

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE LA  
ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 CON Y SIN RECUBRIMIENTO  
AUTOCATALÍTICO DE ELECTROLESS NI-P**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar por el título de  
Ingeniero Metalúrgico  
por la Br. León Mathison, Silvia.

Caracas, Abril 2003

**DEDICATORIA**

A Dios por permitirme estar aquí hoy y haber llegado a ser quién soy.

A mi madre (Lourdes) por darme fortaleza, seguridad y apoyo incondicional en los momentos más duros y también en los más felices de mi vida. A ti, por siempre impulsarme a hacer lo que más me gusta sin importar las barreras. Te amo mama!

A mi hermana (Claudia) por ser fuente de inspiración en mi vida y por impulsarme a siempre querer ser mejor, a ti que siempre serás mi familia y tendrás un lugar especial en mi corazón.

A mis amigos incondicionales (Nayar, Luis V., Cesar, Juan Carlos, Jenny, Zoraida) gracias a ustedes conocí lo bello que es la amistad y a través de todos estos años me han demostrado lo importante que es contar con el apoyo de las personas que quieres. Para ustedes, que son algo especial y que jamás olvidaré.

A Luis Perdomo, por haber sido parte importante en el día a día de esta meta alcanzada, por ti supe de nuevo lo que es amar. A ti, por ser la persona que amo.

A todos los amigos que conocí en mi bella U.C.V. (Yelitza, Claudia V., Dayary, Edgar, Víctor, Ronald, Gabriel, Rafael Ch., Riad, Andrés, María B., Jose Antonio, Baldomir, Omar, Claudia S., Jorge, y todos y cada uno de aquellos que tuve la dicha de conocer) a ustedes por haber formado parte de ese día a día en este recorrer de la vida.

*Silvia León Mathison*

**AGRADECIMIENTOS**

Hoy culmino otra meta más en vida, por ello quiero agradecer a todas aquellas personas que de una forma u otra formaron parte de este bello trayecto:

A Lourdes Mathison, mi madre. Gracias a ti nuevamente triunfé en una meta más. Gracias por ser mi amiga incondicional y por simplemente existir a mi lado y permitirme formar parte de tu vida.

A la Dr. Mariana Staia, mi tutora. Por su excelencia.

Al Ing. Marlon Cruz, por tu apoyo en todo momento.

A los Prof. Maribel Suarez y Prof. Edwuin Carrasqueño, por su esfuerzo en la culminación de este trabajo.

A Ing. Nayar Lugo, mi mejor amigo. Gracias, por hacer reír, por apoyarme, por escuchar. Simplemente mil gracias.

A Tec. Victor Torres, por toda tu ayuda y colaboración.

A Claudia Villafañe, por ser amiga. Ramona, gracias por el apoyo que me diste.

A Alberto Poggioli, por haber hecho posible que no desistiera cuando creía que no se podía. Por creer en mí. Gracias a ti hoy estoy aquí.

A la Universidad Central de Venezuela y muy particularmente, a la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales y todo el personal que lo conforma, profesores, técnicos, empleados y estudiantes, que quizás no nombro pero que saben que pusieron un granito de arena por enseñarme las herramientas necesarias para formarme como profesional y como persona.

A todos ustedes,

*Gracias!*

***Silvia león Mathison***

## **RESUMEN**

**León Mathison, Silvia**

# **COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 CON Y SIN RECUBRIMIENTO AUTOCATALÍTICO DE ELECTROLESS NI-P**

**Tutora: Dra. Mariana Staia.**

**Centro de Ciencia e Ingeniería de Nuevos Materiales y Corrosión (CENMACOR),  
Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Central de Venezuela.**

**Palabras claves:** Electroless Ni-P, Abrasión, 7075-T6, Arena seca/rueda de goma.

Se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento ante el desgaste abrasivo de una aleación de aluminio 7075-T6 sin y con recubrimiento de electroless Ni-P con alto contenido de fósforo (aproximadamente 18% P). El recubrimiento fue depositado a nivel industrial por la empresa Reliable Plating Corp. (U.S.A.), obteniéndose un espesor de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$ .

Adicionalmente, se estudiaron las características del recubrimiento tales como: rugosidad, morfología, perfil de composición química a través de su espesor y microdureza. La rugosidad del recubrimiento se determinó empleando el método de perfilometría óptica. El estudio de la morfología del recubrimiento se realizó mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Las huellas de desgaste de las muestras ensayadas fueron analizadas mediante las técnicas de perfilometría óptica y MEB con microanálisis químico por dispersión de la energía de rayos X (EDX). Los ensayos fueron realizados siguiendo los parámetros de la Norma ASTM G-65, bajo el ensayo arena/rueda de goma en condición seca.

A fin de establecer el método de ensayo que mejor se ajustará al estudio de la resistencia a la abrasión de esta aleación, se siguieron tres procedimientos establecidos en la norma. Los parámetros de ensayo que varían en cada caso son la carga y la distancia de deslizamiento: Procedimiento C (13,25 Kgf, 71,8 m); Procedimiento D (4,58 Kgf, 4309 m)

y el Procedimiento E (13,25 Kgf, 718 m). La morfología de las partículas abrasivas (arena sílice estándar Ottawa AFS 50-70) fueron analizadas mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), antes y después de los ensayos.

Los resultados evidenciaron que para el procedimiento D, que corresponde a la condición de menor carga (4,58 Kgf) y mayor distancia de deslizamiento (4309 m), el sustrato presentó un volumen desgastado de  $172.63 \text{ mm}^3$ , mientras que en el caso de las muestras recubiertas se encontró una disminución en el volumen desgastado de un 47 %, con respecto al volumen desgastado del sustrato sin recubrir.

Para el procedimiento E, que corresponde a la condición de mayor carga (13,3 Kgf) y una distancia de deslizamiento de 718 m, el sustrato presentó un volumen desgastado de  $457,81 \text{ mm}^3$ , mientras que en las muestras recubiertas se encontró una disminución en el volumen desgastado de un 69%, con respecto al volumen desgastado del sustrato sin recubrir.

Estos resultados indican que el recubrimiento de Electroless de Ni-P en su estado como depositado sobre la aleación de aluminio en estudio, mejora notablemente las propiedades de resistencia a la abrasión la misma.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b> .....	1
<b>FUNDAMENTO TEORICO</b>	
1.1. ALEACIONES DE ALUMINIO DE LA SERIE 7XXX .....	3
1.1.1. Características y propiedades.....	3
1.2. DEPÓSITOS AUTOCATALÍTICOS ELECTROLESS NI-P .....	7
1.2.1. Principios básicos y características.....	7
1.2.2. Reacciones químicas.....	9
1.2.3. Composición del baño de electroless Ni-P .....	11
1.2.3.1. Fuente de Níquel.....	11
1.2.3.2. Agente reductor.....	12
1.2.3.3. Acomplejantes .....	12
1.2.3.4. Estabilizadores – Inhibidores.....	12
1.2.3.5. Reguladores de pH y buffers .....	13
1.2.3.6. Aceleradores .....	15
1.2.3.7. Energía.....	16
1.2.4. Características de los depósitos. ....	17
1.2.4.1. Estructura.....	17
1.2.4.2. Propiedades Físicas.....	17
1.2.4.2.1. Densidad .....	17
1.2.4.2.2. Contenido de fósforo, %.....	18
1.2.4.2.3. Porosidad .....	19
1.2.4.3. Propiedades mecánicas .....	20
1.2.4.3.1. Esfuerzos internos.....	20
1.2.4.3.2. Dureza.....	22
1.2.4.3.3. Ductilidad.....	23

1.3. DESGASTE.....	24
1.3.1. Tipos de desgaste.....	24
1.3.1.1. Desgaste abrasivo .....	25

## **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

2.1. DIAGRAMA DE FLUJO .....	31
2.2. PROBETAS DE ENSAYO .....	32
2.2.1. Preparación superficial del metal base.....	32
2.2.2. Recubrimiento.....	33
2.2.3. Identificación de las probetas .....	33
2.2.4. Medición de rugosidad.....	34
2.2.5. Medición de dureza.....	34
2.3. CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO .....	35
2.3.1. Composición química .....	35
2.3.2. Análisis de la intercara y medición del espesor .....	35
2.4. CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA.....	37
2.4.1. Ensayos de abrasión.....	37
2.4.1.1. Descripción del equipo .....	37
2.4.1.2. Parámetros de la prueba.....	39
2.4.1.3. Procedimiento .....	39
2.4.1.4. Cálculos y reporte de datos.....	41
2.5. ANÁLISIS DE LAS HUELLAS DE DESGASTE Y DE LA ARENA ABRASIVA... 42	
2.5.1. Caracterización de las huellas de desgaste .....	42
2.5.2. Estudio de la arena abrasiva.....	42

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTALES**

3.1. MEDICIÓN DE RUGOSIDAD.....	43
3.2. MEDICIÓN DE DUREZA, SISTEMA RECUBRIMIENTO/SUBSTRATO .....	46

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO .....	50
3.3.1. Morfología del recubrimiento .....	50
3.3.2. Composición química del recubrimiento .....	51
3.3.3. Espesor de los recubrimientos .....	52
3.4. CARACTERIZACION TRIBOLOGICA.....	53
3.4.1. Ensayos de desgaste según la Norma ASTM G 65. ....	53
3.4.2. Caracterización de la arena abrasiva.....	76
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>80</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>82</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>83</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>86</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Solubilidad sólida de los elementos aleantes en el aluminio .....	4
<b>Figura 2</b> Diagrama de fases del sistema Al-Zn.....	5
<b>Figura 3</b> Representación esquemática tratamiento térmico T6 (Envejecimiento artificial) ..	6
<b>Figura 4</b> Esquema representativo del proceso de deposición de un recubrimiento de electroless Ni.....	8
<b>Figura 5</b> Efecto del pH de la solución en la velocidad de deposición y el contenido de fósforo en el depósito.....	13
<b>Figura 6</b> Eficiencia de los “buffers” .....	14
<b>Figura 7</b> Efecto de los reguladores de pH en la solución de electroless níquel.....	15
<b>Figura 8</b> Efecto del ácido succínico en la velocidad de deposición .....	16
<b>Figura 9</b> Efecto de la temperatura de la solución en la velocidad de deposición. Evaluación realizada a valores de pH entre 3 y 5 .....	16
<b>Figura 10</b> Efecto del porcentaje de fósforo en la densidad de los depósitos Ni-P.....	18
<b>Figura 11</b> Dependencia de la porosidad con el espesor de los recubrimientos de electroless Ni-P .....	20
<b>Figura 12</b> Variación de los esfuerzos internos con el contenido de fósforo del recubrimiento de electroless Ni-P.....	21
<b>Figura 13</b> Efecto del contenido de fósforo sobre los esfuerzos internos de depósitos Ni-P sobre sustratos de acero y aluminio .....	21
<b>Figura 14</b> Efecto del contenido de fósforo en las propiedades mecánicas del electroless Ni-P en su estado como depositado .....	23
<b>Figura 15</b> Dos modalidades genéricas de abrasión (a) Abrasión de dos cuerpos, (b) Abrasión de tres cuerpos .....	26
<b>Figura 16</b> Flujograma del procedimiento experimental.....	31
<b>Figura 17</b> Dimensiones de la probeta de abrasión, según Norma ASTM G 65-94. ....	32
<b>Figura 18</b> Equipo de desbaste y pulido Ecomet 5, marca Buehler. (vista Frontal) .....	33
<b>Figura 19</b> Perfilómetro de interferometría óptica ZYGO New View 200.....	34
<b>Figura 20</b> Durometro LECO.....	35

<b>Figura 21</b>	Esquema del corte longitudinal realizado a las probetas para el análisis del espesor y de la intercara entre el sustrato y el recubrimiento. ....	36
<b>Figura 22</b>	Esquema Máquina de Abrasión.....	38
<b>Figura 23</b>	Maquina para ensayo de abrasión, marca Falex.....	38
<b>Figura 24</b>	Perfil topográfico 3D de las muestras de Aluminio 7075 – T6 (a) sin recubrimiento y (b) con recubrimiento de electroless Ni-P.....	44
<b>Figura 25</b>	Dependencia de la dureza con la profundidad relativa de indentación para las muestras recubiertas con electroless Ni-P .....	46
<b>Figura 26</b>	Fotomicrografía por MEB en el modo de electrones secundarios a 500x del recubrimiento de electroless Ni-P a) Vista superior del recubrimiento. b) Análisis químico por EDX realizado sobre la superficie del recubrimiento. ....	50
<b>Figura 27</b>	Análisis de la composición química del recubrimiento de electroless Ni-P con la profundidad, realizado por la técnica de SNMS.....	51
<b>Figura 28</b>	Fotomicrografía por MEB de la sección transversal de una probeta de una aleación de aluminio 7075-T6 con un recubrimiento de electroless Ni-P, a 500x en el modo de electrones primarios.....	52
<b>Figura 29</b>	Representación gráfica de la pérdida de volumen en función de la condición de ensayo para las muestras de aluminio 7075-T6 sin y con recubrimiento de electroless Ni-P.....	54
<b>Figura 30</b>	Representación gráfica del porcentaje de pérdida de volumen con respecto al volumen total de las muestras en función de la condición de ensayo para las muestras de aluminio 7075-T6 sin y con recubrimiento de electroless Ni-P.....	55
<b>Figura 31</b>	Velocidad de pérdida volumétrica en mm <sup>3</sup> /seg para un carga de 13.25 Kgf en función de la distancia de deslizamiento para los ensayos realizados bajo los procedimientos C y E de la norma ASTM G 65.....	56
<b>Figura 32</b>	Fotomicrografías de las huellas de desgaste. El flujo de arena es de arriba hacia abajo. (a) Al 7075-T6, procedimiento C; (b) muestra recubierta, procedimiento C; (c) Al 7075-T6, procedimiento D; (d) muestra recubierta, procedimiento D; (e) Al 7075-T6, procedimiento E; (f) muestra recubierta, procedimiento E.....	58

- Figura 33** Perfiles topográficos 3D de las muestras ensayadas mostrando la rugosidad de las huellas de desgaste (a) Al 7075-T6, procedimiento C; (b) Muestra recubierta, procedimiento C; (c) Al 7075-T6, procedimiento D; (d) Muestra recubierta, procedimiento D; (e) Al 7075-T6, procedimiento E; (f) Muestra recubierta, procedimiento E.....59
- Figura 34** Fotomicrografías por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 13.25 Kgf y 71.8 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras, a) Zona de salida de la huella a 100x en electrones secundarios b) Centro de la huella a 1000x..61
- Figura 35** Fotomicrografías por MEB en el modo de electrones secundarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 13.25 Kgf y 71.8 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras a) Zona de salida de la huella, 100x b) centro de la huella, 1000x. ....62
- Figura 36** Fotomicrografías por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 4.58 Kgf y 4309 m. Se observan las huellas de desgaste de la muestra: a) Zona de salida de la huella a 100x en electrones secundarios b) Centro de la huella a 1000X.....64
- Figura 37** Fotomicrografías por MEB en el modo de electrones secundarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 4.58 Kgf y 4309 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras a) ES de la zona de salida de la huella, 100x b) ES del centro de la huella, 1000x. ....65
- Figura 38** Fotomicrografías por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 13.25 Kgf y 718 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras, a) Zona de salida de la huella a 100x en electrones secundarios b) Centro de la huella a 1000x..67
- Figura 39** Fotomicrografías por MEB en el modo de electrones secundarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 13.25 Kgf y 718 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras a) ES de la zona de salida de la huella, 100x b) ES del centro de la huella, 1000x.....68
- Figura 40** Fotomicrografía por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 13.25 Kgf y 71.8 m. Se observan la huella de desgaste en el modo de electrones primarios y

su respectivo análisis por EDX a) BSE, 1000x b) EDX de la zona clara en el centro de la probeta.....70

**Figura 41** Fotomicrografía por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 13.25 Kgf y 71.8 m. Se muestra la huella de desgaste en el modo de electrones primarios y el análisis por EDX a la partícula central en la huella a) BSE, 1000x b) EDX puntual de la partícula.....71

**Figura 42** Fotomicrografía por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 4.58 Kgf y 4309 m. Se muestra la huella de desgaste en el modo de electrones primarios y el análisis por EDX a la partícula central en la huella a) BSE, 1000x b) EDX puntual de la partícula.....72

**Figura 43** Fotomicrografía por MEB en el modo de electrones primarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 4.58 Kgf y 4309 m. La dirección de flujo de arena es de derecha a izquierda. Se muestra la interfase Aluminio – electroless Ni-P de las huellas de desgaste a) Probeta ensayada por el procedimiento C, 1000x b) Probeta ensayada por el procedimiento D, 1000x c) Probeta ensayada por el procedimiento E, 1000x.....75

**Figura 44** Fotomicrografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido en el modo de electrones primarios de las partículas de arena abrasiva Ottawa Sand 50-70 antes y después de ensayar, 50x. (a) Arena original (b) Arena ensayada.....77

**Figura 45** Fotomicrografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido en el modo de electrones primarios de las partículas de arena abrasiva Ottawa Sand 50-70 antes y después de ensayar, 100x. (a) Arena original (b) Arena ensayada.....78

**Figura 46** Fotomicrografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido en el modo de electrones primarios de las partículas de arena abrasiva Ottawa Sand 50-70 antes y después de ensayar, 300x. (a) Arena original (b) Arena ensayada.....79

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Composición química de la aleación de aluminio 7075, fracciones en porcentaje en peso.....	4
<b>Tabla 2</b> Propiedades físicas y mecánicas de la aleación 7075-T6 .....	6
<b>Tabla 3</b> Clasificación de los recubrimientos de electroless Ni-P según el contenido de fósforo.....	19
<b>Tabla 4</b> Composición química de la aleación de aluminio 7075 .....	32
<b>Tabla 5</b> Propiedades del recubrimiento de electroless Ni-P .....	33
<b>Tabla 6</b> Nomenclatura utilizada para identificar las probetas de desgaste abrasivo.....	33
<b>Tabla 7</b> Parámetros de ensayos según Norma ASTM G 65-94. ....	39
<b>Tabla 8</b> Condiciones de ensayo de las probetas sin recubrimiento.....	40
<b>Tabla 9</b> Condiciones de ensayo de las probetas recubiertas .....	41
<b>Tabla 10</b> Valores de rugosidad de las muestras sin recubrimiento (antes del ensayo).....	45
<b>Tabla 11</b> Valores de rugosidad para las muestras con recubrimiento de electroless Ni-P (antes del ensayo).....	45
<b>Tabla 12</b> Resultados de las mediciones de dureza de las muestras sin recubrimiento .....	47
<b>Tabla 13</b> Resultados de las mediciones de dureza de las muestras recubiertas con electroless Ni-P .....	48
<b>Tabla 14</b> Resultados de la profundidad relativa de indentación para los valores de dureza Vickers a diferentes cargas sobre las muestras recubiertas con electroless Ni-P .....	49
<b>Tabla 15</b> Pérdida volumétrica reportada por el ensayo abrasivo para cada una de las condiciones en estudio.....	53
<b>Tabla 16</b> Promedio de las pérdidas volumétricas para cada condición de ensayo.....	54
<b>Tabla 17</b> Promedio del área de las partículas abrasivas en $\mu\text{m}^2$ .....	76



## INTRODUCCION

El desgaste, la fatiga y la corrosión son fenómenos que tienen un gran impacto en la rentabilidad y productividad de la gran mayoría de los procesos industriales. Sin embargo, el fenómeno de desgaste ha sido el menos estudiado y probablemente por esta razón, aún no sea posible predecirlo con cierta exactitud. El desgaste es una falla inevitable siempre y cuando existan cuerpos en contacto bajo carga y con movimiento relativo entre sí.

Teniendo en cuenta que casi un 50% de las fallas ocurren debido al desgaste por abrasión, se ha decidido profundizar los estudios en esta área sobre una aleación de aluminio de la serie 7xxx, de suma importancia en la construcción de diferentes estructuras en la industria aeroespacial.

Las aleaciones de aluminio de la serie 7xxx (Al-Zn-Mg-Cu), a la cual pertenece la aleación 7075 de estudio en este trabajo, son consideradas en una categoría especial debido a que desde hace tiempo se conoce que poseen la mejor respuesta al endurecimiento por envejecimiento de todas las aleaciones de aluminio. Estas aleaciones han sido especialmente utilizadas en la industria aeroespacial y aeronáutica debido a su relación resistencia mecánica - peso. Sin embargo, las pobres propiedades tribológicas que presentan estas aleaciones han limitado sus usos. Esto ha conducido a la posibilidad de depositar recubrimientos o realizar cambios en los tratamientos térmicos de dichos substratos.

De esta forma, los recubrimientos autocatálíticos se han presentado como alternativa viable desde los puntos de vista práctico y económico, sobre todo para mejorar la resistencia ante la corrosión y el desgaste (abrasivo, adhesivo o erosivo) de materiales cuyo comportamiento frente a estos fenómenos puede ser pobre, aún siendo sometidos a tratamientos térmicos o superficiales.

Este recubrimiento ha sido estudiado sobre sustratos de acero de mediana resistencia, encontrándose una mejora en sus propiedades tribológicas y resistencia a la corrosión.

En tal sentido, el objetivo principal de este estudio se basa en evaluar el comportamiento de un depósito de electroless Ni-P, sobre una aleación de aluminio 7075-T6 frente a sus propiedades de resistencia al desgaste abrasivo. El recubrimiento se obtuvo en la empresa Reliable Plating, USA, mediante la técnica de deposición autocatódica, con un espesor promedio de 40 micras y alto contenido de fósforo, aproximadamente de 18%. Se escogió el ensayo de desgaste abrasivo bajo la configuración arena/ rueda de goma en condición seca para diferentes condiciones de carga aplicada y distancias de deslizamiento.

Además, se determinó la rugosidad, morfología y la microdureza de las muestras con y sin recubrimiento. La caracterización de las huellas de desgaste se realizó mediante las técnicas de MEB y perfilometría óptica y la morfología de la arena abrasiva, antes y después del ensayo se estudio por la técnica de MEB. Se han calculado los valores del volumen desgastado ( $\text{mm}^3$ ) en cada una de las muestras con el fin de diferenciar cual ha sido el efecto del recubrimiento sobre la resistencia al desgaste abrasivo de la aleación de aluminio 7075-T6.



## FUNDAMENTO TEORICO

### 1.1. ALEACIONES DE ALUMINIO DE LA SERIE 7XXX

#### 1.1.1. Características y propiedades

El aluminio es el elemento metálico más abundante de la corteza terrestre, aunque siempre combinado con otros elementos como hierro, oxígeno y silicio. El aluminio posee una combinación de propiedades que le convierten en un material extremadamente útil. Sin embargo, la resistencia que presenta el aluminio puro es baja, es por ello que en el diseño de las aleaciones de aluminio se plantea la necesidad de emplear elementos aleantes capaces de generar un incremento en la resistencia de la aleación bien sea a través de tratamientos térmicos o por endurecimiento por deformación <sup>[1]</sup>.

Las aleaciones de aluminio son clasificadas de acuerdo con los elementos aleantes principales que contenga la aleación. Para identificar las aleaciones de aluminio forjado, se desarrolló una designación numérica de cuatro dígitos. En las aleaciones de la serie 7xxx los principales elementos constituyentes son cinc, magnesio y cobre. El principal elemento aleante es el Zn en cantidades de 1 a 8% y, cuando se combina con pequeñas cantidades de Mg, resulta en una aleación tratable térmicamente de moderada o muy alta resistencia. Al incrementar la concentración de MgZn<sub>2</sub> la resistencia mecánica de esta aleación aumenta, sin embargo importantes cantidades de Zn y Mg disminuyen la resistencia a la corrosión de esta aleación. Por lo tanto, debe existir un compromiso entre la composición, la microestructura y el tratamiento térmico de manera de mantener el balance adecuado en las propiedades.

En general, estas aleaciones presentan baja resistencia a la corrosión bajo tensiones <sup>[1]</sup>. La aleación 7075 es una de las más importantes aleaciones de este grupo y tiene una composición química nominal como la que se muestra en la Tabla 1.

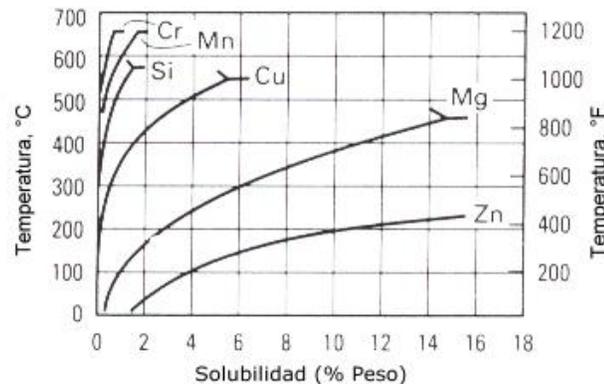
**Tabla 1** Composición química de la aleación de aluminio 7075, fracciones en porcentaje en peso.

