizar para las comparaciones las medidas de desgaste a los 2000 m.

Respecto al seguimiento de la evolución de desgaste debe hacerse la aclaración de que la apreciación del calibre utilizado para tomar las medidas de variación de longitud, 0,05 mm, es del mismo orden que las variaciones de longitud entre intervalos sucesivos de 0,05 en promedio.

Una vez definida la manera en que se medirá el desgaste y la modalidad del ensayo se procedió a ensayar a los diferentes materiales. Las medidas de dispersión se consideraron similares entre todos los materiales, tal como lo recomiendan las normas ASTM: E 122-97.^[3]

6.3. Medidas de desgaste

6.3.1. Resultados

Sobre cada probeta se realizaron dos ensayos de desgaste en las mismas condiciones. El valor promedio de ambos ensayos junto con la barra de error, considerando una dispersión similar a la obtenida en AA1060 /Al₂O₃/15p proporcional al valor medio, se muestra en la figura 6.4.

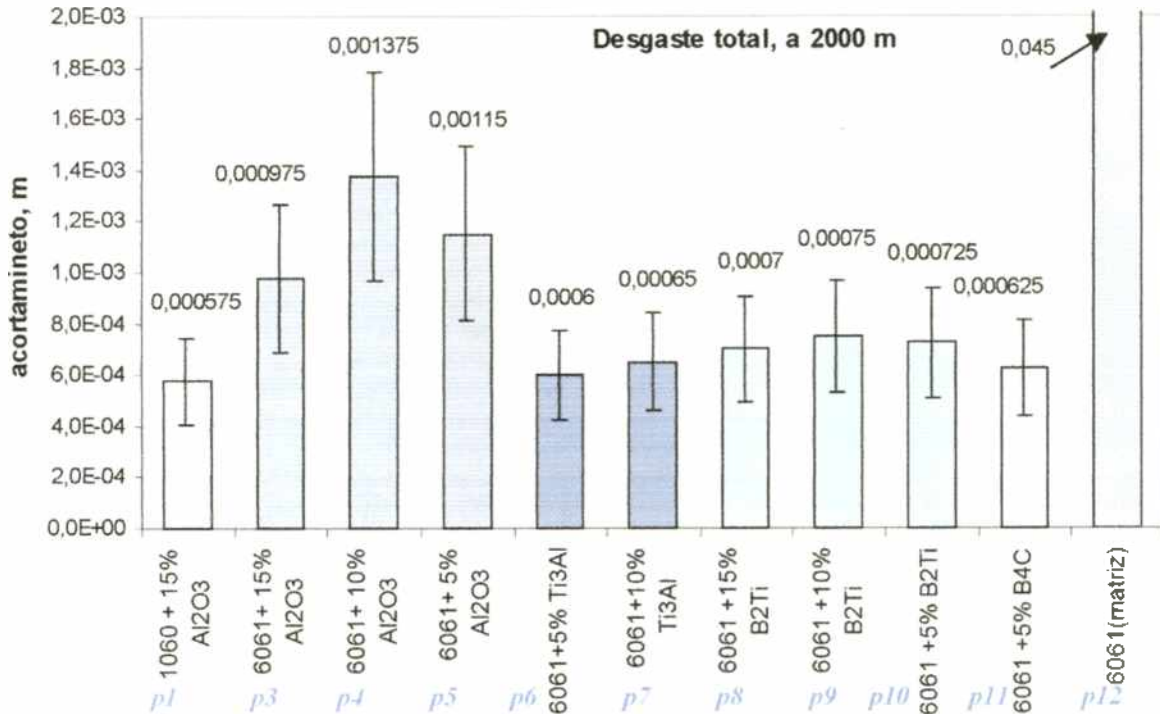


Figura 6.4: Comparación del desgaste total a los 2000 metros, expresado en metros. Entre los distintos materiales ensayados.

Las barras de error indican un intervalo de error con una confianza del 95 %.

En dicha figura se aprecia que el desgaste total sufrido por los materiales compuestos es 2 (dos) órdenes de magnitud menores que las encontradas en la matriz sola. Es preciso aclarar que las probetas de materiales compuestos fueron ensayados hasta 2000 metros, pero el material monolítico fue desgastado sólo hasta 245 metros pues el desgaste era muy grande para la configuración de la máquina de ensayo, por lo tanto el valor que se muestra en el gráfico es una extrapolación a 2000 metros.

Destacan por el mayor desgaste los materiales compuestos de AA6061 reforzados con Al₂O₃, debe recordarse que estos refuerzos tienen un tamaño que es un orden de magnitud menor que los demás refuerzos, que puede ser la razón de la diferencia en los resultados.

Debido a la gran dispersión en las medidas de desgaste es necesario tener en cuenta las barras de error, con un intervalo de confianza del 95%, al momento de hacer las observaciones respecto a la resistencia de los materiales

En la figura 6.5 se muestra la evolución del desgaste característica de cada probeta. En ella se puede observar que las probetas poseen un periodo de “running in”, como se mencionó en la revisión bibliográfica, durante los primeros metros deslizados luego del cual alcanzan un estado “Estacionario”, identificado por una tendencia lineal en la relación desgaste vs. distancia deslizada. En los casos de las probetas: p3, p4 y p5 la etapa lineal estacionaria presenta mayor pendiente en comparación con las demás probetas de materiales compuestos. En el caso de la probeta de material monolítico el desgaste fue muy marcado, por lo tanto se interrumpió el ensayo a los 245 metros.

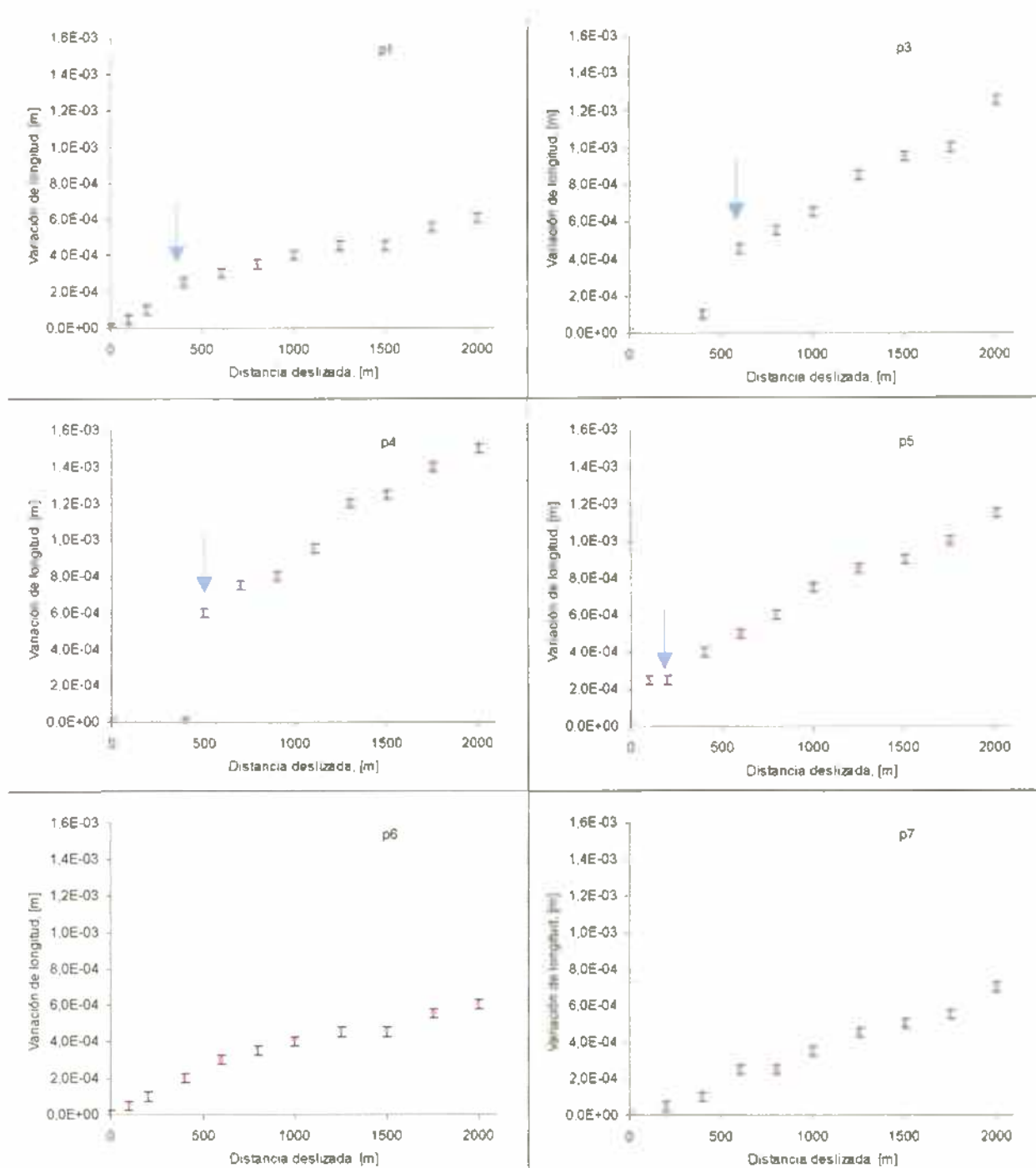


Figura 6.5: Gráficos de la evolución del desgaste en las probetas de materiales compuestos y de monolíticos. La escala es la misma para todos los casos de materiales compuestos, las barras de error indican la apreciación del instrumento.

Las flechas indican el fin de la etapa transitoria: "running in".

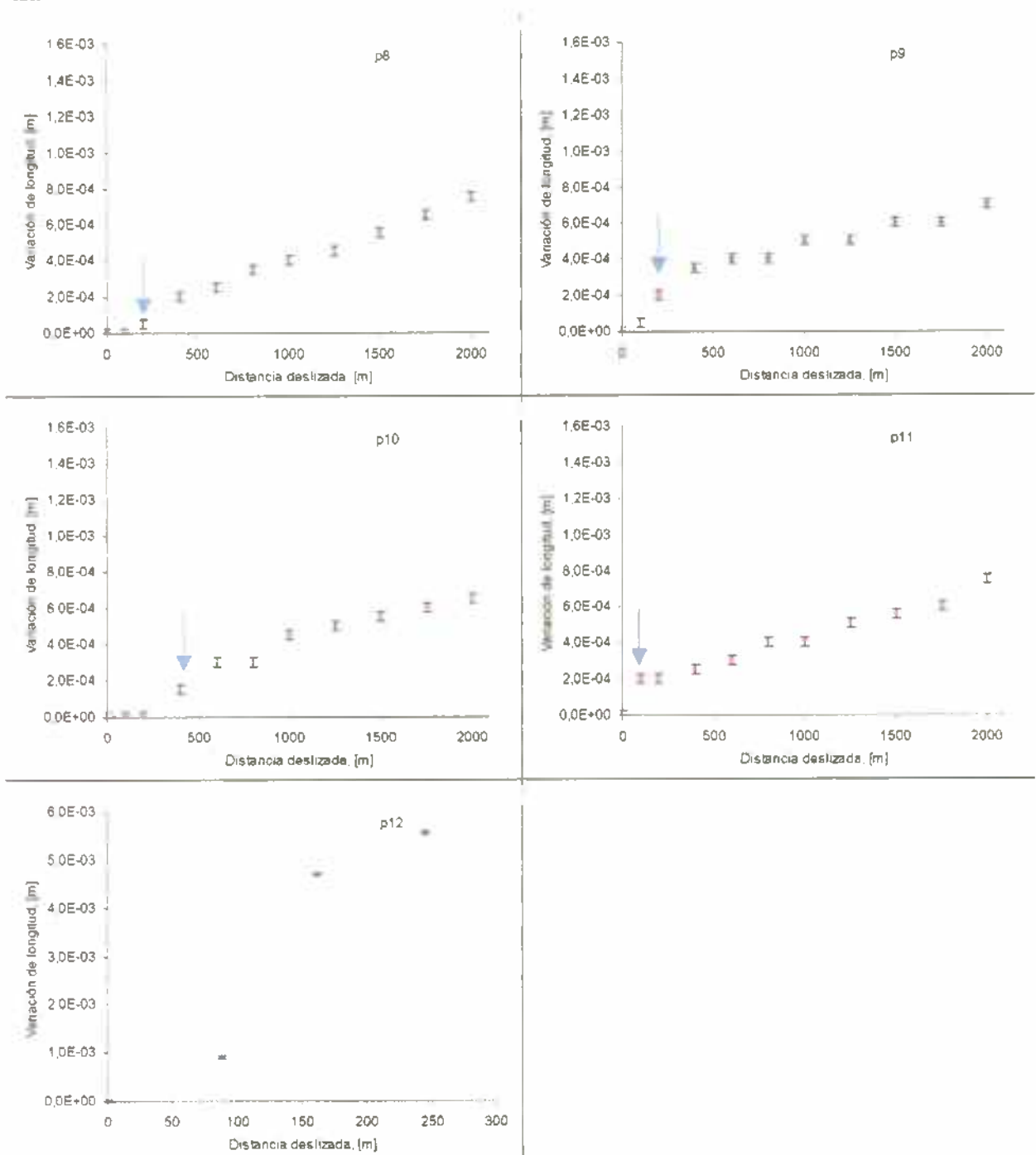


Figura 6.5: continuación, evolución del desgaste de las probetas ensayadas
Las flechas indican el final de la etapa transitoria: "running in"

6.3.2. Análisis de los resultados de desgaste

Los materiales reforzados con partículas de B_2Ti presentan prácticamente el mismo desgaste, indistintamente del porcentaje de refuerzo, tal como se ve en la figura 6.4. Se observa también que los materiales reforzados con Ti_3Al tampoco presentan diferencia en el desgaste en relación con el porcentaje de refuerzo.

Si se comparan las familias de materiales reforzados con B_2Ti , Ti_3Al , B_4C y $AA1060 + Al_2O_3$ puede verse que la diferencia en el desgaste es muy ínfima, destacándose ligeramente los reforzados con B_2Ti con un mayor valor, pero de todos modos la superposición de los intervalos de dispersión es muy importante.

Entre los materiales de matriz AA6061 reforzados con Al_2O_3 , no hay sustento estadístico para establecer una relación entre la proporción de refuerzo y el desgaste, tal como se observa en la figura 6.4.

Los materiales AA6061 / Al_2O_3 presentan un mayor desgaste respecto a los otros materiales, aunque la diferencia es pequeña puede deberse al menor tamaño que presentan estos refuerzos, tal como lo señalaron otros investigadores.^[4, 5, 6] En la figura 6.5 se observa que las probetas p3, p4 y p5, compuestas por AA6061/ Al_2O_3 con 15, 10 y 5 % de refuerzo, la etapa lineal posee una pendiente dos veces mayor que en las otras probetas. Esto indicaría que habría una diferencia en la resistencia del desgaste durante esa etapa. También se observa un salto de gran magnitud en el desgaste de la probeta p4, a los 500 metros, que no fue observado en las demás probetas. Esto será discutido en mayor profundidad en el capítulo 8, al relacionar las características morfológicas observadas en las probetas, presentadas en el capítulo 7, con la resistencia al desgaste de las distintas probetas.

Respecto a la influencia que puede tener el tipo de refuerzos, en estas condiciones no puede apreciarse diferencia alguna entre los diferentes refuerzos de tamaños similares, por ejemplo, mirando la figura 6.4, el desgaste sufrido por la probeta p11, con 5% de C_4B de 10 μm aprox, sufre un desgaste similar a la probeta p10, con 5% de B_2Ti de 10 μm aprox, y también similar al de la probeta p6, con 5% de Ti_3Al de 25 μm aprox, e incluso la probeta p1, con 15% de Al_2O_3 de 10 μm aprox.

La gran diferencia entre las tasas de desgaste de las probetas de materiales compuestos y la del material monolítico puede deberse a diferentes regímenes de desgaste entre estas probetas, si se utilizan los mapas de desgaste confeccionados por Alpas y Wilson^[7] para AA356 y AA356/ SiC / 20p, éste último se mostó en 2.3, teniendo en cuenta que las geometrías de los sistemas son diferentes y los materiales también, puede apreciarse que para nuestras condiciones de trabajo: velocidad de deslizamiento de 2.7 m/s y carga aplicada de 32.4 N Alpas y Wilson encuentran un régimen severo para el material monolítico y un régimen moderado para el material compuesto.

Para realizar una discusión más completa de las causas de estas similitudes entre los distintos materiales compuestos, es necesario realizar el estudio de los elementos que caracterizan el desgaste de estos materiales, a saber: la superficie desgastada, el material transferido por adhesión, la subsuperficie y los fragmentos producidos por desgaste.

Referencias de este Capítulo

- [1] Area, M.C. y Schmalko, M.E. – “Estadística para Ingenieros”, Ed. Universidad Nacional de Misiones, 1995.
- [2] Box, G.E. – “Estadística para Investigadores”, Ed. Reverte, 1999.
- [3] Standard Practice for Choice of sample size to estimate the average for a characteristic of a lot or Process - ASTM E 122_97. (1999) Annual Book of ASTM Standards, vol 14.02
- [4] Hosking, F.M., Folgarportillo, F., Wunderlin, R. And Mehrabian, R.- Composites of aluminum alloys: fabrication and wear behaviour. - J.Mater. Sci., 17 (1982) 477-498.
- [5] Lian, Y. N.; Ma, Z.Y.; Li, S.Z.; Bi, J. - Effect of particle size on wear behaviour of SiC particulate-reinforced aluminum alloy composites - J. Mat. Sci. Letters 14 (1995) 114-
- [6] Alpas, A.T.; Zhang, J.- Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites – Metall. Mat. Trans. A, 25 (1994) 969-983.
- [7] Wilson, S.; Alpas, A.T. - Wear mechanism maps for metal matrix composites - Wear, 212 (1997) 41-49

CAPÍTULO 7

CARACTERIZACIÓN DEL DESGASTE

Para realizar la caracterización del desgaste se realizó el estudio posterior al ensayo de los siguientes ítem:

- superficie desgastada,
- capa mecánicamente mezclada, (MML)
- subsuperficie,
- fragmentos,

en todos los materiales ensayados. En títulos sucesivos se detallarán las observaciones realizadas en cada uno de ellos.

7.1. La Superficie Desgastada

En las superficies de desgaste de todos los materiales compuestos estudiados se pueden encontrar características similares en cuanto a morfología de las fallas superficiales. Las fallas observadas son las siguientes:

- Surcos,
- Cráteres,
- Fisuras,
- Material adherido

Otras características que pueden destacarse fueron: la presencia de hierro detectada mediante EDAX, no se observaron partículas de refuerzos, expuestos sobre la superficie, a pesar de los tamaños relativamente grande de los mismos y de una búsqueda exhaustiva utilizando SEM y EDAX.

A continuación se analizarán las superficies desgastadas agrupando a los materiales por familias de refuerzos.

7.1.1. Materiales Reforzados con Alúmina, Al_2O_3

Se ensayaron tres tipos de compuestos conteniendo 5%, 10% y 15 % de partículas de Al_2O_3 con matriz de AA6061 y un compuesto con 15 % de Al_2O_3 con matriz de AA1060, tal como se detalló en la tabla 5.2.

La superficie desgastada de las probetas de estos materiales presenta en general todas las fallas enunciadas arriba. Las más abundantes fueron los surcos de abrasión, anchos y de poca profundidad, tal como se muestra en las figuras 7.1.a, 7.2.a, 7.3.a, y 7.4.a. En segundo lugar se destaca la cantidad de material adherido, el cual apareció en todas las probetas reforzadas con alúmina.

Respecto a las fisuras en la superficie, fueron observadas solamente en la probeta de AA6061 / Al_2O_3 / 10p, en sentido perpendicular a la dirección de deslizamiento y de corta longitud, ver la figura 7.3.a. En las demás probetas reforzadas con alúmina no se observaron fisuras.

En lo referente a los cráteres se encontraron principalmente en las probetas con 15% de refuerzo, con las matrices de AA1060 y AA6061, ver las figuras 7.1.a y 7.2.a; estos cráteres son de gran tamaño y están distribuidos sobre toda la superficie sin preferencia sobre una zona en particular. En cambio, en las otras probetas no fueron abundantes, observándose solamente en algunos sectores de la superficie y de tamaño pequeño, por ejemplo en la figura 7.3.b se observan cráteres cercanos a la zona de salida.

En todas las probetas se encontró gran cantidad de material acumulado en la zona de salida, formando rebaba. Ver figuras 7.1.b, 7.2.b, 7.3.b, y 7.4.b. Las cuales se caracterizan por mostrar sucesivas capas de material que, según sus características morfológicas, anteriormente formó parte del material ubicado en la superficie de deslizamiento, esto es claramente observado en las figuras 7.1.b, 7.2.b. y 7.3.b.

No fue posible encontrar partículas de refuerzo en las superficies de contacto de estos materiales, ni al microscopio óptico ni en el electrónico.

En las figuras 7.1.c, 7.2.c, 7.3.c y 7.4.c se muestran espectros de EDAX representativos de la superficie deslizada de cada probeta, en todos ellos el pico de hierro es destacado sobre el fondo y en algunos casos son tan importantes como los picos de aluminio, ver figuras 7.2.c y 7.3.c.

Tabla 7.1: Referencia a las probetas reforzadas con Alúmina.

Probeta	Material	Número de figura
P1	AA1060 / Al_2O_3 / 15p	7.1: a, b, c
P5	AA6061 / Al_2O_3 / 5p	7.3: a, b, c
P4	AA6061 / Al_2O_3 / 10p	7.3: a, b, c
P3	AA6061 / Al_2O_3 / 15p	7.2: a, b, c

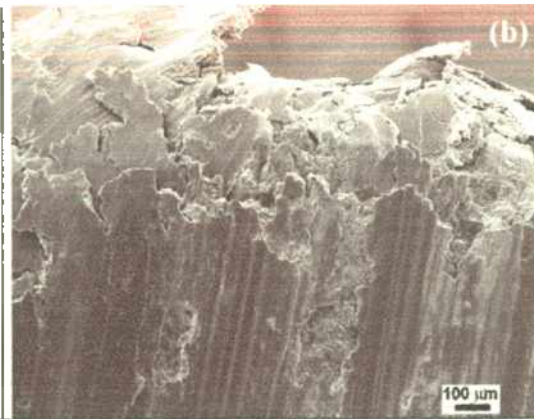
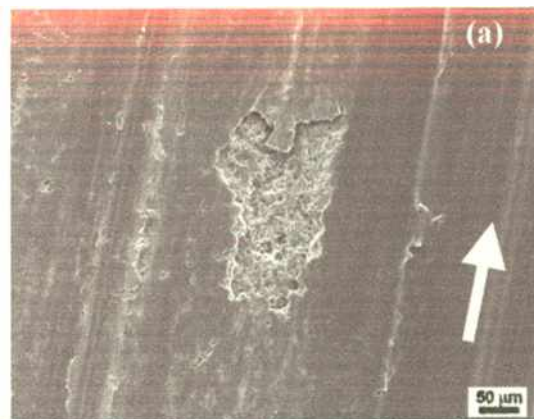


Figura 7.1

P1: AA1060 / Al_2O_3 / 15 p

a) Zona de la superficie desgastada donde se ve surcos de desgaste por abrasión, y un cráter. La flecha blanca indica la dirección de deslizamiento.

b) Borde de salida, donde se ve material prendido que forma rebaba

c) Espectro de una zona de la superficie deslizada, se ven picos de Fe (material adherido proveniente de la contraparte), Al (matriz) y Au (material utilizado para la observación en el microscopio electrónico.)

