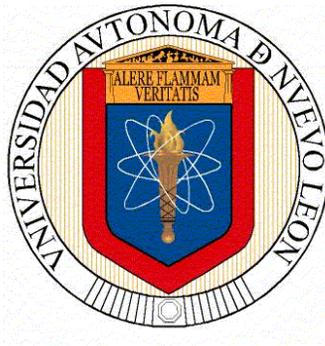


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**ESTUDIO DEL DESGASTE POR EROSIÓN EN ALEACIONES DE  
BAJA DENSIDAD**

**POR**

**MARIO ERNESTO TREVIÑO TORRES**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

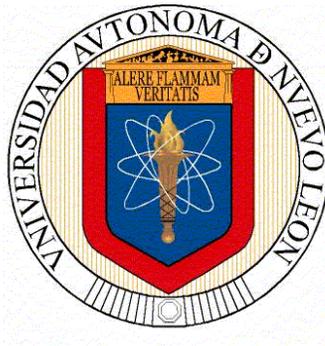
**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**DICIEMBRE 2009**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**ESTUDIO DEL DESGASTE POR EROSIÓN EN ALEACIONES DE  
BAJA DENSIDAD**

**POR**

**MARIO ERNESTO TREVIÑO TORRES**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

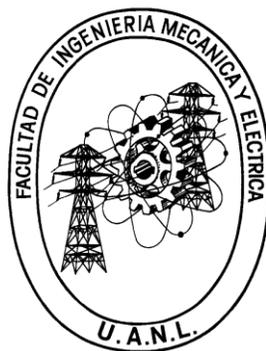
**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**DICIEMBRE 2009**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**ESTUDIO DEL DESGASTE POR EROSIÓN EN ALEACIONES DE  
BAJA DENSIDAD**

**POR**

**MARIO ERNESTO TREVIÑO TORRES**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**DICIEMBRE 2009**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Estudio del Desgaste por Erosión en Aleaciones de Baja Densidad” realizada por el alumno: Mario Ernesto Treviño Torres, matrícula: 0909194 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de tesis

---

Asesor  
Dr. Rafael Colás Ortiz

---

Co-asesor  
Dr. Alberto J. Pérez Unzueta

---

Co-asesor  
Dr. Abraham Velásquez Téllez

---

Vo. Bo.  
Dr. Moisés Hinojosa Rivera  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N. L. Diciembre 2009

# DEDICATORIA

A mis padres:

Catalina Torres Medina  
Ernesto Treviño Treviño †

## AGRADECIMIENTOS

Al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

A la empresa ARSITEK por proporcionarme el material de estudio.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por permitirme trabajar con él para la realización de la presente tesis, por su asesoría, por su apoyo, paciencia, sencillez, estabilidad emocional que genera mucha confianza y por el buen sentido del humor que lo caracteriza.

Al Dr. Alberto Javier Pérez Unzueta, por permitirme aprender de él al trabajar en diferentes servicios para la industria, por su asesoría y consejos para la presente tesis, su paciencia, su sencillez y su buen sentido del humor.

Al Dr. Arturo Juárez Hernández por sus asesorías y disponibilidad.

“La sencillez y el buen sentido del humor no están peleados con la ciencia”.

A la Dra. Maribel, a la Dra. Adriana y a Mary por enseñarme técnicas de caracterización y brindarme imágenes de SEM de las piezas erosionadas.

A todos los doctores del PDIM con los que tomé clases, los cuales compartieron sus conocimientos con un servidor.

Al Dr. José Talamantes y al Dr. Abraham Velasco por permitirme hacer el presente estudio en las instalaciones de investigación y desarrollo de la empresa Nematik, S.A. Agradezco también a todos los compañeros de ese departamento por su apoyo.

A los compañeros de FIME

A Julián Rodríguez por tomarse la molestia de haber ido a Nematik a explicarme el funcionamiento de la máquina erosiva. A mi gran amiga Claudia Morán por darme la mano siempre que lo necesité, Yaneth Bedolla, Gama, Ferni, Miguel Flores (el men). A José (Lampa), Bárbara, Felipe, a mis alumnas de licenciatura Areli y Sandra.

## PRÓLOGO

México se ha convertido en el líder mundial de la producción de piezas fundidas de aluminio para la industria automotriz, gracias a los desarrollos tecnológicos de una empresa en particular: Nematik, S.A., Desarrollos tecnológicos donde la Universidad Autónoma de Nuevo León, y en particular el Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica han tenido una importante participación. La visión de ser el líder científico y tecnológico en la producción de piezas de aluminio para el sector automotriz ha sido el principal motor de los avances logrados. Es por esto que el grupo de trabajo interdisciplinario formado por investigadores de Nematik y de la FIME, continuamente buscan nuevas aplicaciones de las avances científicos y tecnológicos para la innovación de productos. Es así como nace el proyecto de la aplicación de las nuevas tecnologías de recubrimientos del tipo de Oxidación Electrolítica de Plasma (OEP) sobre aleaciones de aluminio. Aunque al principio parecería un gran reto, el autor de la presente tesis, Ing. Mario Ernesto Treviño Torres, nos muestra una novel investigación en las pruebas de resistencia al desgaste erosivo que ocasiona el manejo y el soplado de arena sílica, para la fabricación de corazones de fundición.

Los resultados obtenidos muestran que el aluminio recubierto por medio de OEP, presenta una resistencia a la erosión tres veces mayor que la del aluminio sin recubrimiento. Resultados que abren la posibilidad de seguir estudiando este tipo de recubrimientos para aplicaciones de piezas de aluminio, no solo en la industria automotriz, sino en otras áreas de la ingeniería. Aunque la resistencia a la erosión del aluminio recubierto con OEP, no superó a la de los aceros utilizados para herramientas y cajas de corazones, una de las visionarias aplicaciones a futuro, el presente trabajo pone los cimientos para futuras investigaciones.

El conocimiento generado en este trabajo de investigación en forma conjunta, sirve como ejemplo de un caso de éxito de vinculación entre Industria y Universidad. Da la oportunidad de buscar la innovación de productos para mantener a México como líder en ciertos rubros de la industria y permite la instalación de nuevas plantas, en este caso, la de los recubrimientos, generando así más empleo y mejor posicionamiento del país en la competitiva industria automotriz.

Dr. Alberto Pérez Unzueta  
Ciudad Universitaria, N.L., Diciembre 2009

## SÍNTESIS

La Universidad Autónoma de Nuevo León a través del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales en conjunto con la empresa Nematik, S. A. y la empresa Arsitek, S.A. de C.V., realizan un estudio tribológico sobre una aleaciones de aluminio con recubrimiento cerámico con la finalidad de saber si puede emplearse en herramientas de moldeo.

La presente tesis se enfoca al estudio del desgaste por erosión en un recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma también conocido como Keronite consistente de distintas fases de alúmina en sustrato de aleación de aluminio 6061.

Este estudio reproduce el desgaste erosivo a nivel laboratorio que se presenta en las cajas de corazones después de determinados soplos, la finalidad de este estudio es determinar si una aleación de aluminio con recubrimiento Keronite podría sustituir al acero H13 que es un material altamente empleado para la fabricación de cajas de corazones.

El recubrimiento Keronite resultó altamente atractivo para el estudio de erosión ya que por tener una superficie altamente dura y siendo ésta un indicador de resistencia a la penetración ha mostrado ser muy resistente al desgaste en condiciones abrasivas, adhesivas y corrosivas, tal como lo reportan estudios hechos por la empresa que lo fabrica.

Los espesores del recubrimiento estudiado son de 80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  a ángulos de impacto de 20°, 40°, 60° y 90° en la maquina de erosión FIME II diseñada y fabricada por catedráticos y estudiantes del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de FIME con el apoyo de Nematik.

Se siguieron dos metodologías de erosión, la primera conforme al estándar de erosión de la norma ASTM y la segunda bajo la metodología de erosión FIME-NEMAK la cual reproduce la erosión acelerada aproximándose a las condiciones reales de soplo del proceso de moldeo de caja fría.