	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Cr
Mín.		5.1	2.1	1.2	-	-	-	-	0.18
Máx.	90	6.1	2.9	2.0	0.5	0.4	0.3	0.28	0.2

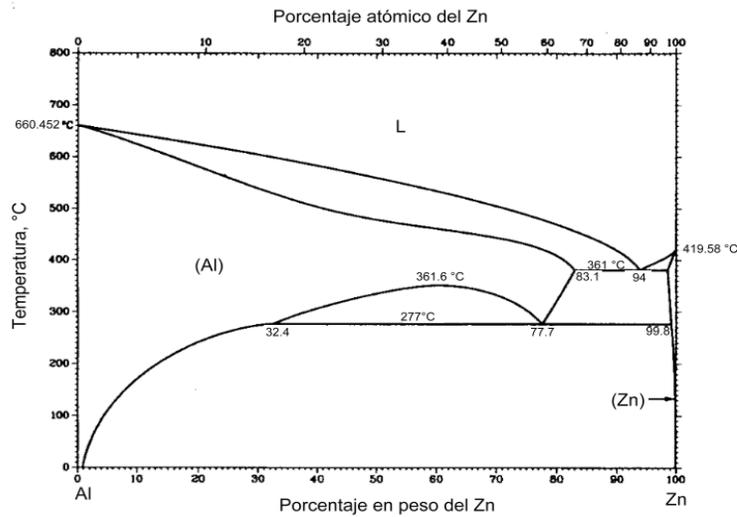
Esta aleación consiste principalmente de una matriz de aluminio con precipitados endurecedores y compuestos de segunda fase, siendo el  $Al_{23}CuFe_4$  el más común. La secuencia de precipitación en las aleaciones Al-Zn-Mg se presenta a continuación [2].

Solución Sólida ( $_{7075}$ ) → Zonas G.P (esférica) →  $\eta'$  (Fase de transición) →  $\eta$  ( $MgZn_2$ )

De todos los elementos aleantes, de las aleaciones de aluminio, el Zn es el que presenta la mayor solubilidad sólida en el aluminio ver Figura 1 La curva de solubilidad sólida del sistema Al-Zn crece con el incremento de la temperatura, tal como se muestra en el diagrama de fases de la Figura 2, lo que permite que esta aleación sea endurecible por tratamiento térmico de precipitación o envejecimiento artificial [1].



**Figura 1** Solubilidad sólida de los elementos aleantes en el aluminio



**Figura 2** Diagrama de fases del sistema Al-Zn

En algunas aleaciones, un incremento considerable en la resistencia puede ser obtenido mediante la aplicación de cantidades controladas de trabajo en frío en el producto luego del temple. De esta manera, según sea la condición de la aleación, se puede designar diversos tipos de nomenclaturas.

**F:** Como fabricado

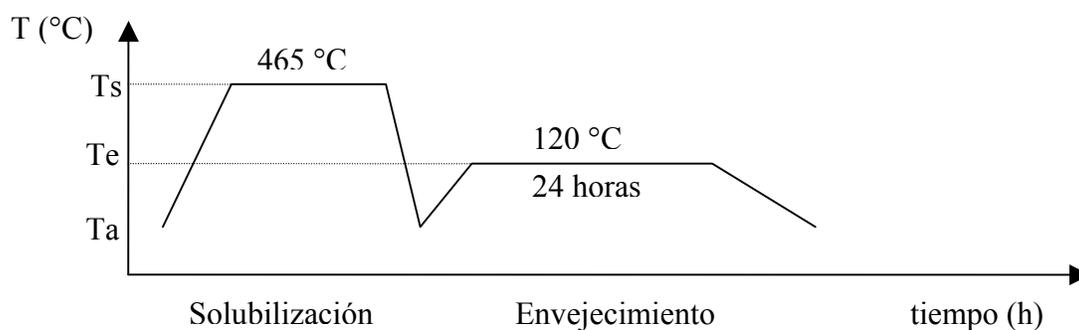
**W:** Tratamiento térmico de solución aplicado a aleaciones para envejecimiento natural.

**O:** Recocido

**T:** Tratado térmicamente para producir una condición estable.

La letra T es siempre seguida por uno o más dígitos los cuales especifican la secuencia del tratamiento térmico. Uno de los tratamientos empleado con mayor frecuencia para obtener aleaciones de alta resistencia consiste en el tratamiento térmico de solución (Ts) y posteriormente envejecimiento artificial (a temperatura Te). Este tratamiento es designado como T6, y es aplicado a productos carentes de deformación en frío luego del tratamiento térmico de solución.

El tratamiento térmico designado como T6, puede ser alcanzado por medio del calentamiento de la aleación desde una temperatura ambiente ( $T_a$ ) hasta los  $465\text{ }^\circ\text{C}$  y mantenimiento a dicha temperatura por un tiempo suficiente para propiciar la disolución de los elementos de aleación presentes en la matriz de aluminio (tratamiento de solubilización). Posteriormente, se realiza un enfriamiento brusco para inducir el estado de sobresaturación de la aleación y luego se efectúa un calentamiento hasta  $120\text{ }^\circ\text{C}$  durante un tiempo de 24 horas (envejecimiento artificial), con el objeto de generar la precipitación de las fases endurecedoras.<sup>[3]</sup> La representación del tratamiento térmico se muestra en la Figura 3.



**Figura 3** Representación esquemática tratamiento térmico T6 (Envejecimiento artificial)

Generalmente, la aleación de aluminio 7075-T6 ha tenido aplicación en la industria aeronáutica y aeroespacial para la fabricación de componentes estructurales del fuselaje y para el tanque externo de transbordadores espaciales<sup>[1]</sup>. Se puede encontrar en sus formas comerciales como láminas, placas, productos tubulares, barras, etc. En la Tabla 2 se pueden observar las propiedades mecánicas y físicas de la aleación.

**Tabla 2** Propiedades físicas y mecánicas de la aleación 7075-T6 <sup>[4]</sup>

Propiedad	Magnitud
Densidad	2.81 gr/cc
Dureza Vickers	175
Resistencia máxima	570 MPa
Coefficiente de expansión térmica (20°C)	23.6 $\mu\text{m/m}$
Conductividad térmica	0.96 J/g $^\circ\text{C}$
Punto de fusión	477 $^\circ\text{C}$ – 635 $^\circ\text{C}$

## 1.2. DEPÓSITOS AUTOCATALÍTICOS ELECTROLESS NI-P

### 1.2.1. Principios básicos y características

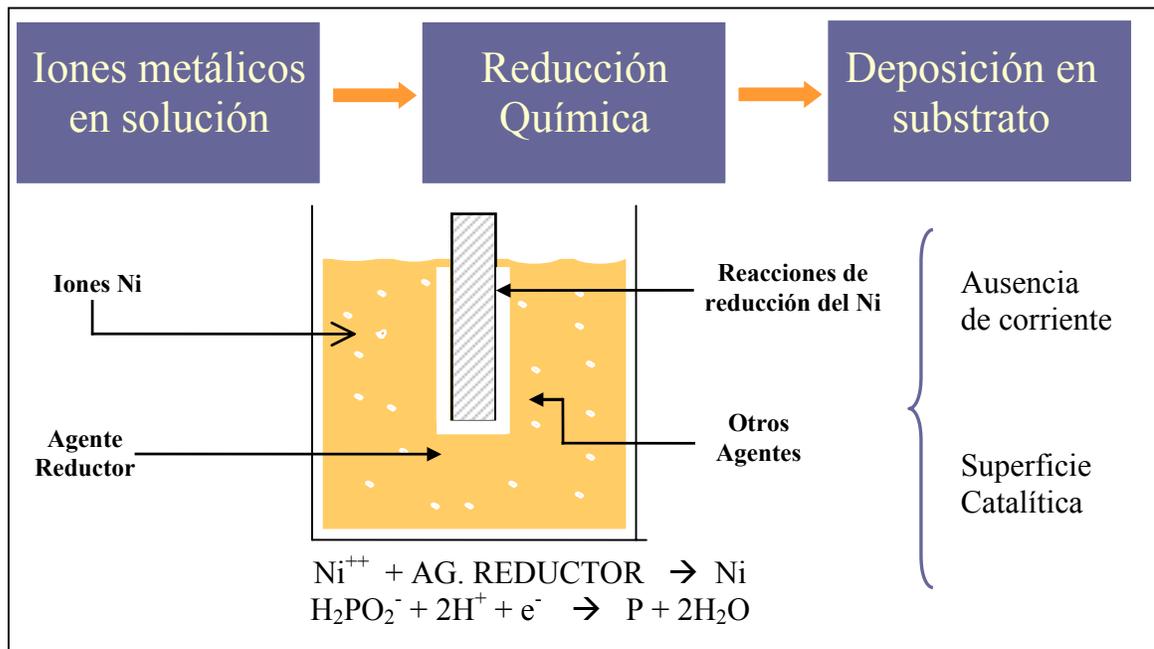
El término “Electroless plating” fue originalmente adoptado por Brenner y Riddell<sup>[3]</sup> para describir un método para recubrir substratos metálicos con aleaciones de níquel y cobre sin la presencia de una fuente externa de corriente eléctrica. A través de los años, el término ha sido ampliamente usado para describir cualquier método que deposite continuamente metal desde un medio acuoso.

En general, el “Electroless plating” está caracterizado por la reducción selectiva de iones metálicos solo en la superficie de un substrato catalítico inmerso en una solución acuosa de iones del metal mencionado, con una continua deposición sobre el substrato a través de la acción catalítica propia de los depósitos.

El Electroless níquel es normalmente usado debido a sus excelentes propiedades de resistencia al desgaste y a la corrosión. Los recubrimientos de Electroless Ni son frecuentemente aplicados sobre aluminio para proveer superficies soldables. Este recubrimiento es además usado para obtener dureza, ductilidad y superficies resistentes para operación en servicio por encima de los 40 °C y para tener capas uniformes en formas complejas.

Wu *et al* <sup>[5]</sup>, estudiaron recubrimientos de Ni-P de aproximadamente 7% P y depósitos compuestos de Ni-P/SiC sobre una fundición de baja aleación usando la técnica de electroless. Los resultados indicaron que los depósitos de electroless Ni-P son una solución sólida sobre saturada y que la fase Ni<sub>3</sub>P precipita cuando es tratado térmicamente a 350 °C, lo cual incrementa la dureza. Sin embargo, cuando la temperatura es mayor de 400°C la dureza disminuye rápidamente pero el volumen desgastado continúa decreciendo continuamente.

Debido a que durante el proceso los depósitos catalizan la reacción de reducción, el término *autocatalítico* es también usado para describir este tipo de proceso de deposición. En la Figura 4 se puede ver una representación esquemática del proceso.



**Figura 4** Esquema representativo del proceso de deposición de un recubrimiento de electroless Ni.

El proceso de deposición por electroless puede ser dividido en cinco etapas elementales<sup>[3]</sup>:

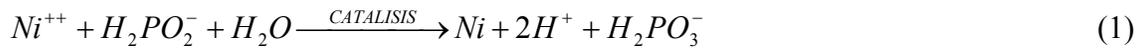
- Difusión de las especies reactantes a la superficie
- Adsorción de los reactantes en la superficie
- Reacción química en la superficie
- Desorción de los productos de reacción desde la superficie
- Difusión de los productos al resto de la solución

Se considera que estas etapas ocurren de manera consecutiva y la etapa que posea la menor velocidad será la etapa controlante del proceso de deposición.

El electroless Níquel no es un producto nuevo en la mayoría de las industrias. Este ha sido usado en diferentes aplicaciones, desde su desarrollo en los años 1950.

### 1.2.2. Reacciones químicas

La reacción fundamental que caracteriza el proceso de deposición de Ni-P por electroless esta representada en la ecuación (1):



Esta reacción es la responsable de las variaciones de pH. Se observa que el ión níquel es reducido en presencia de hipofosfito y agua. Cuando el ión hipofosfito es oxidado a un ión ortofosfito, los iones hidrógeno son liberados en paralelo con la reacción (1), ocurre la siguiente reacción a un ritmo dos veces mayor que la reacción anteriormente descrita:



Un análisis completo del mecanismo de reacción está representado en las ecuaciones que se muestran a continuación [6]:





En las ecuaciones (4) y (5) se producen iones de hidrógeno. Como consecuencia, estas reacciones van seguidas de un aumento de pH. Por otro lado, en la reacción (6) se producen iones oxidrilos, los cuales tienden a bajar el pH del baño. Estos dos efectos tienden a contrarrestarse, pero las velocidades de reacción implícitas son diferentes.

Además, debe considerarse que el porcentaje de fósforo aumenta con la disminución del pH, razón por la cual debe tenerse un estricto control del mismo debido a que si este disminuye excesivamente el depósito de Ni se disuelve liberando hidrógeno (8). Una deposición a un valor aproximado de pH = 5 presentara un contenido de fósforo cercano al 8%, mientras que dicho porcentaje de fósforo estará cerca del 10% si la deposición ocurre con un valor de pH aproximado a 4.

El níquel actúa como un catalizador en si mismo en el proceso de deposición de electroless Ni-P. Si los metales más electropositivos que el níquel son sumergidos en el baño, entonces, una pequeña, delgada y activa capa de níquel se deposita en la superficie. Ejemplo de esto lo son el hierro y el aluminio. El proceso del hierro será:



Esta capa de níquel actuará entonces como un catalizador y la deposición del mismo continuará de acuerdo con la ecuación (1).

### **1.2.3. Composición del baño de electroless Ni-P**

Las propiedades físicas y químicas de los depósitos de electroless níquel dependen de su composición, la cual a su vez depende de las condiciones de operación durante el proceso de deposición.

Los constituyentes típicos de una solución de electroless níquel son:

- Fuente de níquel
- Agente reductor
- Agentes acomplejantes
- Estabilizadores - inhibidores
- Reguladores de pH
- Energía
- Agitación.

Cada uno de estos agentes ejerce una acción específica en la solución y mantienen de esta manera las condiciones óptimas para la continuidad del proceso de deposición.

#### **1.2.3.1. Fuente de Níquel**

La principal fuente de níquel, empleada para la deposición por electroless, la constituye el sulfato de Ni. Otras sales de níquel, tales como el cloruro de níquel y el acetato de níquel, son empleadas en aplicaciones muy limitadas.

La concentración de Ni en aplicaciones industriales es de aproximadamente  $6,5 \pm 1$  g/l. Se ha encontrado que cuando la concentración de Ni es igual o mayor a 5 g/l, este elemento no ejerce influencia en la velocidad de deposición.

### **1.2.3.2. Agente reductor**

Para la reducción química de los iones de níquel presentes en la solución de electroless, pueden emplearse agentes a base de fósforo, boro o nitrógeno. Los más comunes son hipofosfito, borohidruros, aminoboranos o hidracina. Para la reducción con fósforo es ampliamente empleado el hipofosfito de sodio,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , el cual consiste en cristales higroscópicos incoloros los cuales son fácilmente solubles en agua.

### **1.2.3.3. Acomplejantes**

Los agentes acomplejantes son añadidos a las soluciones de electroless níquel con el fin de regular o controlar la cantidad de níquel libre durante el proceso de deposición. De esta manera, se previene la descomposición del baño, la cual podría presentarse por efecto de la precipitación de sales o compuestos de níquel. Estos agentes también son capaces de controlar la reacción de deposición de níquel, de manera que ésta ocurra únicamente sobre la superficie catalítica. Ejemplos de agentes acomplejantes lo constituyen los ácidos orgánicos y sus sales <sup>[7]</sup>.

Los agentes acomplejantes también pueden actuar como “buffers” en las soluciones de “electroless” níquel, previniendo así disminuciones repentinas en los valores de pH a medida que se producen iones de hidrógeno por efecto de la reacción de reducción del níquel. Los agentes acomplejantes pueden ejercer efectos marcados sobre la calidad del depósito, específicamente en el contenido de fósforo, esfuerzos internos y porosidades <sup>[7]</sup>.

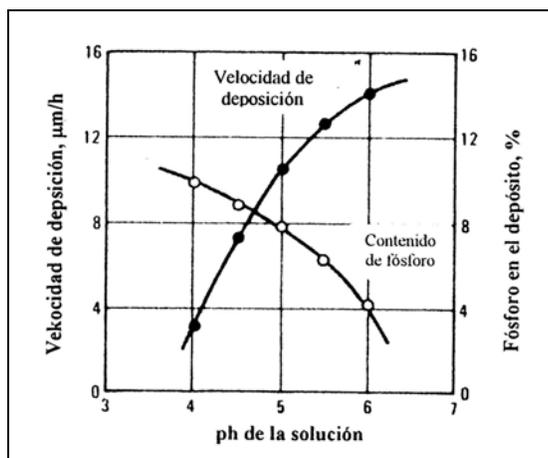
### **1.2.3.4. Estabilizadores – Inhibidores**

Las soluciones de deposición por electroless níquel son capaces de operar bajo condiciones normales durante períodos prolongados de tiempo, sin la necesidad de ser empleados ningún tipo de agente estabilizador. Sin embargo, la descomposición del baño puede ocurrir espontáneamente de manera inesperada <sup>[3]</sup>.

La descomposición espontánea del baño puede ser controlada al añadir pequeñas cantidades (trazas) de inhibidores catalíticos a la solución. Estos inhibidores son absorbidos por cualquier partícula coloidal presente en la solución, impidiendo de esta manera la reducción del níquel sobre su superficie [3].

### 1.2.3.5. Reguladores de pH y buffers

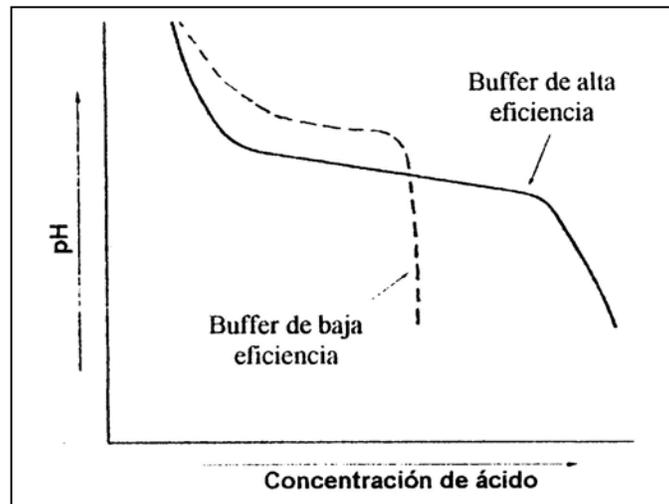
La formación de iones  $H^+$  como producto de la reducción del Níquel, produce una disminución de los valores de pH en la solución. La variación o cambios en los valores de pH ocasionan variaciones tanto en las condiciones de deposición como en la concentración de los elementos depositados, y éstas, a su vez, en las propiedades del producto final. La Figura 5 ilustra los cambios en la velocidad de deposición y contenido de fósforo en el depósito por efecto de variaciones en los valores de pH [8].



**Figura 5** Efecto del pH de la solución en la velocidad de deposición y el contenido de fósforo en el depósito [8]

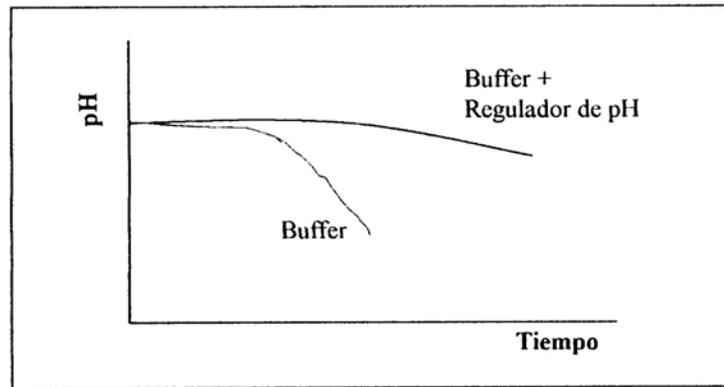
Para controlar las variaciones producidas en los valores de pH, se emplean generalmente los “buffers”; las cuales son sustancias o mezcla de sustancias que añadidas a una solución son capaces de neutralizar tanto ácidos como bases, sin generar cambios apreciables en el pH original. La eficiencia o capacidad de un “buffer”, por tanto, puede ser medida por medio de la cantidad de ácido requerido para producir un cambio en un valor

determinado de pH. Mientras mayor sea la cantidad de ácido para producir el cambio en el pH en presencia del “buffer”, mayor será la eficiencia de este agente. Esta relación puede ser observada en la Figura 6<sup>[8]</sup>.



**Figura 6** Eficiencia de los “buffers”<sup>[8]</sup>.

Aún cuando los “buffers” ayudan a mantener los valores de pH, sin producir variaciones apreciables, para prolongados tiempos de deposición, se pueden generar disminuciones repentinas en el pH, por lo que es necesario monitorear y neutralizar el exceso de  $H^+$  en la solución por medio de la adición de agentes reguladores de pH. Entre los reguladores de pH más comúnmente utilizados se encuentran los compuestos alcalinos (hidróxidos) y soluciones de amonio. El efecto que producen estos agentes en las soluciones de electroless es mostrada en la Figura 7<sup>[8]</sup>.



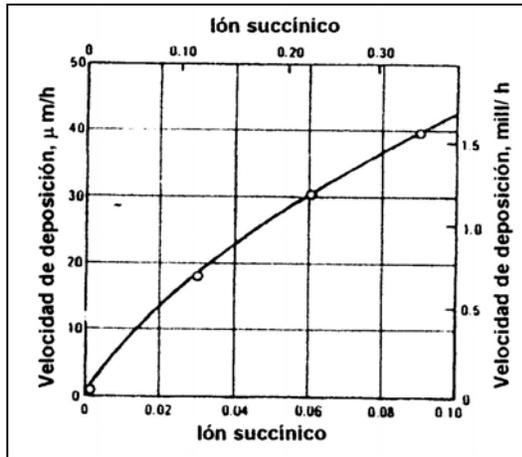
**Figura 7** Efecto de los reguladores de pH en la solución de electroless níquel<sup>[8]</sup>.

### 1.2.3.6. Aceleradores

Para contrarrestar el efecto de los acomplejantes, los cuales generan disminuciones considerables en la velocidad de deposición, se introducen en la solución de deposición pequeñas cantidades de aditivos orgánicos denominados aceleradores.

Según las investigaciones, se cree que los aceleradores actúan en el enlace de los átomos de hidrógeno y fósforo en la molécula de hipofosfito (reductor con fósforo), permitiendo que el hidrógeno sea removido más fácilmente y adsorbido sobre la superficie catalítica.

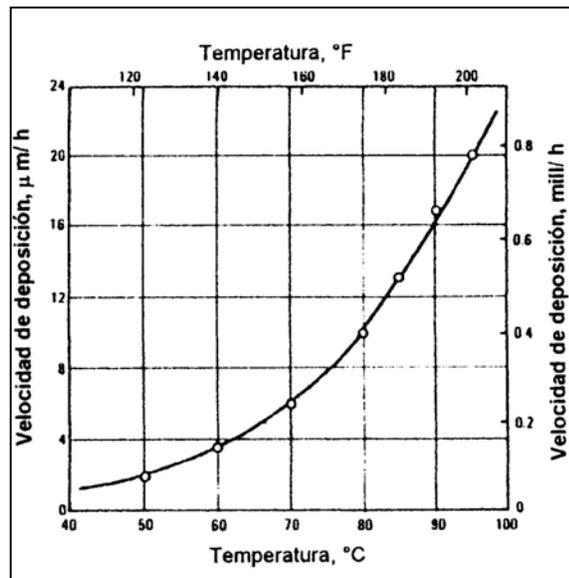
El acelerador utilizado con mayor frecuencia en los baños que contienen al hipofosfito como agente reductor, es el ácido succínico. El efecto de este tipo de acelerador en la velocidad de deposición es ilustrado en la Figura 8<sup>[8]</sup>.



**Figura 8** Efecto del ácido succínico en la velocidad de deposición<sup>[8]</sup>.

### 1.2.3.7. Energía

La cantidad de energía requerida por el sistema es uno de los factores más importantes capaces de afectar la cinética y velocidad de las reacciones<sup>[3]</sup>. La velocidad de deposición es usualmente muy lenta a temperaturas por debajo de 65 °C, pero incrementa rápidamente con el incremento de la temperatura, tal como se ilustra en la Figura 9.



**Figura 9** Efecto de la temperatura de la solución en la velocidad de deposición. Evaluación realizada a valores de pH entre 3 y 5<sup>[8]</sup>.

## **1.2.4. Características de los depósitos.**

### **1.2.4.1. Estructura**

Los depósitos de electroless Ni-P de baja aleación de fósforo (< 7% P) son depósitos “microcristalinos” ya que consisten en granos muy pequeños (de 2 a 6 nm). Depósitos con contenidos mayores de fósforo (> 7% P) tienen una estructura amorfa. La estructura del depósito tiene una gran relación con las condiciones de deposición y con las propiedades del recubrimiento.

Li, H. *et al*<sup>[9]</sup>, estudiaron la estructura y la morfología de aleaciones amorfas de Ni-P depositadas sobre silicón tipo P. Estos depósitos fueron sometidos a un proceso de cristalización calentando a altas temperaturas desde 550 K hasta 610 K en nitrógeno por 2 horas. Se determinó que no existieron cambios significantes en la composición ni en la estructura electrónica del recubrimiento. Sin embargo, se observaron cambios en la estructura amorfa así como en la morfología de la superficie. Indicando que el recubrimiento amorfo de electroless Ni-P como depositado consiste en miles de pequeñas partículas distribuidas homogéneamente sobre su superficie. Estas partículas son esféricas y presentan un tamaño promedio alrededor de 100 nm.