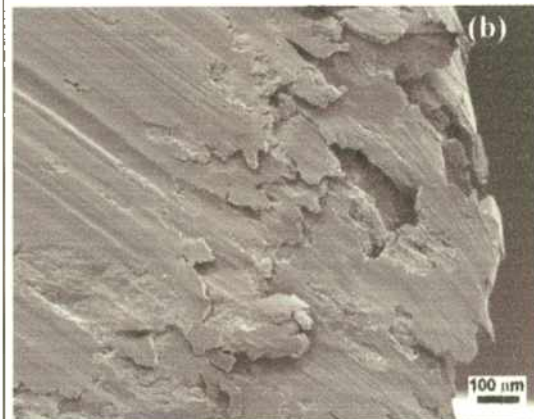
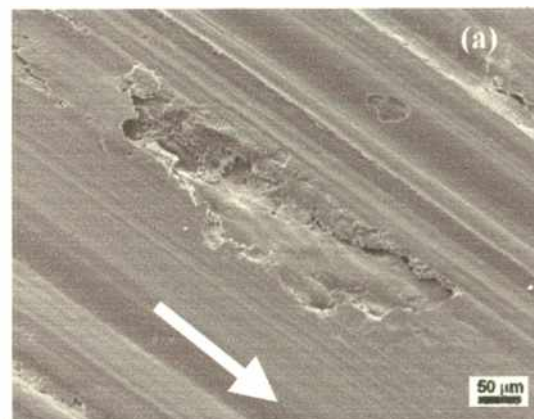
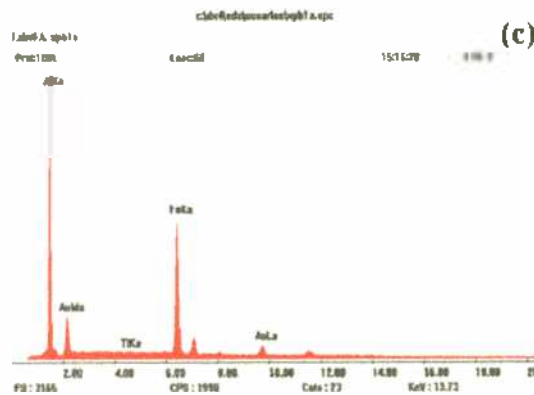


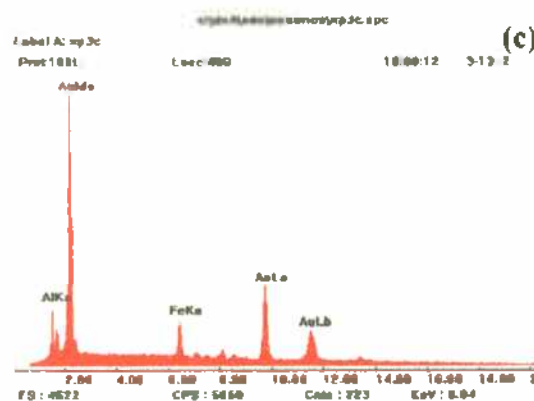
Figura 7.2

p3: AA6061 / Al_2O_3 / 15 p

a) Zona de la superficie desgastada donde se ve un cráter en rodeado de surcos de abrasión.

b) Borde de salida

c) Espectro de una porción de la superficie desgastada, se ven picos de Fe (material adherido proveniente de la contraparte), Al y Au.



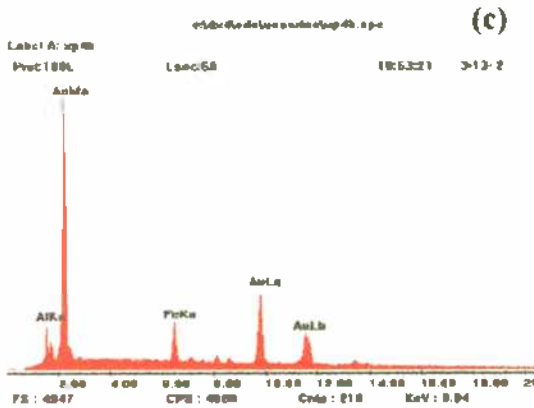
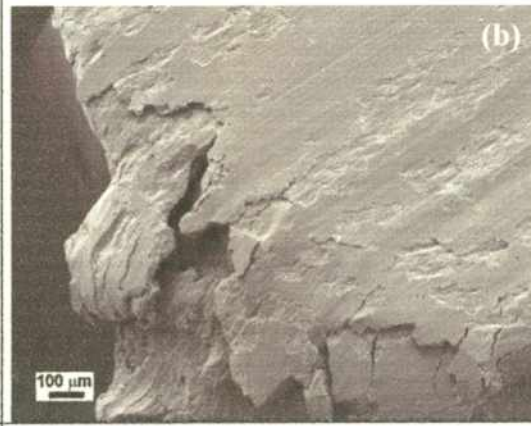


Figura 7.3

p4: AA6061 / Al_2O_3 / 10 p

- a) Superficie desgastada donde se observan los surcos debidos a abrasión, material adherido y fisuras superficiales en forma transversal a la dirección de deslizamiento junto a la marca F.
- b) Borde de salida mostrando rebaba, además se observan cráteres
- c) Espectro de una zona de la superficie desgastada, se ven picos Fe, Al y Au.

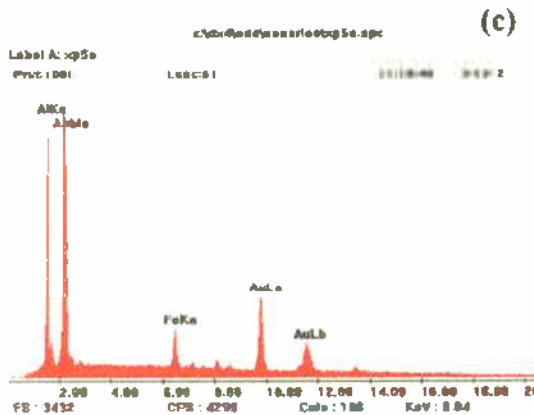
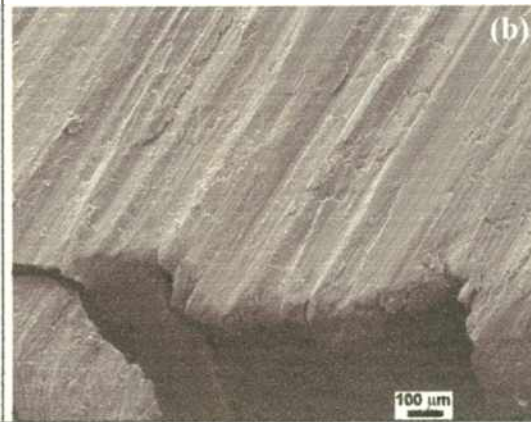


Figura 7.4

p5 AA6061 / Al_2O_3 / 5 p

- a) Surcos de abrasión.
- b) borde de salida
- c) Espectro de una zona de la superficie desgastada, se ven picos de Fe, Al y Au

7.1.2. Materiales Reforzados con Intermetálico Ti_3Al

Se ensayaron dos tipos de compuestos conteniendo 5% y 10 % de partículas de Ti_3Al en una matriz de AA6061, tal como se detalló en la tabla 5.2. Para todos los casos la superficie desgastada presenta surcos de abrasión en la dirección del deslizamiento, como pueden verse en las figuras 7.5 y 7.6. Los surcos son anchos, de paredes bajas y fondo liso. No habiendo diferencia apreciable entre diferentes probetas a pesar de la diferencia en el volumen de refuerzo.

Las probetas también presentan cráteres en la superficie desgastada de unos 100 μm , ver la figura 7.5.b, excepcionalmente se encuentran algunos de forma alargada llegando a los 400 μm en la dirección de mayor longitud, mostrado en la figura 7.6.a. La distribución de los cráteres no sigue ninguna tendencia.

Material adherido fue observado en toda la superficie de contacto, presentándose zonas que no fueron cubiertas y que mostraban surcos debido a abrasión en una etapa anterior, ver figura 7.5.a. En las figuras 7.5.c y 7.6.c se muestran dos espectros de EDAX tomados en la superficie desgastada, de cada una de las probetas, en ellos se destaca el pico del hierro, indicando que hubo transferencia de material de la contraparte.

Se observaron escasas fisuras superficiales en la probeta reforzada con 5%, ver la figura 7.5.a, en la otra no se encontraron. No fueron observadas partículas de refuerzo en la superficie desgastada de las probetas, buscadas por medios ópticos y electrónicos mediante exploración con EDAX, buscando la presencia de titanio. Aunque, como se ven en los espectros de las figuras 7.5.c y 7.6.c se detectó titanio disperso en la superficie, pero no como partículas de refuerzo del tamaño original, 25 μm aprox.

Las probetas de ambos materiales presentaron abundante rebaba en la zona de salida, ver figura 509.b y 510.b, así como material incrustado en la zona de entrada.

Tabla 7.2: Referencia a las probetas reforzadas con Intermetálico Ti_3Al .

Probeta	Material	Número de figura
P6	AA6061 / Ti_3Al / 5 p	7.5: a, b, c
P7	AA6061 / Ti_3Al / 10 p	7.6: a, b, c

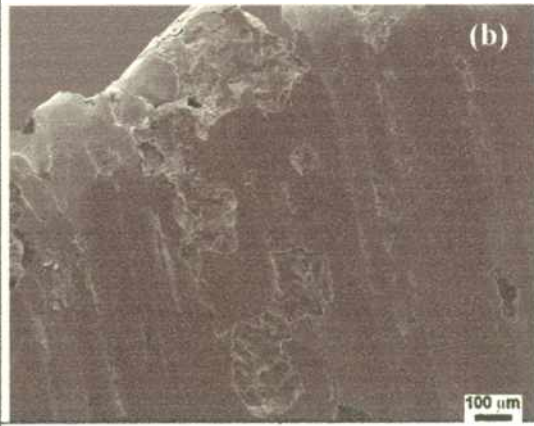
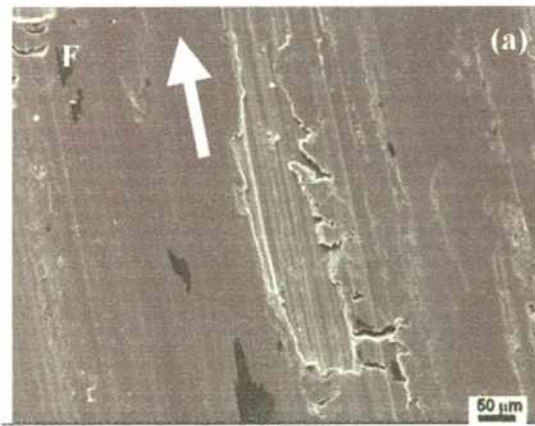


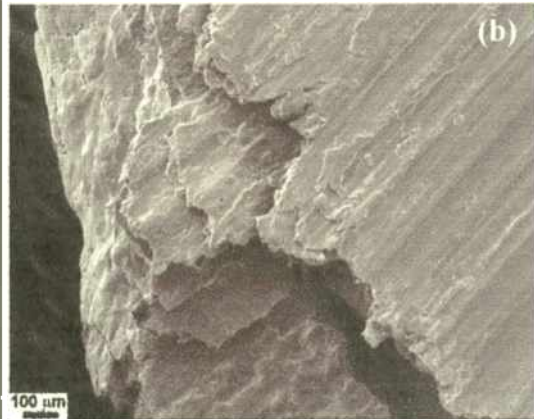
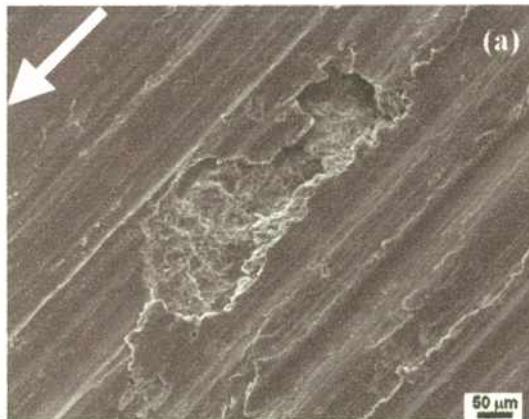
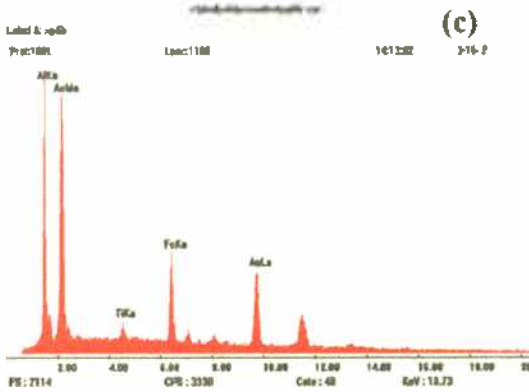
Figura 7.5

P6: AA6061 / Ti₃Al / 5 p

a) Superficie anterior sin cubrir mostrando surcos de abrasión anteriores, y fisuras transversales junto a la marca F.

b) Zona de salida, se muestra la rebaba, y algunos cráteres.

c) Espectro de una porción de la superficie desgastada, picos de Fe (contraparte), Al (matriz), Ti (refuerzo) y Au



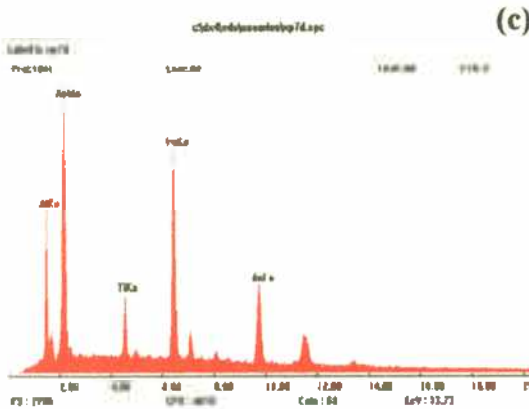
Figuras 7.6

p7 AA6061 / Ti₃Al / 10 p

a) Zona de la superficie desgastada donde se ve un cráter grande, el fondo del cráter no presenta surcos de abrasión. Pero si se ven surcos en la zona circundante.

b) Rebaba presente en este material, puede observarse la gran cantidad de material adherido al pin

c) Espectro de un sector de la superficie desgastada de la probeta, se ven picos de Fe (material de la contraparte adherido al pin), Al (matriz), Ti (refuerzo) y Au.



7.1.3. Materiales Reforzados con Diboruro de Titanio, B₂Ti

Se ensayaron tres diferentes compuestos conteniendo 5%, 10% y 15 % de partículas de B₂Ti con matriz de AA6061, tal como se detalló en la tabla 5.2.

En la superficie desgastada de todas las probetas se observaron todas las fallas mencionadas anteriormente. Los más importantes fueron los surcos de abrasión, anchos y de poca profundidad, observados en todos los casos, sin encontrar diferencia notable con las distintas proporciones de refuerzo. Ver figuras 7.7.a, 7.8.a y 7.9.a.

Los cráteres observados son de tamaño pequeño, ver figura 7.9.a, se observaron en todas las probetas y no se encontró alguna tendencia en la ubicación de los mismos, sobre la superficie desgastada.

Se encontraron fisuras superficiales, con orientaciones perpendiculares a la dirección de deslizamiento, especialmente en la probeta más reforzada, ver figura 7.8.a y 7.9.b.

Material adherido fue encontrado en toda la superficie en contacto, aunque hubo zonas en donde no se cubrió totalmente con material nuevo, ver la figura 7.8.a, observándose los surcos formados en etapas anteriores. También se detectó hierro, mediante EDAX, y se tomaron lecturas representativas de la superficie de cada una de las probetas, mostradas en las figuras 7.7.c, 7.8.c y 7.9.c, donde se destacan los picos de hierro y los picos de titanio. El titanio detectado por EDAX no pudo ser vinculado a partículas de refuerzo iniciales, B₂Ti de 10 µm, en la superficie desgastada, pues el titanio detectado estaba disperso de manera homogénea en la superficie desgastada.

Respecto a material adherido a en el borde de salida formando rebaba, fue encontrado en todos los casos y en cantidad abundante. Ver figuras 7.7.b, 7.8.b y 7.9.b.

Tabla 7.3: Referencia a las probetas reforzadas con Diboruro de Titanio.

Probeta	Material	Número de figura
P10	AA6061 / B ₂ Ti / 5 p	7.7: a, b, c
P9	AA6061 / B ₂ Ti / 10p	7.8: a, b, c
P8	AA6061 / B ₂ Ti / 15p	7.9: a, b, c

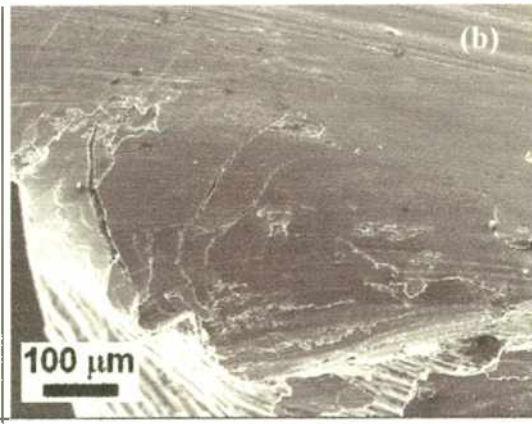
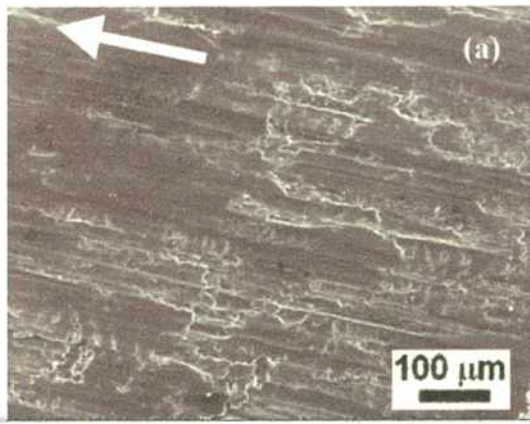


Figura 7.7

P10: AA6061 / B₂Ti / 5p

a) Mostrando surcos de abrasión y material adherido

b) Borde de salida

c) Espectro de una porción de la superficie desgastada del material, se ven picos de Fe (material de la contraparte adherido al pin), Al (matriz), Ti (refuerzo) y Au

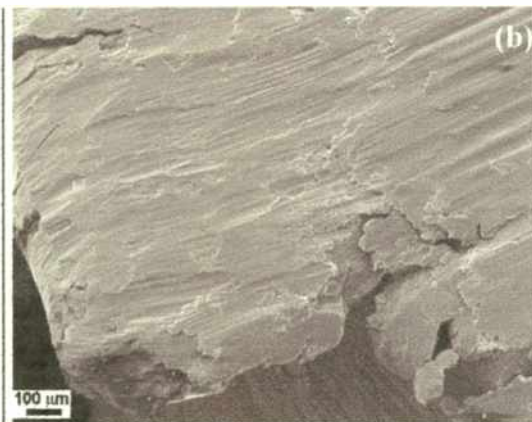
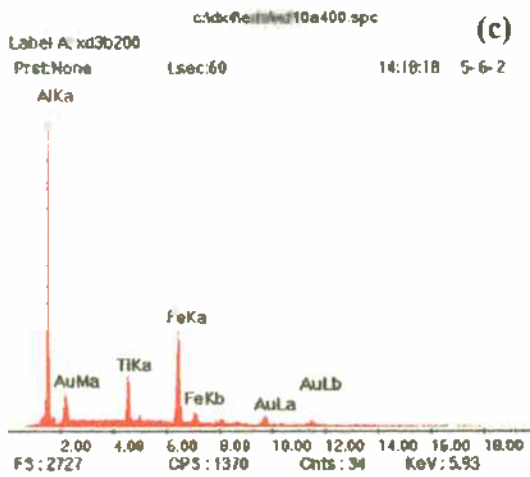


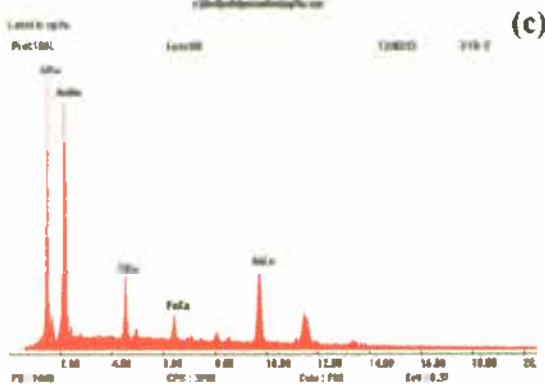
Figura 7.8

p9: AA6061 / B₂Ti / 10 p

a) Mostrando surcos de abrasión y material adherido, se observan fisuras junto a la marca F.

b) Borde de salida

c) Espectro de una porción de la superficie desgastada del material, se ven picos de Fe (material de la contraparte adherido al pin), Al (matriz), Ti (refuerzo) y Au



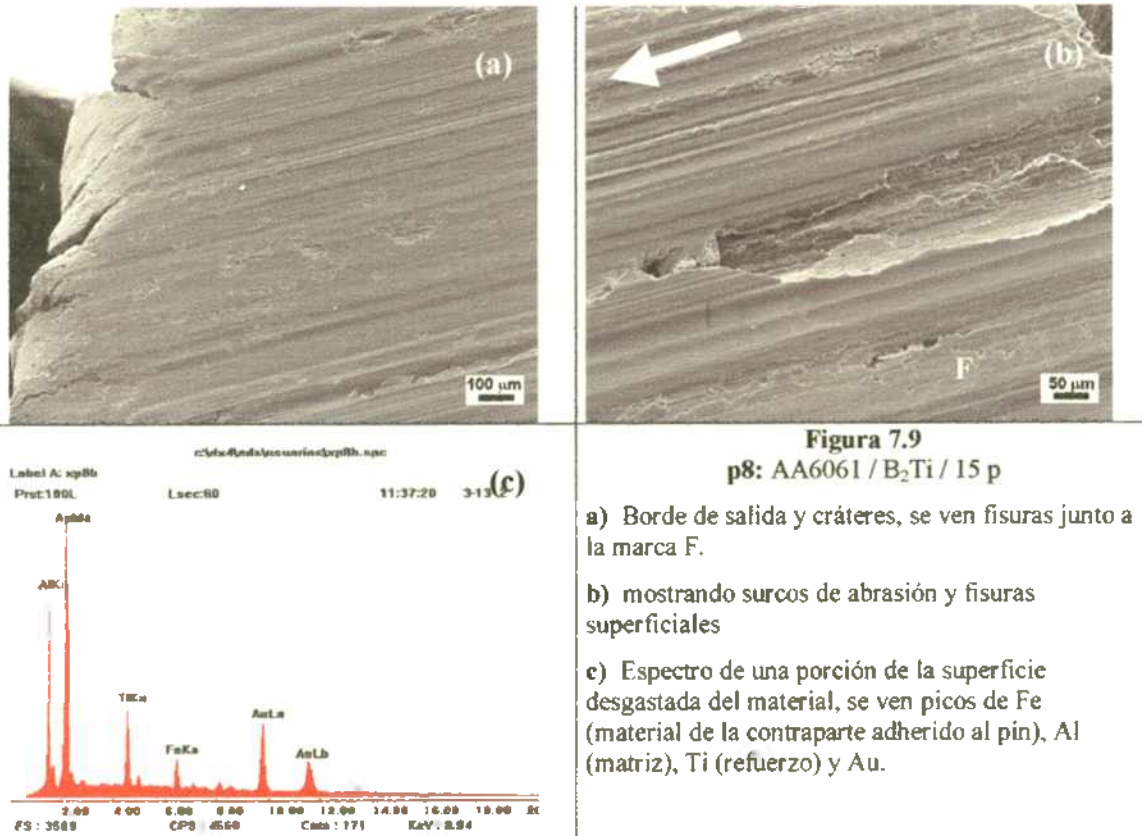


Figura 7.9
p8: AA6061 / B₂Ti / 15 p

- a) Borde de salida y cráteres, se ven fisuras junto a la marca F.
- b) mostrando surcos de abrasión y fisuras superficiales
- c) Espectro de una porción de la superficie desgastada del material, se ven picos de Fe (material de la contraparte adherido al pin), Al (matriz), Ti (refuerzo) y Au.

7.1.4. Material Reforzado con Carburo de Boro B₄C

La probeta de material compuesto reforzado con Carburo de Boro fue obtenida y ensayada solamente con el 5% de volumen de refuerzo.

La superficie desgastada de esta probeta presentó surcos de desgaste debidos a abrasión, anchos y de escasa profundidad, siguiendo la dirección de deslizamiento y mostrados en las figuras 7.10.a y 7.10.b.

La superficie también presentó fisuras superficiales transversales a la dirección de deslizamiento, mostradas en la figura 7.10.b. Se observó escasa cantidad de cráteres pequeños y ningún cráter grande.

En la figura 7.10.d se muestra el espectro EDAX de una porción representativa de la superficie desgastada, en ella se ve el pico de hierro, que indica adherencia de material de la contraparte, también en la figura 7.10.a se observa material adherido que no cubrió completamente la superficie, ya que se observa surcos de abrasión formados en etapas anteriores.

No pudieron detectarse partículas de refuerzo del tamaño inicial, 10 µm, ni por medios ópticos ni electrónicos. La búsqueda mediante EDAX no resulta efectiva ya que las señales de los componentes del refuerzo, carbono y boro, no son detectadas por los sensores disponibles.

Material adherido formando rebaba fue observado y en mayor proporción que las demás probetas de materiales compuestos, ver la figura 7.10.c y la figura 1.10.b.