Se presenta la utilización del método de doble disco para medir la velocidad de partícula y finalmente se caracterizaron las superficies de las placas erosionadas mediante la observación en microscopios ópticos y de electrónico de barrido, se obtuvieron los valores cuantitativos de la erosión obteniendo beneficios tanto industriales como de investigación.

# INDICE

	Página
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>II</b>
<b>PRÓLOGO.....</b>	<b>III</b>
<b>SÍNTESIS.....</b>	<b>IV</b>
<b>CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Planteamiento del problema.....	3
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Limitaciones.....	6
1.6 Metodología.....	6
<b>CAPITULO 2 OXIDACIÓN ELECTROLÍTICA DE PLASMA.....</b>	<b>8</b>
2.1 Introducción.....	8
2.2 Proceso de obtención.....	11
2.2.1 Equipo de proceso.....	13
2.2.2 Conversión y deposición del recubrimiento cerámico.....	13
2.3 Fases en el recubrimiento Keronite de sustrato de aluminio.....	15
2.4 Porosidad.....	17
2.4.1 Porosimetría por intrusión de mercurio.....	22
2.4.2 Picnometría de Helio.....	24
2.4.3 Efectos de la porosidad en las características del recubrimiento.....	24
2.4.3.1 Rigidez (Módulo de elasticidad).....	24
2.4.3.2 Dureza.....	25
2.4.3.3 Conductividad térmica.....	25
2.5 Esfuerzos residuales.....	25
2.6 Pruebas de indentación.....	27
2.7 Propiedades termofísicas.....	29
2.8 Pruebas sobre el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma..	32
2.8.1 Pruebas de fragmentación.....	32
2.8.2 Pruebas de resistencia al desgaste.....	34
2.8.2.1 Prueba perno en disco.....	34
2.8.2.2 Prueba ASTM G65 arena seca en rueda de goma.....	35
2.8.2.3 Prueba ASTM B117.....	36
<b>CAPITULO 3 DESGASTE.....</b>	<b>37</b>
3.1 Introducción.....	37
3.2 Mecanismos de desgaste.....	39
3.2.1 Desgaste corrosivo.....	39
3.2.2 Desgaste erosivo.....	41
3.2.3 Desgaste adhesivo.....	44
3.2.4 Desgaste abrasivo.....	46

3.2.5 Desgaste por fatiga de contacto.....	47
3.2.6 Desgaste por fretting (Corrosión por vibración).....	48
3.2.7 Desgaste oxidativo.....	49
<b>3.3 Erosión.....</b>	<b>50</b>
3.3.1 Fuerzas involucradas.....	53
3.3.2 Mecanismo.....	54
3.3.3 Ángulo de impacto.....	57
3.3.4 Propiedades de la partícula.....	63
3.3.4.1 Dureza.....	63
3.3.4.2 Forma de la partícula.....	65
3.3.4.3 Tamaño de partícula.....	67
3.3.5 La dureza de la superficie.....	68
3.3.6 Desgaste erosivo por fractura frágil.....	73
3.3.7 Transición dúctil-frágil.....	76
3.3.8 Erosión en recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma.....	78
 <b>CAPITULO 4 METODO DE DOBLE DISCO.....</b>	 <b>81</b>
 <b>CAPITULO 5 MOLDEO.....</b>	 <b>86</b>
<b>5.1 Introducción.....</b>	<b>86</b>
<b>5.2 Química del proceso de caja fría.....</b>	<b>89</b>
<b>5.3 Proceso de soplado.....</b>	<b>91</b>
5.3.1 Soplado.....	91
5.3.2 Gaseo (curado).....	93
5.3.3 Purgado.....	93
5.3.4 Extracción e inspección.....	94
<b>5.4 Control de la arena en el proceso de caja fría.....</b>	<b>94</b>
5.4.1 Forma de la partícula.....	95
5.4.2 Granulometría.....	96
5.4.3 Temperatura de la arena.....	97
5.4.4 Humedad de la arena.....	98
5.4.5 pH y demanda de ácido.....	98
 <b>CAPITULO 6 EXPERIMENTACIÓN.....</b>	 <b>100</b>
<b>6.1 Introducción.....</b>	<b>100</b>
<b>6.2 Microscopía óptica.....</b>	<b>102</b>
<b>6.3 Microscopía electrónica de barrido.....</b>	<b>104</b>
<b>6.4 Difracción de rayos X.....</b>	<b>112</b>
<b>6.5 Micro y macrodureza.....</b>	<b>113</b>
<b>6.6 Rugosidad.....</b>	<b>116</b>
<b>6.7 Preparación de muestras.....</b>	<b>117</b>
<b>6.8 Preparación de arena.....</b>	<b>118</b>
<b>6.9 Distribución granulométrica de la partícula.....</b>	<b>119</b>
6.9.1 Factor de redondez.....	120
<b>6.10 Pruebas erosivas.....</b>	<b>122</b>
<b>6.11 Descripción de la máquina erosiva.....</b>	<b>124</b>

6.12 Determinación de las presiones del sistema.....	126
<b>CAPITULO 7 RESULTADOS.....</b>	<b>127</b>
7.1 Introducción.....	127
7.2 Prueba del estándar de erosión G76 de la ASTM.....	128
7.3 Prueba de erosión FIME-NEMAK arena seca como erodente.....	133
7.4 Prueba de erosión FIME-NEMAK arena con resina como erodente.....	137
7.5 Imágenes MEB de las superficies erosionadas.....	151
7.5.1 Erosión bajo el estándar G76 de la ASTM.....	151
7.5.2 Erosión bajo la metodología FIME-NEMAK arena seca como erodente	154
7.5.3 Erosión bajo la metodología FIME-NEMAK arena con resinas.....	156
como erodente	
<b>CAPITULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>162</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>165</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>169</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>178</b>
<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....</b>	<b>180</b>

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

El desgaste por erosión en los herramientas que se utilizan para la fabricación de corazones de arena ha sido motivo de varios estudios ya que las pérdidas económicas son significativas debido al desperdicio de los vaciados al no cumplir con las especificaciones dimensionales.

Las cajas para corazones, las cuales son fabricadas comúnmente con un acero grado herramienta tipo H13, sufren del fenómeno de erosión en su superficie debido a los repetidos impactos de la mezcla de arena sílica y resina en determinado tiempo durante el proceso de soplado, con esto, los corazones

producidos presentan defectos dimensionales y esto a su vez ocasiona que las paredes de la cabeza o monobloques sean más delgadas, no cumpliendo con las tolerancias dimensionales de la especificación.

La industria de la fundición requiere de la optimización de recursos para sus procesos de producción de corazones y vaciados por lo cual debe de apoyarse con el desarrollo e implementación de nuevos materiales que puedan satisfacer las necesidades industriales de resistencia al desgaste por erosión en los herramientas de moldeo ya que cualquier reducción en el desgaste de las cajas para corazones traerá consigo significativos ahorros.

El recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma también llamado Keronite, el cual se genera en aleaciones ligeras como las de magnesio, aluminio y titanio resultó ser muy atractivo para el estudio de la erosión debido a la alta dureza en su superficie, la cual es una de sus principales características, que lo hace resistente al desgaste en condiciones abrasivas. La empresa dueña de la patente de este material innovador reporta en sus estudios de resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo y por corrosión pérdidas mínimas de masa. Siendo la dureza un indicador de la resistencia a la penetración se puede pensar que el Keronite tendrá un menor índice de erosión muy por debajo del acero que actualmente utiliza la industria.

El alcance experimental del presente trabajo es realizar el estudio de erosión en el recubrimiento Keronite de espesores de 80, 110, 120 y 150 micrómetros de la aleación de aluminio 6061 obteniendo los valores cualitativos y cuantitativos para compararlos con los del acero H13 y así determinar si el Keronite lo puede sustituir.

## 1.2 Objetivos

Obtener los valores de desgaste por erosión de la aleación de aluminio 6061 con recubrimiento cerámico Keronite con espesores de 80, 110, 120 y 150 micrómetros a ángulos de impacto del erodente de 20°, 40°, 60° y 90°.