### **1.2.4.2. Propiedades Físicas**

#### **1.2.4.2.1. Densidad**

La densidad de los depósitos es dada según la siguiente expresión <sup>[8]</sup>:

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (g / cm}^3\text{)}$$

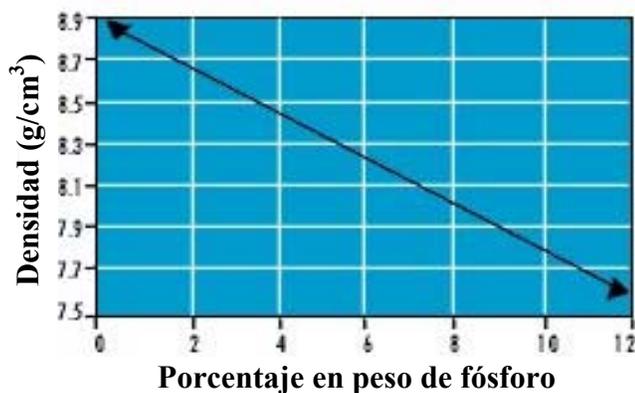
La densidad del Níquel metálico puro a temperatura ambiente es 8.9 g/cm<sup>3</sup>. En el caso de aleaciones de Níquel-fósforo es principalmente el contenido de fósforo el que

gobierna la densidad. La relación que describe este comportamiento, la cual es válida para contenidos de fósforo de 18% en peso, se expresa a continuación [8]:

$$\rho = \frac{113.6 - Cp}{12.7}$$

donde Cp = contenido de Fósforo.

Tal que en la Figura 10., se observa la relación densidad vs porcentaje en peso de fósforo. A medida que aumenta el porcentaje de fósforo, disminuye la densidad del depósito.



**Figura 10** Efecto del porcentaje de fósforo en la densidad de los depósitos Ni-P

#### 1.2.4.2.2. Contenido de fósforo, %

El contenido de fósforo en los depósitos de electroless Ni-P tiene relación directa con las propiedades (ver Tabla 3) que presenta el mismo. Por ello, es importante tener claro bajo que condición va a estar el recubrimiento. Los recubrimientos de de Ni-P obtenidos mediante la técnica de electroless se clasifican según su contenido de fósforo de la siguiente manera [8]:

- Bajo contenido de fósforo (Cont. P 1%-4%)
- Medio contenido de fósforo (Cont. P 6%-9%)
- Alto contenido de fósforo (Cont. P 10%-12%)

**Tabla 3** Clasificación de los recubrimientos de electroless Ni-P según el contenido de fósforo.

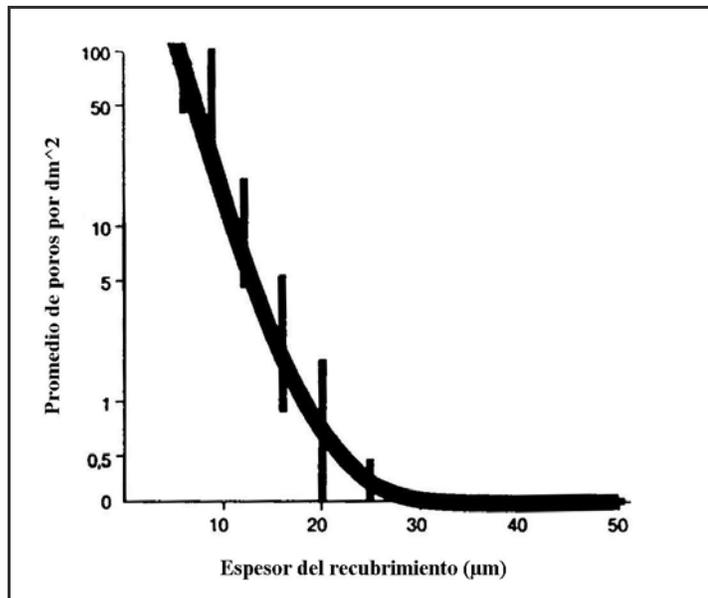
Contenido de Fósforo	Características
Alto Fósforo	Provee máxima protección en los ambientes más severos
	Fácil de soldar
	Excelente ductilidad
	No magnético
	Excelente barrera difusora
Medio Fósforo	Buena resistencia a la corrosión en ambientes alcalinos y ácidos
	Excelente lubricidad
	Tratable térmicamente hasta 65 HRC
	Apariencia brillante decorativa
Bajo Fósforo	Alta dureza como depositado
	Excelente resistencia la desgaste
	Bastante resistente a la corrosión en ambientes alcalinos
	Alto punto de fusión (1200 °C)
	Fácil de soldar

#### 1.2.4.2.3. Porosidad

La porosidad es uno de los parámetros más importante. Es en gran parte el que determina la resistencia a la corrosión o el ataque químico del sistema recubrimiento-substrato. Otras propiedades como densidad, soldabilidad y ductilidad son también ampliamente determinadas por la porosidad.

Se ha demostrado que la porosidad de los depósitos producidos por medio de la técnica electroless es menor que su equivalente producto electrodepositado<sup>[10]</sup>. Además, se ha reportado una estrecha relación entre el espesor del recubrimiento y el número de poros.

En la Figura 11. puede observarse que a medida que aumenta la porosidad<sup>[8]</sup> el espesor disminuye.

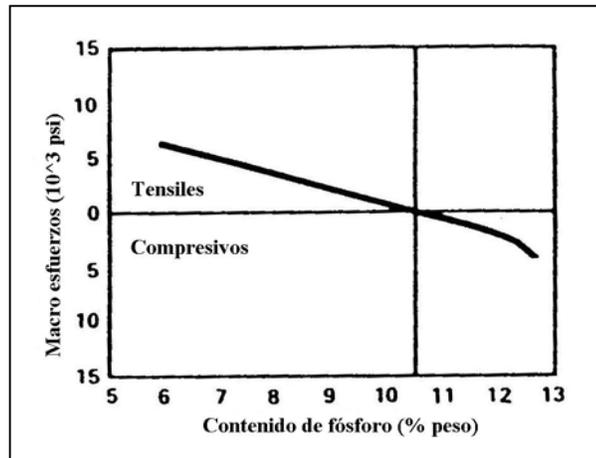


**Figura 11** Dependencia de la porosidad con el espesor de los recubrimientos de electroless Ni-P<sup>[8]</sup>.

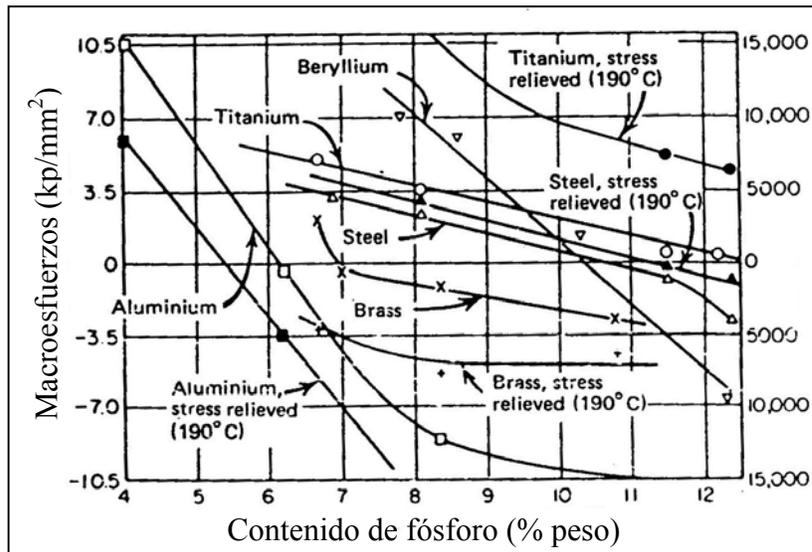
### 1.2.4.3. Propiedades mecánicas

#### 1.2.4.3.1. Esfuerzos internos

Diferentes estudios, tales como los de Duncan, Fields *et al.* y Tulsi<sup>[8]</sup> han mostrado que los esfuerzos internos, sean estos compresivos o tensiles, (Figura 12) así como su magnitud, están relacionados con el contenido de fósforo en el depósito, y con la naturaleza del substrato. La variación de los esfuerzos internos con el contenido de fósforo del electroless Ni, depositado sobre substratos de acero y aluminio se ilustra en la Figura 13 <sup>[10]</sup>.



**Figura 12** Variación de los esfuerzos internos con el contenido de fósforo del recubrimiento de electroless Ni-P<sup>[8]</sup>.



**Figura 13** Efecto del contenido de fósforo sobre los esfuerzos internos de depósitos Ni-P sobre sustratos de acero y aluminio<sup>[8]</sup>.

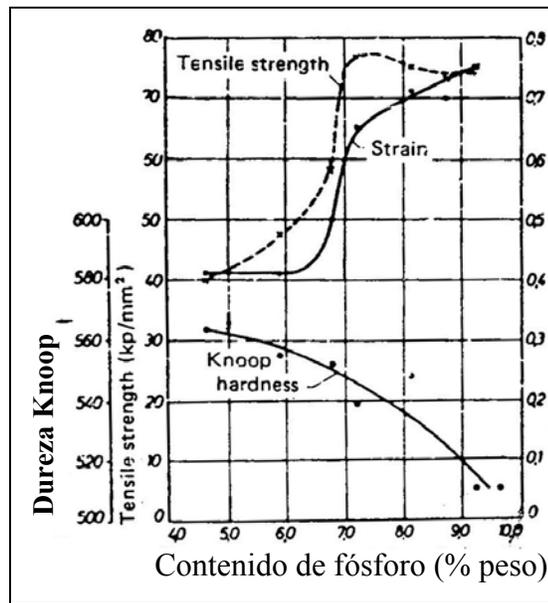
#### 1.2.4.3.2. Dureza

En 1974 Riedel y colaboradores<sup>[8]</sup> evaluaron ciertos factores en la medida de dureza de los recubrimientos, y reportaron diferencias entre la dureza medida a un recubrimiento y la dureza medida de un recubrimiento depositado sobre un sustrato. Según esta investigación, la dureza del sustrato influye en los valores encontrados de un sustrato recubierto, por lo que de esta manera, el valor de dureza resultante es una combinación entre la dureza del depósito y la del sustrato.

Desde 1984, se han propuesto diversos modelos con el fin de determinar el valor de dureza del recubrimiento aplicado sobre un sustrato. Entre estos modelos se destacan los de Jónsson y Hogmark, Chicot y Lessage, Bückle, Korsunsky et al.<sup>[8]</sup>, etc.

Para los depósitos de electroless Ni-P con durezas ubicadas entre los 450 y 700 HV, en la condición como depositado, se ha encontrado que para su medida se deben emplear cargas que estén ubicadas entre los 50 y 200g (0,5 a 2N)<sup>[7]</sup>.

La dureza también depende del contenido de fósforo del depósito, como se puede ver en la Figura 14 en donde se puede notar una disminución en sus valores con el incremento en el contenido de fósforo.



**Figura 14** Efecto del contenido de fósforo en las propiedades mecánicas del electroless Ni-P en su estado como depositado<sup>[8]</sup>.

### 1.2.4.3.3. Ductilidad

La ductilidad de un recubrimiento de electroless Ni-P varía con la composición. Para recubrimientos de alto % fósforo o alta pureza, la ductilidad está entre 1–1½ % (como elongación). Este valor está por debajo de los valores de la mayoría de los materiales de ingeniería, sin embargo, son adecuados para casi todas las aplicaciones de estos recubrimientos. Para depósitos de bajas concentraciones de fósforo o que contienen impurezas metálicas o sulfuros, la ductilidad es evidentemente reducida y puede aproximarse a cero y por tanto, se puede volver frágil.

### **1.3.DESGASTE**

El desgaste es un desprendimiento gradual de partículas de la superficie de un material sólido, por fricción con otro sólido, o por contacto con un líquido o gas en movimiento.

El daño a la superficie supone desplazamiento y separación de partículas, acelerado por el calor desarrollado en la fricción y, por esta razón, el desgaste en seco va acompañado con frecuencia de corrosión. Según la Sociedad Americana de Ingenieros de la Lubricación (ASLE), el desgaste se define como la “remoción de material por acción mecánica”.

El desgaste no se considera como una propiedad inherente del material puesto que sólo se produce por la interacción de dos cuerpos en contacto y en movimiento y está determinado, en gran parte, por condiciones externas independientes de la naturaleza del material.

#### **1.3.1. Tipos de desgaste**

Una de las clasificaciones más simples del desgaste está basada en la presencia o ausencia de lubricantes efectivos en el tribosistema: desgaste lubricado y desgaste no lubricado. Sin embargo, el método convencional para clasificar los procesos de desgaste se apoya en la descripción física de los mismos, con los mecanismos de desgaste como rasgo distintivo <sup>[11]</sup>. Distintos autores han sugerido las siguientes clasificaciones:

- Burwell y Strang <sup>[12]</sup>: Desgaste Abrasivo, Desgaste Adhesivo, Desgaste Corrosivo, Fatiga superficial, Desgaste micro-oscilatorio, Erosión y Cavitación.
- Jahanmir <sup>[13]</sup>: Adhesión, Delaminación, Desgaste micro-oscilatorio, Abrasión, Erosión, Desgaste por impacto, Fatiga superficial, Desgaste por corrosión, Desgaste por Difusión y Desgaste por contacto eléctrico.

- Godfrey <sup>[14]</sup>: Desgaste Adhesivo moderado, Desgaste Adhesivo Severo, Abrasión, Erosión, Fatiga, Delaminación, Corrosión, Electrocorrosión, Corrosión micro-oscilatoria, Cavitación, Descarga eléctrica y Pulido.
- Rice <sup>[15]</sup>: Adhesión, Abrasión, Fatiga, Corrosión u Oxidación, y Desgaste Eléctrico.

Según la Norma Industrial Alemana DIN 50320 <sup>[16]</sup>, después de reducir algunos términos redundantes en relación a los mecanismos de desgaste básicos, distingue cuatro tipos principales de desgaste: Adhesión (formación y rompimiento de enlaces adhesivos inter-superficiales o uniones soldadas en frío), Abrasión (remoción de material debido al rayado), Fatiga Superficial (formación de grietas en la superficie debido a esfuerzos tribológicos cíclicos que resultan en separación de material) y Reacción Tribo-química (formación de sustancias químicas producto de la interacción entre los elementos del tribosistema).

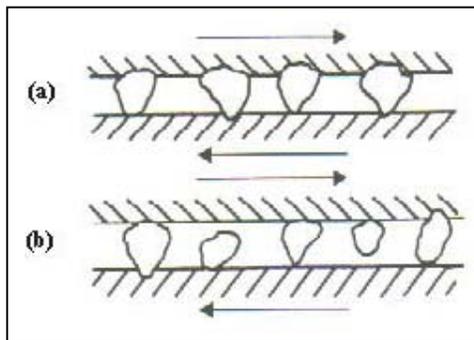
Por su parte, La Sociedad Americana de los Metales ASM, establece tres tipos fundamentales de desgaste: desgaste debido a partículas o fluidos (entre los que se encuentra el desgaste abrasivo), desgaste por rodadura, deslizamiento o impacto y desgaste asistido químicamente <sup>[17]</sup>.

### **1.3.1.1. Desgaste abrasivo**

Según la definición de la ASTM <sup>[18]</sup>, el desgaste abrasivo es aquel originado por partículas o protuberancias duras que son forzadas en contra de una superficie sólida mientras se mueven a través de ella. La abrasión puede ocurrir cuando una superficie dura y rugosa desliza sobre otra superficie más blanda, formando una serie de surcos y desprendiendo material en forma de partículas sueltas. El desgaste abrasivo también puede originarse cuando partículas abrasivas duras son introducidas entre dos superficies deslizantes, desprendiendo material de ambas. En este caso, el desgaste sucede cuando

un grano abrasivo se adhiere temporalmente a una de las superficies deslizantes, y forma un surco en la otra.

Ambas modalidades del desgaste abrasivo, una que involucra una superficie dura y rugosa, y la otra, que involucra granos abrasivos sueltos, se conocen como procesos de desgaste abrasivo de dos cuerpos y de tres cuerpos, respectivamente <sup>[12]</sup>, ilustrados en la Figura 15. El desgaste abrasivo de dos cuerpos no toma lugar cuando la superficie deslizante dura es lisa. De forma similar, el desgaste abrasivo de tres cuerpos no ocurre cuando las partículas dentro del sistema son pequeñas, o cuando ellas son más suaves que los materiales deslizantes. Por tanto, es usualmente posible dar una disposición a los materiales para evitar el desgaste abrasivo en un sistema deslizante. Sin embargo, una vez que el deslizamiento ha comenzado, el desgaste abrasivo puede convertirse en un problema, ya que partículas de desgaste frecuentemente endurecidas por la oxidación comienzan a acumularse en el sistema, dando como resultado otros procesos de desgaste. En otros casos, partículas contaminantes del medio circundante pueden introducirse en el sistema de deslizamiento.



**Figura 15** Dos modalidades genéricas de abrasión (a) Abrasión de dos cuerpos, (b) Abrasión de tres cuerpos

Quizás la forma más común de desgaste abrasivo experimentada en la práctica de la ingeniería es la abrasión de tres cuerpos definida como aquella originada por materiales abrasivos dispersos entre dos superficies en fricción. Dichos materiales abrasivos pueden ser de dos tipos: material adventicio (suciedad) o material proveniente de las mismas superficies en fricción (óxidos). Algunos tribologistas dedicados al estudio de prevención

de fallas, proclaman que el material adventicio es la causa más frecuente de fallas tribológicas en la industria <sup>[19]</sup>.

Los sistemas de dos cuerpos presentan generalmente de diez a mil veces más la pérdida de material que en el caso de los sistemas de tres cuerpos para una carga y una longitud de desgaste dado <sup>[18]</sup>, debido a que durante la abrasión de tres cuerpos, las partículas abrasivas son capaces de rotar sin adoptar orientaciones de corte, a diferencia de la abrasión de dos cuerpos, donde la rotación de las partículas no es permitida.

En relación a los ambientes de contacto, los tribosistemas abrasivos son clasificados en: abiertos (libres) o cerrados (restringidos). En diversas pruebas, Blickensderfer y colaboradores <sup>[20]</sup>, demostraron que para una carga y longitud de desgaste dada, la tasa de desgaste es aproximadamente la misma para los sistemas abiertos y cerrados. No obstante, las mediciones de pérdida de material en los sistemas cerrados, con frecuencia parecerán mayores a las de los sistemas abiertos, debido a que la mayoría de los sistemas cerrados experimentan mayores cargas.

La abrasión también puede clasificarse como un proceso de bajo ó alto esfuerzo. La abrasión de bajo esfuerzo ocurre cuando el abrasivo permanece relativamente intacto, como en el caso de lijar madera con papel abrasivo. La abrasión de alto esfuerzo tiene lugar cuando las partículas abrasivas son trituradas, por ejemplo, en un molino de esferas donde tanto las esferas como el mineral a triturar son desgastados. Durante la abrasión de alto esfuerzo, una partícula abrasiva relativamente grande corta al material que no ha sido totalmente deformado durante el proceso del material en cuestión, como por ejemplo, cuando se muelen rocas en un triturador.

Dube, N.B. *et al* <sup>[21]</sup>, han estudiado la influencia de las condiciones de ensayo sobre el comportamiento de fractura de las partículas, así como el movimiento de las mismas en el desgaste abrasivo y, por lo tanto, las consecuencias de estos efectos para el desgaste y los métodos de ensayos. El ensayo de desgaste abrasivo fue conducido en un aparato para ensayo de arena seca/rueda de goma siguiendo las especificaciones de la norma ASTM

G65-91 bajo el procedimiento B con ciertas modificaciones. Se utilizó un acero AISI 1020. En la mayoría de las condiciones estudiadas, la superficie de la huella mostró pequeña o ninguna direccionalidad en sus rasgos, pero si mostraron evidencia de múltiples indentaciones probablemente asociado con un movimiento de rodadura de las partículas abrasivas entre la muestra y la rueda de goma. Aún, en los casos donde rasgos lineales fueron observados, estos eran a menudo surcos que aparentemente se produjeron por diferentes mecanismos como ranuras. Los surcos exhibieron múltiples indentaciones a escala macroscópica, y parecen estar asociados con una canalización preferencial de muchas partículas las cuales ruedan por si solas. Las ranuras, en cambio, aparentemente resultan del contacto deslizante entre las partículas individuales de abrasivo y la contraparte, y se observaron a una escala mucho más pequeña. Los resultados mostraron que los mecanismos por los cuales el material es removido de la superficie involucran múltiples indentaciones plásticas por la rodadura de las partículas de abrasivo en la zona de contacto.

Apachitei *et al* <sup>[22]</sup>, estudiaron la resistencia al desgaste de los recubrimientos de Ni-P como depositado y posteriormente tratado térmicamente como una función de la carga aplicada y el contenido de fósforo. Se determinó que la resistencia al desgaste disminuyó tanto con el incremento en la carga aplicada así como con el contenido de fósforo.

En los ensayos con tratamiento térmico se observó que los depósitos de bajo contenido de fósforo (3.9 % P) mostraron el mejor desempeño con una reducción del 55 % en el volumen perdido, luego de una hora de tratamiento térmico. Para los depósitos de alto fósforo (10.4 % P) no hubo ningún cambio significativo con la aplicación del tratamiento térmico. Los tratamientos térmicos requeridos para aumentar la resistencia al desgaste de los depósitos autocatalíticos de níquel exceden la temperatura de envejecimiento de las aleaciones de aluminio. Como consecuencia, se debe tener mucho cuidado en seleccionar el tratamiento térmico requerido de forma de preservar las propiedades mecánicas del substrato.

Gore, G. J. *et al* <sup>[23]</sup>, ensayaron alrededor de 13 materiales, entre los cuales estaba el aluminio de dureza aprox. de 79 HV <sub>10 kg.</sub>, usando el método de “arena seca / rueda de goma para abrasión de bajo esfuerzo descrita en la Norma ASTM G 65.” <sup>[23]</sup> bajo el procedimiento B, que implicaba una carga de 130 N y una distancia de deslizamiento de 1436 m. Los resultados mostraron que el volumen desgastado del Al ha sido de 298 mm<sup>3</sup>. La huella de desgaste obtenida era bastante profunda, características del ancho e incrustaciones de arena redondeadas. Estas incrustaciones son del orden de 1 mm de ancho, que pueden ser comparadas con las dimensiones de las partículas de arena 95 % pasantes correspondientes al tamaño de 425 micras. En todos los casos, la respuesta al desgaste fue cuantificada midiendo la pérdida de masa que luego fue convertido en volumen desgastado usando los valores de densidad de masa correspondiente para cada material. De todos los materiales ensayados, el aluminio fue el que tuvo menor resistencia al desgaste.

Elalem, K. *et al* <sup>[24]</sup>, estudiaron el efecto de la carga y de la distancia de deslizamiento sobre la respuesta al desgaste abrasivo. Es generalmente aceptado que el volumen perdido es proporcional a la carga aplicada. En este trabajo algunos materiales metálicos como Al 6061, Cu 110, Acero inoxidable 17-4Ph y el acero de herramientas D2 fueron seleccionados para el estudio. De todos los materiales ensayados, la aleación de aluminio fue la que exhibió la menor resistencia al desgaste. Se demostró que el volumen perdido aumenta a medida que aumenta la carga, sin embargo, esta situación cambia cuando un material tiene una dureza muy alta, como es el caso del acero de herramientas D2. En cuanto al efecto de la distancia de deslizamiento sobre el volumen desgastado se determinó que no se produjo ningún cambio para la aleación de aluminio, Cu 110 y el acero inoxidable 17-4Ph.

Scholl, M. <sup>[25]</sup>, investigaron el comportamiento al desgaste abrasivo de recubrimientos de nitruro de titanio fueron depositados empleando la técnica de deposición física en fase vapor (PVD), usando el ensayo arena seca/rueda de goma. El ensayo se realizó siguiendo una modificación de los procedimientos establecidos. La modificación fue en el número de intervalos a los cuales la muestra fue pesada y examinada por MEB.

Se usó arena Sílice (AFS 50/70, 212-300 micras de cuarzo redondeado Ottawa) como abrasivo en el ensayo. La carga empleada fue de 130 N y las muestras se examinaron después de 4-10 revoluciones en la parte inicial de la prueba. Intervalos más largos fueron usados a medida que el ensayo estaba progresando. La resistencia al desgaste del recubrimiento fue evaluada graficando la pérdida de volumen contra la distancia de deslizamiento. Para comparar, se ensayaron probetas sin recubrimiento. Se determinó que los recubrimientos con un espesor menor a 1.5 micras exhibieron un modo de falla de remoción continua de los mismos y una subsiguiente fractura de la capa de TiN. Los recubrimientos cuyos espesores estaban por encima de 1.5 micras fallaron similarmente solo en los bordes que presentaban algún tipo de defecto, por ejemplo, algún lugar donde había sido removida una macropartícula.

Wirojanupatump, S. *et al*<sup>[26]</sup>, hicieron una comparación directa del comportamiento de un acero dulce ante el desgaste abrasivo vía húmeda y vía seca. Fue visto que el ambiente es un parámetro importante en la tasa de desgaste abrasivo de un acero suave. Los ensayos se llevaron a cabo con diferentes abrasivos en un amplio intervalo de cargas y tamaños de partículas. La tasa de desgaste (en algunos casos en orden de magnitud) ha sido menor en condiciones húmedas que en secas, con las mayores diferencias observadas cuando las partículas abrasivas eran pequeñas y redondeadas. El desgaste en condición seca ocurrió predominantemente por el mecanismo de abrasión de tres cuerpos mientras que el desgaste en condición húmeda ocurre principalmente por el mecanismo de abrasión de 2 cuerpos. El agua puede afectar el desgaste de muchas maneras, pero se consideró que ejerció el papel de lubricante. Dado que la tasa de desgaste y los mecanismos son tan dependientes del ambiente de ensayo, se debe tener cuidado en escoger el tipo de ensayo que más simule las condiciones de servicio.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. DIAGRAMA DE FLUJO

El esquema del procedimiento experimental seguido para la evaluación del comportamiento ante el desgaste abrasivo de una aleación de Al 7075-T6 con y sin recubrimiento autocatalítico de electroless Ni-P, es mostrado en la Figura 16.