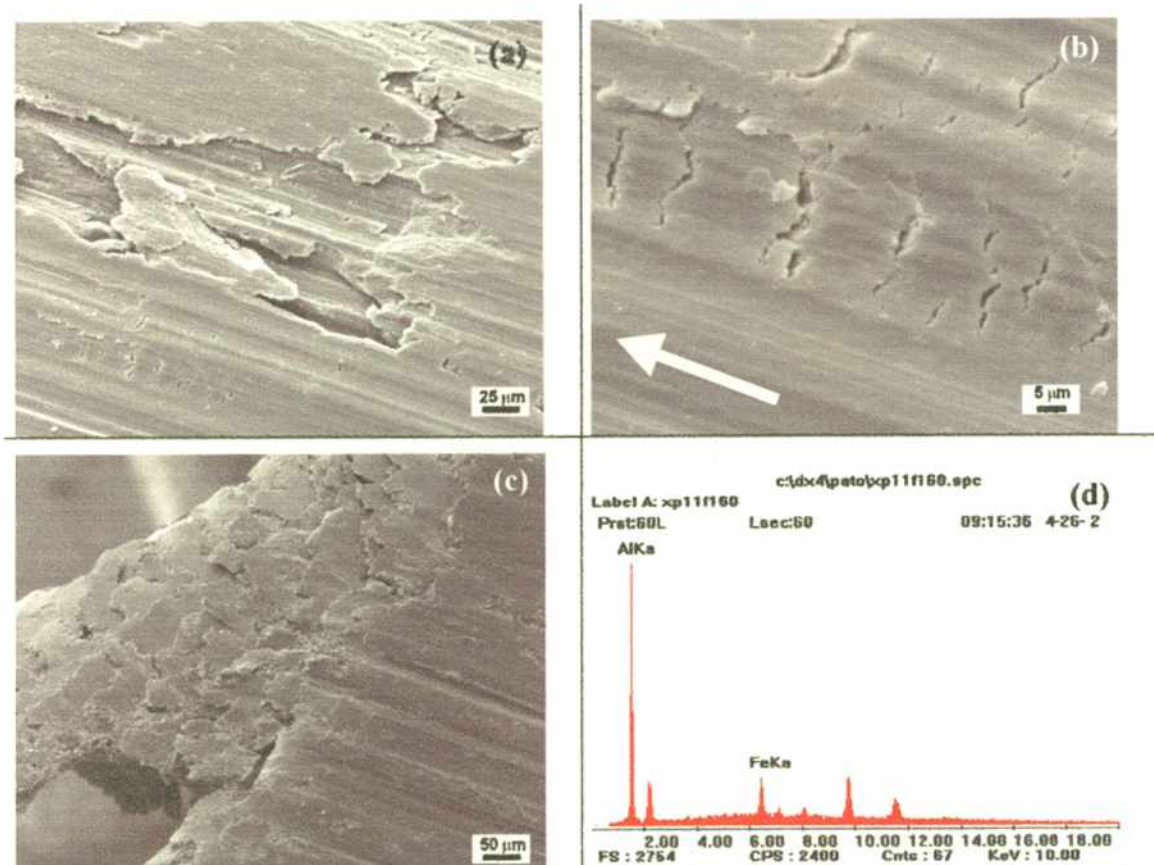


Figura 7.10
p11: AA6061 / B₄C / 5p

- a) Superficie desgastada donde se muestra surcos de desgaste, material adherido y zonas sin cubrir donde se observan surcos de pasadas anteriores
- b) Imagen aumentada de la anterior destacando las fisuras superficiales, en dirección transversal a la dirección de deslizamiento
- c) Rebaba ubicada en el borde de salida de la probeta
- d) Espectro de una porción de la superficie desgastada de la probeta, se ven picos de Fe (material de la contraparte adherido al pin), Al (matriz), Ti (refuerzo) y Au.

7.1.5. Material sin Reforzar, AA6061

Esta probeta fue desgastada solamente hasta una distancia de 245 metros. De todos modos se pueden ver en la superficie desgastada abundante daño. La morfología de la superficie desgastada fue muy diferente de la observada en los materiales compuestos, descrito anteriormente en este trabajo.

La superficie no es lisa y suave, sino que presenta un aspecto irregular desgarrada en la dirección de deslizamiento, mostrada en la figura 7.11.a, no se observaron surcos de abrasión, ni cráteres

Se realizó un barrido de la superficie desgastada para buscar hierro, mediante EDAX, pero no se detectó en esta probeta.

El material adherido en el borde de salida era abundante, ver la figura 7.11.b, además presentaba material incrustado en el borde de ataque como se muestra en la figura 7.11.c.

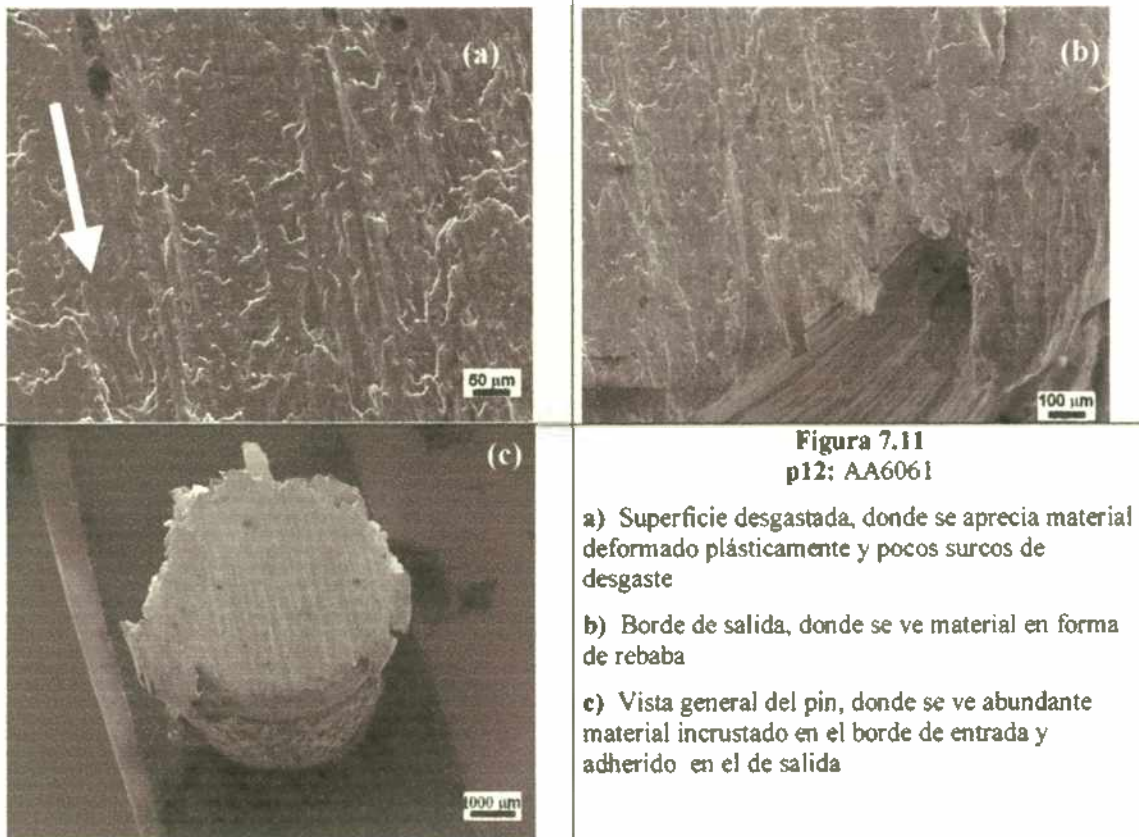


Figura 7.11
p12: AA6061

- a) Superficie desgastada, donde se aprecia material deformado plásticamente y pocos surcos de desgaste
- b) Borde de salida, donde se ve material en forma de rebaba
- c) Vista general del pin, donde se ve abundante material incrustado en el borde de entrada y adherido en el de salida

7.1.6. Análisis y Discusión Sobre la Superficie Desgastada

Tal como se mostró en las figuras 7.1 a la 7.11, la superficie desgastada de las probetas de materiales compuestos, presentó características muy similares en todos los casos, independientemente del tipo y proporción de refuerzo. En la tabla 7.4 se resumen las características observadas en la probeta de material. Las características observadas fueron destacadas ya por diversos autores en trabajos relacionados con materiales compuestos^[1-6].

Los denominados surcos de abrasión, que siguen la dirección de deslizamiento, fueron observados en materiales monolíticos en los 50^{'[7]} y más recientemente Kato et al.^[8,9] han estudiado lo que denominaron micromecanismos de desgaste abrasivo, donde estos mecanismos se diferencian en la manera de remover el material al producirse la abrasión en una sola pasada. Sin embargo, en situaciones de múltiples pasadas Kato no explica la manera de diferenciar entre los micromecanismos que actuaron sobre surcos ya formados, tan solo se puede decir que hubo abrasión pero no la intensidad de la misma.

Tabla 7.4: Resumen de las características observadas en la superficie desgastada de las probetas.

Probeta	Surcos de abrasión	Figuras Transv. a la dir. de desliz.	Cráteres	Material adherido en la superficie	Hierro en la superficie	Refuerzos en la superficie	Rebaba
AA1060 / Al ₂ O ₃ / 15 p	Anchos y poco profundos	No	Grandes	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 5p	Ídem	No	Grandes	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 10p	Ídem	Sí	Pequeños	Si	Sí	No	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 15p	Ídem	No	Pequeños	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 5 p	Ídem	No	Grandes	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 10p	Ídem	No	Grandes	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 5p	Idem	Sí	Pequeños	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 10p	Ídem	Sí	Pequeños	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 15p	Ídem	Sí	Pequeños	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / B ₄ C / 5 p	Ídem	Sí	Pequeños	Sí	Sí	No	Si
AA6061	No	No	No	No	No	-	Si

Se han debatido diversas maneras de cuantificar la presencia de surcos en la superficie desgastada, pero la gran cantidad de parámetros utilizados al medir la

rugosidad hace que sea muy difícil encontrar un parámetro adecuado, que pueda correlacionarse con medidas de intensidad de desgaste o cotejarse con deferentes mecanismos de abrasión. Por eso en este trabajo se describen por sus características morfológicas en forma cualitativa, como: anchos y de poca profundidad en todos las probetas de materiales compuestos.

En cuanto al material adherido, observado en todos los materiales compuestos ensayados, se lo encuentra pegado sobre zonas que presentan surcos de desgaste, formado en una etapa previa. Como se ven en las figuras 7.3.a; 7.4.a; 7.5.a; 7.8.a; 7.9.b; 7.10.a. Un razonamiento que permite explicar las zonas similares a cráteres donde se observan surcos de abrasión en el fondo, ver la figura 7.5.a, sería que el material una vez adherido se va esparciendo paulatinamente y cubriendo grandes porciones de la superficie, eventualmente se encuentra con otro frente de material adherido que sufre el mismo efecto, en esos casos puede formarse una unión a tope, cubriendo completamente la superficie antes expuesta. En cambio, si se interrumpe el ensayo antes de unirse puede presentar el aspecto de cráteres en cuyo fondo se ven surcos de abrasión.

La presencia de hierro en la superficie de los materiales compuestos, mostradas en los espectros de EDAX de las figuras anteriores, es la evidencia de la presencia de material de la contraparte adherido al pin, por lo que es posible esperar la formación de una capa mezclada mecánicamente, tal como fue reportada por otros investigadores^[1, 10, 11].

Los cráteres observados en la superficie y las fisuras superficiales presentes en algunos casos, como el de la figura 7.6.a, son indicativos de un mecanismo desgaste por delaminación o fatiga de contacto.

En el material monolítico no se observaron surcos de abrasión, ver la figura 7.11, ni hierro. La superficie presenta el aspecto de haber sido desgarrada en toda su extensión, por lo que mecanismos de fatiga superficial no se observan. Es de esperarse que ocurriera un mecanismo de desgaste más violento que los presentados en los materiales compuesto. Se destaca la preponderancia de adhesión sobre la abrasión. En la tabla 7.5 se hace una comparación entre las características observadas en los materiales compuestos y en el material monolítico.

Tabla 7.5: Resumen de las observaciones ópticas, SEM, EDAX sobre las probetas

	Material compuesto	Material Monolítico
Surcos	Sí	No
Cráteres	Sí	No
Fisuras	Eventualmente	No
Material adherido	Sí	No detectable
Partículas de refuerzo	No	-
Presencia de hierro en la superficie	Sí	No
Rebaba	Sí	Sí
Relieve de la superficie	Surcos suaves	Irregular

Respecto al material adherido en el borde de salida, formando rebaba, se encontró en todos las probetas de compuestos y monolítico, mostradas en las figuras 7.1 a 7.11. En algunos casos se formaban rulos, ver la figura 7.8.b, y en otros la rebaba era

más rígida, y no llegaba a enrularse, ver la figura 7.10.c. Pero en todos los casos fue abundante. También el material incrustado en el borde de entrada fue importante en muchos casos, destacándose en la probeta de material monolítico, figura 7.11.c.

La importancia de la rebaba en las probetas no fue atendida por investigadores como Alpas et al.^[14], Venkataraman y Sundararajan^[2] quienes prácticamente no la mencionan y quizás introdujeron errores en la cuantificación del desgaste que no fue evaluado. En cambio, Kuo y Rigney^[13], Sundberg et al.^[14] e inclusive la ASTM, en su norma G-77_99^[15], destacan la presencia de material adherido en forma de rebaba y consideran que produce errores en las determinaciones del desgaste. A pesar de la falta de unificación de criterio en la consideración del desgaste es necesario considerar su presencia en los sistemas sometidos a desgaste.

A modo de verificación se recortó la rebaba de una de las probetas, de AA1060/ Al_2O_3 /15p desgastada con 32,4 N hasta 2000 m, siguiendo la superficie cilíndrica original. Se pesó la rebaba y dio 0,032 g. Si se compara este valor con la variación de peso por desgaste medida igual a 0,00837 g, ver la figura 6.2, se puede ver que el error introducido por el desprendimiento de rebaba puede ser mayor al 100%.

Finalmente es necesario mencionar que la contraparte también sufrió cambios, sobre su superficie se observó material adherido, el cual presentó una coloración distinta al material del disco y muy similar a la del aluminio. Esta adherencia se observó en todos los ensayos, ya sean con probetas de materiales monolíticos o compuestos. En la literatura^[3, 16] se encuentran referencias a distintas fases presentes adheridas al los materiales, destacando los óxidos de hierro y de aluminio, Al y Fe metálicos y compuestos Fe_xAl_y , todos inducidos por la fricción.

7.2. Capa Mezclada Mecánicamente

7.2.1. Resultados

Como se mencionó anteriormente la capa mezclada mecánicamente o MML por sus iniciales en inglés: Mechanical Mixed Layer, está involucrada en la resistencia al desgaste. De ahí que se dedique la atención a ella y las características de la misma.

Debe mencionarse que se encontró capa mezclada en todas las probetas ensayadas de materiales reforzados. Para confirmar su existencia se buscó la presencia de hierro en una capa subsuperficial. En cambio en la probeta de material monolítico no se encontró dicha capa.

Para calificar la capa de material mezclado, se realizaron diversos exámenes en cada probeta:

- Inspección visual
- Composición química
- Medidas de microdureza
- Medidas de espesor de la capa

Para su caracterización se realizó un corte longitudinal a lo largo del eje del pin cilíndrico y en la dirección del deslizamiento, atravesando un diámetro en la sección transversal del pin, tal como se indica en la figura 7.12. Se efectuó un corte por cada probeta, por lo que no hay evidencia suficiente para diferenciaciones en medida de espesor y composición química exacta. Se pulió la superficie y se realizó un ataque leve con el reactivo de Keller.

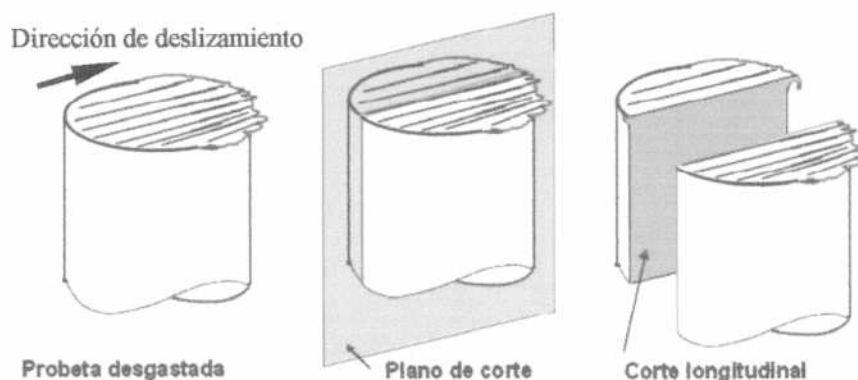


Figura 7.12: Esquema indicando la situación del corte longitudinal

7.2.2. Microestructura y Composición

Para estudiar la morfología de capa mezclada se realizaron observaciones en el SEM y en el microscopio óptico. Las imágenes que se muestran en la figura 7.13 dan una idea de los diferentes aspectos que presentó la capa de material mezclado en los diferentes tipos de materiales compuestos. En dicha figura se señalaron la MML y algunos refuerzos para una mejor comprensión.

La MML puede caracterizarse morfológicamente como un conglomerado de material que fue fragmentado y posteriormente apisonado presentando un aspecto de material granular compactado, su porosidad no fue cuantificada.

En las probetas de la familia AA6061/ Al_2O_3 , el tamaño de los refuerzos es del orden del micrón, la MML presenta un aspecto muy similar al del material del bulk, región del material sin modificaciones por el proceso de desgaste, no habiendo diferencias morfológicas a pesar de la distinta proporción de refuerzo. En la MML se observaron partículas de refuerzo, mezcladas en una matriz de aluminio y hierro. Se observó una delimitación neta entre la MML y el material ubicado por debajo, visible por un cambio en la coloración, como se muestra en la figura 7.13.b, donde dicho cambio aparece como un tono de gris diferente.

En las probetas de los materiales reforzados con intermetálico Ti_3Al también se observa una demarcación muy precisa entre MML y el material debajo de ella, en este caso el tamaño del refuerzo es tan grande como el espesor de estas capas, por lo tanto se observa poco material de refuerzo de tamaño original, ver la figura 7.13.c. El material que conforma la MML es una mezcla de compuestos de aluminio y hierro, observándose zonas más ricas en hierro que otras. No se aprecia diferencia entre los materiales con diferente proporción de refuerzo. En este caso la MML se torna visible en el microscopio óptico por un cambio en la coloración del material, como se ve en la figura 7.13.c.

En las probetas de los materiales reforzados con diboruro de titanio también hubo una clara delimitación entre la MML y el material ubicado por debajo, en este caso fue observado mayor cantidad de refuerzos fragmentados relleno una capa formada por la mezcla de compuestos de aluminio y hierro. Tampoco en este caso hubo diferencias notorias con la variación en la proporción de refuerzo. La distinción de la MML mediante el cambio en la coloración también fue observada en estos materiales y se muestra en la figura 7.13.d.

La probeta de AA6061 reforzado con carburo de boro también presenta una buena delimitación entre el material mecánicamente mezclado y el material por debajo de él, visible mediante el microscopio óptico, ver la figura 7.13.e. En él se observan partículas de refuerzo más pequeñas que el tamaño original, embebidas en una mezcla de compuestos de aluminio y hierro.

En las probetas de AA1060 reforzadas con alúmina, las cuales presentan una dispersión no-homogénea en las partículas de refuerzo, también presentan MML, incluso en la zona donde no hubo refuerzos debajo. En la MML se encontraron partículas de refuerzo de tamaño original y otras más pequeñas, mezcladas con aluminio y hierro similar a los casos anteriores, ver la figura 7.13.a.

Las características antes descriptas y otras adicionales que también fueron observadas en las probetas son recopiladas y presentadas en la tabla 7.6.

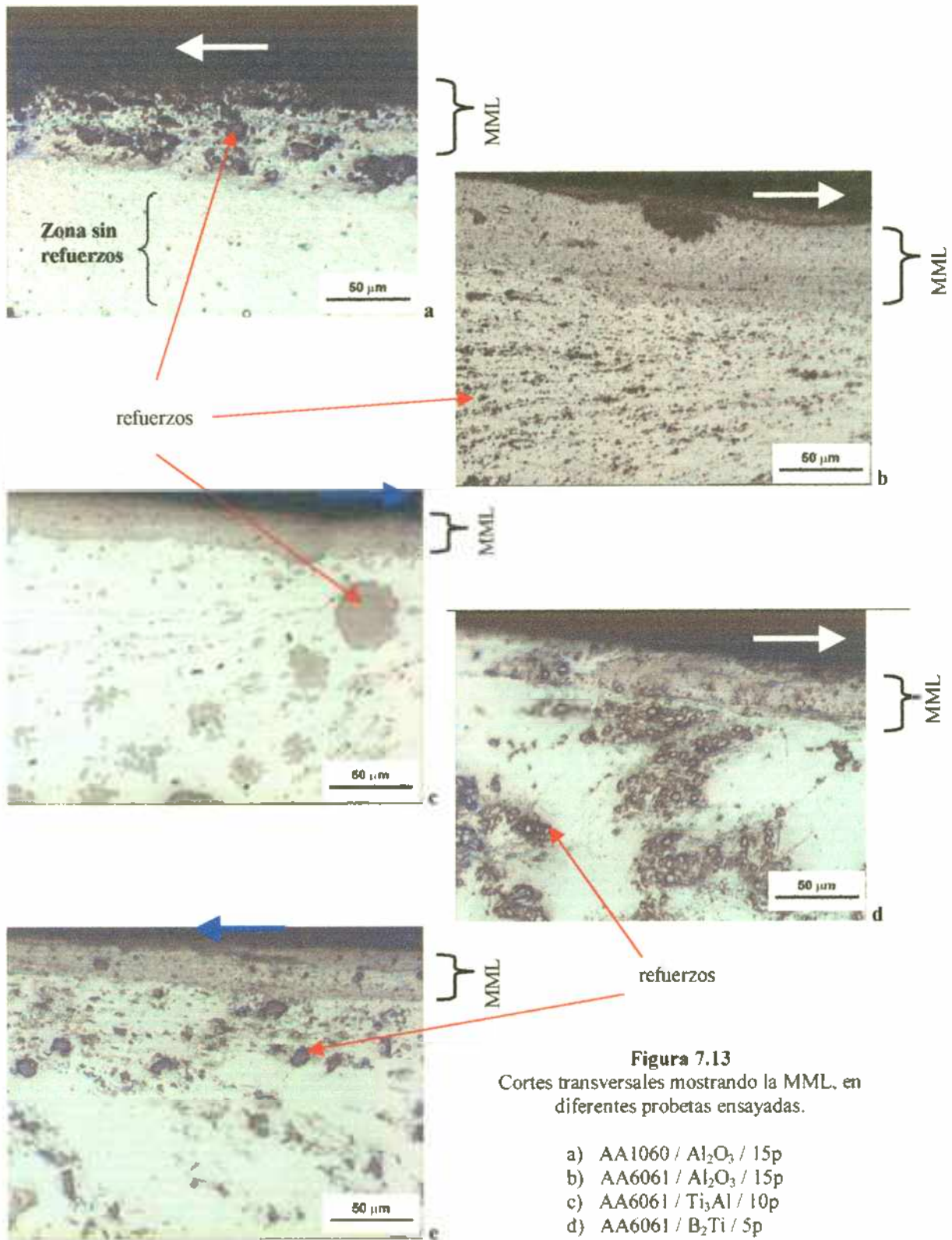


Figura 7.13
Cortes transversales mostrando la MML, en
diferentes probetas ensayadas.

- a) AA1060 / Al₂O₃ / 15p
- b) AA6061 / Al₂O₃ / 15p
- c) AA6061 / Ti₃Al / 10p
- d) AA6061 / B₂Ti / 5p
- e) AA6061 / B₄C / 5p

Las flechas indican la dirección del movimiento
de la contraparte

Tabla 7.6: Resumen de las características observadas en la Capa Mezclada Mecánicamente de las probetas.

Probeta	Aspecto similar al del bulk	Partículas de refuerzo		Hierro	Distinguible por cambio en la coloración	Delimitación neta entre MML y material inferior	MML extendida sobre toda la superficie del corte longitudinal
		Tamaño original	Tamaño menor				
AA1060 / Al ₂ O ₃ / 15 p	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 5 p	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 10 p	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 15 p	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 5 p	No	Escaso	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 10 p	No	Escaso	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 5 p	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 10 p	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 15 p	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061 / B ₄ C / 5 p	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AA6061	-	-	-	-	-	-	-

7.2.3. Medidas de Microdureza en la Capa Mezclada

En la capa mezclada se realizaron medidas de microdureza Vickers, con una carga de 25 gramos, para ello se realizaron 4 o más improntas en diferentes sectores de la misma, los valores promedios y máximos, así también como su error se indican en la tabla 7.7 y se graficaron en la figura 7.14. Las improntas abarcaron diferentes fases, evitando las partículas grandes de refuerzo cuando fue necesario, tal como se mencionó en el parágrafo 4.4. En el apéndice A se presentan las medidas de microdureza de la MML y de la subsuperficie de cada probeta, estos gráficos ilustran mejor la diferencia de microdurezas entre la MML y la matriz ubicada debajo de ella.

Otra manera de representar la diferencia de durezas entre la MML y la matriz es calculando la dureza relativa de la MML respecto a la matriz de cada material compuesto, obteniendo los valores graficados en la figura 7.15. En dicha figura se observa que para la probeta de AA1060/ Al₂O₃/ 15p la MML formada es una 8 veces más dura que la matriz en esa misma probeta, de forma similar en la probetas de AA6061/ Al₂O₃/ 15p la MML es 3,5 veces más dura que la matriz en esa probeta. Una lectura similar puede hacerse para cada probeta, notándose que la relación de durezas no baja de 3,5 veces y no superó las 8 veces.