Determinar, basándose en los resultados obtenidos, si el material de estudio puede tener aplicación para herramientas de moldeo.

Recomendar formas operativas que optimicen la utilización del Keronite para aplicaciones industriales que requieran resistencia al desgaste por erosión.

## 1.3 Planteamiento del problema y justificación

La industria de la fundición se enfrenta a un fenómeno no deseado “el desgaste por erosión” de las cajas de corazones, como se muestra en la figura 1.1. Dicho desgaste no puede ser evitado al inyectar la mezcla arena y resina para la formación del corazón de arena, los impactos recurrentes de la mezcla generan una pérdida de masa en las paredes de la caja para corazones lo que hace que el corazón presente otras dimensiones a la requerida, con esto a su vez se pierden tolerancias dimensionales en las cabezas y monobloques del metal fundido una vez que éste solidificó convirtiéndolo en desperdicio representando una pérdida económica.

Por lo anterior se justifica realizar estudios de erosión en materiales que pudieran ser más resistentes que el acero H13 el cual es el material del que comúnmente están fabricadas las cajas para corazones. Un material atractivo para el estudio de erosión es el recubrimiento de oxidación electrolítica de

plasma (Keronite) de aleaciones de aluminio. En las aleaciones de aluminio el recubrimiento consiste de alúmina en diferentes fases, las características superficiales del recubrimiento son alta dureza, presenta resistencia al desgaste por abrasión, adhesión y corrosión, por otra parte posee una baja densidad. La dureza al ser un indicador de la resistencia a la penetración de un material tiene una estrecha relación en la resistencia a la erosión, tal como lo reporta el investigador Soderberg en sus estudios de erosión en diferentes materiales, incluyendo aceros, súper aleaciones y materiales cerámicos como la alúmina siendo ésta última la que presentó el menor índice de erosión, figura 1.2 [1].



Figura 1.1 Erosión en cajas para corazones de arena. Fotos cortesía Nematik.

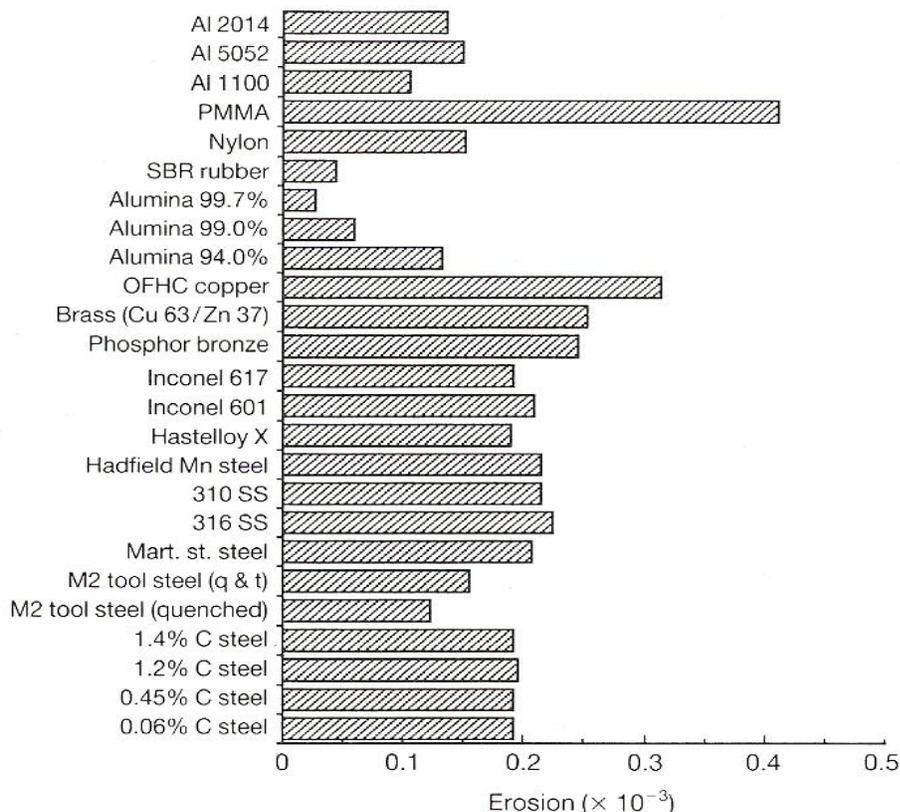


Figura 1.2 Valores de erosión en distintos materiales. Se utilizó como erodente partículas de arena olivina con tamaño de 350-500  $\mu\text{m}$  y dureza Moh entre 5 y 7. La velocidad del erodente fue de 66  $\text{m s}^{-1}$  a un ángulo de impacto de 45 grados [1].

## 1.4 Hipótesis

La aleación de aluminio 6061 con recubrimiento cerámico Keronite mostrará menor desgaste por erosión que la misma aleación sin recubrimiento. Adicionalmente a ángulos bajos de impacto se mostrarán los menores índices de erosión.

Debido a que el recubrimiento Keronite presenta una dureza muy por encima a la del acero H13 este material innovador mostrará un menor índice de erosión que el acero.

## 1.5 Limitaciones

Al utilizar la técnica de doble disco para medir la velocidad de la partícula erosiva no se pudo realizar la medición a la distancia de 5 centímetros de separación de la boquilla con el disco inferior debido a que el arco entre las huellas de erosión marcadas en el disco inferior sería muy grande, arrojando una gran incertidumbre de la medición.

No se pudo realizar la medición del flujo del erodente a través de la boquilla con diámetro interno de 1.5 mm debido a lo pequeño de la partícula (50  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio) en la prueba de erosión del estándar G76 de la norma ASTM.

## 1.6 Metodología

Se realizaron dos tipos de pruebas erosivas, la primera siguiendo la metodología de erosión del estándar G76 de la norma ASTM y la segunda mediante la metodología de erosión FIME-NEMAK la cual reproduce la erosión acelerada sobre las placas de estudio con condiciones reales de soplo tal como se produce la erosión en las cajas para corazones.

Las probetas para erosión fueron obtenidas de soleras de la aleación de aluminio 6061 con recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma recubiertas en las instalaciones de Keronite en los Estados Unidos de América.

Las probetas fueron cortadas y se midió su dureza superficial y la rugosidad. Antes y después de las pruebas de erosión, las muestras fueron pesadas para determinar su pérdida en masa.

Se realizaron las pruebas de erosión en la máquina FIME II la cual se encuentra en las instalaciones de la empresa Nematik, S.A. Y fue construida por catedráticos y estudiantes del Programa Doctoral de Ingeniería en Materiales para obtener el título de maestría y doctorado. Para la construcción de la máquina se contemplaron las variables que intervienen en el proceso real del desgaste erosivo en el herramental para reproducirlas a nivel laboratorio, dichas variables son: las presiones del aire en las cámaras de mezcla, los ángulos de incidencia y la distancia de la boquilla a la placa para realizar la erosión.

Adicionalmente las probetas fueron inspeccionadas en microscopios ópticos a varios aumentos así como en microscopio electrónico de barrido.

Los resultados obtenidos son presentados como imágenes de la marca de erosión en las probetas y los valores cuantitativos como gráficas de erosión en función del recubrimiento y ángulo de impacto.

## **CAPITULO 2**

# **OXIDACIÓN ELECTROLÍTICA DE PLASMA**

### **2.1 Introducción**

Las aleaciones de aluminio son utilizadas en la industria automotriz, espacial, aeronáutica, debido a que presenta como principal ventaja la alta relación resistencia/peso. Sin embargo su baja dureza en general y la baja resistencia al desgaste han limitado su aplicación en varios usos industriales. Una alternativa para que las aleaciones de aluminio sean utilizadas en componentes sujetos al desgaste es el uso de recubrimientos con alta dureza. Actualmente se están desarrollando recubrimientos avanzados a base de óxidos complejos y de crecimiento acelerado.