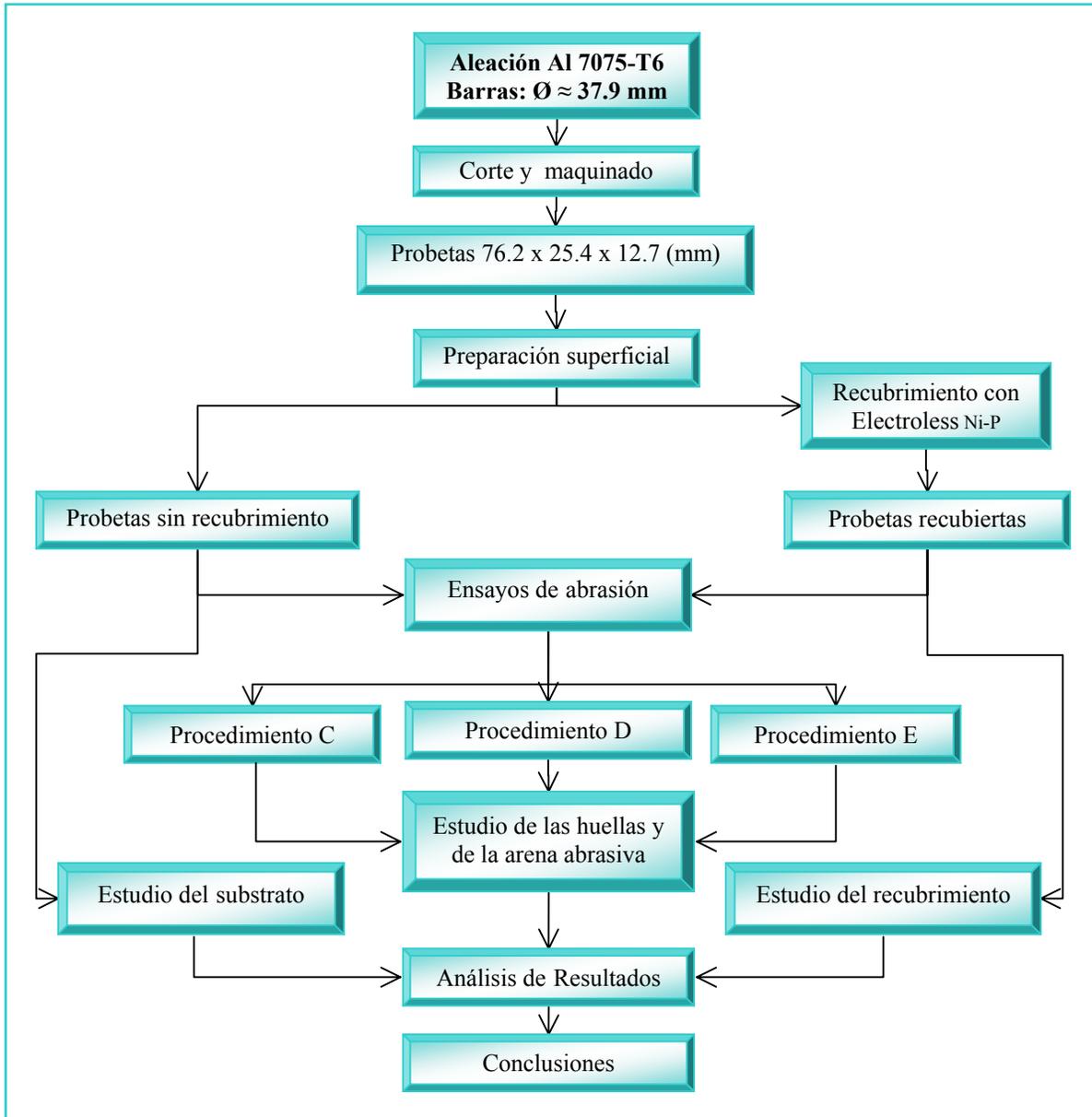


Figura 16 Flujograma del procedimiento experimental

## 2.2. PROBETAS DE ENSAYO

El material de ensayo fueron barras de una aleación de aluminio 7075, con tratamiento térmico T6, con un diámetro de 39.7 mm y una longitud de 3,6 m, dichas barras fueron suministradas por la empresa Kaiser Aluminium, (Illinois, U.S.A.). La composición nominal de esta aleación, en porcentaje en peso, es mostrada en la Tabla 4.

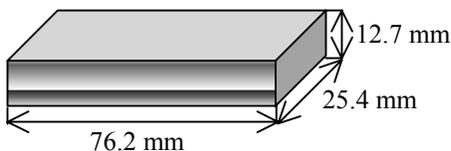
**Tabla 4** Composición química de la aleación de aluminio 7075

	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Cr
Mín.		5.1	2.1	1.2	-	-	-	-	0.18
Máx.	90	6.1	2.9	2.0	0.5	0.4	0.3	0.28	0.2

Las barras fueron cortadas y mecanizadas en un taller mecánico. De las barras se obtuvieron 15 probetas de 76.2 mm x 25.4 mm x 12.7 mm. Nueve de las probetas obtenidas fueron recubiertas con depósitos de electroless Ni-P a nivel industrial por la empresa Reliable Plating Corp. (U.S.A.), con un espesor de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$ .

### 2.2.1. Preparación superficial del metal base

La preparación metalográfica de las probetas ver Figura 17, consistió de una primera etapa de desbaste con una serie de lijas de carburo de silicio según la siguiente numeración: 400, 600, 800 y 1200, con el fin de eliminar cualquier irregularidad originada durante el maquinado. Durante la segunda etapa se efectuó el pulido de las mismas empleando una suspensión de alúmina de 0,3  $\mu\text{m}$ , posteriormente, otra suspensión de 0,05  $\mu\text{m}$ , con el objeto de generar una superficie especular para la evaluación posterior. El desbaste y pulido de las probetas fue realizado en un equipo Buehler semiautomático Ecomet 5, Figura 18.



**Figura 17** Dimensiones de la probeta de abrasión, según Norma ASTM G 65-94.



**Figura 18** Equipo de desbaste y pulido Ecomet 5, marca Buehler. (vista Frontal)

### 2.2.2. Recubrimiento

Nueve (9) de las quince (15) probetas obtenidas luego de la preparación superficial, fueron enviadas a recubrir con un depósito de electroless Ni-P de alto fósforo. Según la empresa Reliable Plating, U.S.A. las características esperadas del recubrimiento están dadas en la Tabla 5:

**Tabla 5** Propiedades del recubrimiento de electroless Ni-P

<b>Propiedades del depósito</b>	<b>Bajo/Medio fósforo</b>	<b>Alto Fósforo</b>
Apariencia física	Muy brillante	Semi-brillante
Contenido de fósforo (% peso)	3 - 5	11 - 13
Rockwell "C" HK(100) como depositado	58 - 62	46 - 50
Rockwell "C" Tratado térmicamente	66 - 70	66 - 68
Resistencia/ Protección a la corrosión	Bueno	Excelente
Ensayo de ácido nítrico	Falla	Pasa
Propiedades magnéticas	Magnético	No magnético

### 2.2.3. Identificación de las probetas

Se estableció la nomenclatura de las muestras, la cual se especifica en la Tabla 6.

**Tabla 6** Nomenclatura utilizada para identificar las probetas de desgaste abrasivo.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Condición</b>
Números (1 - 8)	Material base
Letras (A - I)	Material base + recubrimiento

#### 2.2.4. Medición de rugosidad

Los valores de rugosidad promedio ( $R_a$ ) de los especímenes con y sin recubrimiento fueron medidos luego de la preparación superficial con la ayuda de un Perfilómetro de Interferometría Óptica marca ZYGO modelo New View 200 (Figura 19). Se realizaron tres mediciones de rugosidad ( $R_a$ ) en zonas diferentes de cada muestra. Además, se obtuvieron imágenes en tres dimensiones de la topografía de las muestras bajo estudio.



**Figura 19** Perfilómetro de interferometría óptica ZYGO New View 200.

#### 2.2.5. Medición de dureza

Se usaron 6 probetas (3 sin recubrimiento y 3 con recubrimiento) para el estudio de la dureza, por medio de un microindentador Vickers, con el fin de obtener valores que permitieran establecer comparaciones entre la aleación sin recubrir y las probetas recubiertas con electroless Ni-P. Se hizo un barrido de dureza con una rejilla de doce (12) improntas por carga, las cuales fueron 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500 y 1.000 gf con un tiempo de aplicación de 15 seg. El equipo empleado para realizar estas mediciones fue un durometro marca LECO modelo AMH3000, con platina motorizada, Figura 20.



**Figura 20** Durometro LECO

## **2.3. CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO**

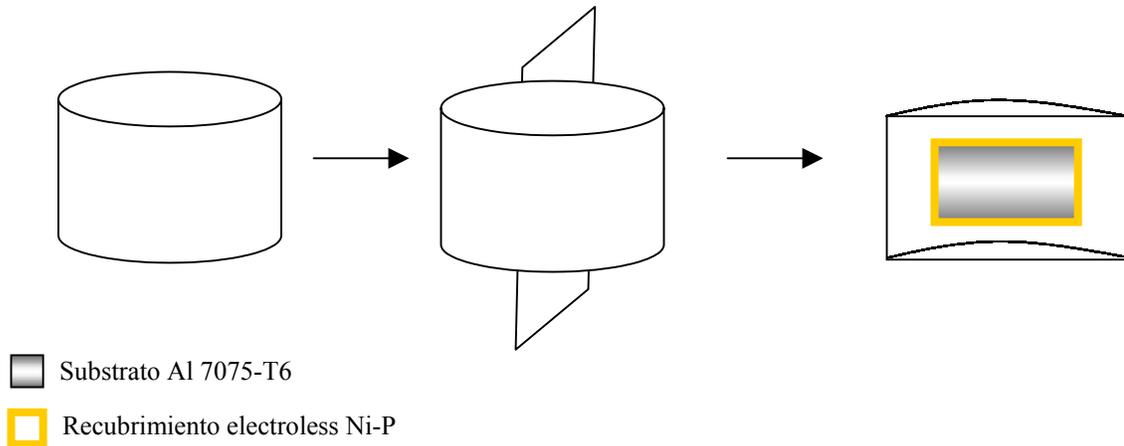
### **2.3.1. Composición química**

Para el estudio de la composición química del depósito de electroless Ni-P, se empleó la técnica de análisis denominada Sputtering Neutron Mass Spectroscopy (SNMS), la cual permite obtener un perfil composicional a través del espesor del recubrimiento. A la compañía MATS LTD, Inglaterra, encargada del estudio, se le exigió reportar los valores de los contenidos de fósforo y níquel a lo largo del espesor del recubrimiento.

### **2.3.2. Análisis de la intercara y medición del espesor**

Para la medición del espesor del depósito de electroless Ni-P, así como también para el análisis de las condiciones de la intercara entre el sustrato (aleación 7075-T6) y dicho depósito, se empleó una serie de muestras recubiertas. A las probetas se les efectuó un corte transversal para obtener muestras más fáciles de manejar. Luego del corte, las probetas fueron embutidas con una resina epóxica termoendurecible, suministrada por la Buehler.

Posteriormente, las muestras fueron seccionadas longitudinalmente, tal como se ilustra en la Figura 21. Este proceso se usó para proteger el recubrimiento y evitar posibles daños del mismo durante el corte.



**Figura 21** Esquema del corte longitudinal realizado a las probetas para el análisis del espesor y de la intercara entre el sustrato y el recubrimiento.

Para la preparación metalográfica de estas muestras, se realizó el desbaste empleando la serie de lijas de SiC: 400, 600, 800 y 1200, y posterior pulido, por medio de suspensiones de alúmina de 0,3 y 0,05  $\mu\text{m}$ , lo cual permitió obtener una superficie especular para su análisis por MEB.

En el microscopio se tomaron fotomicrografías de la zona entre el recubrimiento y el sustrato a diferentes magnificaciones para su posterior estudio. Se tomó una fotomicrografía a un aumento de 1500x para luego medir el espesor por medio del analizador de imágenes.

## **2.4. CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA**

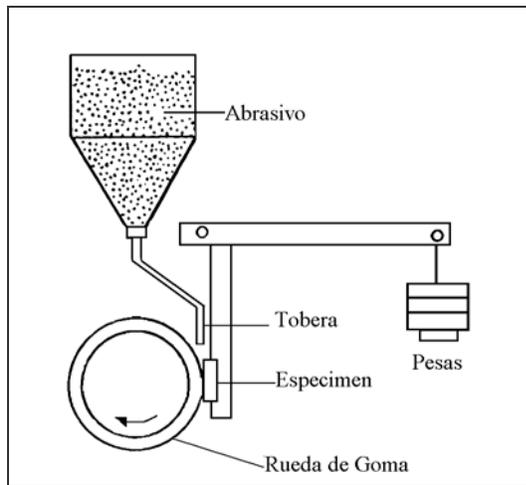
### **2.4.1. Ensayos de abrasión**

#### **2.4.1.1. Descripción del equipo**

Se utilizó una máquina de prueba estándar de abrasión de rueda de caucho y arena seca, cuyo principio de funcionamiento y elementos principales se describen a continuación. Consta de una rueda de caucho de 228.6 mm de diámetro y 12.7 mm de ancho, de composición y dureza estandarizadas, acoplada a un árbol que gira a velocidad constante. Éste es conducido por un motor eléctrico DC a través de un sistema reductor de engranajes. La disposición de la rueda de caucho permite que el caudal de abrasivo, proveniente de un recipiente ubicado en la parte superior de la máquina, fluya tangencialmente a la misma y en la dirección de giro. El flujo másico de abrasivo está controlado por el área transversal de la tobera de salida, creando una alimentación uniforme entre la rueda y el espécimen, este último acoplado a la máquina mediante un porta probetas.

A través de un sistema de palancas, un número determinado de pesas aplican la fuerza normal entre el espécimen y la rueda de caucho, carga que es soportada por las partículas abrasivas. La carga aplicada según el tipo de prueba estándar A, B, C, D y E se indica en la Tabla 7, y es equivalente a 2,5 veces el peso colocado en el sistema de palancas de la máquina.

Un contador de revoluciones detiene el motor después de un número prefijado de revoluciones, la dureza de la rueda de la goma debe ser durometro A-60  $\pm$  2. Un esquema ilustrativo de la máquina de abrasión puede observarse en la Figura 22 y la maquina usada en los ensayos es mostrada en la Figura 23.



**Figura 22** Esquema Máquina de Abrasión



**Figura 23** Maquina para ensayo de abrasión, marca Falex.

### 2.4.1.2. Parámetros de la prueba

El equipo de ensayo tiene dos parámetros de ensayo: la distancia de deslizamiento (Número de revoluciones de la rueda) y la carga aplicada.

Los ensayos de abrasión se realizaron bajo la Norma ASTM G 65-94, siguiendo los procedimientos C, D y E según se indica en la Tabla 7.

**Tabla 7** Parámetros de ensayos según Norma ASTM G 65-94.

<b>Procedimiento ASTM</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Abrasión lineal (m)</b>
<b>A</b>	13,25	6.000	4309
<b>B</b>	13,25	2.000	1436
<b>C</b>	13,25	100	71,8
<b>D</b>	4,58	6.000	4309
<b>E</b>	13,25	1.000	718

Los parámetros del ensayo son los siguientes:

- Velocidad de la prueba: constante e igual a  $200 \pm 2$  rpm.
- Abrasivo: arena de sílica estándar AFS 50-70, con una humedad máxima 5 % masa/masa.
- Diámetro de la rueda de caucho: 228.6 mm.

### 2.4.1.3. Procedimiento

Considerando las especificaciones de la norma ASTM G 65-94, conjuntamente con las recomendaciones del fabricante, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Una vez realizada la limpieza de las probetas, se procede a tomar el peso de cada una de ellas, utilizando una balanza analítica, con una aproximación de 0,001 g.
- Se identificaron las probetas como material base o recubiertas, ver Tabla 6.

- Calibración del medidor de la fuerza de fricción del equipo haciéndola equivalente al 75 % de la fuerza de fricción anticipada.
- Determinación del porcentaje de humedad en peso de una muestra de abrasivo, dejándola en el horno durante una hora a 120 °C y verificando que la diferencia de peso antes y después del calentamiento no superara el 5%.
- Medición del caudal de arena, pesando en una balanza analítica la cantidad de abrasivo que precipita durante un lapso de un minuto. Se verificó que el caudal se encontraba dentro del rango de 300-400 g/min, según las especificaciones de la norma ASTM-65. (Flujo de arena =  $\pm$  344 g/min.)
- Medición de la dureza de la rueda de caucho, utilizando para ello un durometro A60, marca Rex, modelo 1600 y siguiendo las instrucciones del manual del equipo, (valor de dureza promedio =  $\pm$  A59)
- Verificación del diámetro adecuado de la rueda de goma (228,6 milímetros).
- Verificación de una cortina de arena uniforme.
- Calibración de la fuerza de fricción.

Luego de retirar los especímenes del porta probetas, se procedió a eliminar los restos de arena sobre la superficie de los mismos mediante un soplador automático. Seguidamente se pesaron en una balanza digital con una precisión de 0,001 g y posteriormente los especímenes se almacenaron en un desecador.

**Tabla 8** Condiciones de ensayo de las probetas sin recubrimiento

Probeta	Carga (Kgf)	Distancia de deslizamiento (m)	Tiempo (seg)
1	13.25	71.8	30
2	13.25	71.8	30
3	13.25	71.8	30
4	4.58	4309	1800
5	4.58	4309	1800
6	13.25	718	300
7	13.25	718	300
8	13.25	718	300

**Tabla 9** Condiciones de ensayo de las probetas recubiertas

<b>Probeta</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>Distancia de deslizamiento (m)</b>	<b>Tiempo (seg)</b>
A	13.25	71.8	30
B	13.25	718	300
C	13.25	71.8	30
D	13.25	71.8	30
E	13.25	718	300
F	4.58	4309	1800
G	4.58	4309	1800
H	4.58	4309	1800
I	13.25	718	300

#### 2.4.1.4. Cálculos y reporte de datos

Los resultados de las pérdidas por abrasión fueron reportados como pérdida volumétrica en mm<sup>3</sup>. Para convertir pérdida de masa a pérdida volumétrica se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\rho}{m}$$

Donde:

V = Volumen perdido en mm<sup>3</sup>

$\rho$  = densidad del material

m = masa total de la muestra.

## **2.5. ANÁLISIS DE LAS HUELLAS DE DESGASTE Y DE LA ARENA ABRASIVA**

### **2.5.1. Caracterización de las huellas de desgaste**

Luego de terminado el ensayo de cada una de las probetas, se seleccionó una probeta representativa, correspondiente a cada uno de los diferentes ensayos realizados (con y sin recubrimiento) para su evaluación por medio del MEB. Se observaron las huellas a diferentes magnificaciones de forma tal de obtener detalles específicos de dicha zona y poder comparar entre los diferentes casos.

Para el estudio de los mecanismos de desgaste presente en las muestras ensayadas, se realizó un análisis morfológico de las huellas de desgaste de las probetas de abrasión mediante la técnica de MEB.

El estudio de las huellas de desgaste se realizó en la modalidad de electrones primarios (EP) para obtener una idea de la distribución composicional de las huellas de desgaste, y además fueron analizadas en la modalidad de electrones secundarios (ES) para obtener un análisis topográfico de las mismas.

Se realizó un análisis cualitativo puntual de las huellas y zonas adyacentes por microanálisis químico por E.D.X. en zonas donde se requería conocer la composición.

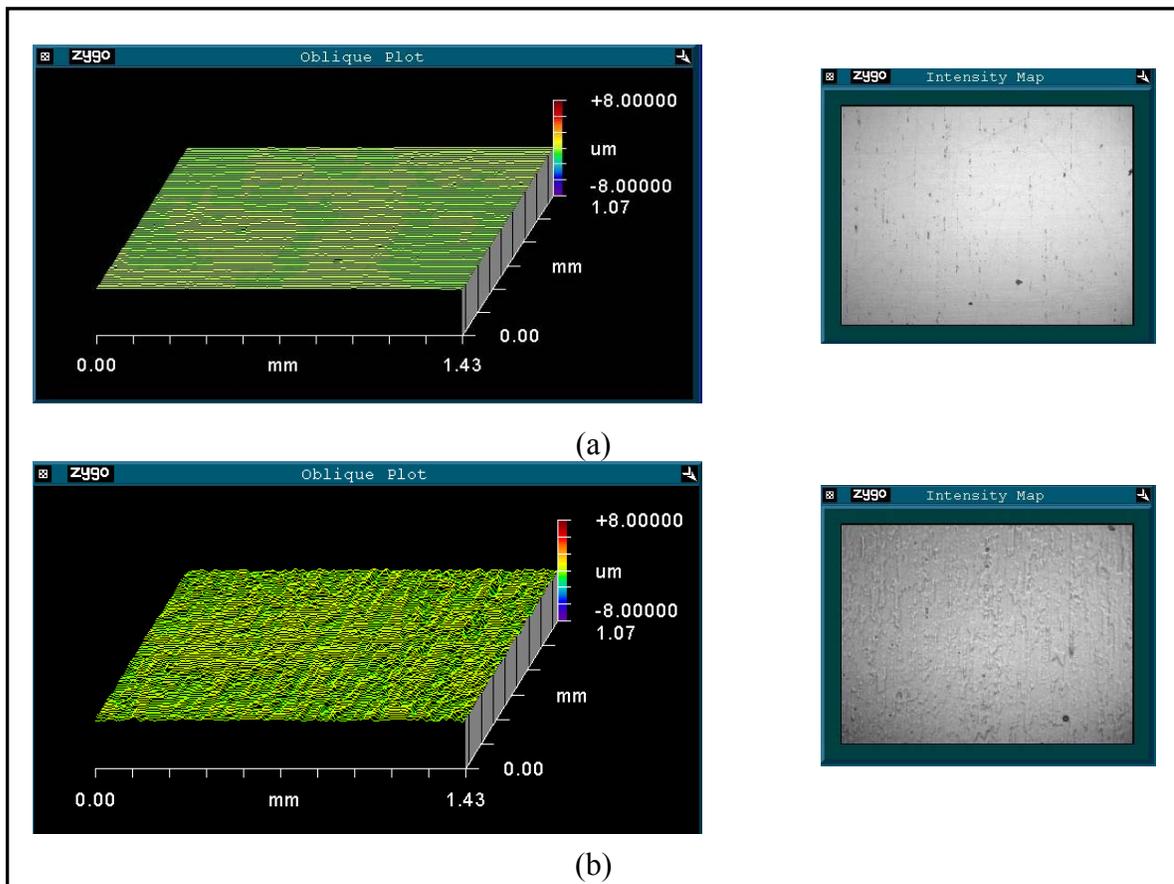
### **2.5.2. Estudio de la arena abrasiva**

Se tomaron muestras de la arena sílice estándar AFS 50-70, antes y después del ensayo de abrasión, dichas muestras fueron estudiadas por medio de MEB y luego empleando el analizador de imágenes, para determinar si existía un cambio significativo en la forma y tamaño de las partículas debido a la fuerza soportada por la arena durante el ensayo.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTALES

### 3.1. MEDICIÓN DE RUGOSIDAD

Las muestras de aleación de Aluminio 7075-T6, preparadas metalográficamente bajo las condiciones descritas en el procedimiento experimental, presentaron un valor promedio de rugosidad ( $R_a$ ) de  $0,033 \pm 0,004 \mu\text{m}$ , por su parte, las muestras recubiertas con electroless Ni-P evidencian un valor de  $R_a$  de  $0,131 \pm 0,022 \mu\text{m}$ , siendo el valor de rugosidad para el recubrimiento de electroless Ni-P mayor al del material base. En la Figura 24 se muestran los perfiles topográficos de las muestras sin y con recubrimiento de electroless Ni-P.



**Figura 24** Perfil topográfico 3D de las muestras de Aluminio 7075 – T6 (a) sin recubrimiento y (b) con recubrimiento de electroless Ni-P.