Tabla 7.7 Microdureza de la MML

Material	Microdureza Vickers (0,025)		
	promedio	máximo	error
P1	334	383	17
P3	347	383	17
P4	420	420	21
P5	383	383	19
P6	377	383	19
P7	443	514	22
P8	533	605	27
P9	445	572	22
P10	408	420	20
P11	317	401	16

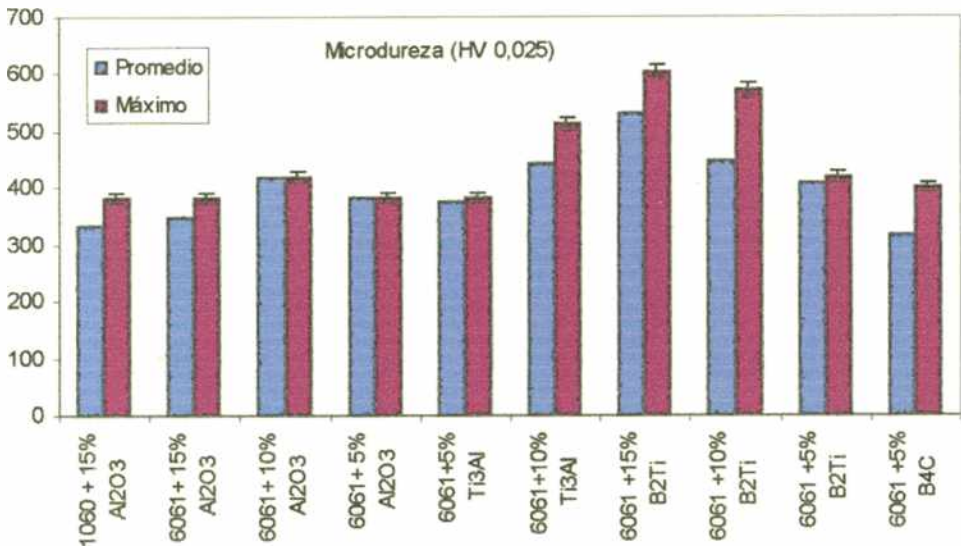


Figura 7.14: Valores promedio y máximos de microdureza Vickers de la Capa Mezclada Mecánicamente, MML. Se realizaron cuatro improntas, como mínimo, en cada probeta. Las barras de error indican la apreciación del instrumento.

7.2.4. Medidas de Espesores de la Capa Mezclada

Sobre cada probeta se tomaron medidas del espesor de la capa mezclada mecánicamente, debe tenerse en cuenta que estos valores solamente se midieron en un corte longitudinal por probeta. Además, la variación encontrada en estas medidas, a lo largo de una misma sección es muy alta. En algunos casos las diferencias eran notables, especialmente en el material no-homogéneo, p1: AA1060 /Al₂O₃ / 15p. Las medidas se hicieron sobre las micrografías tomadas en el microscopio óptico y electrónico y fueron corroboradas con medidas obtenidas de la escala graduada incluida en el escleroscopio Vickers.

Los valores obtenidos fueron volcados en la figura 7.16, donde se dan las magnitudes promedio de los espesores de la capa mezclada en secciones equivalentes en cada probeta, así como una barra de error que indica la variabilidad en las mediciones realizadas.

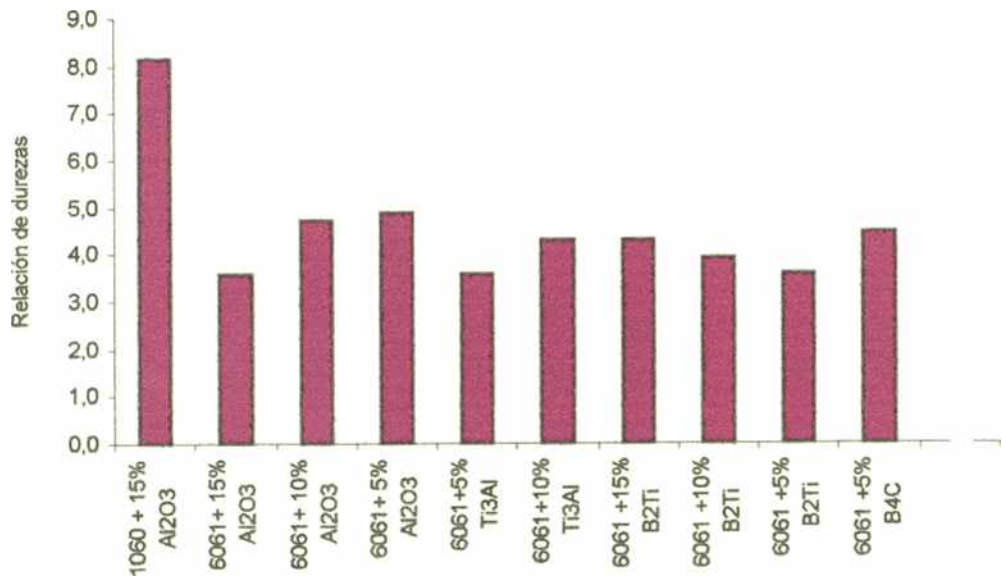


Figura 7.15: Dureza relativa de la MML respecto a la matriz de cada una de las probetas. El material monolítico no presenta MML.

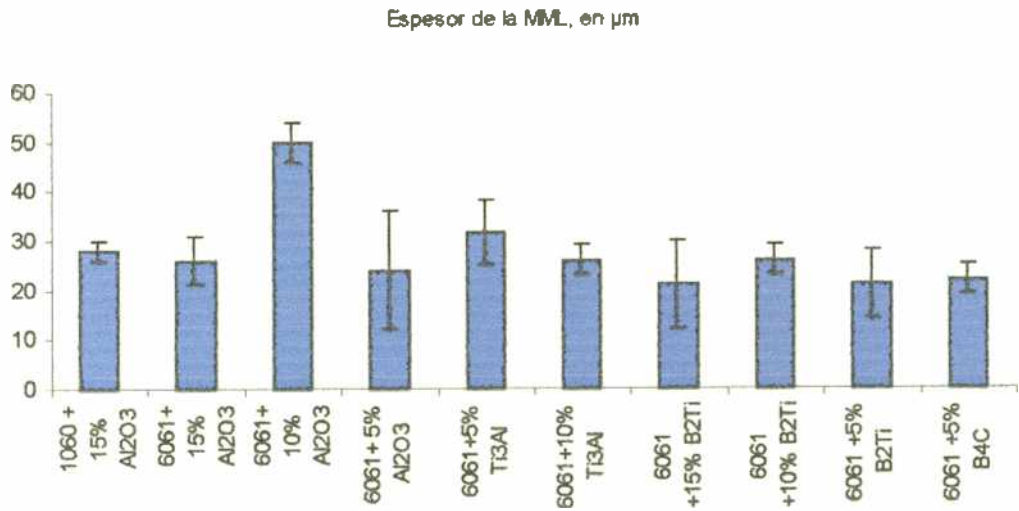


Figura 7.16: Valor promedio del espesor de la Capa Mezclada, para las diferentes probetas. La barra de error indica la dispersión en las medidas.

7.2.5. Análisis y Discusión Sobre la Capa Mezclada Mecánicamente

La presencia de capa mecánicamente mezclada se confirma con la presencia de una capa de hierro, proveniente de la contraparte, y un cambio abrupto en la microdureza de la capa mezclada respecto a la de la matriz, ver los gráficos mostrados en el Apéndice A y la figura 7.15. Esto fue encontrado en todos los casos independientemente del tipo, tamaño, dureza o proporción de refuerzo presente.

Los valores de dureza de la MML, mostrados en la figura 7.14, son similares a la de dureza, de la contraparte, 272 HB. Es de esperarse por lo tanto que tenga la capacidad de resistir en gran medida a la abrasión producida por la contraparte y a distribuir la carga de manera más uniforme sobre la probeta de material compuesto. Como se mencionó en el capítulo 2, ésa es la función del tercer cuerpo, propuesta por Godet^[17], que separa las superficies originales, y que es originado por el mismo proceso de desgaste y permanece durante todo el ensayo.

Los valores de dureza relativos de la figura 7.15 y los de la MML en la figura 7.14 indicarían que la dureza de la MML es independiente de la dureza de la matriz, ya que una matriz más o menos dura presenta valores alto y similares de MML, y también es prácticamente independiente del tipo de refuerzo empleado. Es más bien esperado que se establezca una composición en equilibrio dinámico dependiente de las sollicitaciones mecánicas, como el tercer cuerpo de Godet, y su estabilidad dependerá de la resistencia mecánicas que pueda alcanzarse con los materiales del par interactuante.

En la MML de algunas probetas, indicadas en la tabla 7.6, se observaron refuerzos de tamaños menores que el tamaño original, por lo que es probable que hubiera fragmentación de los refuerzos, tal como lo observan Alpas y Zhang^[4] y también Venkataraman y Sundararajan^[11].

La adherencia de la capa mezclada sobre material original de la probeta se puede estimar considerando que, es tan buena como para permitir la maniobrabilidad habitual empleada en las tareas de desbaste y pulido de los cortes transversales de las probetas para realizar su inspección metalográfica, sin necesidad de mayores cuidados como podría ser recubrimientos con Níquel u otros materiales duros.

Las medidas de espesor de la capa mezclada, dadas en la figura 7.16, son a modo orientativo debido a la falta de uniformidad en el espesor sobre toda la sección observada, para hacer una lectura más objetiva es necesario disponer de distintos cortes en una misma probeta y conocer la variabilidad en toda la sección transversal del pin. Por lo tanto no deben considerarse una estricta correlación con otras propiedades.

La presencia de MML en pares de desgaste hierro-material compuesto de matriz de aluminio ha sido reportada en varias condiciones de ensayo y tipos de máquinas, Modi et al.^[1] observaron capas de material transferido en materiales compuesto reforzados con partículas de SiC, ensayadas en condiciones similares a este trabajo, con la salvedad de que utilizaron una configuración pin on disk.

Subramanian^[10], ensayando aleaciones de aluminio-silicio contra cobre, solamente tuvo mezclado mecánico con bajas velocidades de deslizamiento, considera que las altas velocidades de deslizamiento generaran gran cantidad de calor que producirán un aumento de la temperatura, produciendo un ablandamiento en la zona cercana al deslizamiento y se generaran debris gruesos sin posibilidad de formarse una capa transferida. Aunque es necesario tener en cuenta las capacidades disipadoras de los diferentes equipos.

7.3. La Subsuperficie

7.3.1. Resultados

Los estudios realizados sobre la subsuperficie de cada probeta incluyeron:

- Identificación y extensión de la zona deformada plásticamente
- Caracterización morfológica de la subsuperficie
- Medidas de microdureza, buscando cambios en las propiedades de la matriz.

Para su estudio se utilizaron los mismos cortes longitudinales sobre los que se estudió la Capa Mezclada, mencionada en el párrafo 7.2.1.

7.3.2. Morfología de las Subsuperficie

En la figura 7.17, se muestran algunas imágenes de la subsuperficie de las probetas, en ellas se puede reconocer la estructura establecida por Venkataraman^[11], ilustrada en la figura 2.5. Esa zona de material deformado plásticamente, denominada *Shear Zone* por Venkataraman, está determinada por el desplazamiento de los refuerzos en la dirección de deslizamiento, su extensión fue determinada y se muestra en la figura 7.18. En la figura 7.17 también se señala la MML y como “guía para la vista” se trazan curvas sobre las micrografías para ilustrar la deformación plástica. La *Shear Zone* se observa en todas las probetas de materiales compuestos. En la probeta de material monolítico es muy pequeña y una medición de su extensión fue impedida debido a que se estropeó durante el proceso de pulido.

Fueron observados escasos refuerzos fracturados, en comparación con la gran cantidad de refuerzos que mantienen su tamaño original.

En la zona deformada plásticamente ubicada en la subsuperficie se observó un aumento en la porosidad, tal como se muestra en la figura 7.19, donde los poros presentados en AA1060/ Al_2O_3 / 15p; son más pequeños que el tamaño de las partículas originales pero mayores que las partículas fracturadas mostradas en la micrografía 7.19.a. En cambio los poros observados en la probeta AA6061/ Al_2O_3 / 15p, mostrada en la figura 7.19.b, son del mismo tamaño que las partículas de refuerzo, por lo que puede sospecharse que sean huecos dejados por partículas desprendidas al momento de preparar la muestra para la micrografía.

No se observaron fisuras en la matriz al analizar los cortes longitudinales, utilizando reactivos de ataque convencionales mencionados en el capítulo 4. En cambio, se observaron fisuras en varios sectores de la interfase entre la MML y el material de la subsuperficie, en todas las probetas de materiales compuestos.

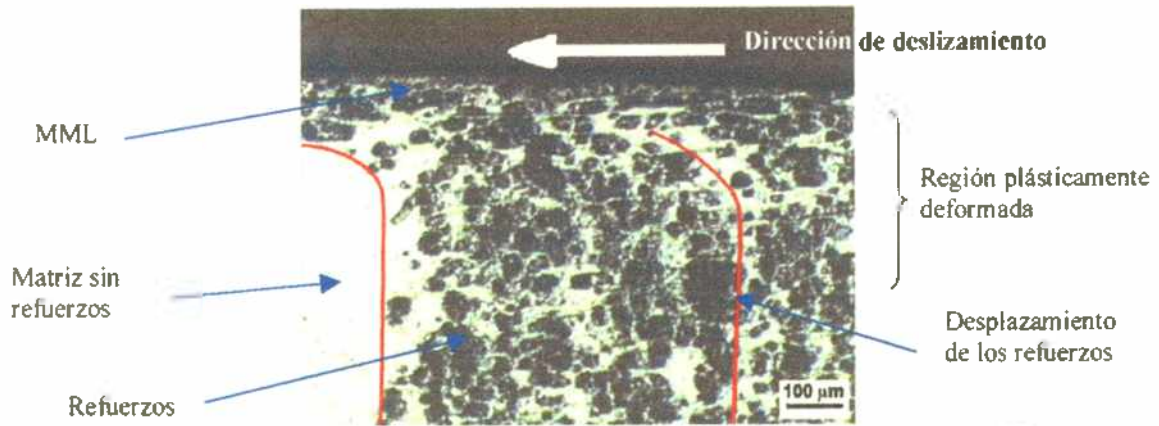


Figura 7.17.a: p1: AA1060 / Al_2O_3 / 15p, zona desplazada en el borde de la región sin refuerzos.

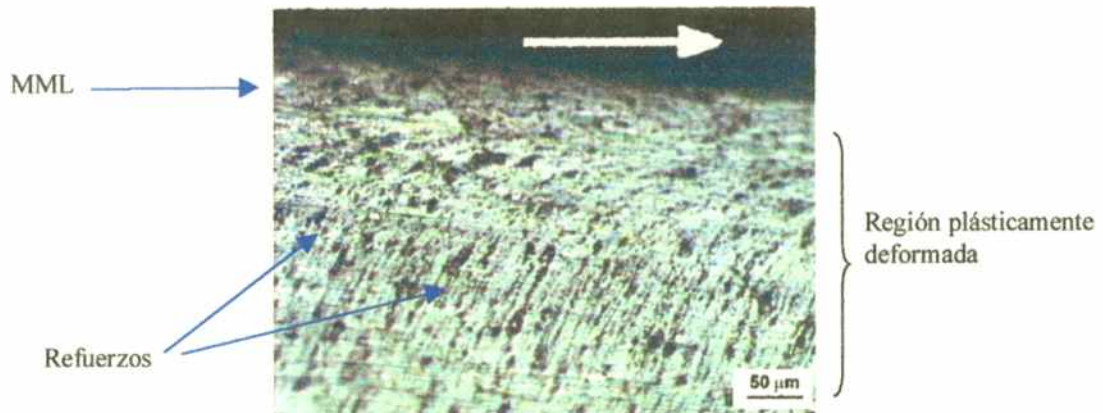


Figura 7.17.b: p3: AA6061 / Al_2O_3 / 15p, zona desplazada plásticamente en la subsuperficie, los refuerzos pequeños indican el desplazamiento sufrido por el material.

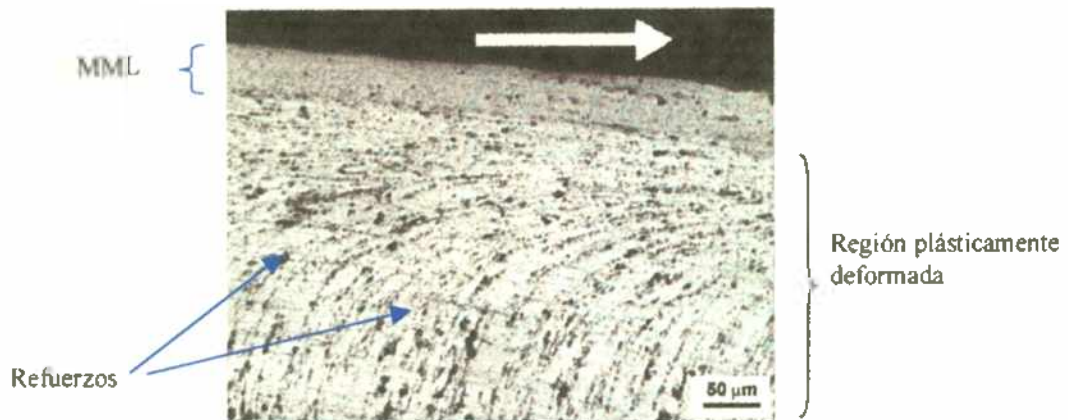


Figura 7.17.c: p4: AA6061 / Al_2O_3 / 10p, zona deformada plásticamente en la subsuperficie, los refuerzos indican la dirección del desplazamiento sufrido.

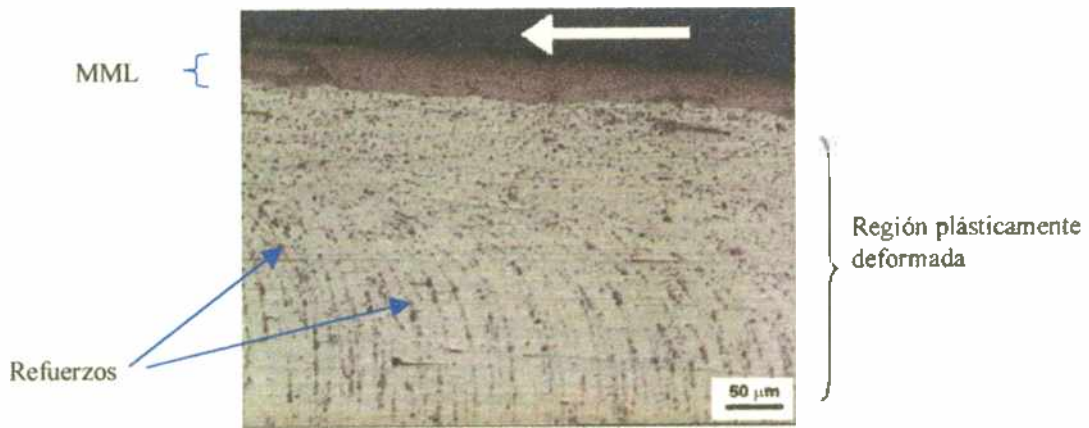


Figura 7.17.d: p5: AA6061 / Al_2O_3 / 5p, subsuperficie.

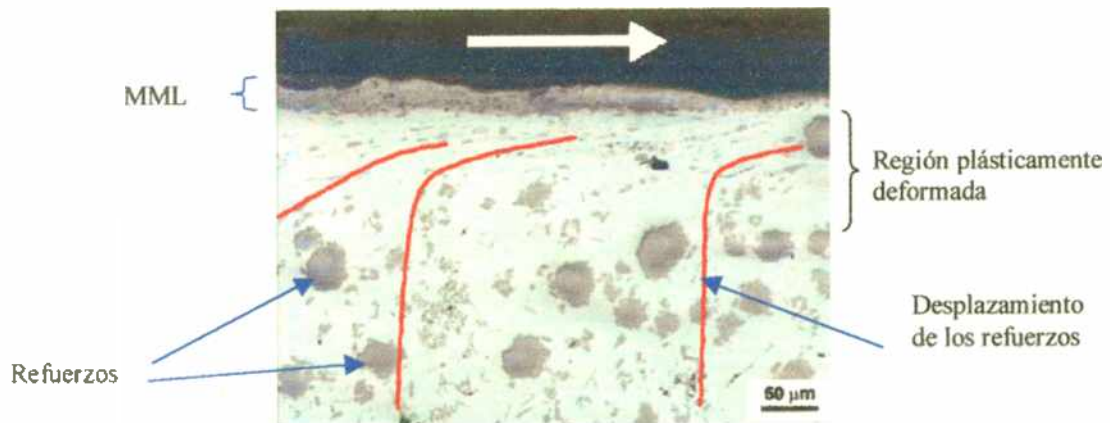


Figura 7.17.e: p6: AA6061 / Ti_3Al / 5p, subsuperficie.

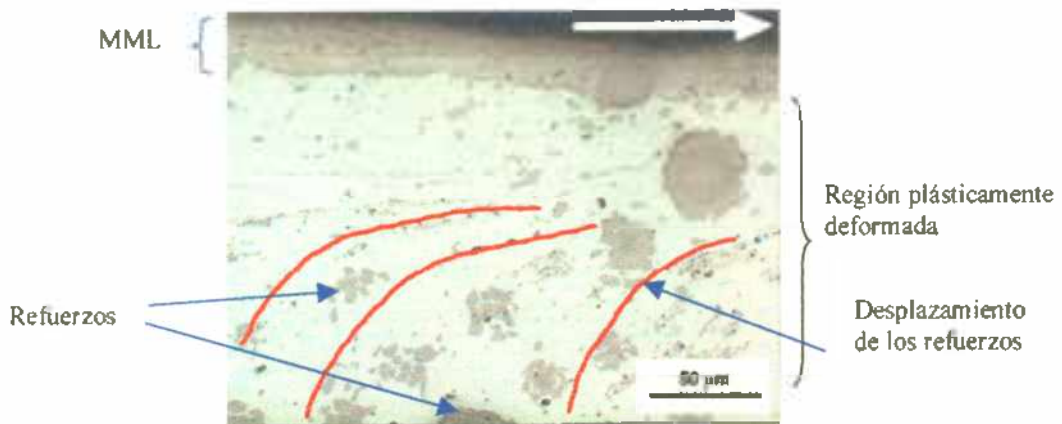


Figura 7.17.f: p7: AA6061 / Ti_3Al / 10p, subsuperficie.

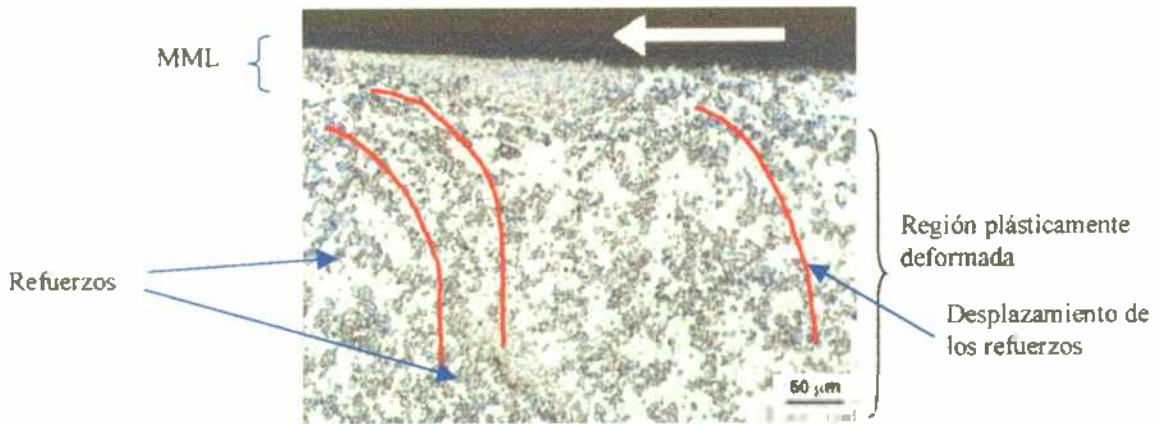


Figura 7.17.g: p8: AA6061 / B₂Ti / 15p, subsuperficie.

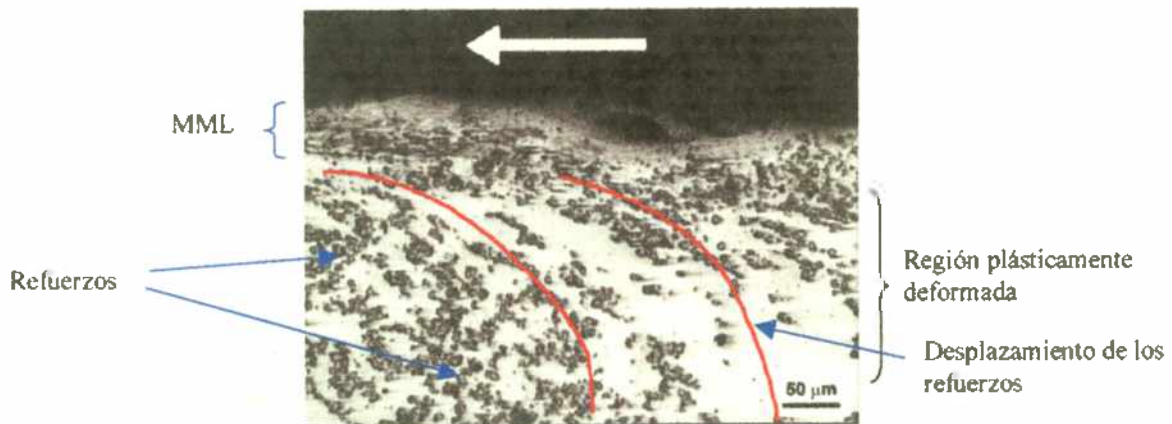


Figura 7.17.h: p9: AA6061 / B₂Ti / 10p, subsuperficie.