La oxidación electrolítica de plasma (OEP) o PEO por sus siglas en inglés (Plasma Electrolytic Oxidation), también llamada oxidación por micro-arco es un tratamiento electroquímico superficial, que genera la conversión de la superficie del sustrato metálico en un recubrimiento cerámico de aleaciones de baja densidad como las de aluminio, magnesio y titanio, es un proceso similar al del anodizado, pero a diferencia de éste emplea mayores voltajes en su proceso de obtención, por lo cual se alcanzan espesores de hasta 150 micrómetros [2]. Debido a la conversión del metal en óxido cerámico, se muestra una excelente adhesión del recubrimiento en el sustrato de las aleaciones mencionadas [2].

Los recubrimientos de oxidación electrolítica están siendo estudiados por su gran potencial de aplicación en mecanismos sujetos al desgaste [3] del tipo abrasivo y corrosivo por presentar como principales características una alta dureza en su superficie entre 1400 y 1700 HV, resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo y corrosivo, presenta una baja conductividad térmica  $1.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , su resistividad dieléctrica es de 10 V por micrómetro por arriba de los 500 °C. En la figura 2.1 se aprecia que el recubrimiento consiste en una capa superior porosa de un 10 % al 30 % del volumen del recubrimiento, posee una capa homogénea de un 70% al 90 % y una interfase entre el sustrato metálico y el recubrimiento menor a un micrómetro [4] [5]. Además en su procesamiento se logra un gran control dimensional y es capaz de seguir superficies curvas tal como se muestra en la figura 2.4 [4] [5].

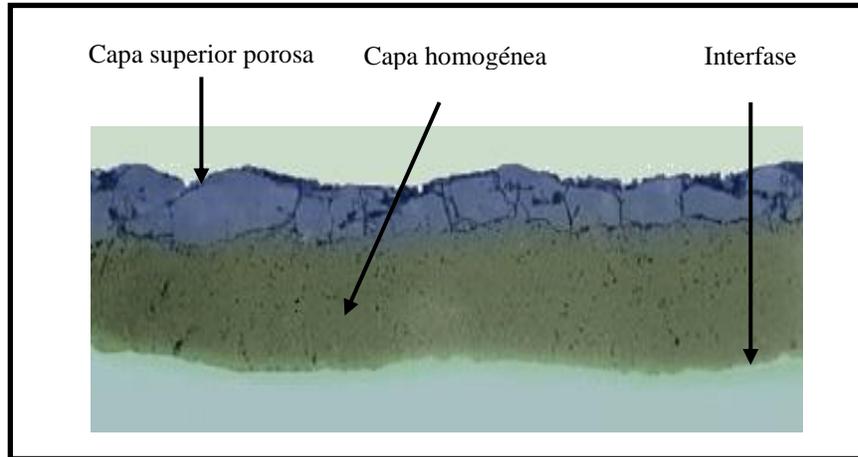


Figura 2.1 Capas que integran el recubrimiento OEP.  
Sección transversal de un recubrimiento de espesor 120  $\mu\text{m}$ ,  
aleación de aluminio 7075 [4] [5].

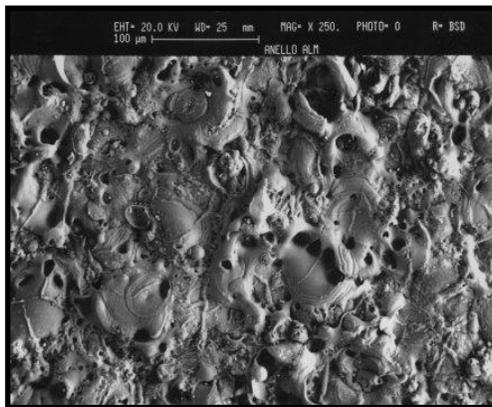


Figura 2.2 Superficie del  
recubrimiento OEP. Aleación de  
aluminio 7075 [4].

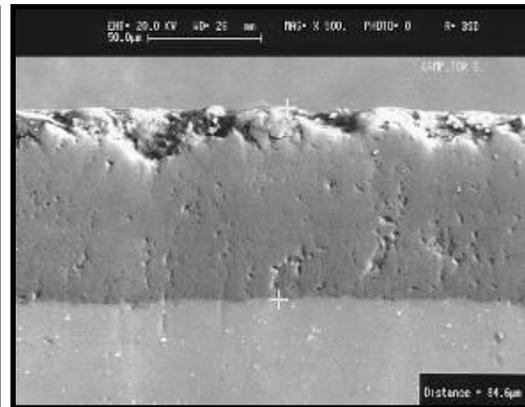
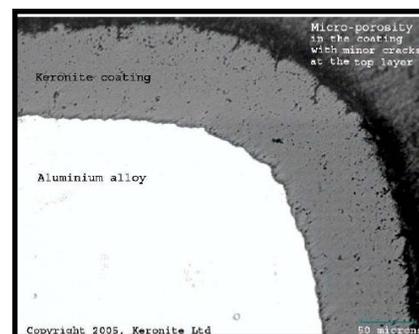


Figura 2.3 Vista transversal del  
recubrimiento OEP. No tiene la capa  
porosa, aleación de aluminio 7075 [4].

Figura 2.4 Forma curva y control  
dimensional del recubrimiento [4].



## 2.2 Proceso de obtención

El recubrimiento por oxidación electrolítica de plasma (OEP) se obtiene en una celda electrolítica la cual se ilustra en la Figura 2.5, la celda se compone por una fuente de poder que alterna la polaridad en los electrodos y capa de alcanzar voltajes de hasta 600 Volts, la corriente puede ser tanto alterna como continua, en un electrodo (ánodo) se coloca la aleación a ser recubierta, esta se encuentra inmersa en un electrolito que consiste en una solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH), silicato sódico, ( $\text{Na}_2\text{SiO}_4$ ), fosfato sódico ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), hidróxido de sodio (NaOH), y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) [6] en concentraciones menores de 5 g por litro de agua, las reacciones químico-plasma ocurren en micro-canales de descarga eléctrica debido a la ruptura dieléctrica del óxido por arriba de los 200 V. A través de los canales de descarga eléctrica hay erupciones de material fundido (aluminio y alúmina) y el proceso incluye la solidificación y densificación del recubrimiento, la mayor parte del electrolito se mantiene a una temperatura de entre 25 y 40 °C debido a un intercambiador de calor y a una bomba que hace recircular la solución. Cuenta con un generador acusto-hidrodinámico y al insuflar aire en la celda se generan vibración y burbujas en el electrolito con la finalidad de mantener un crecimiento homogéneo del recubrimiento [4] [6].