Los valores de rugosidad de cada espécimen se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10** Valores de rugosidad de las muestras sin recubrimiento (antes del ensayo)

<b>Muestras</b>	<b>Ra<sub>1</sub> (μm)</b>	<b>Ra<sub>2</sub> (μm)</b>	<b>Ra<sub>3</sub> (μm)</b>	<b>Ra<sub>p</sub> (μm)</b>	<b>Desv. Est.</b>
1	0,029	0,041	0,030	0,033	0,007
2	0,025	0,025	0,027	0,025	0,001
3	0,029	0,023	0,024	0,025	0,003
4	0,043	0,048	0,056	0,049	0,007
5	0,027	0,03	0,034	0,030	0,004
6	0,039	0,034	0,029	0,034	0,005
7	0,025	0,043	0,024	0,030	0,004
8	0,031	0,034	0,032	0,032	0,002

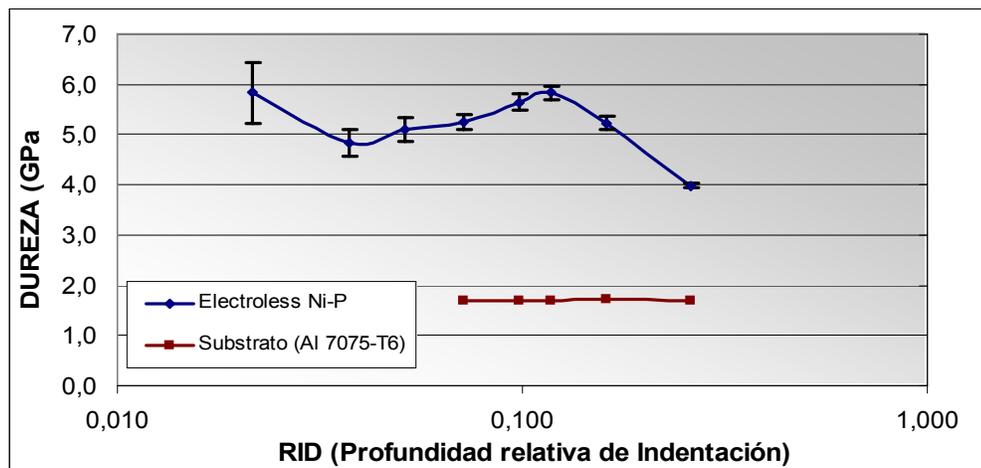
**Tabla 11** Valores de rugosidad para las muestras con recubrimiento de electroless Ni-P (antes del ensayo)

<b>Muestras</b>	<b>Ra<sub>1</sub> (μm)</b>	<b>Ra<sub>2</sub> (μm)</b>	<b>Ra<sub>3</sub> (μm)</b>	<b>Ra<sub>p</sub> (μm)</b>	<b>Desv. Est.</b>
A	0,025	0,054	0,021	0,096	0,018
B	0,124	0,087	0,112	0,108	0,019
C	0,166	0,21	0,182	0,186	0,022
D	0,151	0,159	0,157	0,156	0,004
E	0,145	0,123	0,106	0,125	0,020
F	0,094	0,11	0,092	0,099	0,010
G	0,062	0,062	0,081	0,068	0,011
H	0,119	0,125	0,138	0,127	0,010
I	0,112	0,106	0,129	0,116	0,012

Se observa que los valores de rugosidad son cercanos entre sí, confirmando que los recubrimientos depositados por la técnica de electroless copian prácticamente la topografía del sustrato. Además, dichos valores de rugosidad se encuentran dentro de las especificaciones de la norma ASTM G 65-94 (anexos).

### 3.2. MEDICIÓN DE DUREZA, SISTEMA RECUBRIMIENTO/SUBSTRATO

Los valores de las diagonales de las indentaciones Vickers realizadas para las probetas sin y con recubrimiento de electroless Ni-P se pueden observar en las Tablas 12 y 13 respectivamente. Además, se muestran los valores de dureza promedio calculados para la serie de cargas: 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500 y 1000 gf.



**Figura 25** Dependencia de la dureza con la profundidad relativa de indentación para las muestras recubiertas con electroless Ni-P

En la Figura 25 se observa la grafica semi-logarítmica de la variación de la dureza en función del parámetro adimensional “profundidad relativa de indentación” (RID), la cual se realizó con el fin de desprestigiar la influencia del espesor del recubrimiento, en el valor de dureza del recubrimiento y ver la variación de la dureza con la carga aplicada. Para la realización de la gráfica son introducidos los respectivos valores reflejados en la Tabla 14.

En la curva se observa el comportamiento atípico de la misma, ya que no muestra la tendencia tipo “S” que generalmente se presenta en este tipo de gráficas. Se esperaba que para altas cargas la dureza del recubrimiento tendiera a la dureza del sustrato. Sin embargo, en este caso la diferencia es bastante significativa. De hecho, el máximo valor de profundidad alcanzado para la carga mayor (1.000gf) fue de nueve micras (9  $\mu\text{m}$ ), siendo apenas este valor la cuarta parte del total del espesor del recubrimiento en estudio.





En la Figura 25 se puede observar que la dureza de la muestra recubierta disminuye a medida que la profundidad relativa de indentación aumenta. Sin embargo, existe un comportamiento anormal para el tramo de cargas de 25 gf a 200 gf, en el cual hay un aumento inesperado de la dureza del recubrimiento. Esto puede deberse a la presencia en las capas superficiales del recubrimiento, de algunos elementos que posiblemente le otorguen el aspecto morfológico atípico que presenta el recubrimiento de electroless Ni-P bajo estudio. Por otro lado, se observa que la dureza del substrato de aluminio 7075-T6 se mantiene relativamente constante a través de todo el barrido de dureza en 1.7 GPa.

**Tabla 14** Resultados de la profundidad relativa de indentación para los valores de dureza Vickers a diferentes cargas sobre las muestras recubiertas con electroless Ni-P

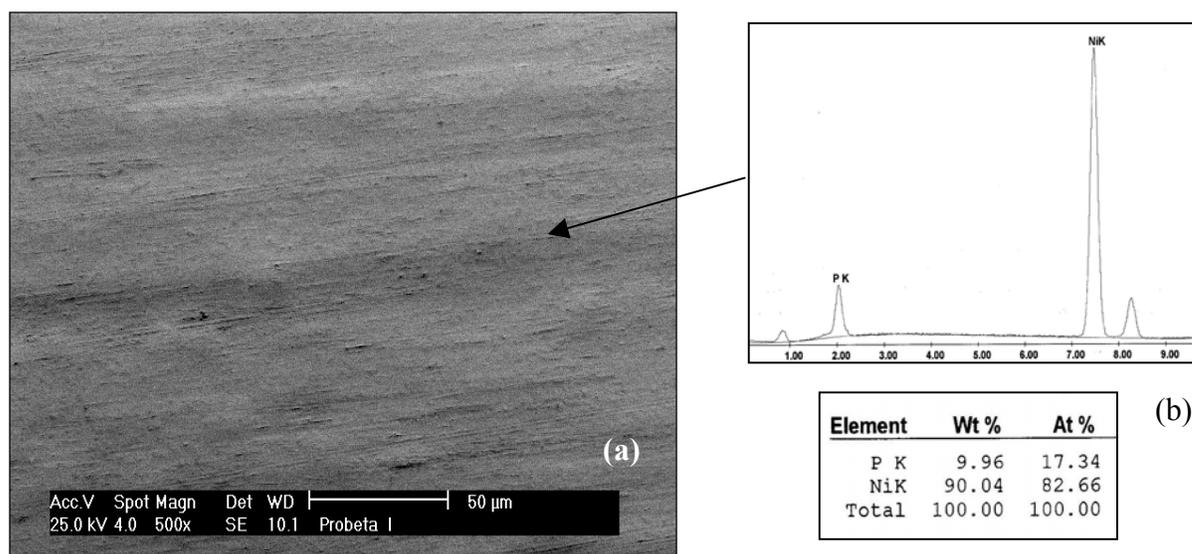
<b>Carga (gf)</b>	<b>D<sub>1</sub></b>	<b>D<sub>2</sub></b>	<b>D<sub>p</sub></b>	<b>D.E.</b>	<b>Espesor (µm)</b>	<b>Dureza (Hv)</b>	<b>D.E.</b>	<b>Dureza (GPa)</b>	<b>D.E.</b>	<b>R.I.D.</b>
10	5,40	9,33	7,37	0,5	<b>37 ± 2</b>	<b>595</b>	47	5,83	0,62	0,028
25	9,84	13,27	11,56	0,41	<b>37 ± 2</b>	<b>493</b>	29	4,83	0,27	0,045
50	12,85	13,27	13,06	0,44	<b>37 ± 2</b>	<b>521</b>	21	5,11	0,24	0,050
100	17,93	18,76	18,35	0,71	<b>37 ± 2</b>	<b>536</b>	21	5,25	0,16	0,071
200	24,61	25,35	24,98	0,65	<b>37 ± 2</b>	<b>576</b>	15	5,64	0,16	0,096
300	30,29	30,84	30,57	0,53	<b>37 ± 2</b>	<b>595</b>	16	5,83	0,14	0,118
500	41,70	41,75	41,73	0,68	<b>37 ± 2</b>	<b>534</b>	10	5,23	0,13	0,161
1000	62,55	63,41	62,98	1,05	<b>37 ± 2</b>	<b>407</b>	8	3,99	0,06	0,243

Es necesario acotar que el parámetro adimensional RID se calculó mediante el uso de la expresión:  $RID = Diagonal\ promedio / (espesor * 7)$ .

### 3.3. CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO

#### 3.3.1. Morfología del recubrimiento

La Figura 26 (a), presenta la microfografía obtenida por MEB en el modo de imagen de electrones secundarios, del recubrimiento de electroless Ni-P. Se puede observar que el recubrimiento amorfo de Ni-P, en este caso presenta una morfología lisa atípica, y no la acostumbrada morfología tipo “coliflor” reportada en la literatura por Li, H. *et al*<sup>[9]</sup>.

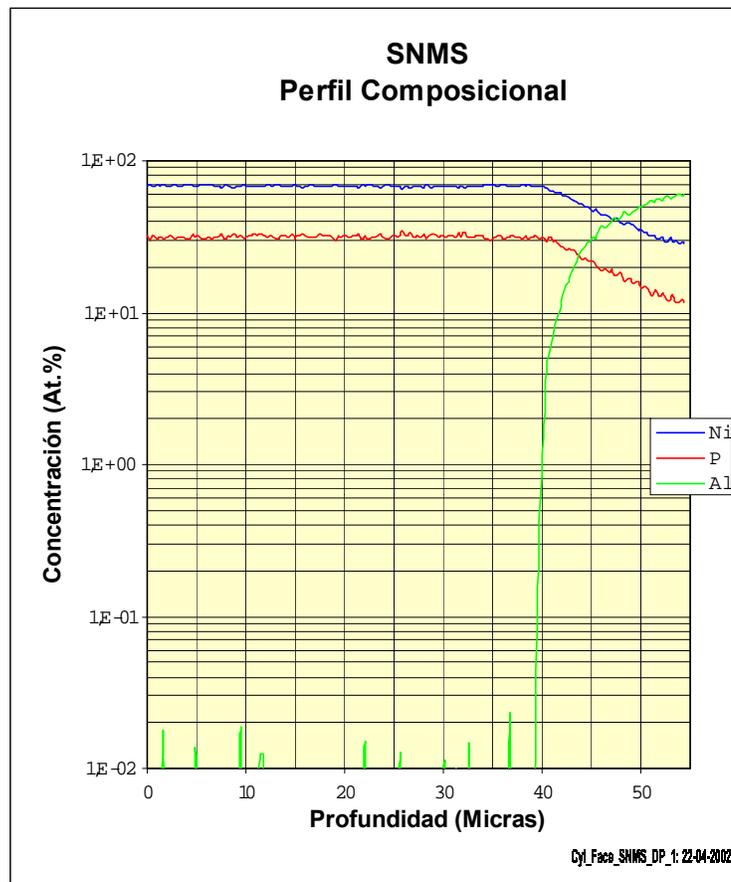


**Figura 26** Fotomicrografía por MEB en el modo de electrones secundarios a 500x del recubrimiento de electroless Ni-P a) Vista superior del recubrimiento. b) Análisis químico por EDX realizado sobre la superficie del recubrimiento.

En la Figura 26 (b), se observa el análisis químico semi-cuantitativo realizado usando la técnica por dispersión de la energía de rayos X, se puede comprobar que el recubrimiento depositado tiene como elementos principales constituyentes al níquel y al fósforo, y que este último elemento representa  $17 \pm 1$  % atómico de P.

### 3.3.2. Composición química del recubrimiento

Para determinar la composición química de los recubrimientos de electroless Ni-P depositados sobre la aleación de aluminio 7075 – T6, se realizó un análisis utilizando la técnica SNMS (*Sputter Neutral Mass Spectroscopy*) realizado por la compañía *MATTS*. Este análisis reporta los resultados en porcentaje atómico de las especies presentes a través de la profundidad de la capa estudiada (Figura 27). Se puede observar que tanto el P como el Ni tienen una composición constante a través de todo el espesor, indicando un control riguroso del proceso de deposición.

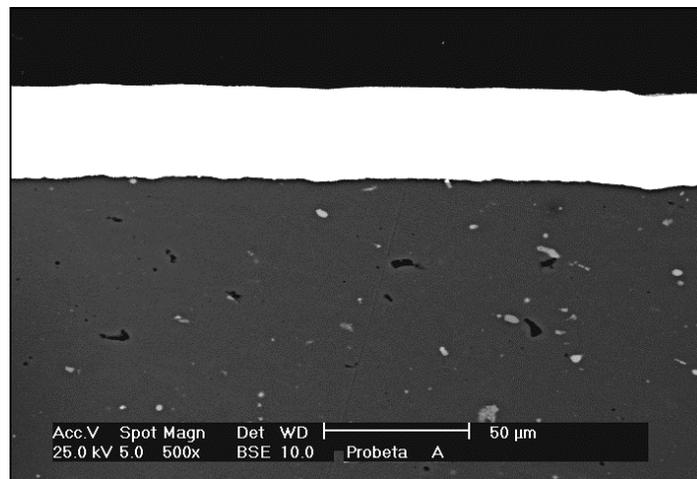


**Figura 27** Análisis de la composición química del recubrimiento de electroless Ni-P con la profundidad, realizado por la técnica de SNMS.

Además, se puede establecer el espesor aproximado del depósito, alrededor de 39  $\mu\text{m}$ , debido a la presencia de un valor constante de la concentración de aluminio en el gráfico para este valor de profundidad.

### 3.3.3. Espesor de los recubrimientos

Para medir el espesor del recubrimiento de electroless Ni-P se realizó también la evaluación por medio de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), a partir de mediciones sobre un corte transversal a las muestras recubiertas. Posteriormente, se empleó el analizador de imágenes para obtener el valor promedio del espesor haciendo un barrido de mediciones de un lado y de otro de la sección transversal como la que se observa en la Figura 28. Se determinó un espesor promedio del depósito de  $37 \pm 2 \mu\text{m}$ .



**Figura 28** Fotomicrografía por MEB de la sección trasversal de una probeta de una aleación de aluminio 7075-T6 con un recubrimiento de electroless Ni-P, a 500x en el modo de electrones primarios.

### 3.4. CARACTERIZACION TRIBOLOGICA

#### 3.4.1. Ensayos de desgaste según la Norma ASTM G 65.

Los ensayos de desgaste abrasivo (arena seca/rueda de goma) fueron realizados bajo la Norma ASTM G 65-94 según 3 procedimientos distintos, descritos con anterioridad en la Tabla 7, en los cuales se varía la carga y la distancia de deslizamiento según cada caso.

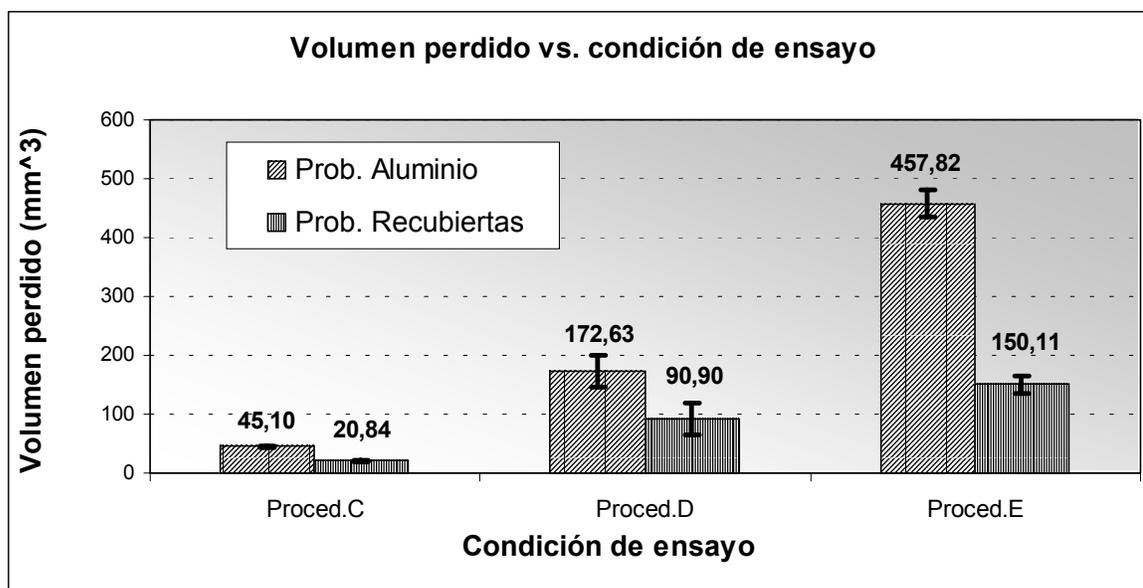
**Tabla 15** Perdida volumétrica reportada por el ensayo abrasivo para cada una de las condiciones en estudio.

<b>PROBETAS</b>	<b>VOLUMEN PERDIDO (mm<sup>3</sup>)</b> (± 0.01)	<b>PROCEDIMIENTO</b>
A	21.44	C, 30 seg
B	153.53	E, 300 seg
C	20.28	C, 30 seg
D	20.79	C, 30 seg
E	162.12	E, 300 seg
F	73.90	D, 1800 seg
G	76.62	D, 1800 seg
H	122.16	D, 1800 seg
I	134.68	E, 300 seg
1	46.97	C, 30 seg
2	44.30	C, 30 seg
3	44.02	C, 30 seg
4	191.42	D, 1800 seg
5	153.84	D, 1800 seg
6	476.72	E, 300 seg
7	463.98	E, 300 seg
8	432.74	E, 300 seg

**Tabla 16** Promedio de las pérdidas volumétricas para cada condición de ensayo

Promedio de volumen perdido en mm <sup>3</sup>				
Muestras	Aluminio	Desviación	Recubiertas	Desviación
Condición	7075-T6	Estándar	con EN	Estándar
Procedimiento C	45,10	1,63	20,84	0,58
Procedimiento D	172,63	26,57	90,90	27,11
Procedimiento E	457,82	22,63	150,11	14,03

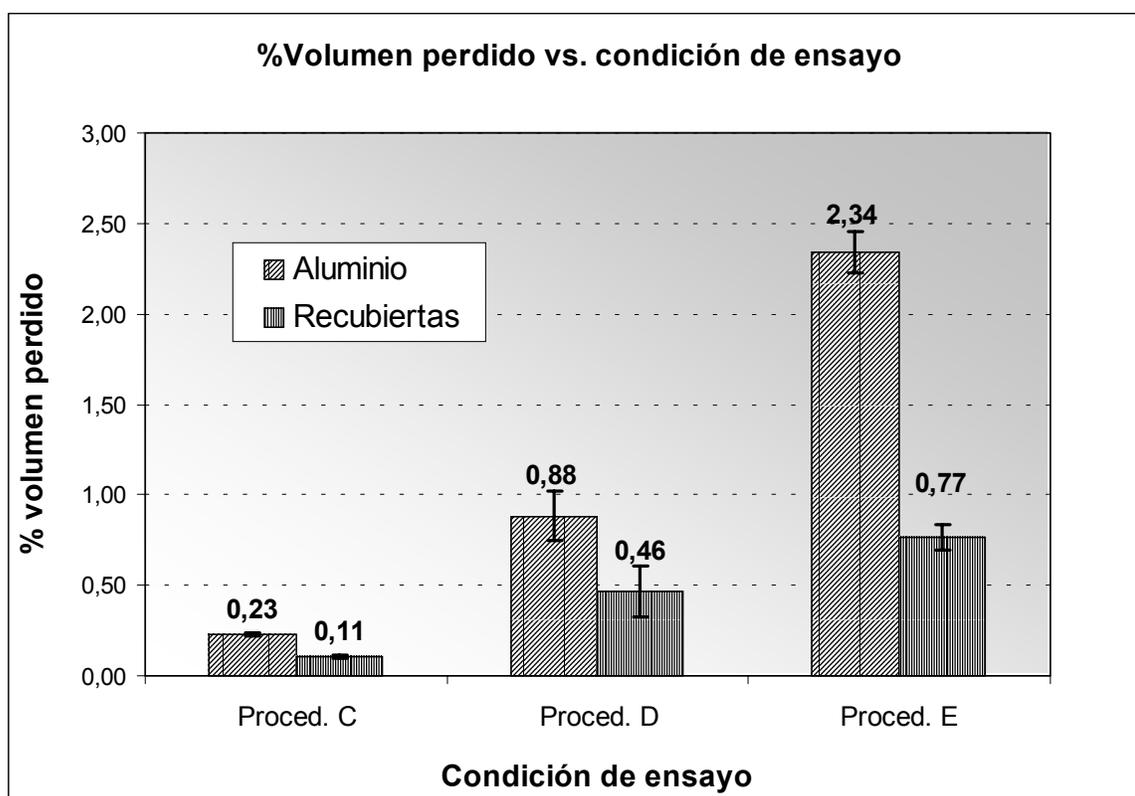
En las Tablas 15 y 16 puede notarse como en los tres procedimientos, la pérdida volumétrica (mm<sup>3</sup>) varía notablemente para cada condición de carga y distancia de deslizamiento. También se presenta la variación de volumen desgastado de las muestras sin y con recubrimiento ensayadas bajo un mismo procedimiento.



**Figura 29** Representación gráfica de la pérdida de volumen en función de la condición de ensayo para las muestras de aluminio 7075-T6 sin y con recubrimiento de electroless Ni-P.

En la Figura 29, se muestra gráficamente las pérdidas volumétricas para las muestras de aluminio 7075-T6 con y sin recubrimiento de electroless Ni-P. Comparando las diferentes condiciones de ensayo en el gráfico, se puede afirmar que el procedimiento E, es la condición de desgaste más severa, en los dos casos.

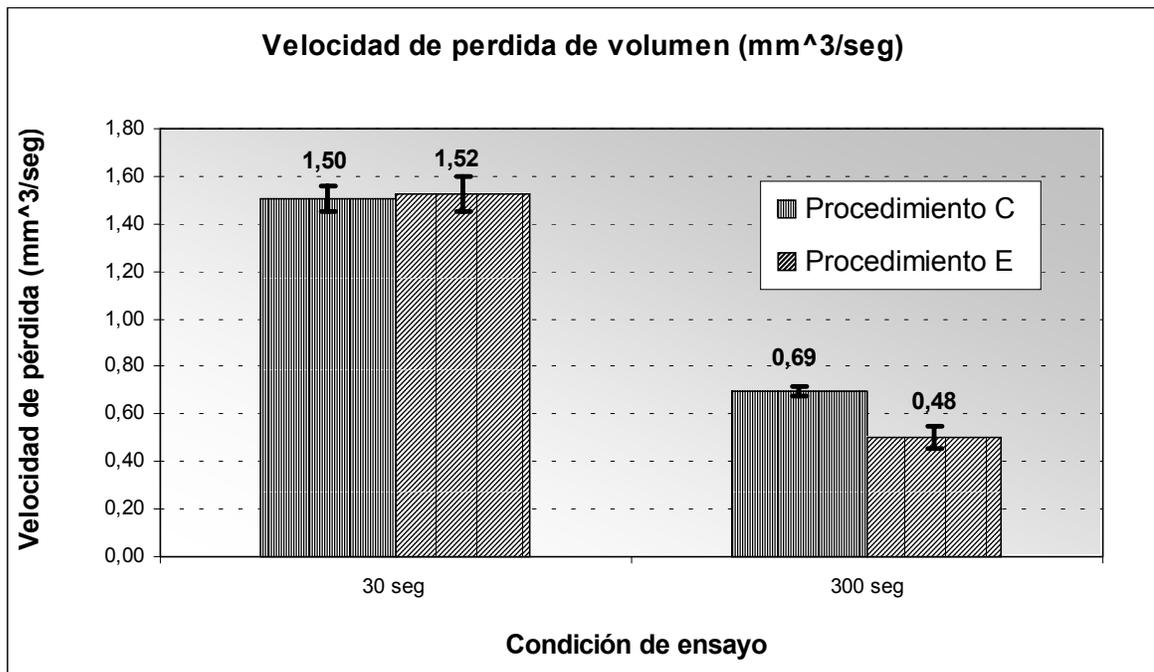
Para la condición de ensayo del procedimiento C (condición de carga y distancia de deslizamiento menos severa) se observa, de igual manera, la mayor resistencia al desgaste que presenta el recubrimiento en comparación con la resistencia que opone el sustrato de aluminio 7075-T6 sin recubrir. En todos los casos, los resultados obtenidos indican que el recubrimiento de electroless de Ni-P en su estado como depositado mejora notablemente las propiedades de resistencia al desgaste de la aleación de aluminio 7075-T6.



**Figura 30** Representación gráfica del porcentaje de pérdida de volumen con respecto al volumen total de las muestras en función de la condición de ensayo para las muestras de aluminio 7075-T6 sin y con recubrimiento de electroless Ni-P

El porcentaje de volumen perdido con respecto al volumen total de las probetas es mostrado en la Figura 30, donde se observa que la mayor pérdida volumétrica (2.34 %) se tiene para el sustrato de aluminio 7075-T6 ensayado bajo una carga de 13.25 Kgf y una distancia de deslizamiento de 718 m (procedimiento E de la norma).

En la Figura 31, podemos ver como existe un velocidad constante de desgaste para las probetas ensayadas bajo los procedimientos C y E de la norma (71.8 m y 718 m, respectivamente) para una misma carga.