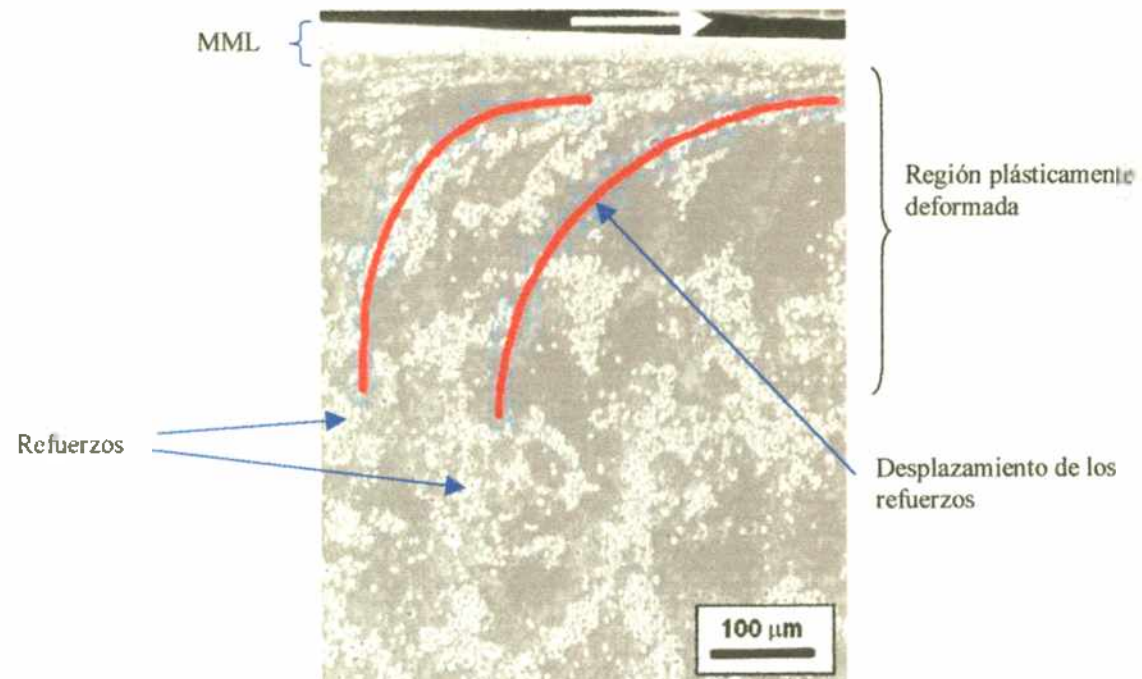


Figura 7.17.i: p10: AA6061 / B₂Ti / 5p, subsuperficie.

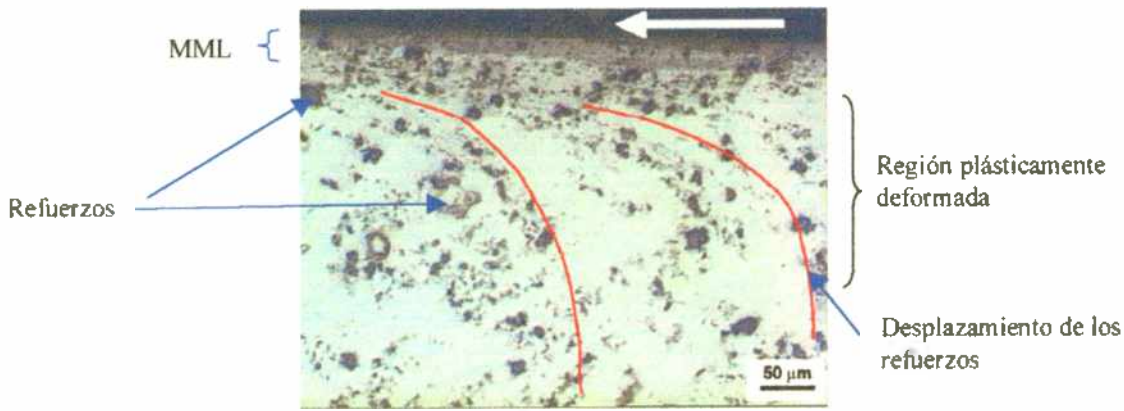


Figura 7.17.j: p11: AA6061 / C₄B / 5p, subsuperficie.

Imágenes de la subsuperficie donde se muestra la zona deformada plásticamente, las líneas rojas indicarían al material originalmente alineado perpendicular a la superficie desgastada.

7.3.3. Extensión de la zona deformada plásticamente

En las diferentes probetas se identificó a la zona deformada plásticamente por el desplazamiento y la orientación que presentaban los refuerzos, ayudados en algunos casos por la distribución en los interdendríticos que presentaron en algunos materiales. Una metodología similar fue utilizada por Venkataraman^[11], Dautzenberg^[18], How y Baker^[19].

En todos las probetas se observó deformación plástica de la subsuperficie. Para medir los espesores de estas capas se tomaron micrografías ópticas y electrónicas sobre las cuales se efectuaron las medidas. Los espesores promedios de la zona deformada para cada probeta se presentan en la figura 7.18.

La variabilidad en el espesor de las capas de material deformado, observada en la figura 7.18, se debe por un lado a una frontera no muy definida, ya que no se dispuso de una referencia precisa, y por otro a la variación propia de la zona deformada, ver las figuras 7.17.

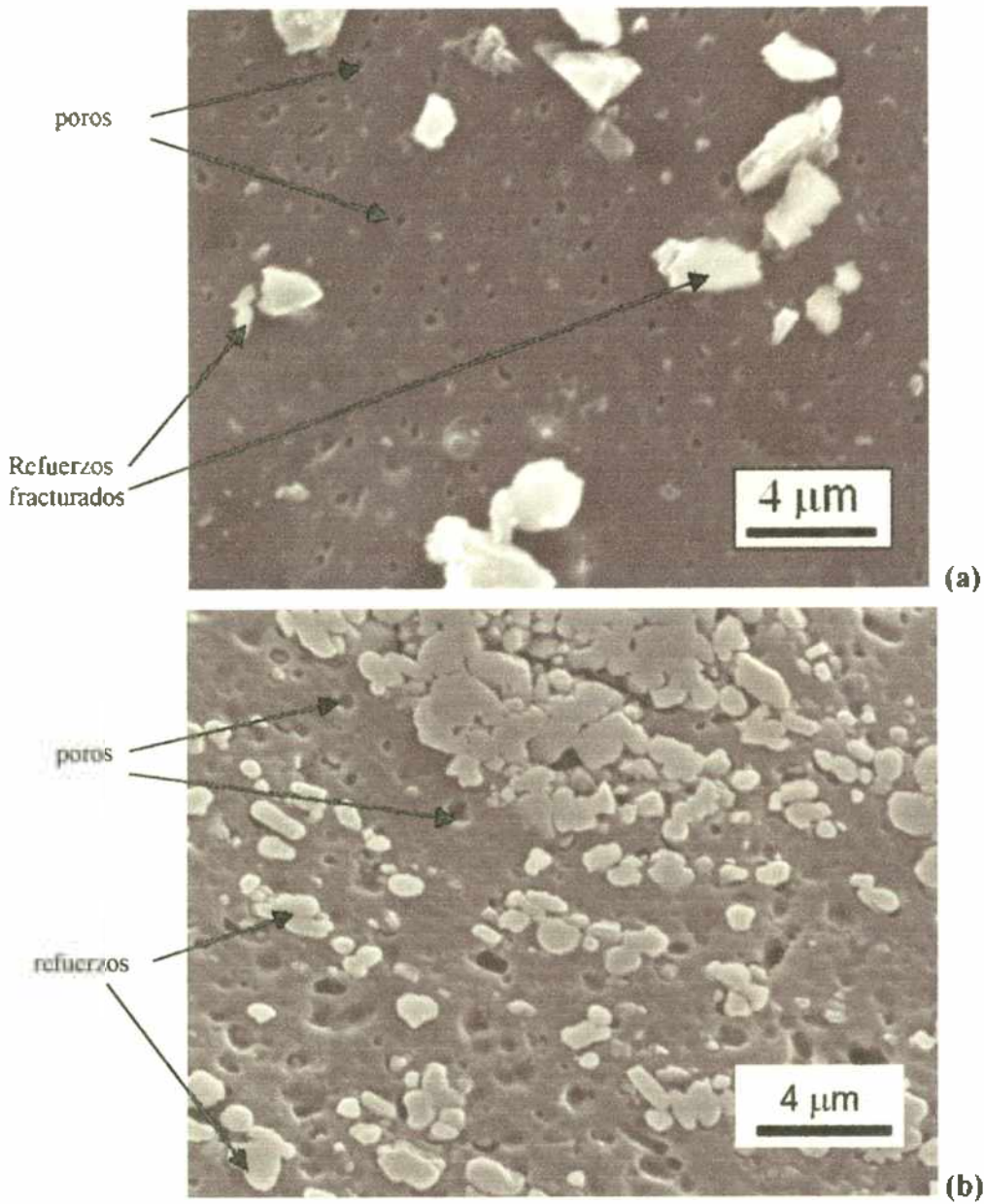


Figura 7.19: Comparación del tamaño de los poros en la zona deformada plásticamente de la subsuperficie, entre los materiales:

a) AA1060/ Al_2O_3 15p; y b) AA6061/ Al_2O_3 15p

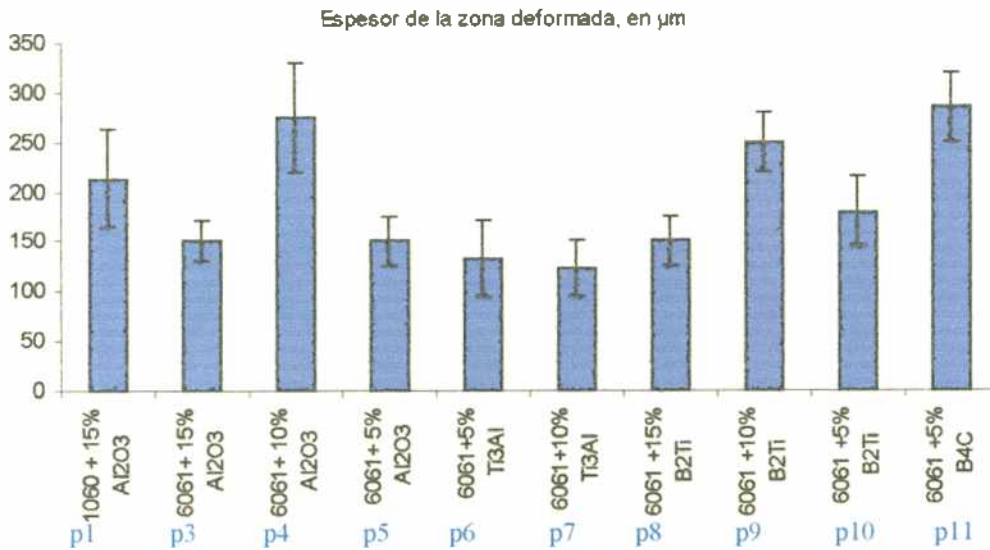


Figura 7.18: Espesor de la zona deformada plásticamente en la subsuperficie. Las barras de error indican la dispersión en las medidas

7.3.4. Medidas de Microdureza en la Subsuperficie

En cada uno de los materiales se realizaron medidas de microdureza a distintas profundidades, las cuales se muestran en el **Apéndice A**. Como se mencionó en la presentación de los materiales, las microdureza de la matriz en los materiales con AA6061 abarca desde un valor de 120 HV (0,025), en AA6061/ B₂Ti/ 15p, hasta 70 HV, en AA6061/ B₄C/ 5p. En cambio en el material AA1060/ Al₂O₃/ 15p se obtuvo un valor de 40 HV (0,025). Todas las medidas de microdureza se realizaron siguiendo el criterio establecido en el parágrafo 4.4.

Con el objeto de buscar endurecimiento por deformación se realizaron medidas de microdureza Vickers en todos los materiales, tal como se ve en la figura del apéndice A, donde se muestra la microdureza de la matriz en función de la profundidad medida desde la superficie desgastada. En dichos perfiles de microdureza los puntos más cercanos a la superficie (a menos de 50 micrones), presentan los valores más altos y pertenecen a la MML, tal como se indica en la figura. Por lo tanto, debe tenerse cuidado de no confundirlo con los valores medidos en la matriz cuando se vaya a buscar evidencias de endurecimiento por deformación.

Para confirmar que se produce endurecimiento por deformación se realizó la comparación estadística de los valores medidos a mayor profundidad con los de la región cercana a la superficie, que no perteneciese a la MML, tal como se indica en el **Apéndice B**. Las medidas de diferencia en la microdureza que permiten decidir si hubo endurecimiento de la matriz son mostradas en la figura 7.20. Este gráfico, debe interpretarse de la siguiente manera: las columnas llenas indican la diferencia entre los valores de microdureza de la matriz original y de la que hubo sufrido deformación. Las líneas de error indican la dispersión en las medidas de microdurezas. Por lo tanto, cuando las columnas tienen valores positivos y las líneas de error comprenden valores positivos, indican endurecimiento de la matriz. Ahora bien, cuando la columna es positiva pero la línea de error comprende valores negativos no puede darse evidencia

significativa de endurecimiento en la matriz. Este último caso es el que presenta el material AA6061/ B₂Ti/ 15p.

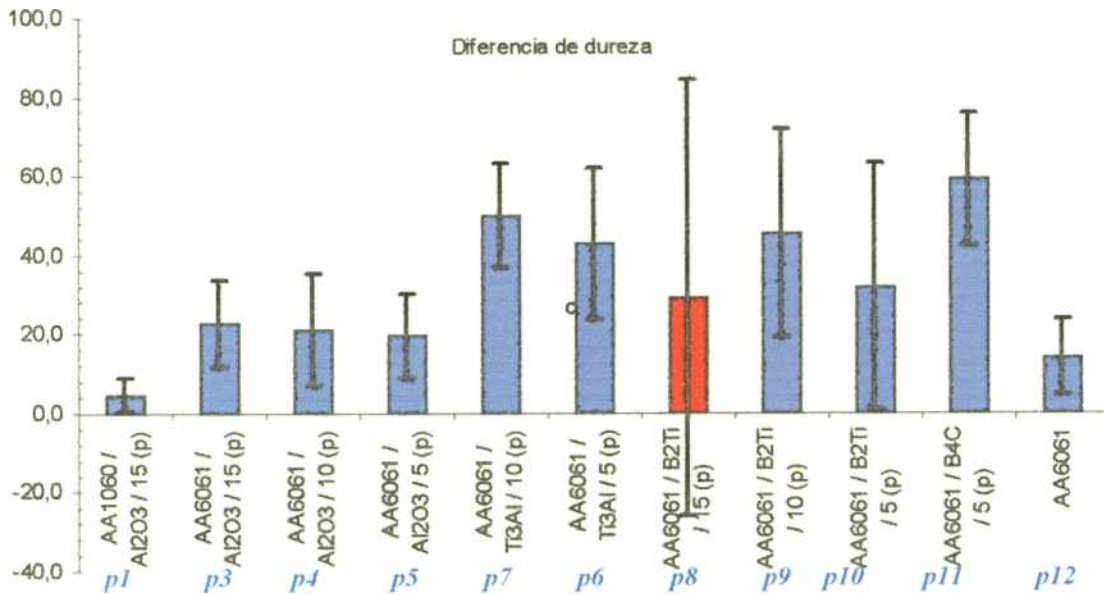


Figura 7.20: Diferencia de microdureza en la subsuperficie que permite confirmar el fenómeno de endurecimiento por deformación de la matriz. La columna en rojo indica que no hay evidencia significativa de endurecimiento.

En los demás materiales puede encontrarse endurecimiento de la matriz en diferentes magnitudes. Destacan las encontradas en los materiales reforzados con B₄C y con Ti₃Al con los mayores grados de endurecimiento y por el otro extremo en el material AA1060/ Al₂O₃/ 15p muestra escaso endurecimiento, prácticamente nulo. La matriz de AA6061 endurece menos que la de los materiales compuestos salvo el AA6061/ B₂Ti/ 15p.

7.3.5. Análisis y Discusión Sobre la Subsuperficie

Según el modelo de subsuperficie confeccionado por Venkataraman se observó la *Shear Zone*, llamada en este trabajo Zona deformada plásticamente, evidenciada por un desplazamiento de partículas de refuerzos siguiendo la dirección de deslizamiento.

En cambio, el límite la *Plastic Zone* de Venkataraman, determinada mediante medidas de microdureza no fue posible realizarla ya que las medidas de microdureza tomadas en las probetas no mostraron una pendiente apreciable, ver los gráficos en el apéndice A.

A pesar de la escasa pendiente si pudo observarse endurecimiento en la subsuperficie debido al desgaste, mostrado en la figura 7.20, salvo en la probeta de AA6061/ B₂Ti/ 15p, donde el endurecimiento observado puede estar enmascarado por la dispersión en las medidas de microdureza. El endurecimiento alcanzó su mayor valor en la probeta de AA6061/ C₄B/ 5p con un valor de 60 HV (0,025).

Venkataraman^[11] encontró endurecimientos que alcanzaron valores de 525 HKnoop en materiales reforzados cuyas matrices presentaban 85HK. Además, encontró una zona de “ablandamiento por trabajado” entre la MML y la zona de “endurecimiento por trabajado”, indicada en la figura 2.5 como *Soft Zone*. Utilizando un equipo pin on disc, con cargas de 52 y 122 N, desgastadas durante 2400 m a 1 m/s.

En las probetas ensayadas en este trabajo las medidas de la microdureza no indican ablandamiento por trabajado, si existiese quizás quede enmascarado si las dimensiones de las zonas afectada es menor que el tamaño de la impronta, que generalmente tuvo tamaños del orden de los 10μm. En la literatura no hay mucha evidencia de ablandamiento por trabajado tal como la reportada por Venkataraman.

Alpas y Zhang^[20], encontraron endurecimiento por trabajado en aleaciones de Al-7 % Si, luego de desgastar en una máquina Block on ring durante 1000 m aplicando cargas de 10 y 45 N a 0.2m/s, donde el endurecimiento fue de 80 HV (0.015) a 110 HV, no observaron ablandamiento por trabajado.

How y Baker^[19], ensayaron AA6061/ Al₂O₃/ 20(fibras cortas), en un equipo pin on disc aplicando cargas de 1 a 50 N ensayados a 0.2m/s, encuentran endurecimiento aunque dudan de la técnica empleada, idéntica a la utilizada por Alpas y Zhang. El cambio de durezas fue de 110 a 135 HV (0.010). No encontraron ablandamiento por trabajado.

Modi et al.^[1], desgastaron una aleación de Al - 4.5 Cu reforzada con 10 % de SiC, en una pin on disc hasta distancias mayores a 500 m aplicando cargas de aproximadamente 50 N a una velocidad de 2.68 m/s. Ellos encontraron un leve endurecimiento de 60 HV a 80 HV. No observaron ablandamiento por trabajado.

Independientemente de las condiciones de los ensayos, la magnitud del endurecimiento provocado por el desgaste observado en las probetas ensayadas es similar al reportado por otros autores.

En la figura 7.21 se comparó la dureza de la matriz con el espesor de la zona deformada plásticamente. En esta no se aprecia correlación significativa entre esas magnitudes.

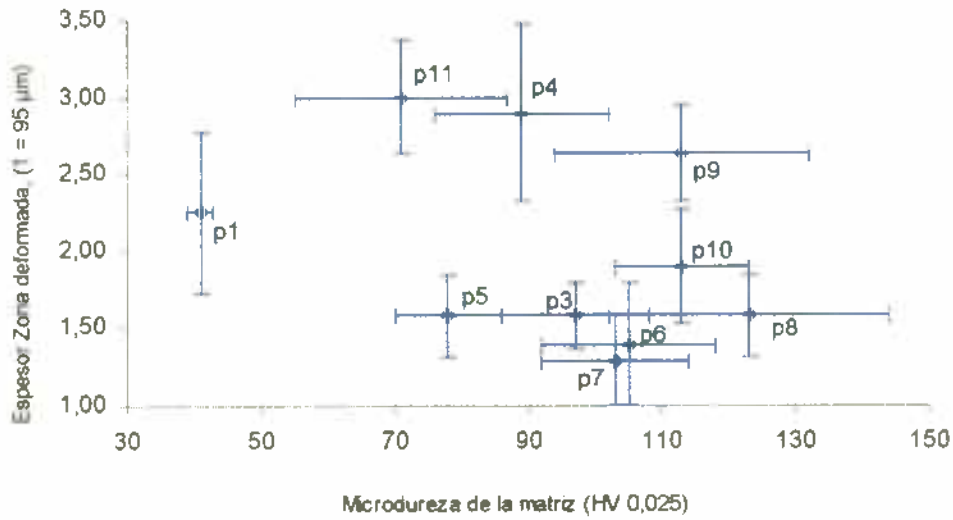


Figura 7.21: comparación entre la dureza de la matriz y el espesor de la capa deformada plásticamente

Respecto a la influencia de la porosidad puede citarse el trabajo realizado por Yilmaz y Buytoz^[21], donde encontraron que la mejora que se obtiene en la resistencia al desgaste abrasivo en materiales compuestos con matriz de aluminio reforzado con partículas duras, compensa y supera considerablemente el detrimento que produciría la porosidad en la resistencia al desgaste por abrasión.

7.4. Fragmentos

La caracterización de los fragmentos producidos por el desgaste permiten identificar algunos de los mecanismos de desgaste. Por lo tanto se presentará el análisis obtenido del estudio de los fragmentos en cada una de las probetas. Atendiendo a características como: forma, morfología superficial, tamaño, composición química y presencia de refuerzos del material compuesto original.

7.4.1. Materiales reforzados con alúmina, Al_2O_3 .

Fragmentos de p1: AA1060/ Al_2O_3 / 15p

Se observaron fragmentos con forma de láminas delgadas con un amplio rango de tamaños, desde 100 a 400 μm . En la figura 7.22.a se muestra un fragmento en forma de lámina, un análisis de la composición química de su superficie, mediante EDAX, indica la presencia de Al y Fe, ver la figura 7.22.b. La superficie presenta un aspecto suave con pequeñas ondulaciones.

Las partículas de refuerzo originales, de dureza 2000 HK, median entre 10-15 μm pero no se identificaron refuerzos en los fragmentos.

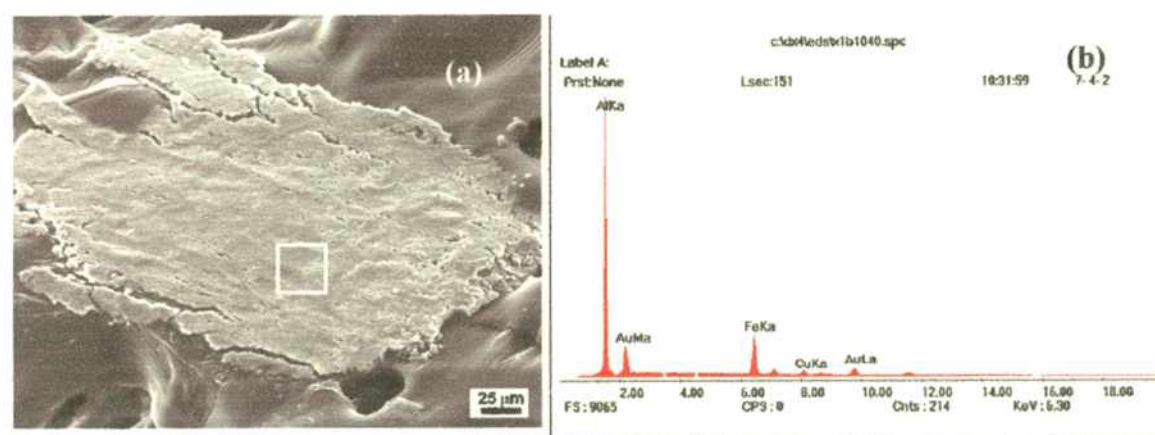


Figura 7.22
P1: AA1060/ Al_2O_3 / 15p

- a) Vista de un fragmento.
- b) Espectro EDAX de la región marcada en la figura (a).

Fragmentos de p3: AA6061/ Al_2O_3 / 15p

Hay preponderancia de fragmentos en forma de láminas delgadas, como los que se muestran en la figura 7.23.a. También se observaron fragmentos más gruesos, por ejemplo el fragmento de mayor tamaño, ubicado a la derecha de la figura 7.23.a. Para dar referencia del tamaño de las láminas pueden considerarse que se asemejan a un rectángulo con una relación de lados de 2x1, con medidas de 50 a 250 μm par a el lado de mayor dimensión.

En una de las caras de los fragmentos se ven surcos de abrasión, similares a como se observó en las superficies desgastadas de las probetas.