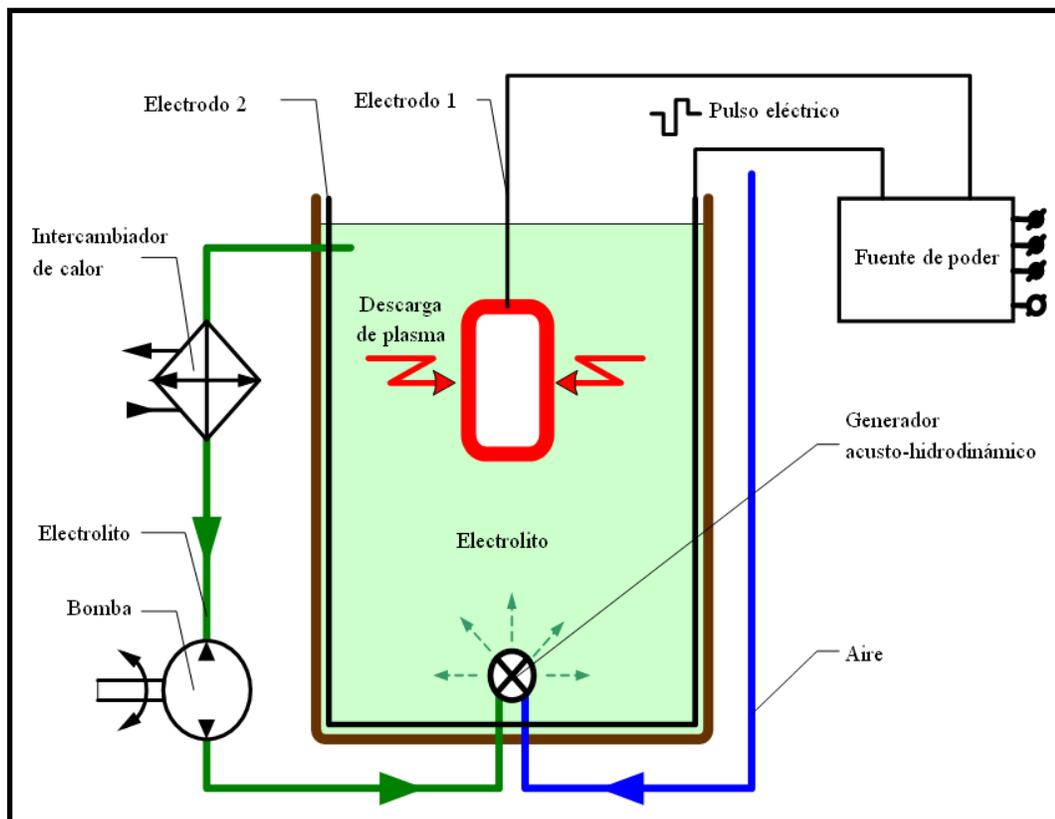


Figura 2.5 Ilustración de la celda electrolítica [4].



Figura 2.6 Solera y disco tratándose termo-químicamente. Se genera en su superficie el recubrimiento Keronite [4] [5].

### 2.2.1 Equipo de proceso

En la figura 2.7 se muestra el equipo denominado “keronator” del Laboratorio Gordon de la Universidad de Cambridge, el cual se utiliza para la obtención del recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma de aleaciones ligeras. Las paredes de la celda son transparentes para poder observar el proceso de oxidación, la celda puede contener hasta 25 litros de electrolito y la potencia se encuentra alrededor de los 10 kW. Funciona a 50 Hz, por lo general la aplicación de los potenciales anódicos es de 400-600 V, y el potencial catódico de 100-200 V, ajustados a fin de mantener una corriente constante de 1 kA por metro cuadrado. En estas condiciones, los recubrimientos crecen en el aluminio hasta los 130 micrómetros de espesor a una velocidad de aproximadamente 1 micrómetro por minuto [5].



Figura 2.7 Equipo para realizar la oxidación electrolítica de plasma [5].

### 2.2.2 Conversión y deposición del recubrimiento cerámico

Cuando la aleación se encuentra inmersa en el electrolito, presenta una película pasiva de óxido como se ilustra en la figura 2.8 (a), al aplicarle voltaje a la celda se da un crecimiento anódico del óxido figura 2.7 (b) y (c), después se presenta

una ruptura dieléctrica por la diferencia de potenciales figura 2.7 (d) en dicho canal de ruptura dieléctrica se alcanzan temperaturas mayores a los 2000 °C lo que da paso a la fusión y erupción tanto del óxido como del sustrato metálico figura 2.7 (e) y (f) posteriormente el óxido solidifica y densifica generándose la deposición, figura 2.7 (g) y (h) [4].



Figura 2.8 Etapas del proceso de deposición del óxido cerámico sobre la aleación ligera.

### 2.3 Fases presentes

Las fases del recubrimiento aquí presentadas se limitan a los recubrimientos de sustrato de aluminio puesto que el estudio de desgaste por erosión se empleará el recubrimiento de sustrato de la aleación de aluminio 6061.

J.A. Curran y T.W. Clyne [6] [7] en sus estudios de difracción de rayos X sobre un recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma de 100  $\mu\text{m}$  de una aleación de aluminio 6082, reportan que encontraron a diferentes ángulos de Bragg (Figura 2.9) distintas fases de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alúmina) de casi similares proporciones (Tabla 2.2.1).

Las alúminas reportadas son  $\alpha$ -alúmina (corindón) de estructura cristalina hexagonal compacta, la  $\gamma$ -alúmina  $\square\square$  la cual es una fase metaestable de estructura cristalina de espinela (cúbica compacta), una significativa proporción de alúmina amorfa y aluminio, éste último probablemente aparece debido a la penetración de los rayos X sobre el recubrimiento hasta el sustrato metálico [3] [7].

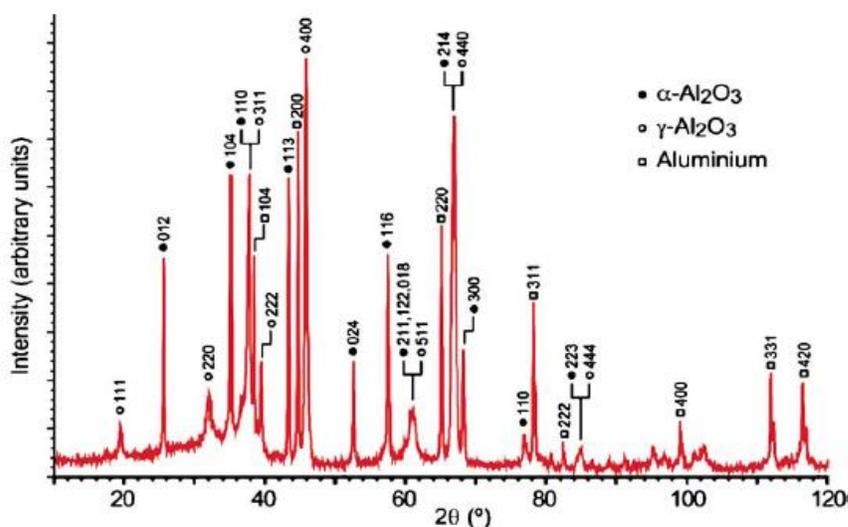


Figura 2.9 Espectro de difracción de rayos X para un recubrimiento sobre la aleación de aluminio 6082.  $2\theta = 10$  a 120 grados [3] [7].

En la tabla 2.1 se proporcionan los porcentajes estimados del volumen de las diferentes fases que constituyen al recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma (Keronite) de 100  $\mu\text{m}$  de espesor en la aleación de aluminio 6082, la densidad teórica del recubrimiento obtenida del promedio de cada fase individual corresponde a  $3.63 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3$  [6].

Tabla 2.1 Densidad y fracción volumétrica de las distintas fases de alúmina presentes en el recubrimiento Keronite de 100  $\mu\text{m}$  de espesor [6].

Fase	Densidad $\text{g/cm}^3$	Fracción volumétrica estimada (%)
$\alpha \text{ Al}_2\text{O}_3$	$3.987 \pm 0.024$	$35 \pm 10$
$\gamma \text{ Al}_2\text{O}_3$	$3.72 \pm 0.1$	$35 \pm 10$
Amorfa $\text{Al}_2\text{O}_3$	$3.1 \pm 0.1$	$30 \pm 10$

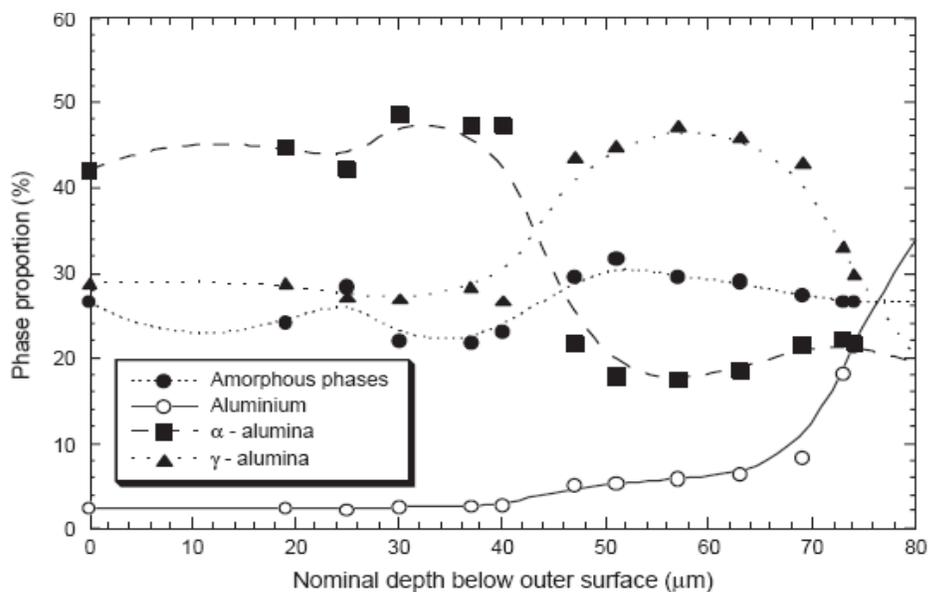


Figura 2.10 Gráfica de la proporción de fases a través del recubrimiento de 100  $\mu\text{m}$ . Se obtuvo por medio de difracción de rayos X en una superficie progresivamente pulida [3].