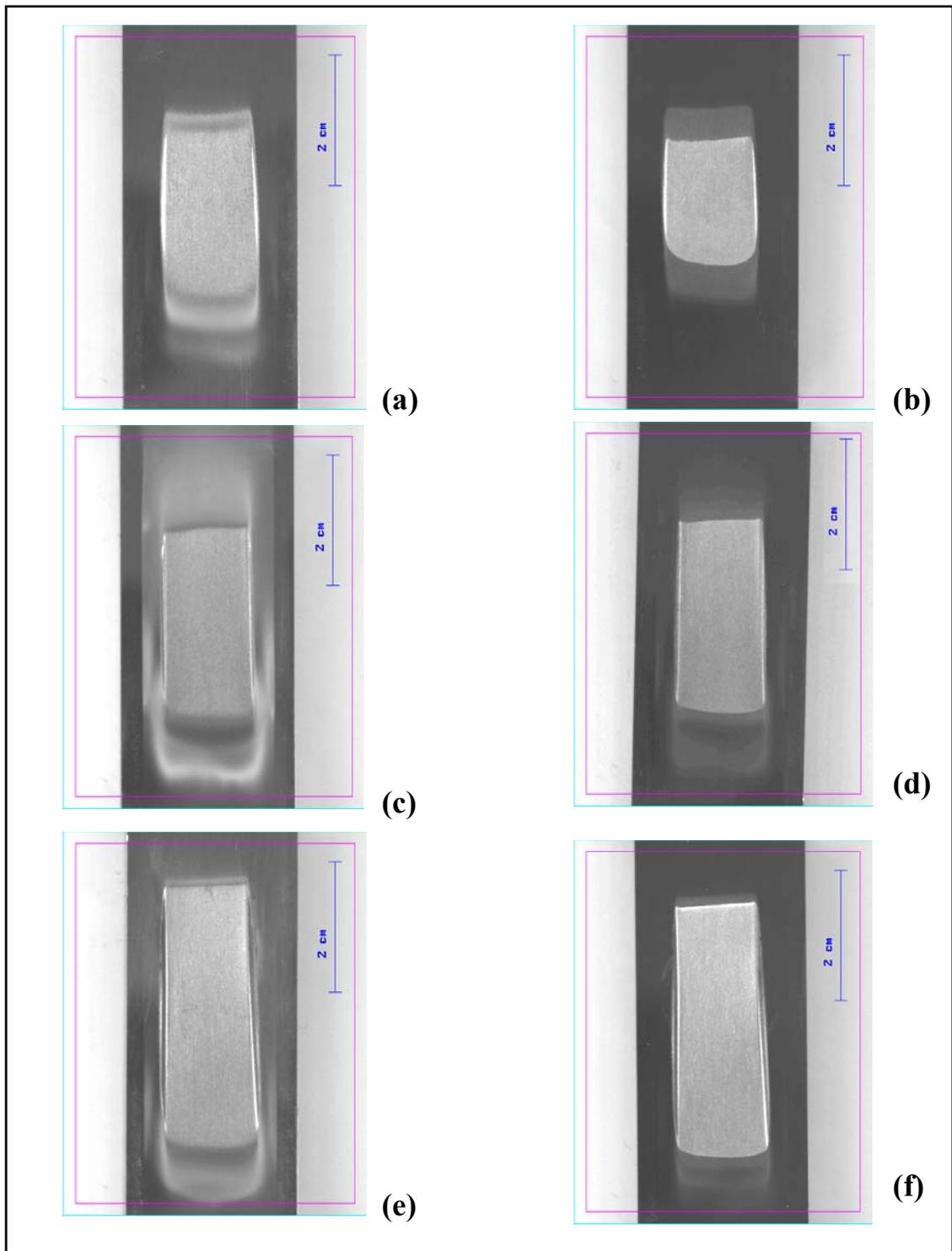


**Figura 31** Velocidad de pérdida volumétrica en mm<sup>3</sup>/seg para un carga de 13.25 Kgf en función de la distancia de deslizamiento para los ensayos realizados bajo los procedimientos C y E de la norma ASTM G 65.

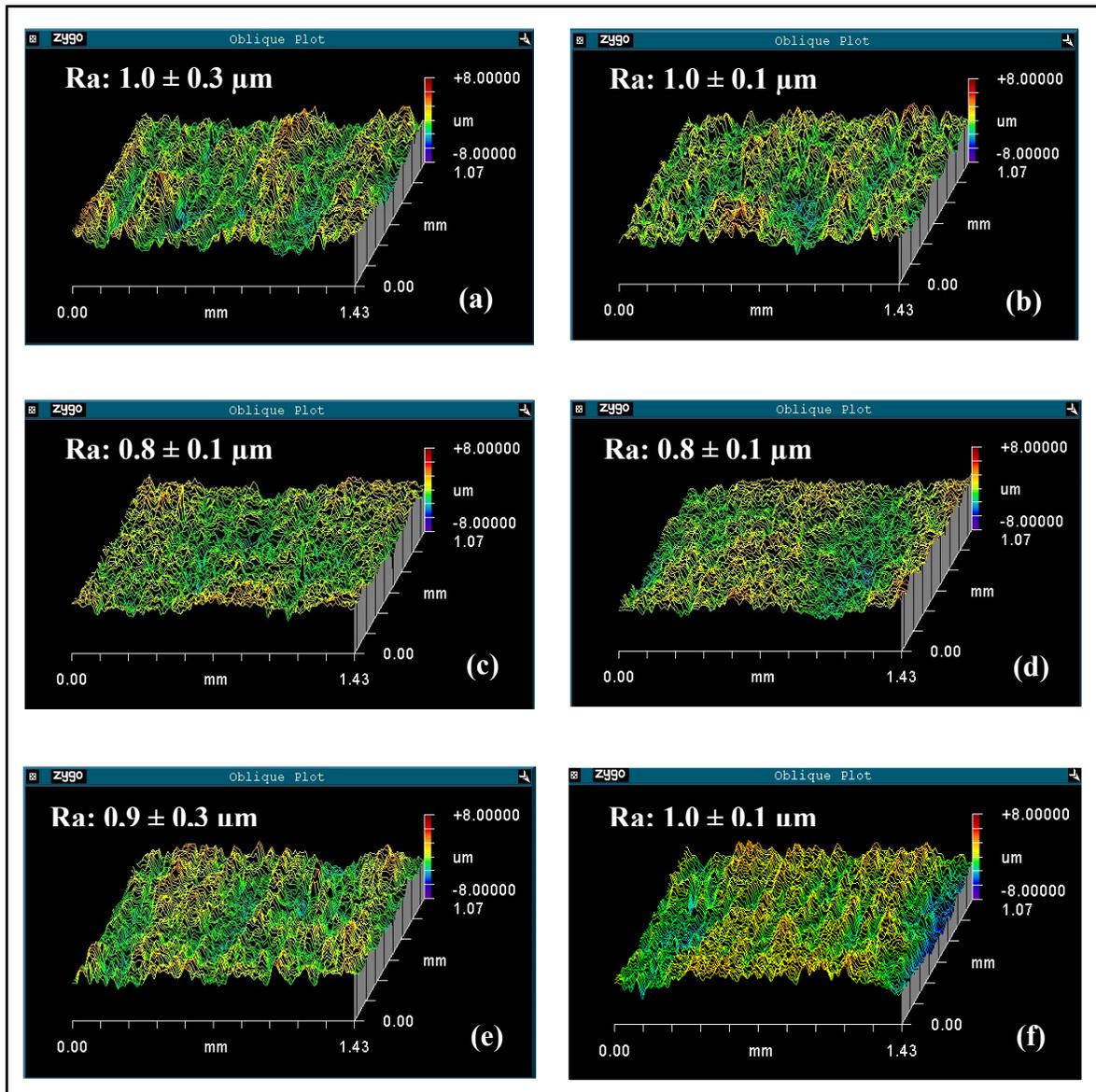
Las huellas de desgaste mostradas en la figura 32 son bastante similares entre si en apariencia. Los cambios en el volumen perdido son reflejados como cambios en la longitud y profundidad de las huellas <sup>[23]</sup>. De tal manera, el procedimiento E en las muestras sin recubrir (Fig. 32 e) representa la condición de ensayo mas severa, es decir, donde existe una mayor perdida volumétrica como respuesta al desgaste.

En la Figura 33 se pueden observar los perfiles topográficos 3D mostrando la rugosidad del centro de la huella para cada condición de ensayo. En la misma se observa como el parámetro que pudiera afectar dichos resultados es la carga aplicada. Como era de esperar, para diferentes distancias de deslizamiento del ensayo, se obtiene la misma rugosidad. Tal que, para las Figuras 33a y 33b (carga 13.25 Kgf) el valor de rugosidad ( $R_a = 1.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ) es el mismo que el observado en las Figuras 33e y 33f (carga 13.25 Kgf) aun a pesar de que las distancias de deslizamiento no fueron las mismas (71.8 m y 718 m, respectivamente) durante el ensayo de desgaste realizado.

Para las Figuras 33c y 33d el valor de rugosidad de las probetas fue un poco mas bajo ( $R_a = 0.8 \pm 0.1$ ) que los valores mencionados anteriormente, asi como también la carga a la que fueron ensayadas las probetas (carga 4.58 Kgf).



**Figura 32** Fotomicrografías de las huellas de desgaste. El flujo de arena es de arriba hacia abajo. (a) Al 7075-T6, procedimiento C; (b) muestra recubierta, procedimiento C; (c) Al 7075-T6, procedimiento D; (d) muestra recubierta, procedimiento D; (e) Al 7075-T6, procedimiento E; (f) muestra recubierta, procedimiento E.

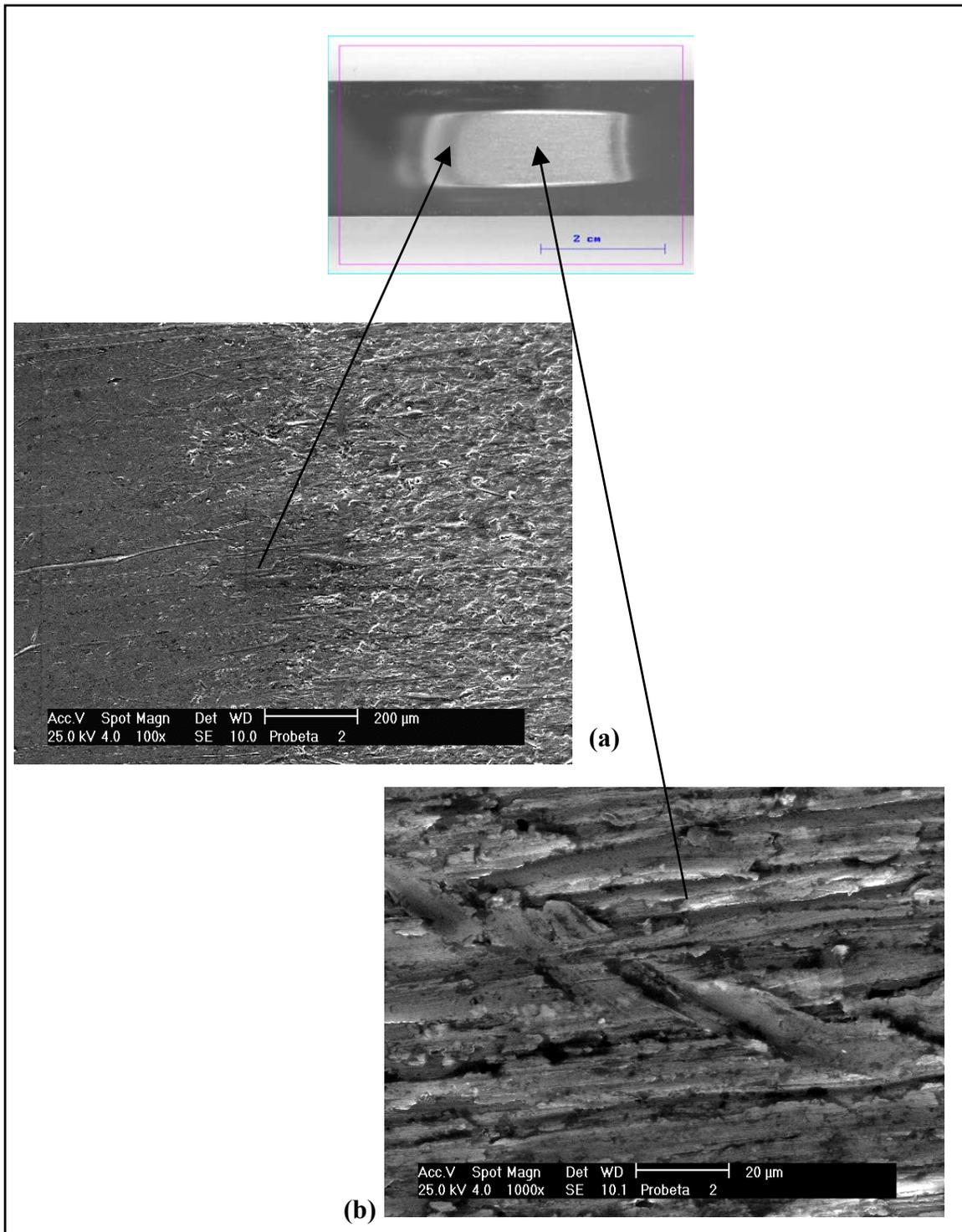


**Figura 33** Perfiles topográficos 3D de las muestras ensayadas mostrando la rugosidad de las huellas de desgaste (a) Al 7075-T6, procedimiento C; (b) Muestra recubierta, procedimiento C; (c) Al 7075-T6, procedimiento D; (d) Muestra recubierta, procedimiento D; (e) Al 7075-T6, procedimiento E; (f) Muestra recubierta, procedimiento E.

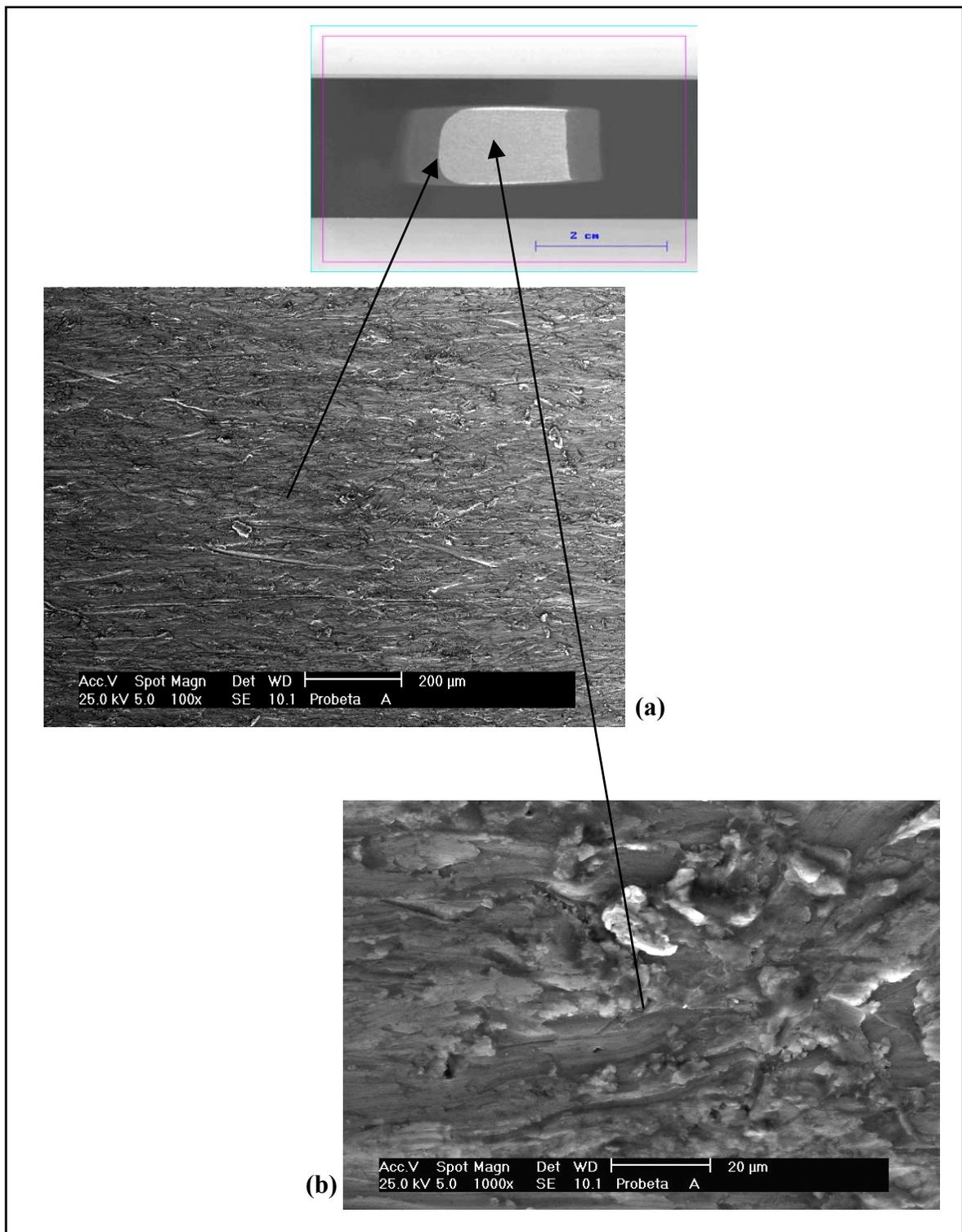
En las Figuras 34 y 35 se observan las huellas de desgaste observadas por Microscopia Electrónica de Barrido en el modo de electrones secundarios para las muestras sin y con recubrimiento respectivamente, ensayadas bajo el procedimiento C de la norma ASTM G65-94 (anexos). En la Figura 34 (a) la intercara de salida del flujo de arena presenta una mayor deformación plástica comparada con la intercara mostrada en la Figura 35 (a). De igual manera, se observa como la deformación plástica del centro de la huella para la Figura 34 (b) es mayor a la presentada en la Figura 35 (b). Esto pone de manifiesto la resistencia que opone el recubrimiento de electroless Ni-P al desgaste abrasivo en comparación del sustrato de aluminio 7075-T6.

Estas observaciones, se confirman con los valores de volumen perdido dados en la Tabla 16, para cada una de las condiciones, donde la pérdida de volumen del sustrato de la aleación de aluminio en estudio fue de  $45.10 \text{ mm}^3$  mientras que las muestras recubiertas tuvieron una disminución del volumen desgastado de un 54 % con respecto al volumen desgastado del sustrato sin recubrir.

Estos resultados pueden estar relacionados directamente con las diferencias entre los valores de dureza que presentan las dos superficies ensayadas. Es bien sabido que la dureza es uno de los parámetros más importantes que afecta la resistencia al desgaste de los materiales. De manera general, mientras más duro sea el material menor será la pérdida volumétrica. La aleación de aluminio 7075-T6 a pesar de tener una dureza elevada (aprox. 175 HV) en comparación con las aleaciones de aluminio en general (Al puro, aprox. 30 HV) difiere en gran medida de la dureza del electroless Ni-P (aprox. 500 HV) y por ello la diferencia en los valores de volumen perdido obtenidos en los diferentes ensayos.



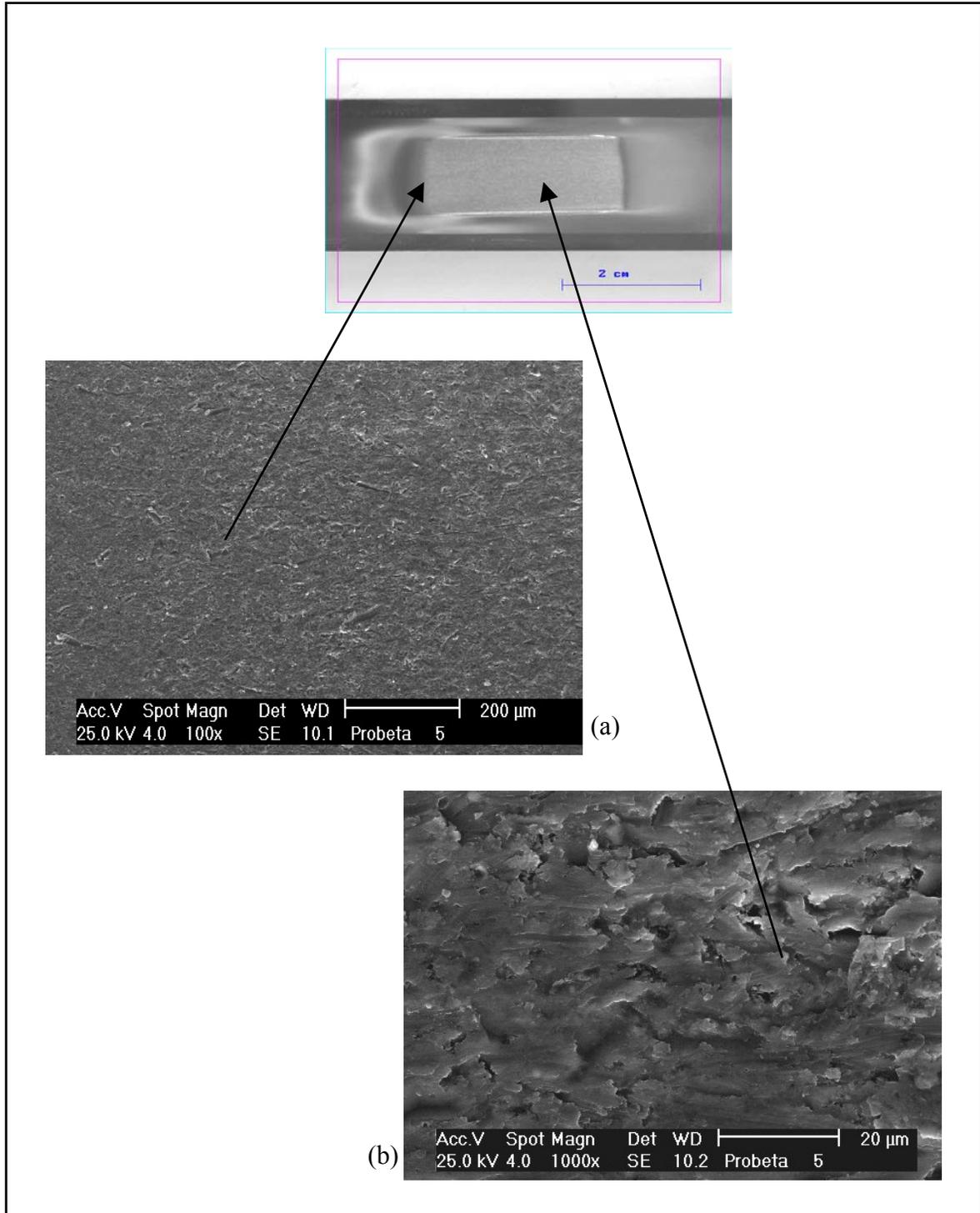
**Figura 34** Fotomicrografías por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 13.25 Kgf y 71.8 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras, a) Zona de salida de la huella a 100x en electrones secundarios b) Centro de la huella a 1000x.



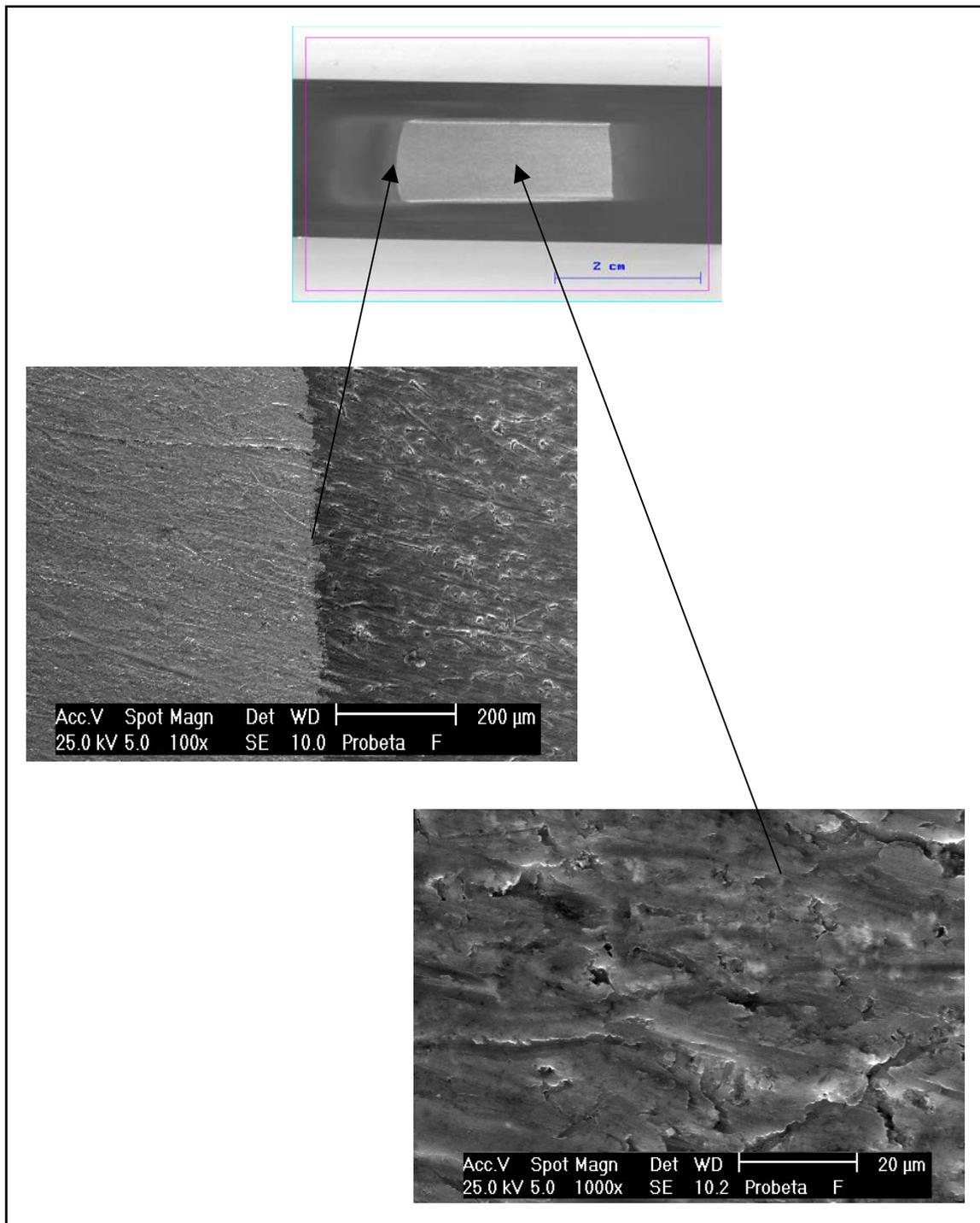
**Figura 35** Fotomicrografías por MEB en el modo de electrones secundarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 13.25 Kg y 71.8 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras a) Zona de salida de la huella, 100x b) centro de la huella, 1000x.