En diversos fragmentos se realizó un análisis de la composición química mediante EDAX, y se encontró Al y Fe en la composición de las mismas, similares al espectro mostrado en la figura 7.23.b. No se observaron partículas de refuerzo morfológicamente diferenciadas aunque su tamaño original era de 2 μm , aprox.

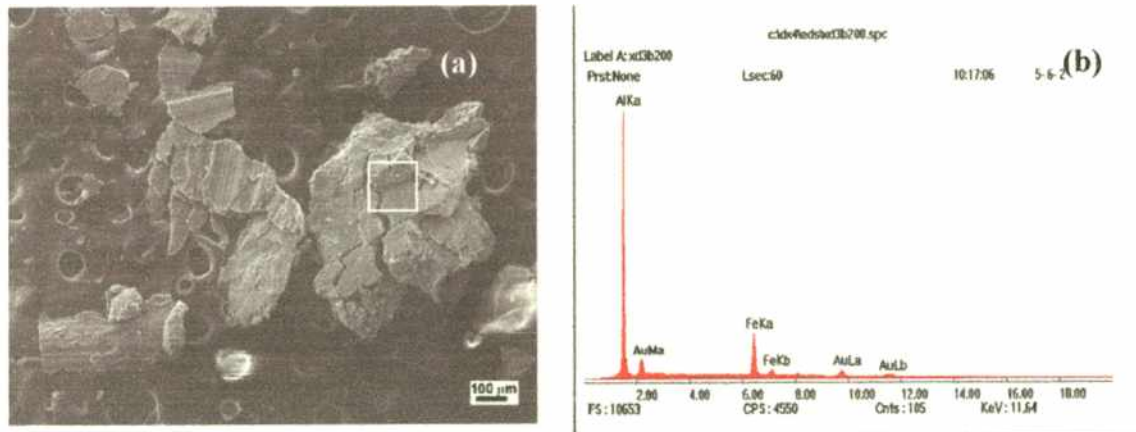


Figura 7.23
P3: AA6061/ Al_2O_3 / 15p

- a) Vista general de los fragmentos.
- b) Espectro EDAX de la región marcada con un rectángulo en la figura (a).

Fragmentos de p4: AA6061/ Al_2O_3 / 10p

Se observaron fragmentos en forma de láminas delgadas, semejantes a un rectángulo con una relación de lados de 2x1, su tamaño fue variable: desde los 100 a 400 μm . También se observaron fragmentos más gruesos, tal como la mostrada en la figura 7.24.a de bordes muy irregulares y la superficie visible muestran surcos de abrasión similares a las observadas en la superficie desgastadas de las probetas.

En la figura 7.24.b se muestra un espectro EDAX donde se identifican los picos de Al y Fe como elementos constituyentes del fragmento.

Observando con mayor aumento la superficie de los fragmentos se encontraron partículas blancas, vistas al SEM, destacadas sobre un fondo oscuro, ver la figura 7.24.c. En el fondo oscuro se observaron los surcos de abrasión mencionados. Sobre varias partículas blancas se tomaron lecturas de composición química mediante EDAX y se encontraron Al y Fe en una proporción de aproximadamente 4 a 1 en todos los casos, a modo representativo se muestra en la figura 7.24.d uno de los espectros recogidos. No se observaron partículas de refuerzo morfológicamente diferenciadas aunque su tamaño original era de 2 μm , en promedio.

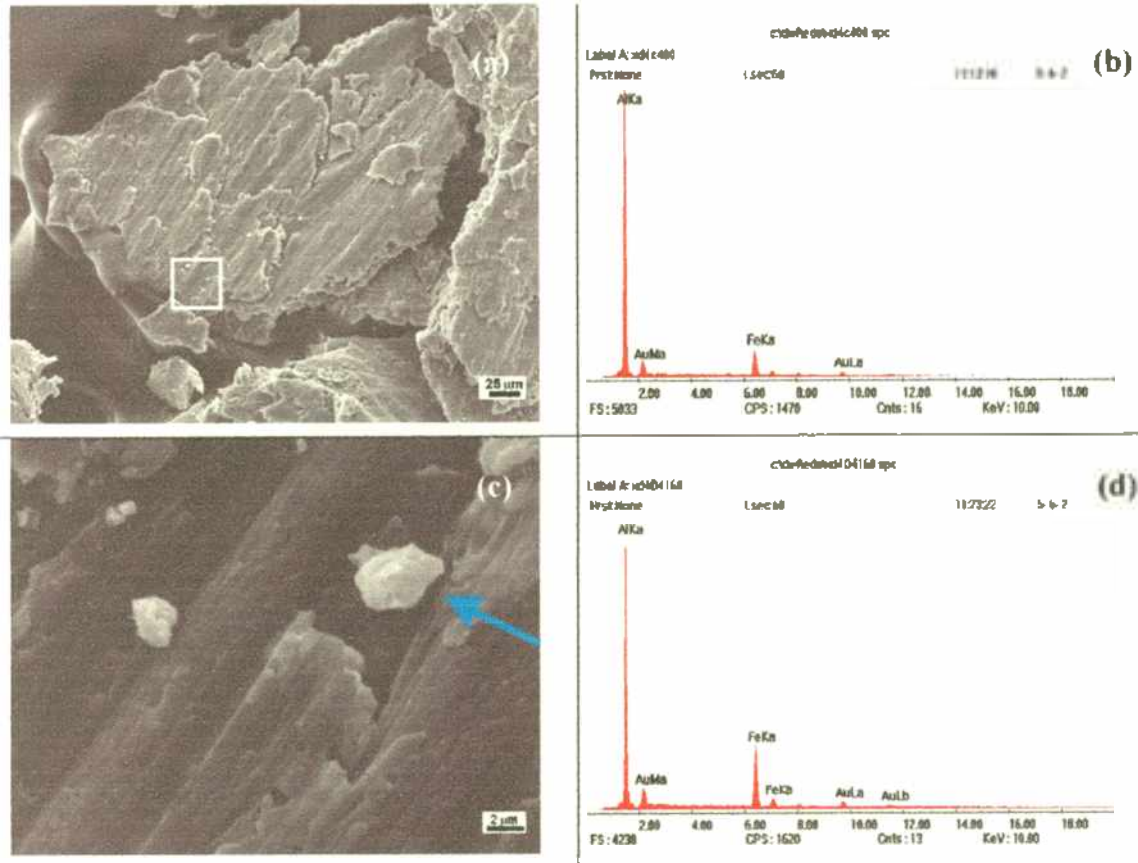


Figura 7.24
P4: AA6061/ Al_2O_3 / 10p

- a) Vista general de los fragmentos.
- a) Espectro EDAX de la región marcada con un rectángulo en la figura (a)
- b) Vista aumentada de la región marcada en la figura (a)
- c) Espectro EDAX correspondiente a la partícula blanca señalada en la figura (c).

Fragmentos de p5: AA6061/ Al_2O_3 / 5p

En la figura 7.25.a se ve un espectro general de fragmentos, entre ellos se ven fragmentos en forma de láminas delgadas, fragmentos enrollados y fragmentos gruesos de formas irregulares, un ejemplo de éste último se muestra en la figura 7.25.b, cuya cara visible no muestra surcos de abrasión como los vistos en otros fragmentos. El tamaño de los fragmentos varió desde los 100 a los 400 µm.

Un análisis de composición química mediante EDAX del fragmento mostrado en la figura 7.25.b indica la presencia de Al y Fe, tal como se ve en el espectro de EDAX en la figura 7.25.c. No se observaron partículas de refuerzo morfológicamente diferenciadas aunque su tamaño original era de 2 µm, en promedio.

En los fragmentos de estas probetas se vieron las pequeñas partículas blancas mencionadas anteriormente.

7.4.2. Materiales reforzados con intermetálico, Ti_3Al

Fragmentos de p6: AA6061/ Ti_3Al / 5p

Se observan fragmentos en forma de láminas delgadas y otros más gruesos, sus tamaños son variables pero en general va desde los 200 a 500 μm , una muestra de ellos se observa en la figura 7.26.a. Los fragmentos en forma de láminas presentan surcos de abrasión, similares a los encontrados en la superficie desgastada de las probetas. Los fragmentos más gruesos presentan bordes irregulares, ver la figura 7.26.b. En gran cantidad de fragmentos se encontró hierro detectado mediante EDAX, ver figura 7.26.c.

Las partículas de refuerzo, de dureza 530 HV, no fueron identificadas en las superficie de los fragmentos a pesar de que originalmente su tamaño era de 25 μm , en promedio.

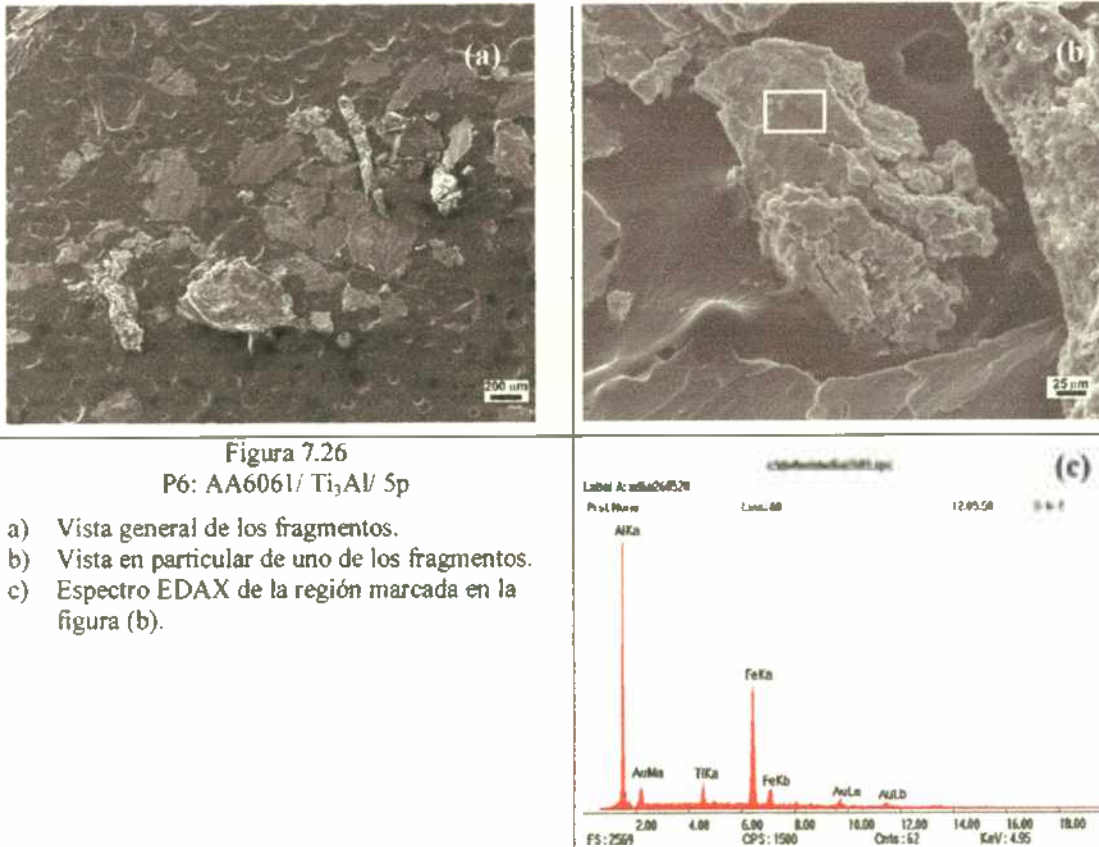


Figura 7.26

P6: AA6061/ Ti_3Al / 5p

- a) Vista general de los fragmentos.
- b) Vista en particular de uno de los fragmentos.
- c) Espectro EDAX de la región marcada en la figura (b).

Fragmentos de p7: AA6061/ Ti₃Al/ 10p

Se encontraron fragmentos en forma de láminas y otros más gruesos. la variedad de tamaños fue amplia desde 100 a 400µm para ambos casos. En la figura 7.27.a se observa un fragmento grande con una superficie irregular, sobre la cual se realizó un análisis de la composición química mediante EDAX, encontrándose Al, Ti y Fe como principales constituyentes, ver la figura 7.27.b. En este y otros fragmentos similares se observaron pequeñas partículas blancas y brillantes al SEM, ver la figura 7.27.c. El análisis de la composición química, mediante EDAX, de estas partículas blancas indicó en general la misma proporción de Al, Ti y Fe, en la figura 7.27.d se muestra uno de los espectros obtenidos.

Entre los fragmentos no se identificaron partículas de refuerzo, a pesar de que originalmente su tamaño era de 25 µm, en promedio.

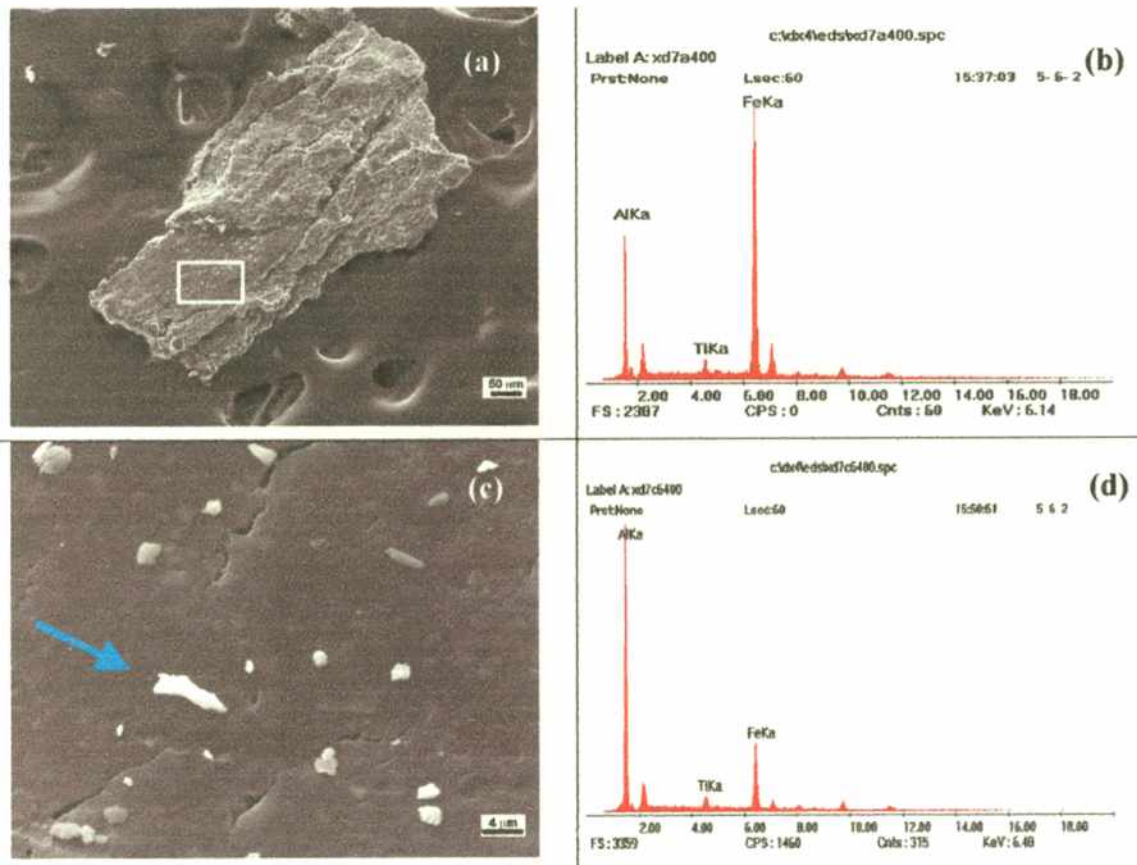


Figura 7.27
p7: AA6061/ Ti₃Al/ 10p

- a) vista de un fragmento.
- b) Espectro EDAX de la región marcada en la figura (a)
- c) Región ampliada de la superficie de un fragmento similar al mostrado en (a).
- d) Espectro EDAX de la partícula blanca indicada en la figura (c).

7.4.3. Materiales Reforzados con Diboruro de Titanio, B_2Ti .

Fragmentos de p8: AA6061/ B_2Ti / 15p

Se observan fragmentos de diversos tamaños, desde los 50 a 300 μm algunos de ellos en forma de láminas, con una superficie lisa donde se ven surcos de abrasión, ver la figura 7.28.a, y otros de forma irregular tal como se ve en la figura 7.28.b. En ambos se encontró hierro en su composición, además de Al y Ti, tal como se ve en el espectro de EDAX de la figura 7.28.c.

Las partículas de refuerzo originales, de dureza 2700 HK, con tamaños promedios de 10 μm inicialmente no fueron identificadas en la superficie de los fragmentos.

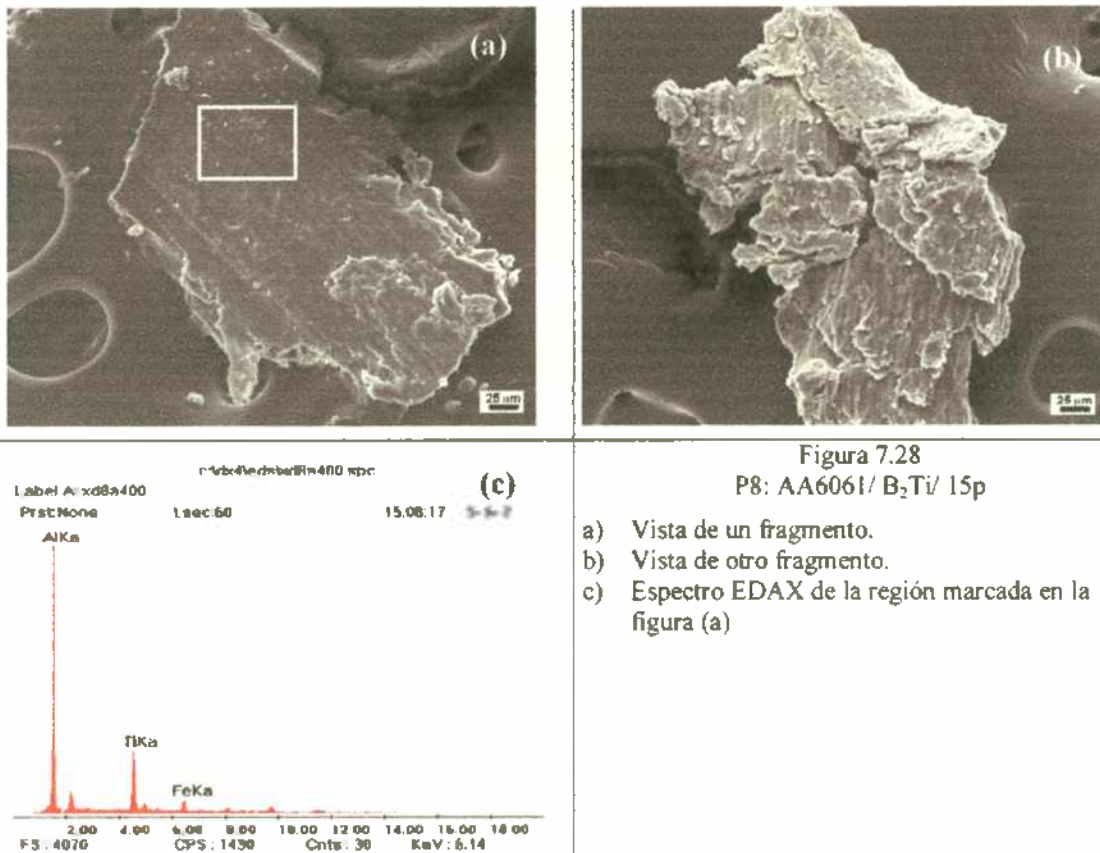


Figura 7.28
P8: AA6061/ B_2Ti / 15p

- a) Vista de un fragmento.
- b) Vista de otro fragmento.
- c) Espectro EDAX de la región marcada en la figura (a)

Fragmentos de p9: AA6061/ B_2Ti / 10p

Los fragmentos de esta probeta fueron de muy variados tamaños desde 100 hasta 400 μm . Predominando los fragmentos en forma de láminas delgadas, tal como se muestra en la figura 7.29.a. Se analizó la composición química de varios fragmentos, encontrándose Al, Ti y Fe, en la figura 7.29.b se muestra un espectro de EDAX característico.

En los fragmentos con forma de láminas se observaron surcos de abrasión similares a los encontrados en la superficie desgastada de las probetas.

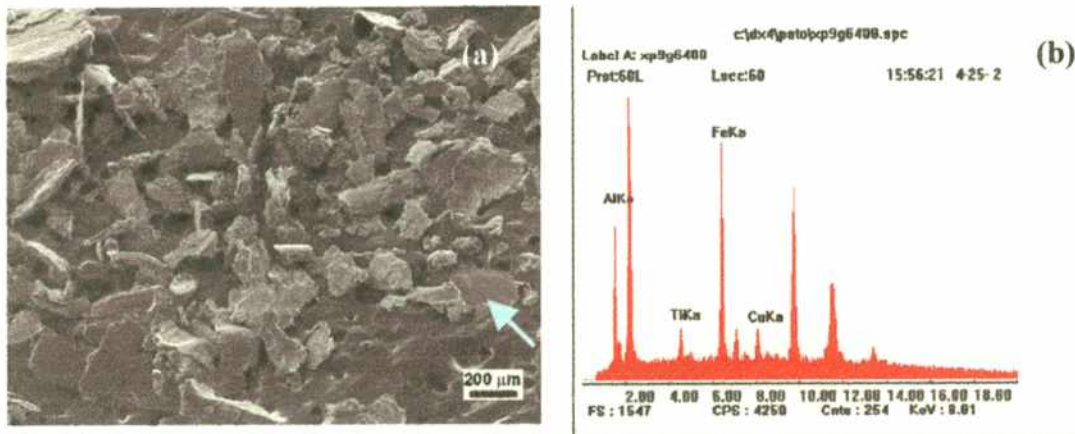


Figura 7.29
P9: AA6061/ B₂Ti/ 10p

- a) Vista general de los distintos fragmentos durante el desgaste.
- b) Espectro EDAX característico recogido de un fragmento señalado en la figura (a).

Fragmentos de p10: AA6061/ B₂Ti/ 5p

Se observan fragmentos en forma de láminas delgadas y otros más gruesos y de formas irregulares, tal como se ve en la figura 7.30.a. El tamaño de los mismos es muy variado, desde 50 a 400 µm. En algunos fragmentos se observan surcos de abrasión similares a los observados en las superficie desgastadas de las probetas.

En la figura 7.30.b se observa un fragmento de gran tamaño que en la cara visible presenta los surcos de desgaste, se determinó la composición química de esa superficie y se encontraron: Al, Ti y Fe, tal como se muestra en la figura 7.30.c.

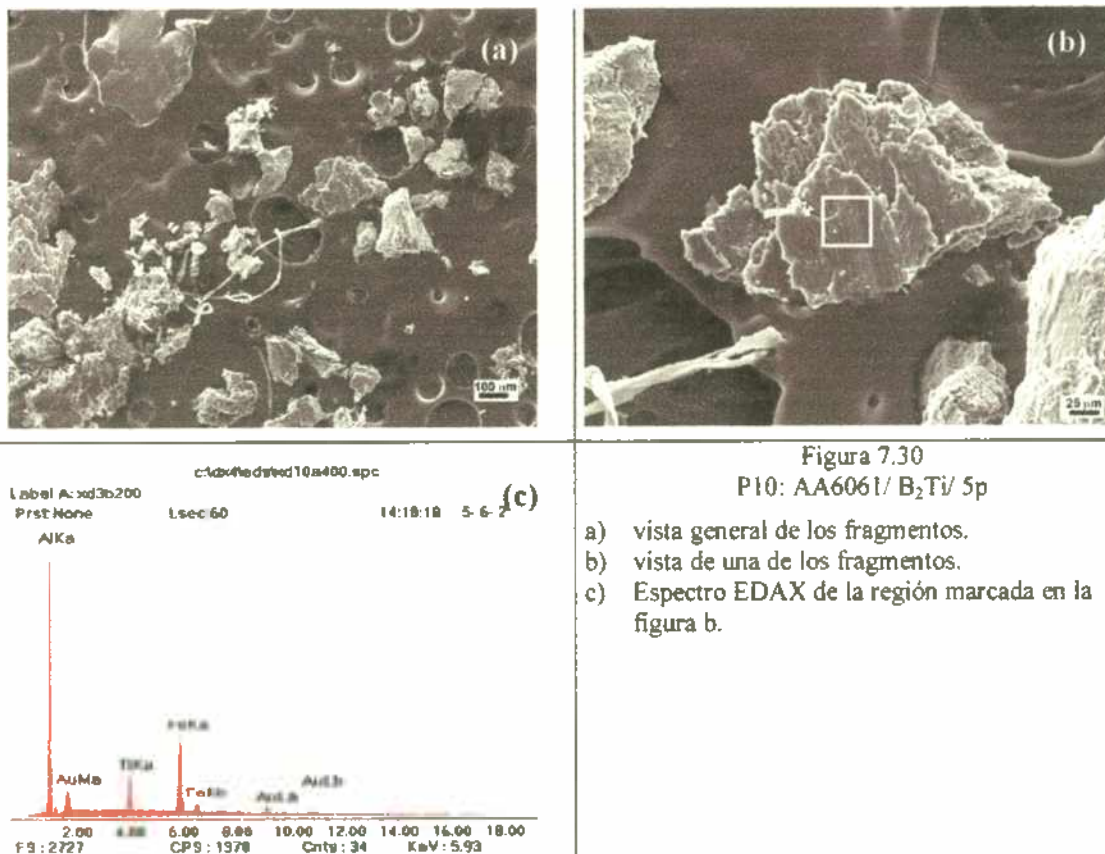


Figura 7.30
P10: AA6061/ B₂Ti/ 5p

- a) vista general de los fragmentos.
- b) vista de una de los fragmentos.
- c) Espectro EDAX de la región marcada en la figura b.