La figura 2.10 muestra los análisis de fases por la técnica de refinamiento Rietveld los cuales fueron graficados mostrando la proporción de fases en función de la profundidad nominal desde la superficie exterior gradualmente desbastada de un recubrimiento de 100  $\mu\text{m}$ . Cabe señalar que existe un error inherente a la profundidad nominal dado que la profundidad de la muestra es finita y aumenta con el ángulo de incidencia [3].

La presencia de material amorfo hace muy difícil su cuantificación, la proporción de aluminio es simplemente una consecuencia de la penetración de rayos X a través del recubrimiento que llega hasta el sustrato y por lo tanto proporciona una indicación del error en este método el cual se observa por el rápido aumento de la proporción de aluminio más allá de una profundidad nominal de 70  $\mu\text{m}$ . Aún teniendo en cuenta esta incertidumbre, hay tendencias significativas en los datos. La proporción de material amorfo se mantiene constante alrededor del 30% en todo el espesor, mientras que la fase estable  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  es predominante (mayor al 40%) hasta los 40  $\mu\text{m}$  de la profundidad nominal; después continúa con mayor proporción la fase metaestable  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  la cual es predominante en los próximos 30  $\mu\text{m}$  [3].

## 2.4 Porosidad

Con técnicas de medición de porosidad como la de intrusión de mercurio y picnometría de helio, así como imágenes de alta magnificación del microscopio electrónico de barrido (MEB) J.A Curran y T.W. Clyne citados en la referencia [6], determinaron la evidencia de porosidad interconectada en los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma.

En la figura 2.11 se aprecia porosidad de magnitudes menores al 3 %, la imagen representa una sección transversal pulida del recubrimiento la cual fue obtenida en el microscopio electrónico de barrido (MEB) empleando el modo de

electrones secundarios. En la figura 2.12 MEB (modo de electrones retro-dispersados) muestra una fina red de canales o grietas las cuales se sugiere que son creadas por eventos individuales de descarga eléctrica, esta red aparentemente representa un bajo porcentaje de porosidad de alrededor del 5% [6].

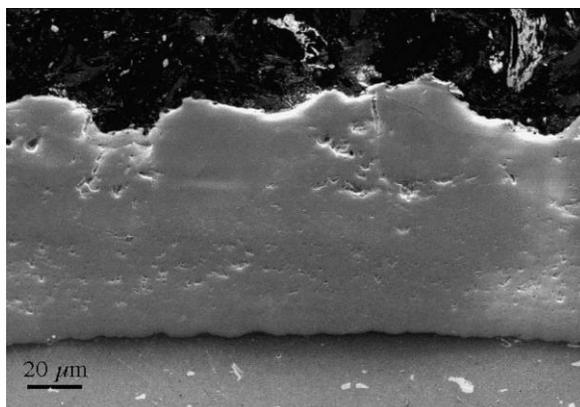


Figura 2.11 Niveles bajos de porosidad <3%. Imagen MEB, sección transversal pulida de un recubrimiento OEP [6].

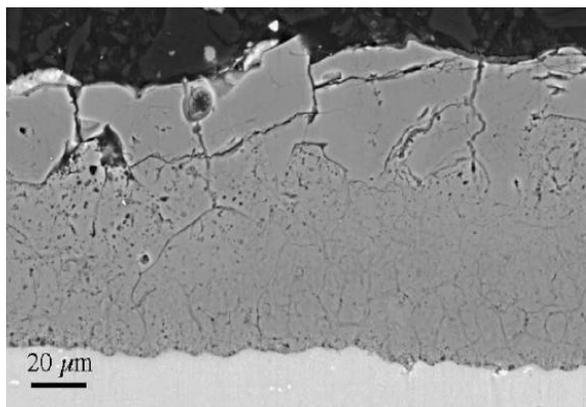


Figura 2.12 Nivel de porosidad alrededor del 5%. Sección transversal pulida de un recubrimiento OEP observada con MEB (modo de electrones retro-dispersados) [6].

Las superficies de los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma exhiben determinadas características que indican los fenómenos físicos ocurridos durante el crecimiento del recubrimiento. En la figura 2.13 se aprecian las superficies de diferentes espesores las cuales exhiben una gran cantidad de cráteres los cuales son consecuencia de eventos de descargas eléctricas localizadas durante el crecimiento del recubrimiento y los cuales disminuyen a medida que aumenta el espesor y la rugosidad promedio, figura 2.14 [3].

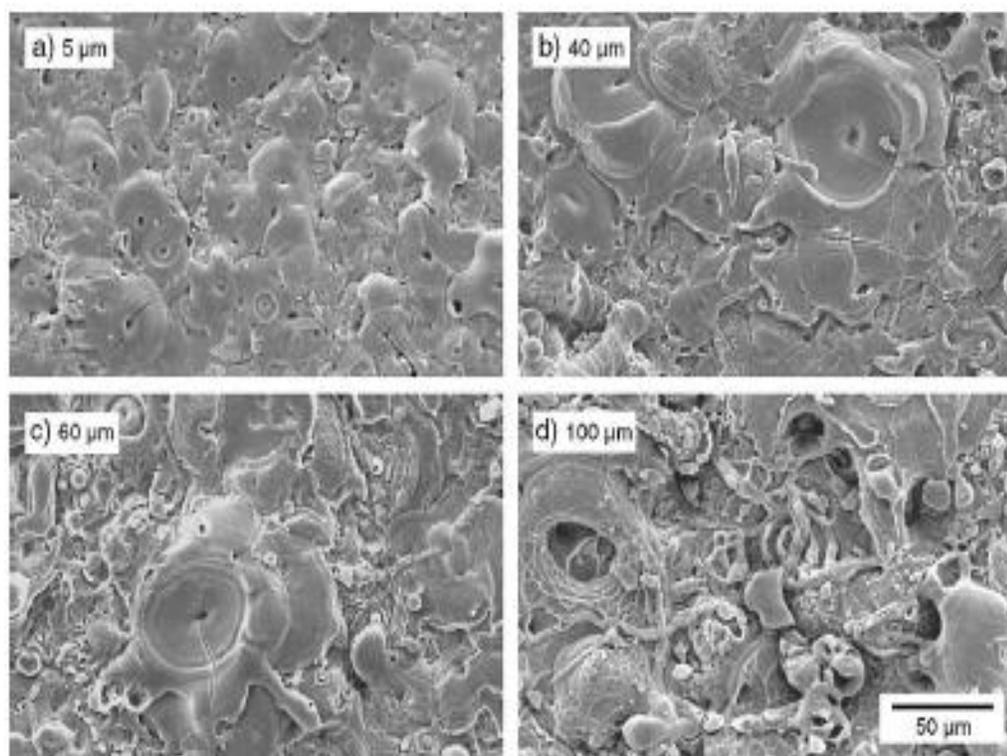


Figura 2.13 Micrografías MEB mostrando la superficie de los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma de diferentes espesores [3].