En las Figuras 36 y 37 se observan las huellas de desgaste por Microscopia Electrónica de Barrido en el modo de electrones secundarios para las muestras sin y con recubrimiento respectivamente, ensayadas bajo el procedimiento D de la norma. En la Figura 36 (a) la intercara de salida del flujo de arena presenta múltiples indentaciones y que parecen estar asociadas con una canalización preferencial de muchas partículas, las cuales ruedan por sí solas <sup>[21]</sup> comparada con la intercara mostrada en la Figura 37 (a) la cual presenta una zona bien diferenciada de lo que es el recubrimiento de electroless Ni-P y lo que es el substrato de aluminio 7075-T6. Además, se observan ranuras bastante lineales que aparentemente resultan del contacto deslizante entre partículas individuales del abrasivo y la contraparte <sup>[21]</sup>. Por otra parte, se observa como la deformación plástica del centro de la huella para las Figuras 36 (b) y 37 (b) es prácticamente la misma, observándose como las ranuras producidas por el contacto de la arena se deforman plásticamente al transcurrir el ensayo, debido a las características mecánicas propias del substrato de aluminio.

Aún cuando en ambos casos (substrato y substrato + recubrimiento) del procedimiento D, la huella ya había alcanzado el substrato, se puede observar en las Figuras 29 y 30, una disminución en el volumen perdido para las muestras recubiertas. Es por ello que se puede decir que la presencia del recubrimiento disminuyó el % de pérdida volumétrica en los ensayos realizados, (ver Figura 42). Numéricamente, las muestras recubiertas tuvieron una disminución en el volumen perdido de un 47 % con respecto a las probetas sin recubrir.



**Figura 36** Fotomicrografías por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 4.58 Kgf y 4309 m. Se observan las huellas de desgaste de la muestra: a) Zona de salida de la huella a 100x en electrones secundarios b) Centro de la huella a 1000X

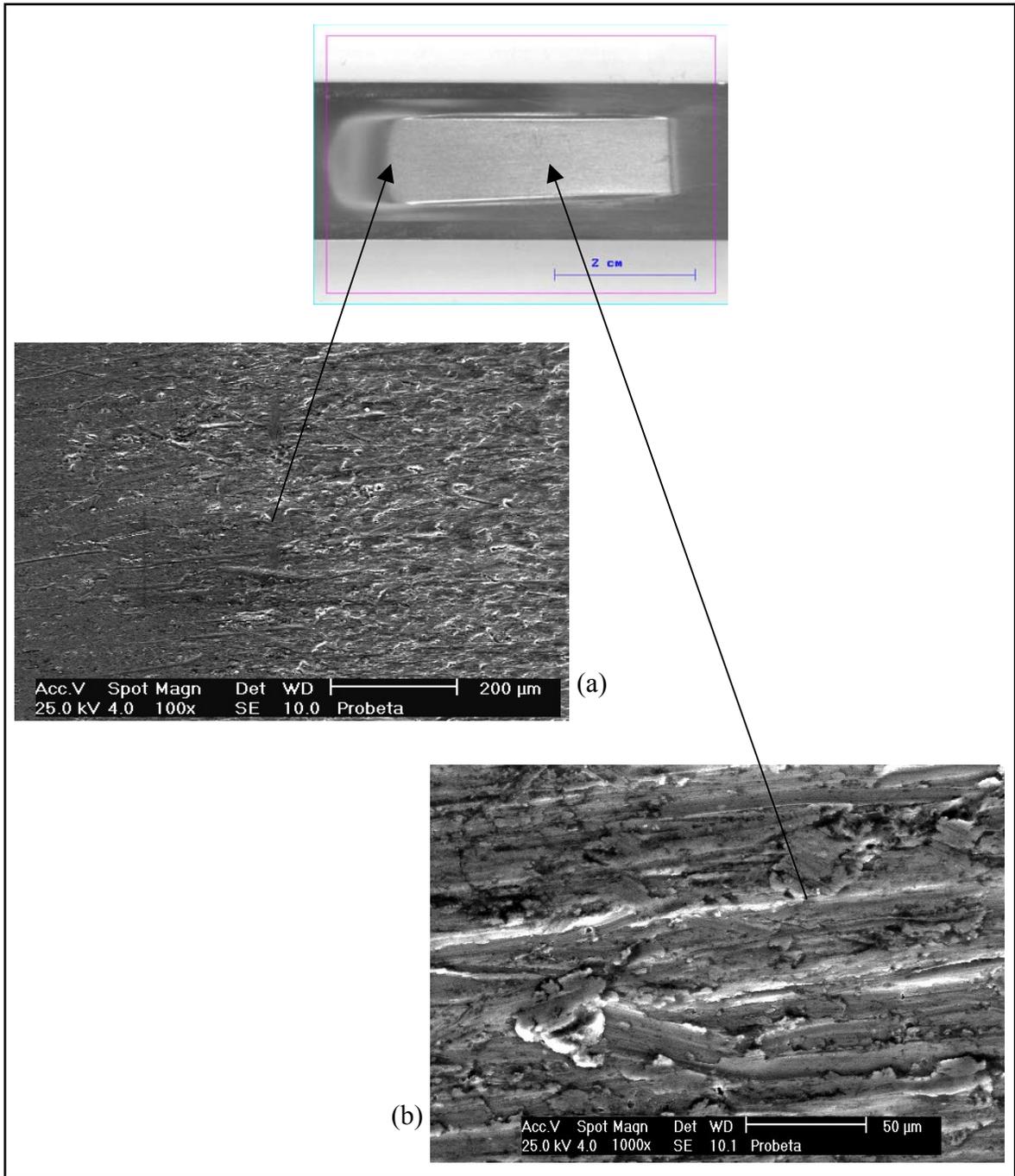


**Figura 37** Fotomicrografías por MEB en el modo de electrones secundarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 4.58 Kgfy 4309 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras a) ES de la zona de salida de la huella, 100x b) ES del centro de la huella, 1000x.

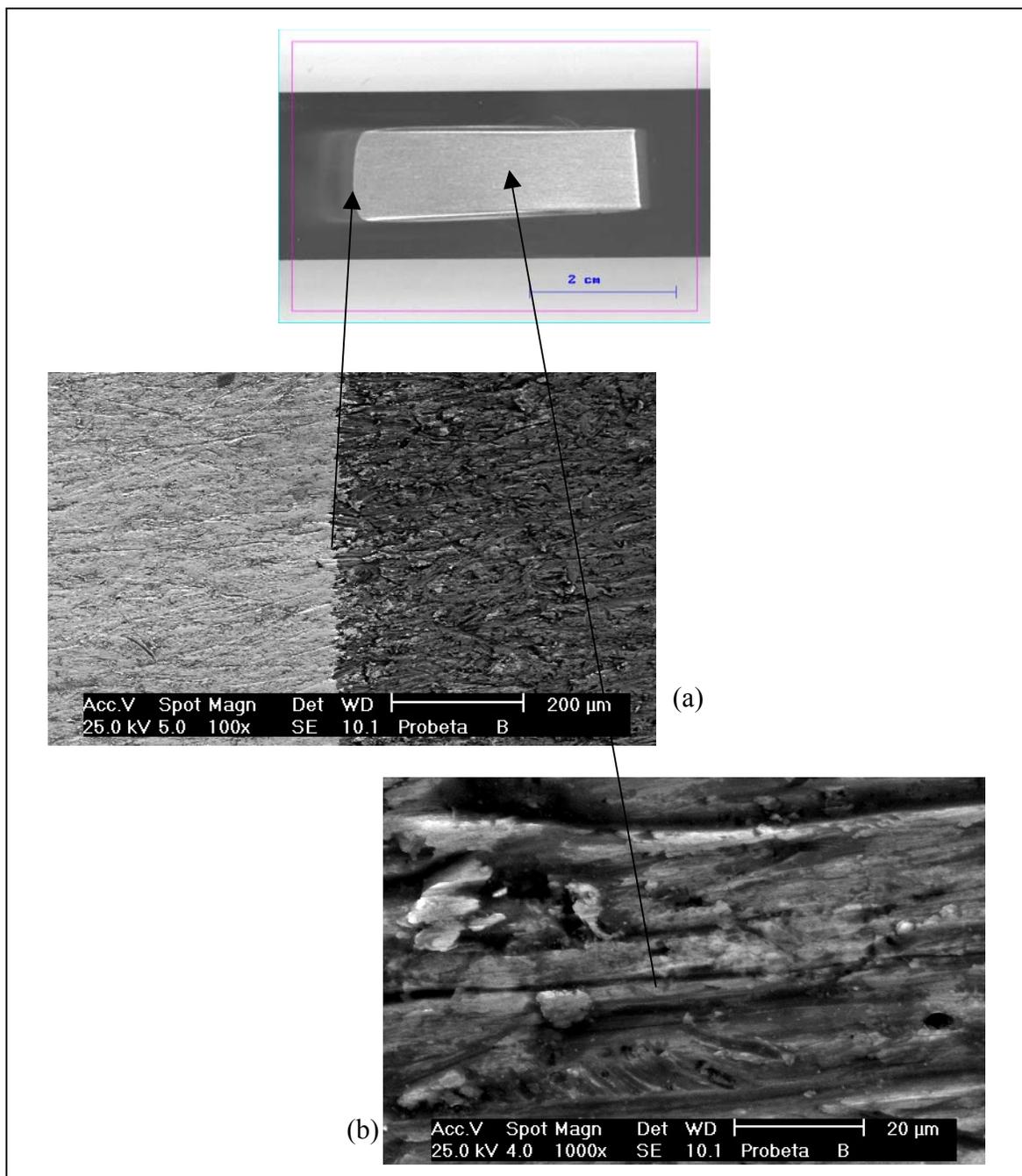
En las Figuras 38 y 39 se observan las huellas de desgaste por Microscopia Electrónica de Barrido en el modo de electrones secundarios para las muestras sin y con recubrimiento respectivamente, ensayadas bajo el procedimiento E de la norma. En la Figura 38 (a) la intercara de salida del flujo de arena presenta una mayor deformación plástica y mayor cantidad de múltiples indentaciones comparada con la intercara mostrada en la Figura 39 (a), la cual presenta surcos más definidos. De igual manera, se observa como hay mayor cantidad de surcos y ranuras, así como material aun no desprendido en el centro de la huella para la Figura 38 (b) que los que presenta la probeta mostrada en la Figura 39 (b). Esto pone de manifiesto la resistencia que opone el recubrimiento de electroless Ni-P al desgaste abrasivo en comparación del substrato de aluminio 7075-T6.

Estas observaciones, se confirman con los valores de volumen perdido dados en la Tabla 16, para cada una de las condiciones, donde el substrato de la aleación de aluminio en estudio perdió  $457.82 \text{ mm}^3$  mientras que las muestras recubiertas tuvieron una disminución del volumen desgastado de un 63 % con respecto al volumen desgastado del substrato sin recubrir.

Este comportamiento fue muy similar al obtenido en las probetas ensayadas bajo el procedimiento C de la norma ASTM G 65-94, esto se confirma al observar la tendencia en la gráfica de velocidad de pérdida de volumen (Figura 31) para dichos procedimientos (procedimientos C y E), la cual fue prácticamente igual para las probetas de aluminio 7075-T6 se obtuvo una mínima variación en el valor del volumen perdido en las probetas de aluminio recubiertas con electroless Ni-P que pudo deberse a errores durante la realización de los ensayos.



**Figura 38** Fotomicrografías por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 13.25 Kgf y 718 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras, a) Zona de salida de la huella a 100x en electrones secundarios b) Centro de la huella a 1000x

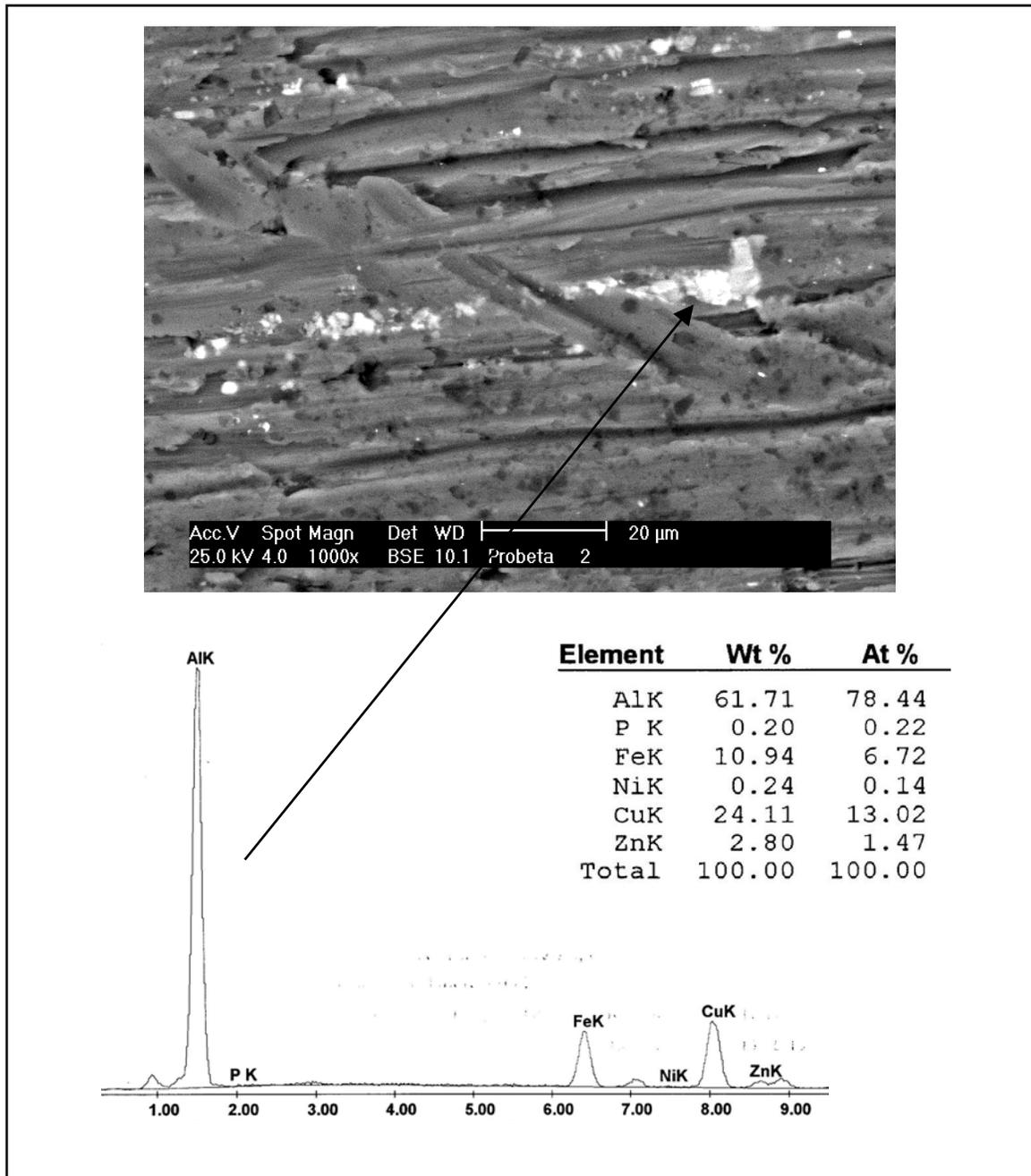


**Figura 39** Fotomicrografías por MEB en el modo de electrones secundarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 13.25 Kgf y 718 m. Se observan las huellas de desgaste de las muestras a) ES de la zona de salida de la huella, 100x  
 b) ES del centro de la huella, 1000x

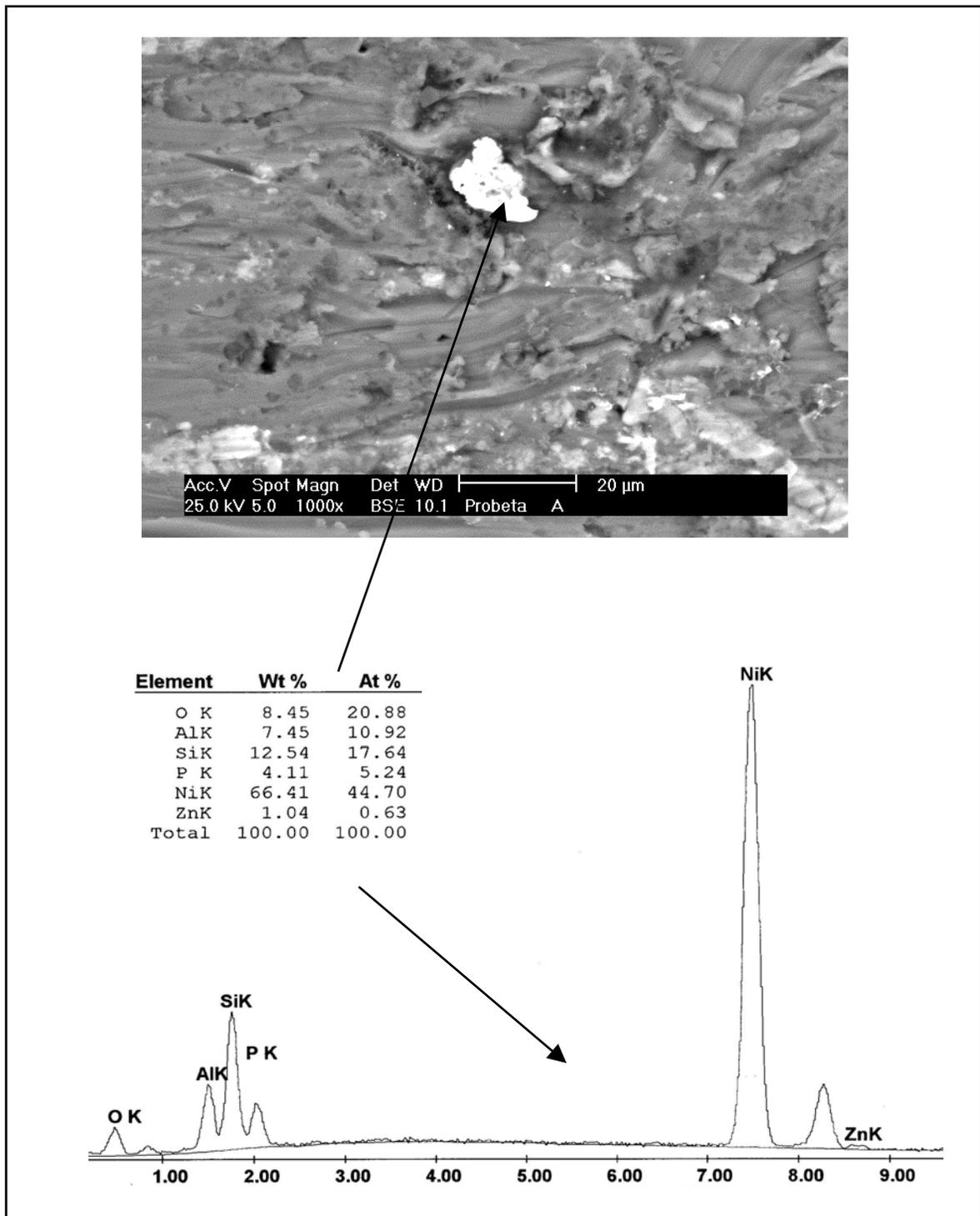
En las figuras 40 y 41 se observan las huellas de las muestras sin y con recubrimiento por Microscopía Electrónica de Barrido en el modo de imágenes de electrones primarios y su correspondiente microanálisis químico por EDX. En el análisis químico realizado en la zona blanca de la figura 49, aparece como pico predominante el níquel, comprobando de esta forma el desprendimiento del mismo de la superficie de la muestra por la acción de desgaste del ensayo.

Para la figura 41 se observa la presencia de aluminio en la matriz de la huella, esto no es extraño ya que no existe otro elemento además de este.

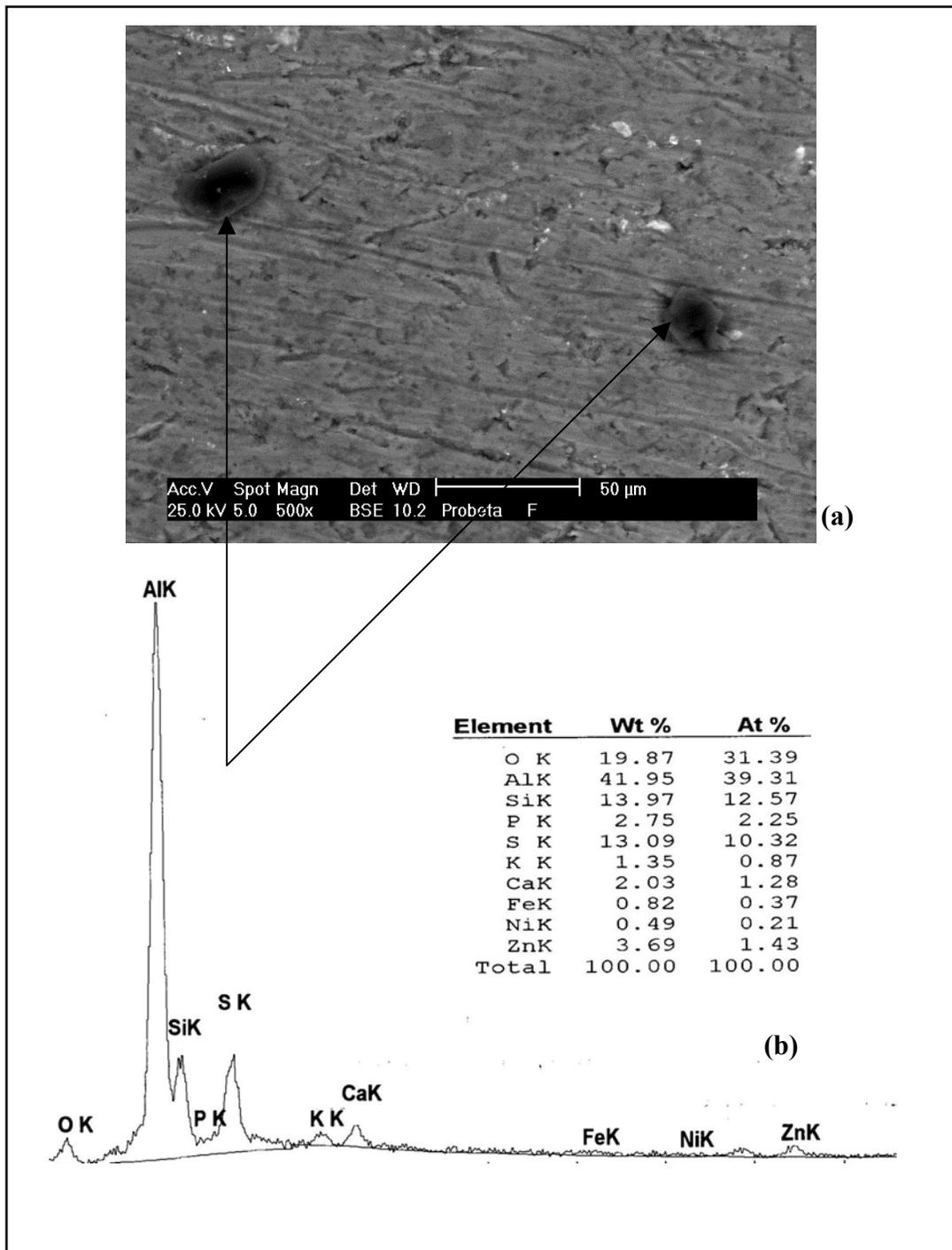
En la Figura 42, se observa una fotomicrografía de la huella de desgaste de una probeta recubierta con el electroless Ni-P y ensayada bajo el procedimiento D de la norma, en la misma se encuentran dos partículas de Sílice embebidas en la matriz de la huella. Esto se confirma por la presencia de Si y O en el análisis químico realizado a dichas partículas, por otro lado, podemos suponer que la huella se encuentra ya en el sustrato, es decir, la mayor parte del recubrimiento ya fue removido debido al desgaste ya que el % de níquel presente en el análisis químico es muy bajo.



**Figura 40** Fotomicrografía por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 ensayada a 13.25 Kgf y 71.8 m. Se observan la huella de desgaste en el modo de electrones primarios y su respectivo análisis por EDX a) BSE, 1000x b) EDX de la zona clara en el centro de la probeta.



**Figura 41** Fotomicrografía por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 13.25 Kgf y 71.8 m. Se muestra la huella de desgaste en el modo de electrones primarios y el análisis por EDX a la partícula central en la huella a) BSE, 1000x b) EDX puntual de la partícula.