7.4.4. Material Reforzado con Carburo de Boro, C_4B

Fragmentos de p11: AA6061/ B_4C / 5p

Entre los fragmentos de esta probeta se encontraron algunos en forma de láminas delgadas y fragmentos enrollados, ver las figuras 7.31.a y b. Los tamaños de estos fragmentos fueron muy variados desde los 25 hasta los 400 μm , siendo generalmente los fragmentos en forma de láminas los de mayores dimensiones.

En numerosos fragmentos se encontró hierro en su composición, tal como se muestra en el espectro de EDAX de la figura 7.31.c.

En ninguno de los fragmentos observados se encontraron partículas de refuerzo originales, de dureza 2800 HK, a pesar de que inicialmente tenían un tamaño promedio de 10 μm .

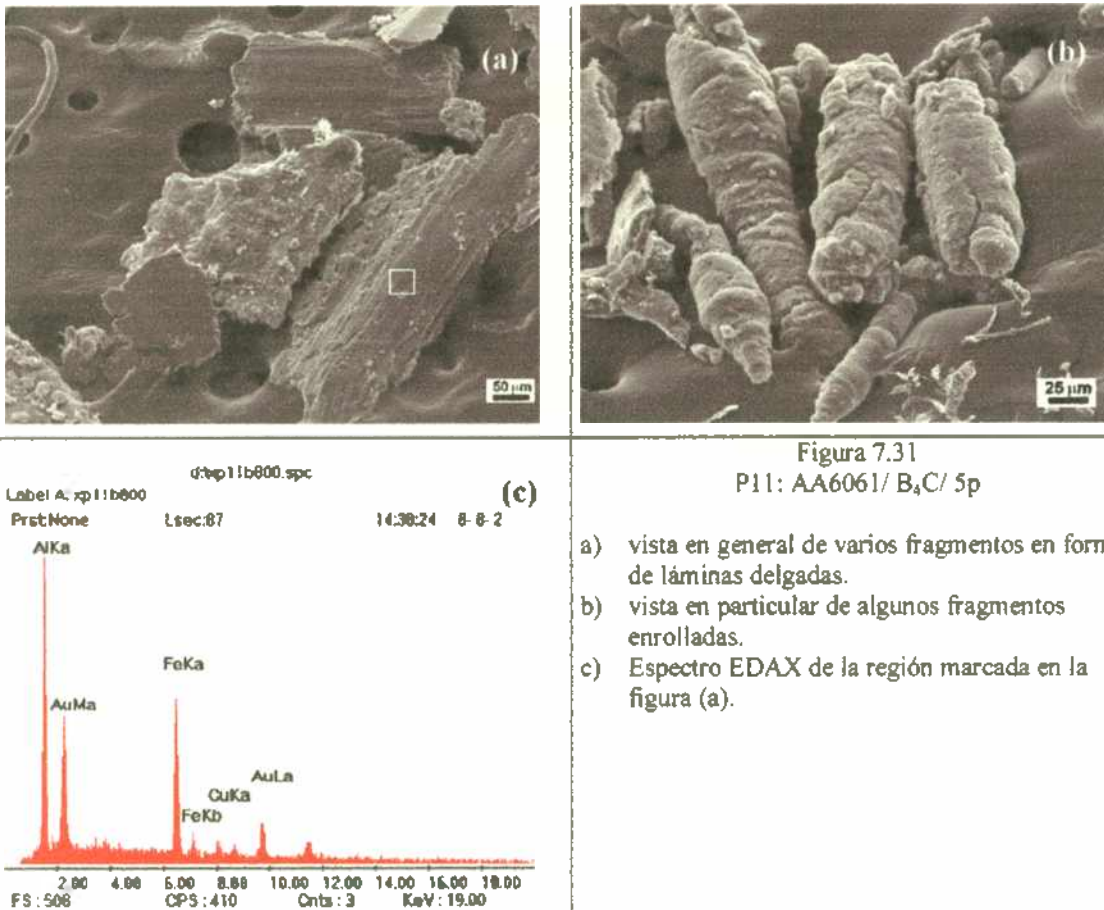


Figura 7.31
P11: AA6061/ B_4C / 5p

- a) vista en general de varios fragmentos en forma de láminas delgadas.
- b) vista en particular de algunos fragmentos enrollados.
- c) Espectro EDAX de la región marcada en la figura (a).

7.4.5. Material sin Reforzar

Fragmentos de p12: AA6061

Las fragmentos pertenecientes al material monolítico, fueron de formas muy diversas, y de tamaños comprendidos entre 300 y 1500 μm como se ve en la figura 7.32.a. Algunas de ellos presentaron un aspecto similar a la superficie desgastada de la probeta, ver la figura 7.32.b. En otros casos se obtuvieron fragmentos en forma de "cinta", ver la figura 7.32.c, de grandes dimensiones. Analizando la composición química de varios fragmentos mediante EDAX, sólo se encontró Al, y prácticamente ningún rastro de Fe, un espectro característico de los recogidos se muestra en la figura 7.32.d.

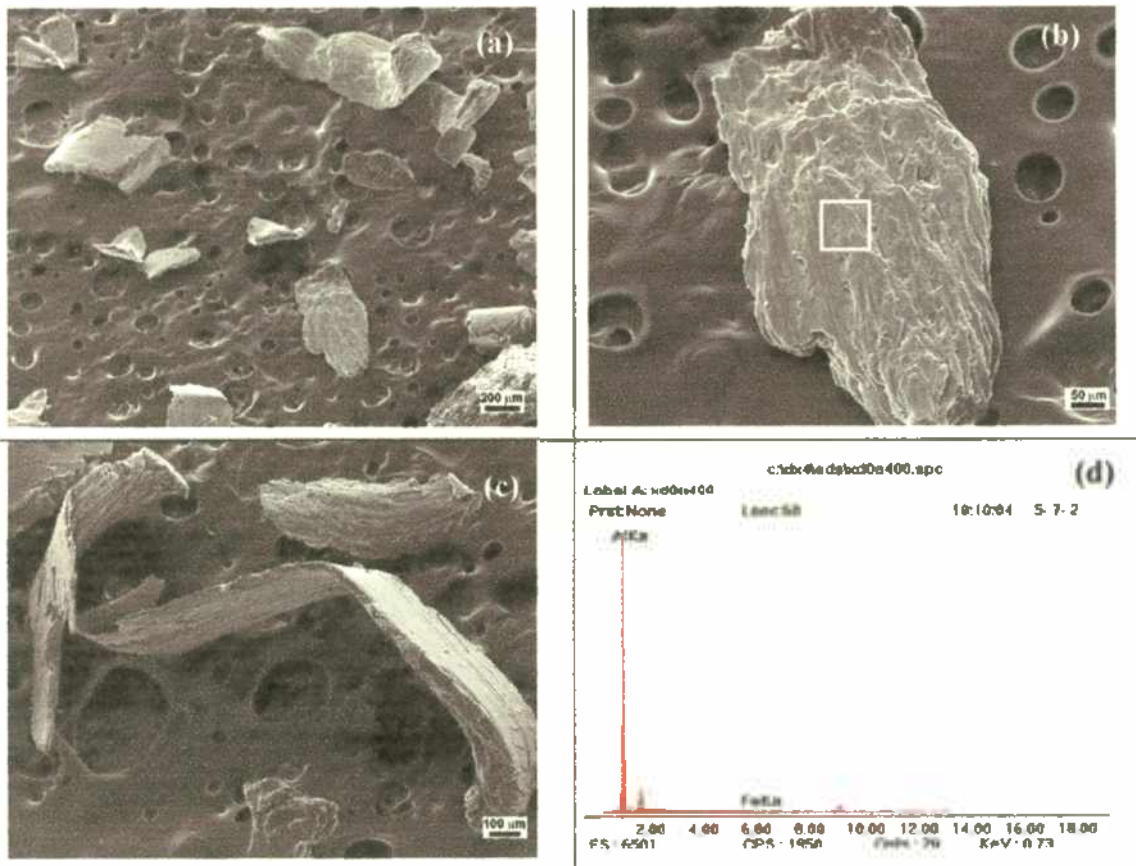


Figura 7.32
P12: AA6061

- a) Vista general de los fragmentos.
- b) Vista en particular de uno de los fragmentos vistos en la figura (a)
- c) Vista de otro fragmento en forma de cinta.
- d) Espectro de EDAX de la región marcada en la figura (b)

7.4.6. Análisis y Discusión Sobre los Fragmentos

En las figuras 7.22 a la 7.32 se observaron los fragmentos de las diferentes probetas ensayadas, del análisis realizado puede extraerse que hay una similitud entre los fragmentos de los materiales compuestos, esto indicaría que los mecanismos operantes en estos materiales son similares. En cambio los pertenecientes a la probeta del material monolítico, ver la figura 7.32, se diferencian de los otros en su tamaño y por la ausencia de fragmentos en forma de láminas. En la tabla 7.8 se detalla un resumen de las características de los fragmentos.

Tabla 7.8: Resumen de las características observadas en las fragmentos durante el desgaste.

Probeta	Tipos de los fragmentos				Fragmentos con Hierro	Tamaños (µm)	Partículas pequeñas con Fe
	Forma de Cintas	Láminas delgadas	Voluminosos	Enrolladas			
AA1060 / Al ₂ O ₃ / 15 p	NR	sí	NR	NR	sí	< 400	sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 5 p	NR	sí	sí	sí	sí	< 250	sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 10 p	NR	sí	sí	NR	sí	< 400	sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 15 p	NR	sí	sí	sí	sí	< 400	sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 5 p	NR	sí	sí	NR	sí	< 500	sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 10 p	NR	sí	sí	NR	sí	< 400	sí
AA6061 / B ₂ Ti / 5 p	sí (delgadas)	sí	sí	sí	sí	< 300	sí
AA6061 / B ₂ Ti / 10 p	NR	sí	sí	sí	sí	< 400	sí
AA6061 / B ₂ Ti / 15 p	NR	sí	sí		sí	< 400	sí
AA6061 / B ₄ C / 5 p	sí (delgadas)	sí	sí	sí	sí	< 400	sí
AA6061	sí (gruesas)	no	sí	sí	no	300 a 1500	no
NR: No se Revisó específicamente							

Aplas y Zhang^[4, 22] estudiaron el AA6061 reforzado con 20% Al₂O₃, observaron que en un régimen moderado los fragmentos tienen forma de láminas delgadas, de espesores de 5 a 20 µm y de tamaños comprendidos entre 100 a 500 µm. En un régimen severo observaron que los fragmentos tienen forma de láminas más gruesas, con espesores de 50 a 200 µm y tamaños similares. No dan ninguna referencia de la composición química ni de los surcos de abrasión, aunque estos son visibles en las fotos que muestran. En cambio durante el desgaste de AA6061, en condiciones de desgaste moderado, con altas cargas y velocidades, observaron fragmentos en forma de láminas,

con espesores de 5 a 30 μm y relaciones espesor / longitud menores a 1:10. Por otro lado, en condiciones de desgaste severo observaron que los fragmentos tienen forma de placas con espesores de 50 a 200 μm y longitudes de 500 a 2000 μm .

Li y Tandon^[3] estudiaron el desgaste de aleaciones Al-Si y observaron características morfológicas similares a las encontradas por Alpas y Zhang.

La relación de tamaños encontradas aquí, a semejanza con los resultados de Alpas y Zhang, aportan pruebas de que los materiales compuestos se encuentran en un régimen moderado de desgaste, en cambio, el material monolítico se encuentra en un régimen severo.

Según lo mencionan Rigney et al.^[23], los fragmentos en forma de *flakes* o láminas delgadas son habituales en procesos de desgaste por delaminación. En cambio fragmentos en forma de cintas son típicas de procesos de corte. Los fragmentos enrollados deben su forma a que sufrieron modificaciones posteriores de su forma original, lo más frecuente es que se lo fuerce a rodar entre las superficies deslizantes adoptando esa forma enrollada, también si hay tensiones residuales de diferente signo en las caras de un fragmento pueden provocar que este se curve.

Debido a la presencia de refuerzos duros en todas las probetas de materiales compuestos es de esperarse que algunos refuerzos realicen procesos de corte^[1, 23], manifestaciones de ellas son los fragmentos en forma de cintas delgadas. En cambio las cintas gruesas observadas en el material monolítico se deben más a fenómenos de adhesión y a la escasa resistencia del material, más que al efecto de corte neto.

Los fragmentos voluminosos observadas poseen características semejantes a una región de la superficie desgastada de la probeta, la rebaba. Si se observan las figuras 7.1.b, 7.2.b, 7.3.b, 7.6.b, 7.10.c la morfología de estas rebabas es similar los fragmentos que se observan en las figuras 7.23.b, 7.25.b, 7.26.a, 7.30.b, 7.31.b. Por lo tanto la rebaba pudo ser el origen de una parte de las fragmentos. Estos fragmentos voluminosos no son tan grandes como los fragmentos encontrados en el material monolítico.

En todos los casos la composición química de los fragmentos fue similar a las de las superficies desgastadas de las probetas, pudiendo haber diferencias según el punto en el que se hicieron las determinaciones. Además, los surcos de abrasión observados en varios fragmentos indican que su origen fue la superficie desgastada de las probetas, más específicamente la MML, lo que no puede especificarse es si esta superficie estaba efectivamente en contacto o se encontraba en la zona de la rebaba. Las superficies que no presentan surcos de abrasión pueden originarse en procesos de fatiga de contacto o fenómenos combinados de adhesión-oxidación.

En los fragmentos de los materiales compuestos se identificaron mecanismos de desgaste por adhesión, por delaminación y por abrasión sobre la MML, además la deformación plástica contribuía con el desprendimiento de algunas partes de la rebaba.

Referencias de este Capítulo

- [1] Modi, O.P.; Prasad, B.K.; Yegneswaran, A.H.; Vaidya, M.L. - Dry sliding wear behaviour of squeeze cast aluminum alloy - silicon carbide composites - Mat. Sci. Eng. A151 (1992) 235-245
- [2] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites I. Macrobehaviour - Acta Materialia, 44, n:2(1996) 451-460.
- [3] Li, X.Y.; Tandon, K.N. - Mechanical mixing induced by wear of an Al-Si alloy against M2 steel - Wear, 225-229 (1999) 640-648.

- [4] Zhang, I.; Alpas, A.T. - Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum alloys - *Mat. Sci. Eng.*, A161 (1993) 273-284.
- [5] How, H.C.; Baker, T.N. - Dry Sliding Wear Behavior of Saffil-reinforced AA 6061 Composites - *Wear*, 210 (1997) 263-272.
- [6] Lee, C.S.; Kim, Y.H.; Han, K.S.; Lim, T.- Wear behavior of aluminium matrix composite materials - *J. Mat. Sci.*, 27 (1992) 793-800.
- [7] Bowden, P. F.; Tabor, D. - *The friction and lubrication of solids*. Clarendon Press, Oxford (1950)
- [8] Kayaba, T; Kato, K; Hokkirigawa, K - Analysis of the abrasive wear mechanism by successive observations of wear processes in a scanning electron microscope - *Wear*, 110 (1986) 419-430
- [9] Kato, K. - Micro-mechanisms of wear - wear modes - *Wear*, 153 (1992) 277-295
- [10] Subramanian, C. - On mechanical mixing during dry sliding of aluminium-12.3 wt% silicon alloy against copper - *Wear*, 161 (1993) 53-60.
- [11] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites. II. The characterization of subsurface deformation and correlation with behavior - *Acta Materialia*, 44, n:2(1996) 461-473.
- [12] Suh, N.P. - The delamination theory of wear - *wear*, 25 (1973) 111-124-
- [13] Kuo, S.M.; Rigney, D. - Sliding behavior of aluminium - *Mat. Sci. Eng.* A157 (1992) 131-143.
- [14] Sundberg, M.; Sundberg, R.; Hogmark, S.; Otterberg, R.; Lehtinen, B.; Hornstrom, S.E.; Karlsson, S.E. - Metallographic aspects on wear of special brass - *Wear*, 115 (1987) 151-165.
- [15] Standard Test Methods for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.-ASTM G 77-99. (1999) Annual Book of ASTM Standards 03.02.
- [16] Leduma, K.C. - A review of scuffing and running-in of lubricated surfaces, with asperities and oxides in perspective - *Wear*, 100 (1984) 315-331.
- [17] Godet, M. - The third-body approach: a mechanical view of wear - *Wear*, 100 (1984) 437 - 452
- [18] Dautzenberg, J.H.; Zaat, J.H. - Quantitative determination of deformation by sliding wear - *Wear*, 23 (1973) 9-19
- [19] How, H.C.; Baker, T.N. - Characterization of sliding friction-induced subsurface deformation of saffil-reinforced AA6061 composites. - *Wear*, 232 (1999) 106-115
- [20] Zhang, J.; Alpas, A.T. - Delamination wear in ductile materials containing second phase particles - *Mat. Sci. Eng.*, A160 (1993) 25-35
- [21] Yilmaz, O; Buytoz, S. - Abrasive wear of Al sub 2 O sub 3 -reinforced aluminium-based MMCs. - *Comp. Sci. Tech. (UK)*, vol. 61, no. 16, 2381-2392, Dec. 2001
- [22] Zhang, J.; Alpas, A.T. - Transition between mild and severe wear in aluminium alloys - *Acta Mater.* Vol 45, n° 2 (1997) 513-528.
- [23] Rigney, D.A.; Chen, L.H.; Naylor, G.S.; Rosenfield, A.R. - Wear processes in sliding systems - *Wear*, 100 (1984) 195-219

CAPÍTULO 8: DISCUSIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS EN RELACIÓN CON LA TASA DE DESGASTE

La influencia de la proporción de refuerzos en la resistencia al desgaste ya fue discutida en el capítulo 6. Ahora se tratará de correlacionar los resultados de resistencia al desgaste con los estudios de la superficie y subsuperficie y los mecanismos reseñados en la revisión bibliográfica.

Una de las primeras variables que se tienen en cuenta al evaluar la resistencia al desgaste es la dureza de los materiales involucrados. En este caso por tratarse de materiales compuestos, se utilizó el criterio mencionado en el parágrafo 4.4 para medir la dureza del mismo. Por lo tanto, se realizaron diversas comparaciones tomando medidas de microdureza de la matriz de los materiales compuestos originales y de la microdureza de la MML. Este tipo de mediciones fue utilizado por investigadores tales como: Venkataraman y Sundararajan^[1], Alpas et al.^[2], y How y Baker^[3] quienes las utilizan para correlacionarlas con otras magnitudes cuantificadoras del desgaste.

La ley de Archard así como las leyes de desgaste por abrasión, vista en el parágrafo 1.3.4, consideran la dureza del material original como una variable influyente en el desgaste. En la figura 8.1 se realizó la comparación entre la tasa de desgaste de las probetas ensayadas, mostradas en la figura 6.4, y la dureza de la matriz del material compuesto correspondiente, vista en la figura 4.2, fuera de escala se indica la tasa del material monolítico. En dicha figura no se puede encontrar una correlación significativa entre dichas magnitudes. Las probetas con valores de dureza de la matriz, comprendidas entre 41 y 123 HV (0,025), presentan tasas de desgaste similares. A excepción de las probetas p3: AA6061/ Al₂O₃/ 15p; p4: AA6061/ Al₂O₃/ 10p; p5: AA6061/ Al₂O₃/ 5p.

Las leyes de desgaste antes mencionadas predicen un comportamiento como el indicado por la línea de trazos dibujada en la figura 8.1.

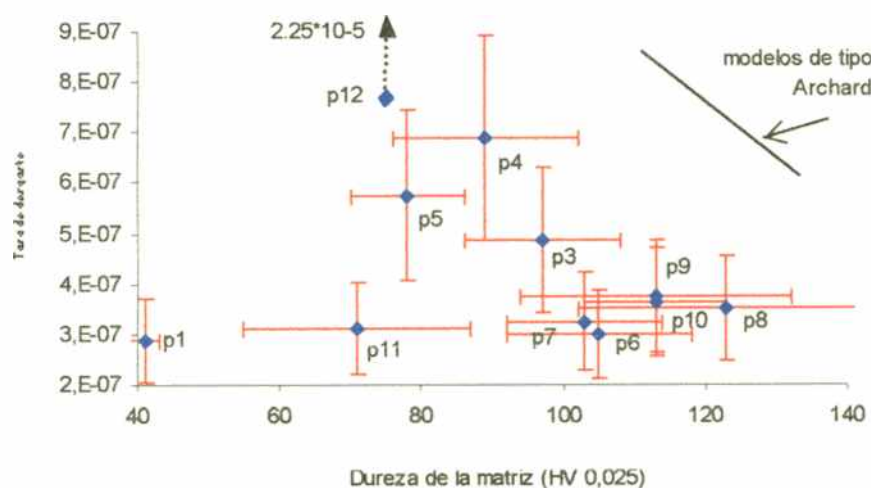


Figura 8.1: Comparación entre la tasa de desgaste y la dureza de la matriz en cada probeta. La tasa de desgaste de la probeta de material monolítico se encuentra fuera de escala, y esta indicada junto a la flecha.

La línea de trazos indica la tendencia esperada por un modelo de tipo Archard.

Casos similares, que no siguen leyes de tipo Archard fueron reportados por varios autores^[4, 5]. Rigney dice que cuando se obtiene un tercer cuerpo con propiedades diferentes al material original, es de esperarse que la dureza del material original o de la matriz influya muy poco en la resistencia al desgaste^[6].

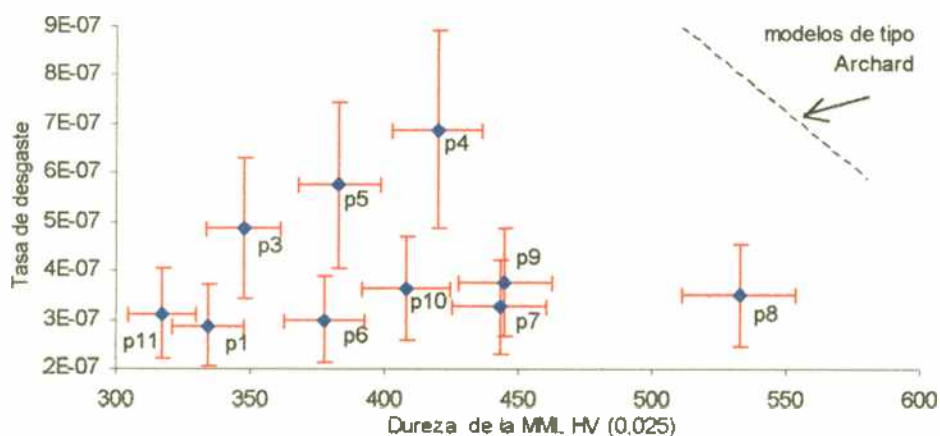


Figura 8.2: Comparación de la tasa de desgaste con la dureza de la MML. Se indicaron las barras de error en ambas medidas.

La línea de trazos indica un comportamiento predicho por modelos de tipo Archard

En este caso se formó una MML, con dureza 3 veces mayor que la matriz, en todas las probetas de materiales compuestos, como se indicó en capítulos anteriores, por lo tanto fue analizada y comparada la tasa de desgaste con la dureza de la MML. Esta comparación se ilustra en la figura 8.2, en donde se puede observar que, salvo en las probetas p3, p4 y p5, todas las probetas las cuales cubren un intervalo de durezas que va desde 317 a 532 HV (0,025), presentan prácticamente la misma tasa de desgaste. Esto indica que no hay evidencia de correlación entre estas magnitudes según Archard, a pesar de ser las superficies en contacto.

Analizando por separado las probetas p3, p4 y p5 sugieren una tendencia, si no se considera el error en las medidas, inversa a la predicha por un modelo de tipo Archard.

La subsuperficie también está involucrada en el proceso de desgaste, tal como se mencionó en el párrafo 2.4. Varios autores han comparado características de la subsuperficie con la tasa de desgaste tratando de encontrar alguna correlación. En este trabajo se tomaron medidas de los espesores de la capa deformada y de la MML, así como mediciones de microdureza en la subsuperficie para buscar endurecimiento por deformación.

En la figura 8.3 se grafica la tasa de desgaste versus el espesor de la capa mezclada, dados en la figura 7.16. A pesar de la gran variabilidad de los datos pueden destacarse una observación: considerando todas las probetas no se encontró una correlación significativa entre el espesor de la MML y la tasa de desgaste, ya que prácticamente en todas las probetas, salvo p4:AA6061/ Al₂O₃/ 10p, se midieron espesores similares de entre 20 y 30 μ m.