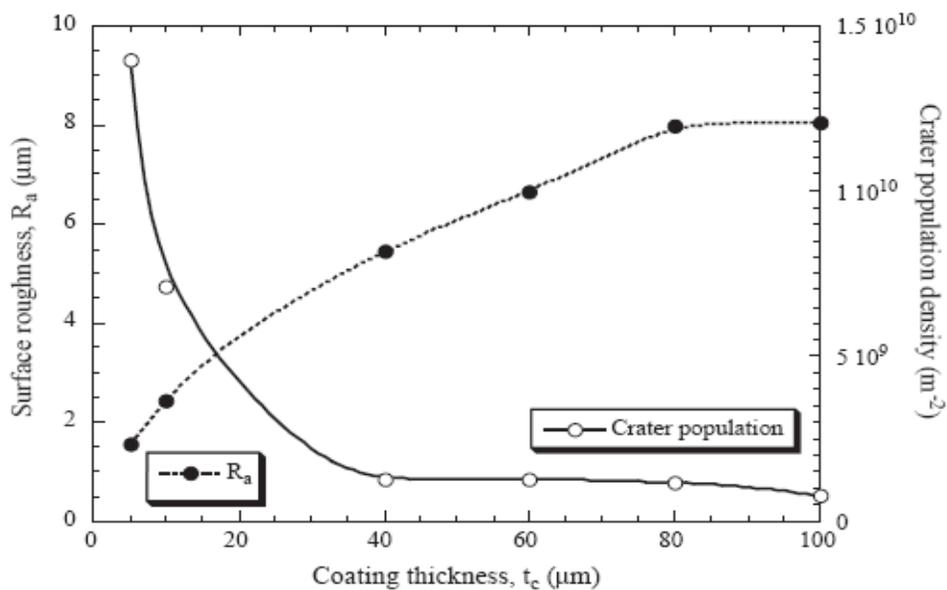


Figura 2.14 Rugosidad de la superficie y densidad de cráteres visibles en función del espesor del recubrimiento (medido con análisis de imágenes) [3].

Al examinar la superficie del recubrimiento a altas magnificaciones MEB usando convatilamento de emisión de campo se revela la presencia de una extensa e interconectada porosidad a fina escala. Tal como se muestra en la Figura 2.15 (b), esta red de porosidad interconectada no se aprecia en las secciones transversales pulidas (figuras 2.11, 2.12) debido a que pudo ser deformada durante su preparación [6].

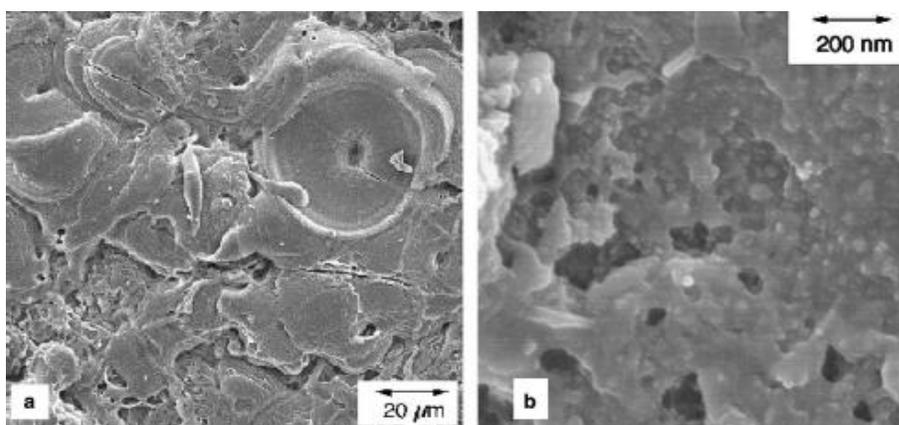


Figura 2.15 Porosidad interconectada. (a) Baja magnificación (b) Alta magnificación [6].

Existe cierta incertidumbre acerca del origen y naturaleza de la formación de la porosidad en los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma. La porosidad propuesta puede surgir de la evolución del oxígeno durante el proceso de la oxidación electrolítica de plasma, sin duda es de destacar que las altas presiones y temperaturas pueden dar lugar a una importante concentración de oxígeno disuelto en los óxidos fundidos. Debido a que las descargas eléctricas se limitan a unos 10  $\mu\text{s}$  de duración [8], el oxígeno probablemente queda atrapado en la alúmina fundida, así que este podría ayudar a crear y escapar a través de la porosidad interconectada tan pronto como se enfría la alúmina fundida [6].

En la figura 2.16 se aprecia el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma en su parte inferior la cual estaba unida al sustrato metálico y fue desprendida por métodos químicos utilizando una solución saturada de hidróxido de sodio (NaOH) para disolver el sustrato, los círculos sobre poros sobresalientes (a) representan cráteres de diámetro mayor a los 10 micrómetros los cuales son otra formación de porosidad sugerida por las descargas eléctricas localizadas (b).

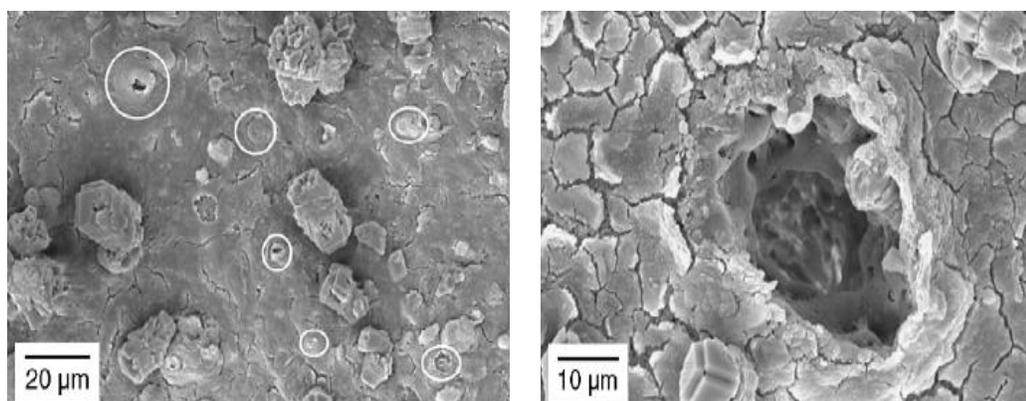


Figura 2.16 Parte inferior del recubrimiento OEP. (a) Marcado de cráteres (b) Cráter formado por las descargas eléctricas localizadas [6].

### 2.4.1 Porosimetría por intrusión de Mercurio

La porosimetría por intrusión de mercurio fue utilizada para evaluar la distribución, tamaño y geometría de los poros así como el volumen total de la porosidad interconectada de la superficie. La porosimetría por intrusión de mercurio también es una alternativa para medir la densidad aparente. Una muestra de masa conocida fue colocada en el equipo de medición la cual fue progresivamente presurizada por encima de los 100 MPa, el volumen de penetración fue monitoreado por mediciones asociadas a los cambios de la capilaridad.

Esta técnica se basa en los fenómenos de capilaridad generados por los líquidos que no mojan a los sólidos con los que están en contacto, así que el mercurio que no penetra espontáneamente en los conductos capilares, debe ser forzado por una presión externa " $P$ " para su introducción que es inversamente proporcional al radio " $r$ " de los mismos, de acuerdo a la ecuación de Washburn.

$$P = \frac{-2\gamma \cos \theta}{r}$$

Ecuación 2.1

Donde:  $P$  Presión externa

$\gamma$  Tensión superficial del mercurio (0.485 N/m).

$\theta$  Ángulo de contacto sólido-líquido (130 grados).

$r$  Radio de los poros.

La densidad teórica del recubrimiento libre del sustrato metálico fue estimada en  $3.63 (+/-0.2) \text{ g/cm}^3$ . La densidad aparente estimada con esta técnica es de  $3.0 (+/-) \text{ g/cm}^3$  la cual corresponde a un nivel de porosidad del 17 % (+/-7%).