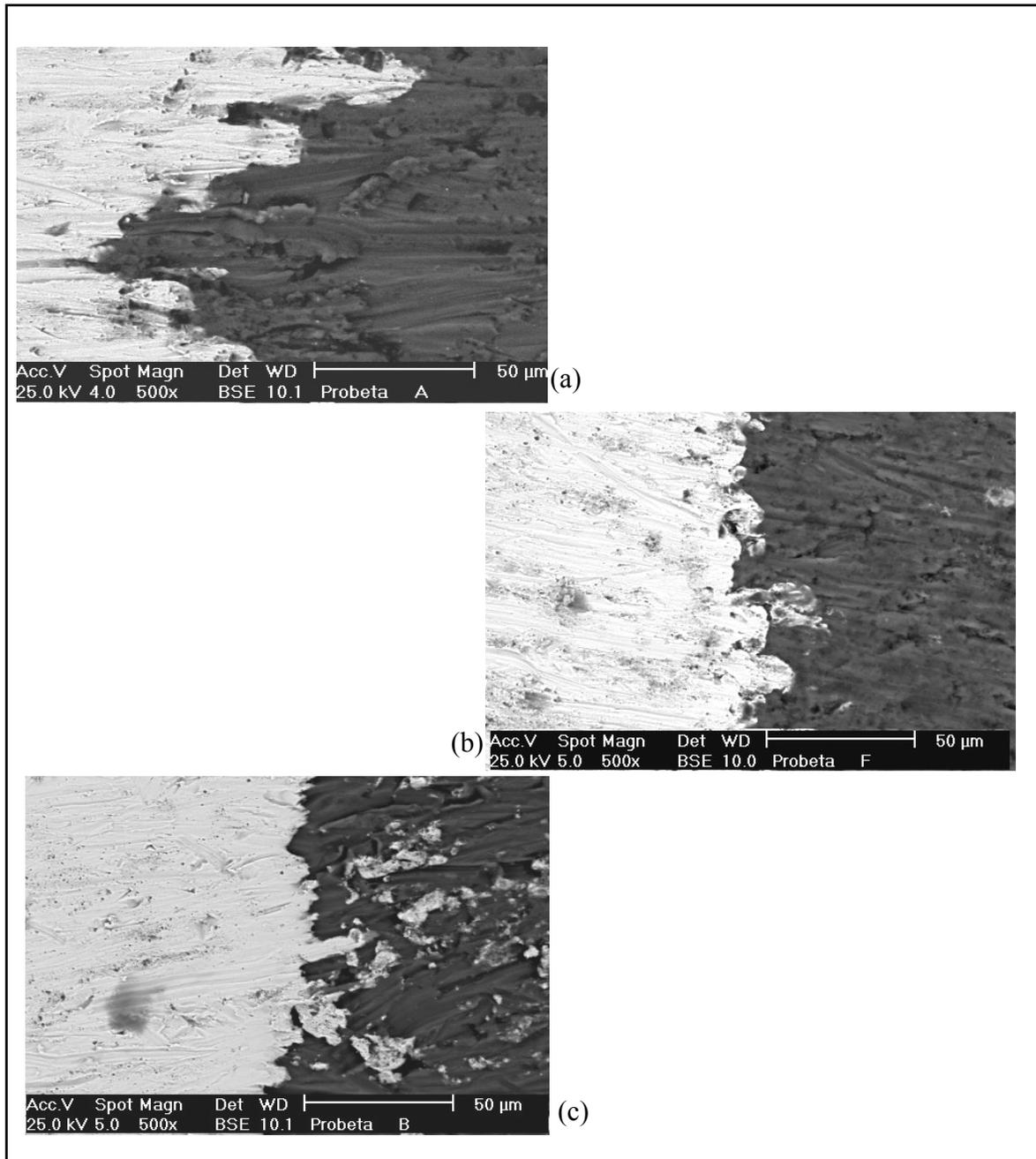
**Figura 42** Fotomicrografía por MEB de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 4.58 Kgfy 4309 m. Se muestra la huella de desgaste en el modo de electrones primarios y el análisis por EDX a la partícula central en la huella a) BSE, 1000x b) EDX puntual de la partícula.



En la Figura 43 se muestran las interfases de salida de las huellas de desgaste en los tres procedimientos seguidos durante los ensayos de desgaste abrasivo. En la Figura 43 a) se observa la interfase de la huella ensayada a una carga de 13.25 Kgf y una distancia de deslizamiento de 71.8 m, el desprendimiento de material en la misma es bastante notorio y se observa gran cantidad de surcos y ranuras presentes.

En la Figura 43 b) existe un límite bien definido entre lo que es el recubrimiento de electroless Ni-P (zona blanca) y el substrato de aluminio (zona oscura), esto puede ser debido a la baja carga (4.58Kgf) a la que se realiza el ensayo.

En la Figura 43 c) se muestra la interfase de la probeta ensayada a la misma carga que la de la Figura 43 a) pero a una mayor distancia de deslizamiento (4309 m), se observa como la remoción de material es irregular dejando algunas zonas recubiertas y otras zonas desprovistas del depósito.



**Figura 43** Fotomicrografía por MEB en el modo de electrones primarios de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con electroless Ni-P, ensayada a 4.58 Kgfy 4309 m. La dirección de flujo de arena es de derecha a izquierda. Se muestra la interfase Aluminio – electroless Ni-P de las huellas de desgaste a) Probeta ensayada por el procedimiento C, 1000x b) Probeta ensayada por el procedimiento D, 1000x c) Probeta ensayada por el procedimiento E, 1000x

### 3.4.2. Caracterización de la arena abrasiva

En las Figuras 44, 45 y 46 se muestran las micrografías por MEB en modo de imagen de electrones primarios de las partículas abrasivas antes y después en los ensayos de desgaste realizados.

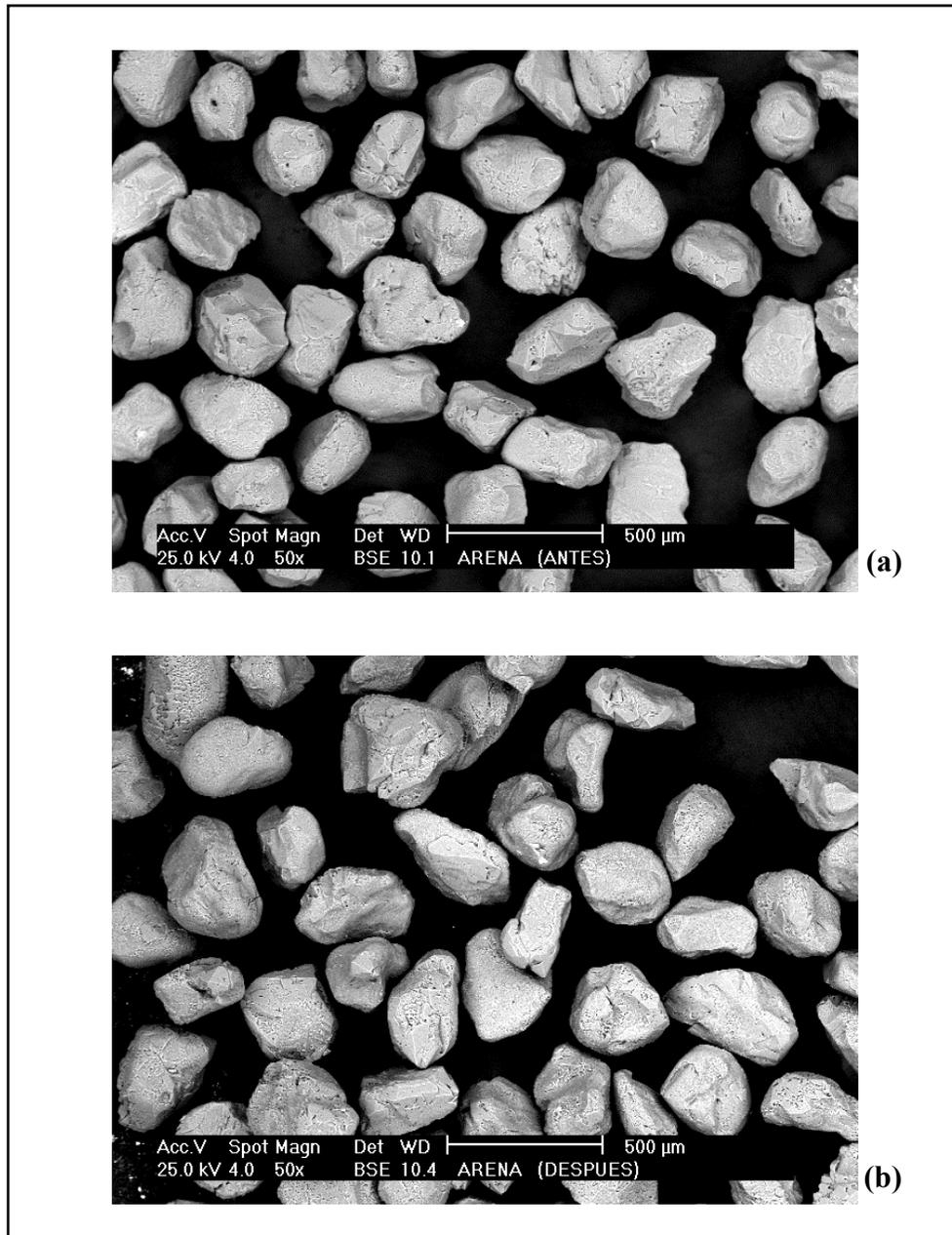
De las Figuras 44 a) y b) se hizo a través del analizador de imágenes la medición del área de las partículas abrasivas antes y después de los ensayos para verificar si había algún cambio en el valor de las mismas por efecto de los ensayos, dando como resultado los valores que se muestran en la Tabla 17.

**Tabla 17** Promedio del área de las partículas abrasivas en  $\mu\text{m}^2$

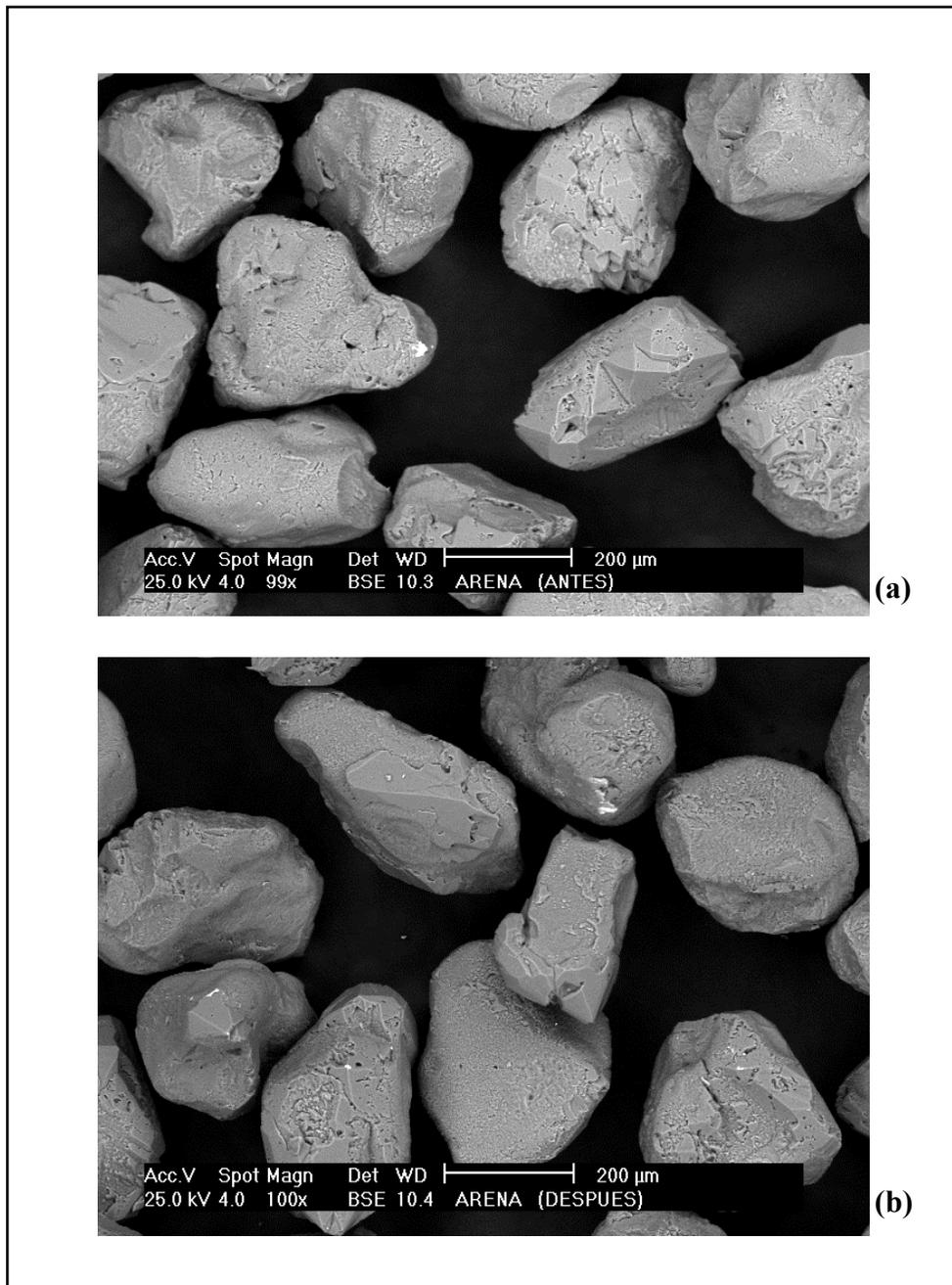
<b>Condición de la arena</b>	<b>Área</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Total mediciones</b>
Original	58682	13365	60
Ensayada	53610	12373	58

De los valores obtenidos se puede decir que el área de las partículas abrasivas se ve afectada en cierto grado por los ensayos de desgaste, perdiendo un 9 % de su área original por la acción de la carga y el roce contra la superficie ensayada.

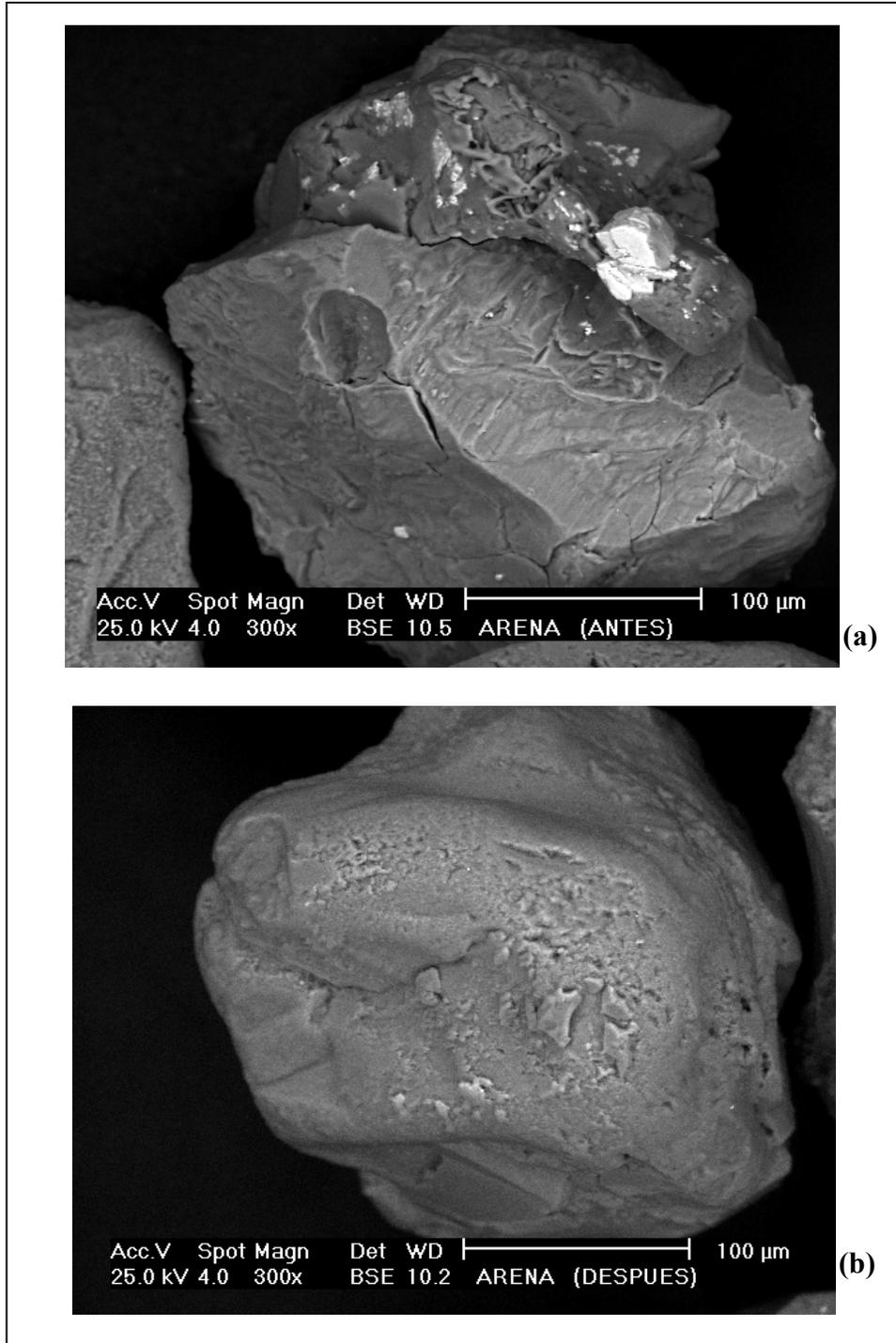
Se observa claramente como en la Figura 46 b) la partícula luce redondeada mientras que en la Figura 46 a) la partícula abrasiva de sílice es totalmente angular. El hecho de que la partícula pierda su angularidad puede confirmarse gráficamente los valores dados en la Tabla 17.



**Figura 44** Fotomicrografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido en el modo de electrones primarios de las partículas de arena abrasiva Ottawa Sand 50-70 antes y después de ensayar, 50x. (a) Arena original (b) Arena ensayada.



**Figura 45** Fotomicrografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido en el modo de electrones primarios de las partículas de arena abrasiva Ottawa Sand 50-70 antes y después de ensayar, 100x. (a) Arena original (b) Arena ensayada.



**Figura 46** Fotomicrografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido en el modo de electrones primarios de las partículas de arena abrasiva Ottawa Sand 50-70 antes y después de ensayar, 300x. (a) Arena original (b) Arena ensayada.

## CONCLUSIONES

- La rugosidad promedio (Ra) de la aleación de aluminio 7075-T6 es  $Ra = 0,033 \pm 0,004 \mu\text{m}$  y para el recubrimiento electroless Ni-P es  $Ra = 0,131 \pm 0,022 \mu\text{m}$ .
- El espesor promedio del recubrimiento de electroless Ni-P es de  $37 \pm 2 \mu\text{m}$ .
- La dureza HV promedio del sustrato (Aluminio 7075-T6) es de  $173,39 \pm 2,97$ .
- La dureza HV<sub>300gf</sub> del recubrimiento Electroless Ni-P es de  $557,7 \pm 16,1$ .
- Los resultados evidenciaron que para el procedimiento D, que corresponde a la condición de menor carga (4,58 Kgf) y mayor distancia de deslizamiento (4309 m), el sustrato presentó un volumen desgastado de  $172,63 \text{ mm}^3$ . Mientras que en el caso de las muestras recubiertas se encontró una disminución en el volumen desgastado de un 47%, con respecto al volumen desgastado del sustrato sin recubrir.
- Para el procedimiento E, que corresponde a la condición de mayor carga (13,3 Kgf) y una distancia de deslizamiento de 718 m, el sustrato presentó un volumen desgastado de  $457,81 \text{ mm}^3$ . Mientras que en las muestras recubiertas se encontró una disminución en el volumen desgastado de un 63%, con respecto al volumen desgastado del sustrato sin recubrir.

- El recubrimiento Electroless Ni-P en su estado como depositado, mejora notablemente la resistencia al desgaste abrasivo de la aleación de aluminio 7075-T6.
- Para una misma carga, la velocidad de pérdida de volumen en la aleación de aluminio se mantiene constante a pesar de incrementar la distancia de deslizamiento del ensayo.

## RECOMENDACIONES

- Estudiar el comportamiento del recubrimiento Electroless Ni-P con adiciones de partículas duras como SiC. Debido a que el tratamiento térmico de este sistema no se podría realizar a temperaturas mayores que la temperatura correspondiente a T6 (aproximadamente 120°C).
- Analizar la composición química del recubrimiento a través de todo su espesor. Para ello, se puede utilizar un análisis de área por MEB para identificar todos los elementos presente en el recubrimiento y luego por medio de un análisis Line Scan, determinar como es el comportamiento a través de todo el espesor, de cada uno de los elementos presente en el estudio anterior.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **METAL HANDBOOK.** *Properties and selection: non ferrous alloys special- purpose materials.* Vol. 2, pp 15-61.
- [2] **SMITH F. William,** *Precipitation Hardening of aluminum alloys,* ASM, OHIO, pp 9-1 a 9-22.
- [3] **MALLORY, Glenn O.** The Fundamental Aspects of Electroless Nickel Plating. *“Electroless Plating: Fundamentals and Applications”.* American Electroplaters and Surface Finishers Society. Cap. 1. Orlando, Florida, 1990.
- [4] **MatWeb- Aluminum 7075-T6; 7075-T651.** <http://www.matweb.com>.
- [5] **WU, Y.C.; Li, G.H.; Zhang, L.,** *Wear resistance of electroless deposited Ni-P and Ni-P/SiC composite coatings on low alloy cast iron.* Mach. Eng. 1.998
- [6] **RORBO, K.** *“Electroless Nickel plating”*, The Atomic Energy Commission. Internal Report A-22. 1962
- [7] **BAUDRAND, Donald W. and MacDermid Inc.** *“Electroless Nickel Plating”.* ASM Handbook. Vol. 5. Surface Engineering, 1994.
- [8] **RIEDEL, Wolfgang.** *“Electroless Nickel Plating”.* ASM International Metals Park. Ohio, 1991.
- [9] **LI, HEXING; Chen, H.; Dong, S.; Yang, J.; Deng, J.** *Study on the crystallization process of Ni-P amorphous alloy,* Applied Surface Science 125, pag. 115-119 1.998
- [10] **WEIL, Roland and Parker, Konrad.** The Properties of Electroless Nickel. *“Electroless Plating: Fundamentals and Applications”.* American Electroplaters and Surface Finishers Society. Cap. 4. 1990.
- [11] **ZUM GAHR, Karl-Heinz;** *Microstructure and Wear of Materials,* Tribology Series 10, Elsevier, 1987, pp. 48-436
- [12] **BURWELL, J. T. and Strang, C. D.;** *On the empirical law of Adhesive Wear,* Journal of Applied Physics, 23 (1952), pp.18-28.

- [13] **JAHANMIR, S;** *On the Wear Mechanisms and the Wear Equations*, in Fundamentals of Tribology, Suh, N. P. and Saka, N (Editores), MIT Press, Cambridge 1980, pp. 283-311.
- [14] **GODFREY, D.;** *Diagnosis of Wear Mechanisms*, Wear Control Handbook, Peterson, M. B. y Winer, W. O. (Editores), ASME, New York 1980, pp. 283-311.
- [15] **RICE, S.L., Moslehy, F.A.;** *Tribological Models for Solid/Solid Contact: Missing Links*, STP 1105: Tribological Modeling for Mechanical Designers, K.C. Ludema, R.G. Bayer, P.J. Blau and W. Littman (Editores), American Society for Testing and Materials (ASTM), 1991, pp.77-86.
- [16] **DIN 50320.** Verschleiß – Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin 1979, pp. 2-80.
- [17] **AMERICAN SOCIETY FOR METALS,** *Committee on Wear Resistance; Wear resistance of Steels*, Metals Handbook Vol.18 , Wear and Lubrication 9<sup>na</sup> Edition, ASM, EE.UU., p. 169, 1992.
- [18] **STANDARD TERMINOLOGY RELATING TO WEAR AND EROSION,** *Annual book of Standards*, Vol. 03.02, ASTM, 1987, p. 243-250.
- [19] **PETERSON, M. B. and Winter, W. O.;** *Wear Control Handbook*, ASME, New York, 1980, pp. 67-85.
- [20] **BLICKENSDEFER, R, Madsen, B. W. and Tylczak, J.H.;** *Comparison of Several Types of Abrasive Wear Tests*, Proc. International Conference of Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, EE.UU, p. 313, 1985.
- [21] **DUBE, N. B. and Hutchings, I. M.,** *Influence of particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel*, Wear, Volumes 233-235, December 1999.
- [22] **APACHITEI, I.; Duszyk, J.** *Autocatalitic nickel coatings on Aluminium with improved abrasive wear resistance*, Surface and Coating Technology 132 pag 89-98 2.000
- [23] **GORE, G. J. and Gates, J. D.** *Effect of hardness on three very different forms of wear*, Wear, Volumes 203-204, March 1997

- [24] **ELALEM, K. and Li, D. Y.** *Variations in wear loss with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber-wheel abrasion condition: a modeling study*, Wear, Volume 250, Issues 1-12, October 2001
- [25] **SCHOLL, M.** *Abrasive wear of titanium nitride coatings*, Wear, Volumes 203-204, 1997.
- [26] **WIROJANUPATUM, S. p and Shipway, P. H.** *A direct comparison of wet and dry abrasion behavior of mild steel*, Wear, Volumes 233-235, December 1999

## **ANEXOS**