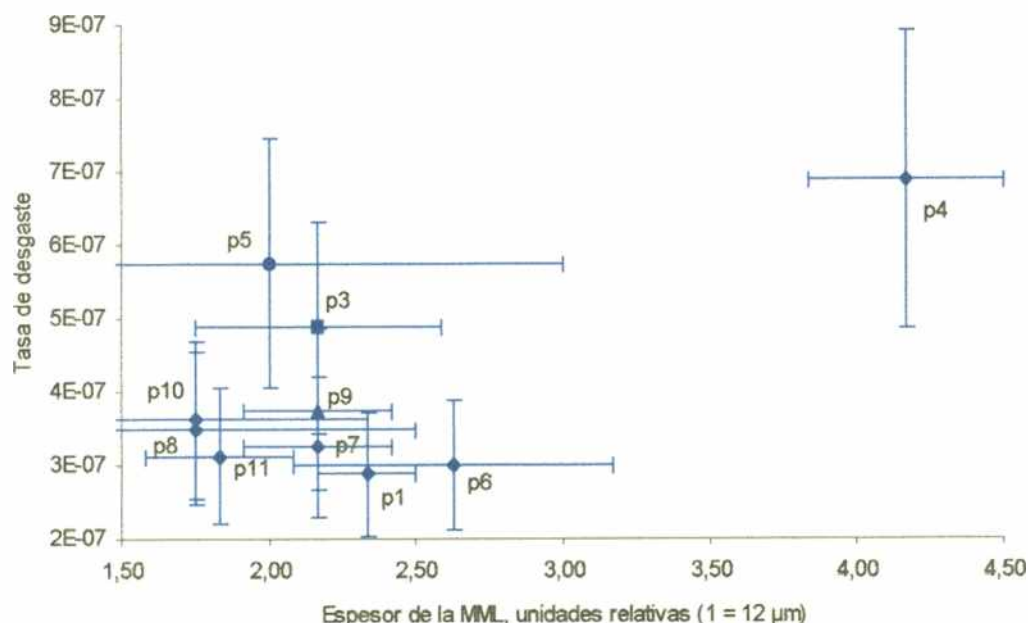


Figura 8.3: Comparación de la Tasa de desgaste con el espesor de la MML. Se indican los intervalos de error en cada magnitud.

Sobre la relación entre los Espesores de la MMI. y la Tasa de desgaste Venkataraman y Sundararajan^[7] han encontrado evidencia de una correlación entre estas magnitudes, la cual no deja de ser cuestionable debido a la escasa información sobre el criterio utilizado para determinar el espesor de la MML, ni cuántos cortes se realizaron en la misma probeta.

Utilizando un criterio similar al anterior puede compararse la tasa de desgaste con el espesor de la zona deformada, cuyos valores fueron presentados en la figura 7.18. Esta comparación se muestra en la figura 8.4, en la cual no se observa una correlación significativa entre dichas magnitudes, ya que probetas que presentaron diferentes espesores de la zona deformada plásticamente, desde 120 a 300μm, presentan similares tasas de desgaste.

Hasta ahora se ha discutido sobre las características observadas que fueron cuantificadas, en todos los casos mencionados no se encontraron correlaciones satisfactorias con la Tasa de desgaste.

Realizando una análisis con las características morfológicas de la superficie desgastada, las que incluyen, surcos de abrasión, cráteres, fisuras, material adherido y rebaba. Se encontró una diferencia que permite agrupar los materiales compuestos por un lado y al material monolítico por otro.

Las características morfológicas mencionadas aparecen en forma similar sobre los materiales compuestos, como se mencionó en la tabla 7.5, debe recalcar que estos materiales presentan una capa de material mezclado, MML, en cambio en el material monolítico el aspecto de la superficie desgastada es muy diferente (ver la figura 7.11) la

que es debida principalmente a fenómenos de adhesión y probablemente recristalización y no presenta MML. La tasa de desgaste del material monolítico es muy superior a la de los materiales compuestos, con una diferencia de dos ordenes de magnitud, la diferencia morfológica más destacada es la presencia de la MML en los materiales compuestos. Obviamente, son las propiedades mecánicas alcanzadas por la capa mezclada la que producen un diferente comportamiento durante el desgaste.

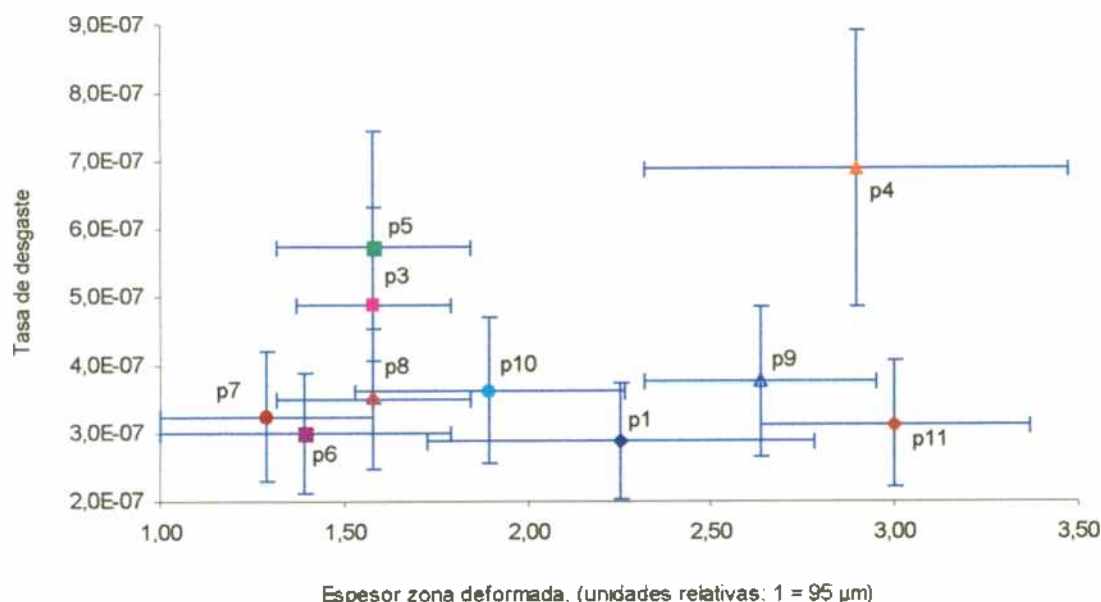


Figura 8.4: Comparación de la tasa de desgaste con el espesor de la zona deformada plásticamente en la subsuperficie.

Esta diferencia tan notable entre materiales monolíticos y compuestos fue observada por Alpas y Zhang^[8] en el intervalo de cargas donde el material compuesto se encuentra en un régimen de tipo II, tasas de desgaste bajas y similares independientemente de la proporción de refuerzo, y el material monolítico en un régimen de tipo III, tasas de desgaste altas, ver la figura 2.1.

Del análisis de los fragmentos pueden agruparse nuevamente los fragmentos obtenidos en materiales compuestos por un lado y los del material monolítico por otro, indicando que hay predominio de mecanismos de desgaste diferentes en cada grupo. Esto concuerda con las observaciones hechas sobre la superficie desgastada. Relacionándolo con la tasa de desgaste obtenida en ambos grupos y con lo reportado por Wilson y Alpas^[9] puede decirse que los materiales compuestos se encuentran en un régimen de desgaste moderado y el material monolítico en un régimen de desgaste severo.

Una discusión adicional sobre las probetas p3, p4 y p5 confeccionadas con AA6061 reforzadas con 15, 10 y 5% de Alúmina de 2μm en promedio. Estas probetas acusaron mayor desgaste que las probetas de otros materiales. En vista de que no se encontraron diferencias apreciables de microdureza en la subsuperficie, ni en la MML,

ver el apéndice A, tampoco hubieron diferencias en la morfología de las superficies desgastadas, ver la sección 7.1. Del análisis de los fragmentos no se extraen mayores diferencias con los fragmentos de los demás materiales compuestos. El espesor de la zona deformada y de la MML ya fue expuesto más arriba, no encontrándose razón que permita explicar esta diferencia.

Se ha mencionado en el capítulo 2, que el desgaste de materiales compuestos es complejo y generalmente intervienen varios mecanismos simultáneamente. En virtud de las discrepancias encontradas en la tasa de desgaste deben mencionarse otros mecanismos que pueden intervenir y que se manifiesten de manera diferente a las demás probetas, debido principalmente a la diferencia de tamaño de los refuerzo de por lo menos un orden de magnitud, ver la tabla 4.2.

En la sección 1.2.4 se mencionó que la deformación de la subsuperficie también participa en el proceso de desgaste, y en este caso el menor tamaño de las partículas influiría en:

- la capacidad de transmitir cargas.
- la eficacia en el arresto de fisuras
- la ductilidad del material compuesto

Una disminución en la capacidad de transmitir la carga de la matriz al refuerzo, es un concepto muy utilizado cuando se tratan fibras cortas donde se puede calcular una longitud mínima de la fibra para que se pueda aprovechar toda la resistencia del material de refuerzo. Si este fuese el efecto predominante influiría en la profundidad de la zona deformada. En la probeta p4 se encuentra un alto valor en la zona deformada, ver la figura 7.18, que se corresponde con un alto desgaste ver la figura 6.4. En cambio las probetas p3 y p5 acusan una profundidad de la zona deformada similar a las probetas de los demás materiales compuestos.

La eficacia para frenar fisuras esta directamente relacionado con el tamaño de los refuerzos^[10], pero considerando que se encontraron pocas fisuras en la subsuperficie se considera que este mecanismo puede ser más importante en la MML de estos materiales. Si fuese así se manifestaría una mayor proporción de cráteres respecto a los demás materiales, esto no fue observado.

La ductilidad de los materiales compuestos está directamente influenciada con el tamaño de los refuerzos extrínsecos, mayores μm ^[11]. Si este fuese el mecanismo predominante se tendrían gran cantidad de material deformado y acumulado hacia el borde de salida, el cual puede formar rebaba o bien desprenderse como fragmentos. Como no se realizaron medidas de cuantificación de la rebaba no puede concluirse sobre este punto. Además, un estudio cuantitativo de los fragmentos resulta complicado y no se dispuso del equipo adecuado.

Concluyendo las probetas de materiales reforzados con partículas pequeñas pueden sufrir en mayor medida los mecanismos recién mencionados respecto a las demás probetas de materiales compuestos.

Referencias de este Capítulo:

- [1] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites_ I. Macrobehaviour - *Acta Mater.*, 44, n:2 (1996) 451-460.
- [2] Alpas, A.T.; Hu, H.; Zhang, J. - Plastic deformation and damage accumulation below the surfaces - *Wear*, 162-164 (1993) 188-195.
- [3] How, H.C.; Baker, T.N. - Characterization of sliding friction-induced subsurface deformation of saffil-reinforced AA6061 composites. - *Wear*, 232 (1999) 106-115.
- [4] Rigney, D.- The roles of hardness in the sliding behavior of materials - *Wear*, 175 (1994) 63-69
- [5] Biswas, S.K.; Arvind Singh, R. - Wear of metals-influence of some primary material properties - *Tribology letters*, vol 13, n 3 (2002) 203-207.
- [6] Rigney, D.A. - Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials - *Wear*, 245 (2000) 1-9.
- [7] Venkataraman, B.; Sundararajan, G. - The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites_ II. The characterization of subsurface deformation and correlation with behavior - *Acta Mater.*, 44, n:2(1996) 461-473.
- [8] Zhang, I.; Alpas, A.T. - Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum alloys - *Mat. Sci. Eng.*, A161 (1993) 273-284.
- [9] Wilson, S.; Alpas, A.T. - Wear mechanism maps for metal matrix composites - *Wear*, 212 (1997) 41-49.
- [10] Hertzberg, R.W. - *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3° Ed., John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [11] Brechet, Y.; Newell, J.; Tao, S.; Embury, J.D. - A note on particle comminutio at large plastic strains in Al-SiC composites - *Scr. Metal. Mater*, 28 (1993) 47-51.

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES

Las conclusiones se presentan agrupadas según los distintos sectores caracterizados y en relación con la tasa de desgaste.

Conclusiones sobre la Superficie desgastada y los Fragmentos

- La morfología de la superficie desgastada de los materiales compuestos presenta características similares en todos los casos, mostrando una diferencia notable con la superficie desgastada del material monolítico, en las condiciones de ensayos utilizadas.
- En todos los materiales ensayados se observó abundante material extrudado y acumulado en el borde de salida de las probetas conformando una rebaba.
- Los fragmentos, o debris, indicarían la existencia de mecanismos de abrasión, delaminación y deformación plástica abundante en todas las probetas de materiales compuestos. También señalan la transferencia de material de la contraparte a la probeta. Los fragmentos del material monolítico no presentan hierro y son de forma muy irregular e indican la preponderancia de mecanismos adhesivos.

Conclusiones sobre la Capa Mezclada Mecánicamente

- En todos los materiales compuestos se formó una capa de material mezclado en forma mecánica, MML. Conteniendo hierro o compuestos de hierro proveniente de la contraparte.
- Se tomaron 40 medidas de microdureza, sobre 10 probetas, que indican que la MML, cuando se forma, es más dura que la matriz del compuesto original. Con una dureza similar a la del material de la contraparte.
- El espesor de la MML no está relacionado con el espesor de la zona deformada, y dependería de las variables del proceso: carga y velocidad.

Conclusiones sobre la Subsuperficie

- La deformación plástica sufrida por el material alcanzó en todos los casos la subsuperficie de las probetas con profundidades de 120 a 300 μm , evidenciado por el desplazamiento de los refuerzos en la dirección del deslizamiento. Esta deformación plástica acumuló material en el borde de salida.
- Utilizando medidas de microdureza se detectó endurecimiento por trabajado en casi todas las probetas de materiales monolíticos y compuestos.

Conclusiones sobre la magnitud de la tasa de desgaste

- La tasa de desgaste de los materiales compuestos es 100 veces menor que la del material monolítico.
- La tasa de desgaste de los materiales compuestos reforzados con un mismo tipo de refuerzos no se ve afectada significativamente por la proporción en volumen de ellos, en las proporciones estudiadas.

Conclusiones sobre la relación entre las características morfológicas y la tasa de desgaste

- No hay correlación entre dureza de la MML y la tasa de desgaste de las probetas de materiales compuestos.
- No hay correlación entre dureza de la matriz y la tasa de desgaste de las probetas.
- Las condiciones de ensayo sitúan a los materiales compuestos en una región de desgaste moderado y al material monolítico en una de desgaste severo.
- La comparación de dureza de la **capa mezclada** con la del compuesto original, pone en evidencia que un tercer cuerpo de características muy diferentes, evidenciado por una medición de microdureza, se interpone entre las superficies originales, siendo independiente del tipo de refuerzo empleado. **La MML en cada probeta puede ser la razón de que las tasas de desgaste sean similares en todos los materiales compuestos.**

CAPÍTULO 10: TRABAJOS FUTUROS

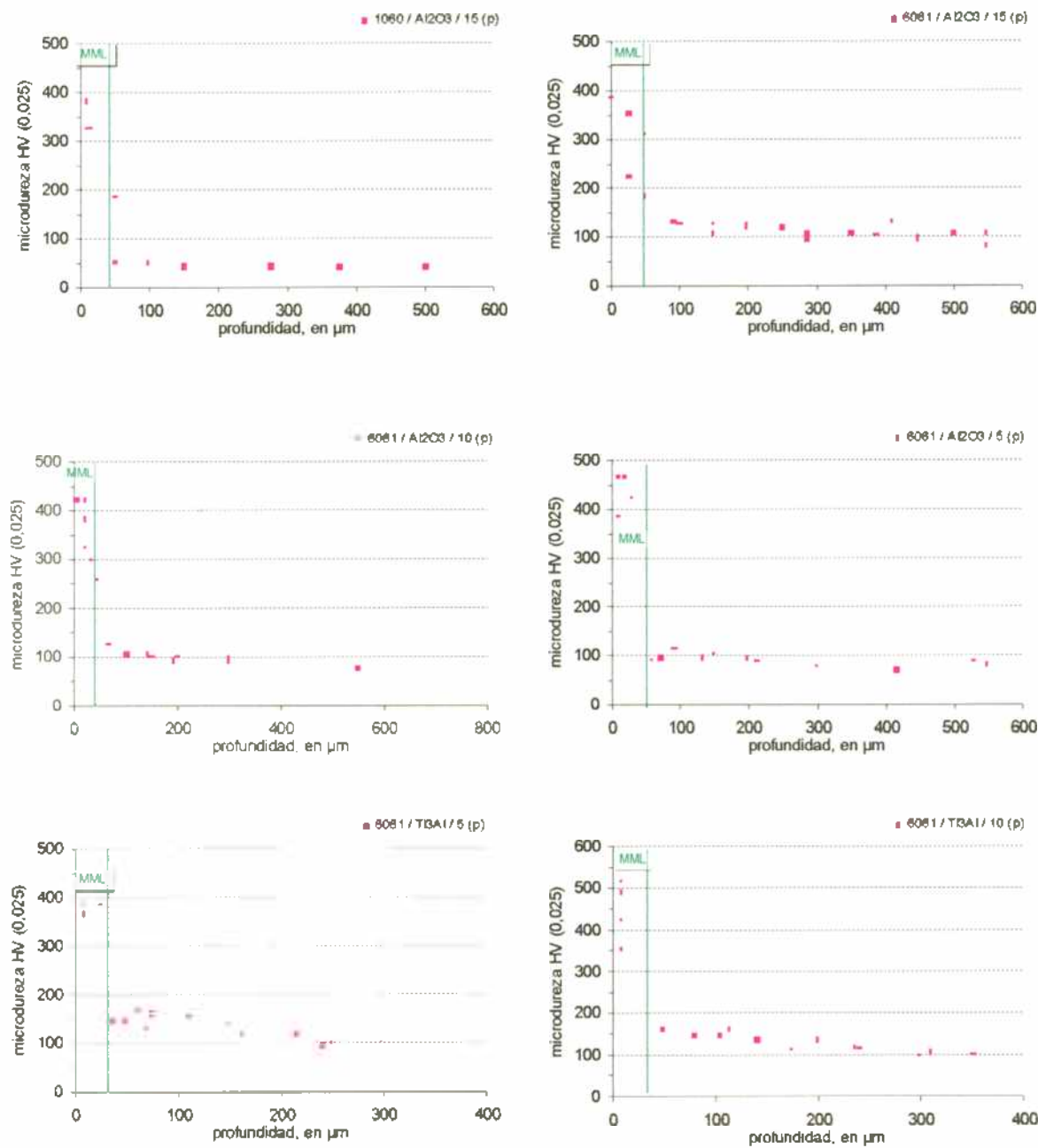
En función de las evidencias acumuladas a lo largo del trabajo experimental y del análisis realizado, sugerimos los próximos trabajos a realizar para una mejor comprensión de los materiales compuestos de matriz de Aluminio y su comportamiento en desgaste.

- Analizar la interfase de los diferentes refuerzos con la matriz.
- Inspeccionar la superficie del disco para buscar marcas de abrasión, cráteres y material del pin adherido .
- Realizar la modelización del fenómeno de desgaste teniendo en cuenta la Capa de material Mezclado Mecánicamente.
- Repetir ensayos en la matriz sola.
- Medir Tensiones Residuales, para confirmar recristalización en el 6061 monolítico.
- Hacer estudios para caracterizar la Capa Mezclada Mecánicamente mediante TEM, RX y de Tensiones residuales para estudiar recristalización y formación de nanocristales en la MML.

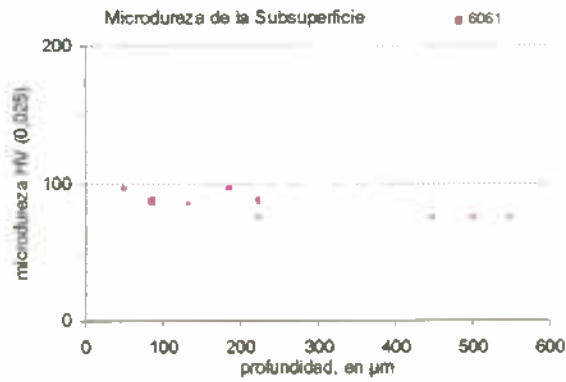
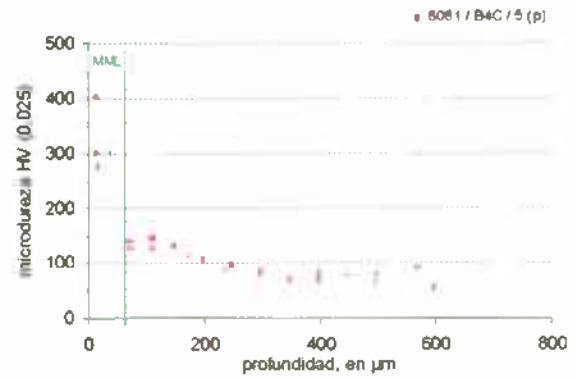
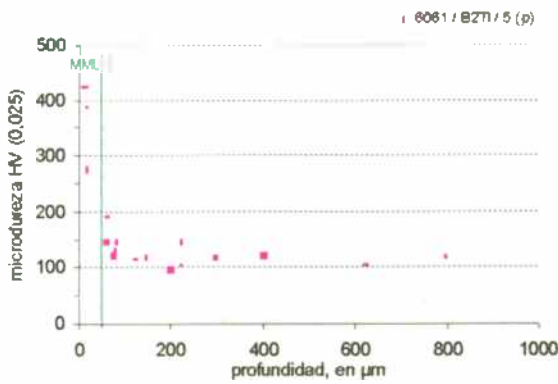
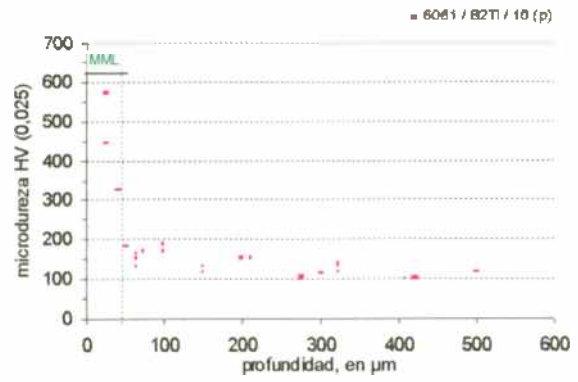
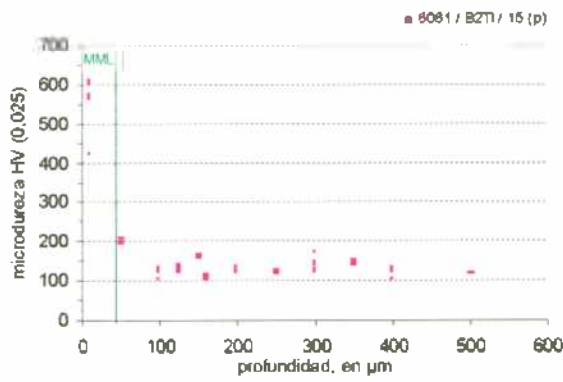
APÉNDICE A

Gráficos de Microdureza de la MML y de la subsuperficie versus la profundidad a la superficie desgastada

Figura A.1



Apéndice A



APÉNDICE B

Método para medir endurecimiento en la subsuperficie

Para confirmar que hubiera endurecimiento en la subsuperficie se realizó una comparación de lecturas puntales de microdureza de la zona más profunda y lecturas puntales de la zona próxima a la superficie, sin considerar la MML.

Para la comparación se realizó una prueba t entre las dos muestras, con la hipótesis nula considerando una diferencia entre la media de las dos muestras igual a cero. Considerando un intervalo de confianza del 95%, el número preciso de lecturas en cada muestra se indica en la tabla siguiente.

En la tabla B.1 se indican los valores de la diferencia entre las medias de las muestras, el intervalo de error considerando un intervalo de confianza del 95% y la evidencia de una diferencia significativa, que finalmente se adopta para decidir si hay endurecimiento por deformación.

Tabla B.1: Detalles del cálculo de la diferencia de dureza, entre la matriz del material original y el material deformado por el desgaste

Material	Nº de Puntos considerados	Diferencia de dureza, [HV(0.025)]	Error (+/-) con 95%	Endurecimiento
AA1060 / Al ₂ O ₃ / 15 (p)	5	4.6	4.3	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 15 (p)	6	22.7	11.1	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 10 (p)	5	21.2	14.3	Sí
AA6061 / Al ₂ O ₃ / 5 (p)	5	19.8	10.7	Sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 10 (p)	5	50.0	13.3	Sí
AA6061 / Ti ₃ Al / 5 (p)	5	43.0	19.1	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 15 (p)	5	29.2	55.1	No
AA6061 / B ₂ Ti / 10 (p)	5	45.4	26.5	Sí
AA6061 / B ₂ Ti / 5 (p)	5	31.8	31.1	Sí
AA6061 / B ₄ C / 5 (p)	5	59.0	16.8	Sí
AA6061	4 -5	14.2	9.8	Si