La distribución del tamaño del poro se puede observar en la figura 2.17, asumiendo el comienzo de la penetración del mercurio después de la rugosidad se puede estimar el nivel de porosidad total. La relación entre la presión y tamaño del poro viene dada por la ecuación 2.1. Dado que la presión máxima aplicada en el equipo de medición es alrededor de 100 MPa (~1 kbar) la penetración solo se espera en los poros de 7 nm de diámetro. Extrapolando los valores para poros de tamaño pequeño en la gráfica se puede deducir que el nivel de porosidad total es de alrededor del 20% [6].

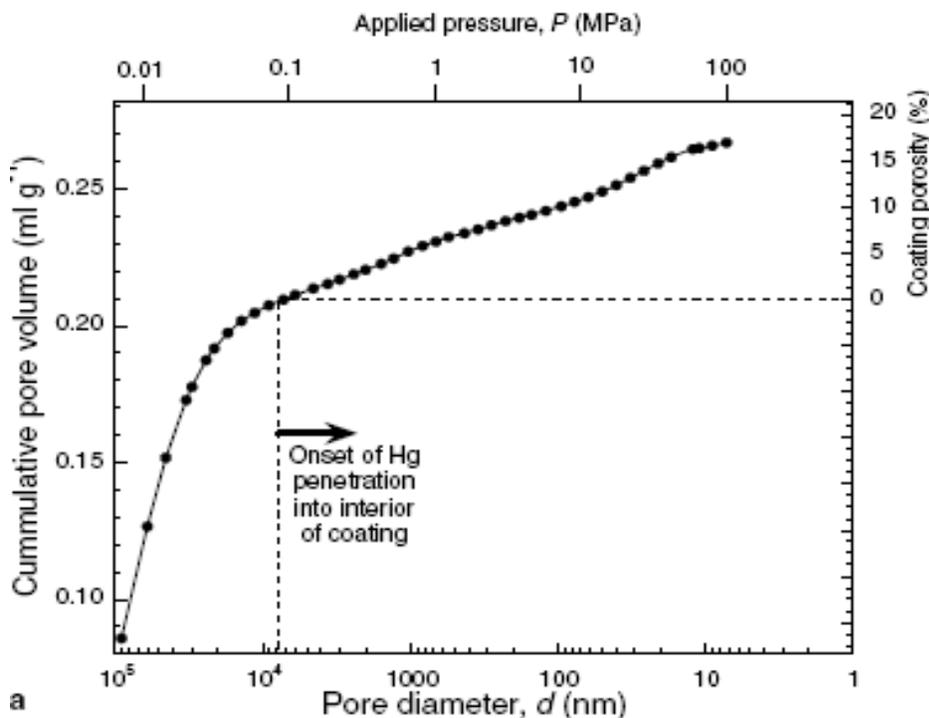


Figura 2.17 Porosimetría por intrusión de mercurio. Volumen acumulado en función de la presión aplicada (tamaño de poro) [6].

## **2.4.2 Picnometría de Helio**

La picnometría de helio es un método que permite determinar la densidad de materiales sólidos midiendo la cantidad de helio desplazado por la muestra. La presión del gas fue medida antes y después de insertar la muestra en la cámara de medición, el sistema fue calibrado antes de cada medición con una esfera de referencia, cada medición se repitió 50 veces hasta que la desviación estándar de los resultados se situó por debajo del 0.05%.

La densidad aparente fue estimada en  $2.1 (+/-0.3) \text{ g/cm}^3$  lo que supone un grado de porosidad del 42% (+/-12%).

Existen grandes discrepancias en las técnicas utilizadas lo que pueden ser producto de la profundidad de penetración de cada fluido. Las técnicas utilizadas tienden a sobreestimar el valor correcto lo que representa un efecto adicional a la incertidumbre de la medición.

## **2.4.3 Efectos de la porosidad en las características del recubrimiento**

### **2.4.3.1 Rigidez (Módulo de elasticidad)**

La porosidad presente en el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma es causa del bajo módulo de elasticidad en este material [6]. La relación MacKenzie sugiere que un 20% de porosidad puede causar una reducción del módulo de elasticidad alrededor de un 30% aunque la arquitectura del poro es relevante en la resistencia del recubrimiento, de hecho la resistencia reportada es de menor magnitud que un material completamente denso [6].

### **2.4.3.2 Dureza**

La dureza se espera que sea sensible a la presencia de la porosidad. Por ejemplo el 20% de porosidad reduciría la dureza en un 60-70% de un material completamente denso [6].

### **2.4.3.3 Conductividad térmica**

Los recubrimientos de oxidación electrolítica exhiben menor magnitud de conductividad térmica que la alúmina, esto se atribuye en parte al tamaño fino de grano y a la presencia de material amorfo, la porosidad es un factor mínimo de contribución a esta característica [6].

## **2.5 Esfuerzos residuales**

Los esfuerzos residuales están presentes en la mayoría de los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma y estos son resultado del proceso de deposición y del desarreglo entre el recubrimiento y el sustrato. Tales esfuerzos generan la propagación de grietas a lo largo de la interfase. Espectroscopia Raman sugiere que hay aproximadamente un gradiente lineal de esfuerzos en los recubrimientos (figura 2.18), los esfuerzos de tensión van alrededor de los 100 Mpa y los de compresión alrededor de 300 Mpa [9].

La espectroscopia Raman es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona en pocos segundos información química y estructural de casi cualquier compuesto orgánico o inorgánico, una pequeña porción de la luz es dispersada inelásticamente experimentando ligeros cambios de frecuencia, característicos del material analizado e independientes de la frecuencia de la luz incidente permitiendo así la identificación del material y los esfuerzos presentes.

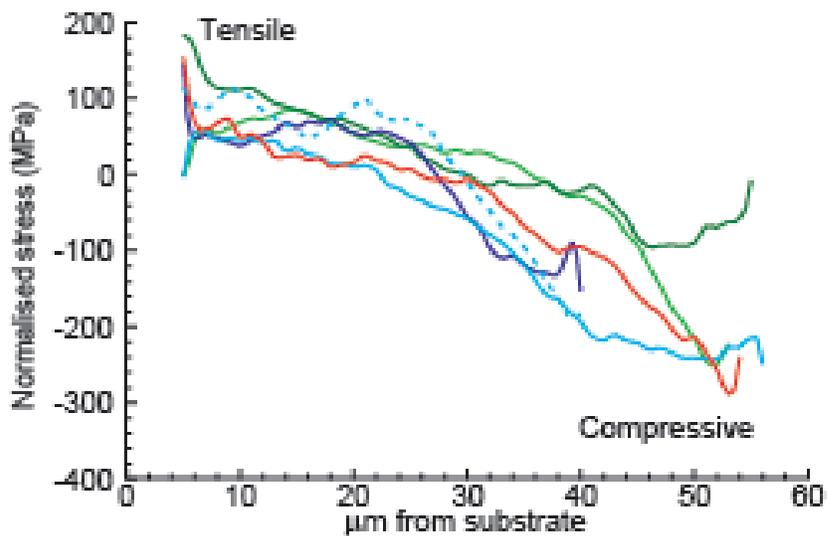


Figura 2.18 Perfil de esfuerzos aproximado a través del espesor. Medido con espectroscopia Raman.



Figura 2.19 Curvatura uniforme en un recubrimiento OEP.

En la figura 2.19 se aprecia el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma separado del sustrato metálico por métodos químicos al cual se le realizó una medición de los esfuerzos residuales más precisa midiendo su curvatura. Combinada con la baja rigidez del recubrimiento (25 GPa medido con la prueba de cuatro puntos), la curvatura sugiere una diferencia de esfuerzo de  $51 \pm 10$  MPa a través del espesor de  $100 \mu\text{m}$ . A partir de esto, se puede concluir que la relajación de esfuerzos solo contribuye en  $5 \text{ J m}^{-2}$  a la reducción de la energía elástica [2].

## 2.6 Pruebas de indentación

A. Plati, J.A. Curran y T.W. Clyne [2] encontraron la propagación de grietas a través de la interfase entre el sustrato metálico y el recubrimiento en las indentaciones que realizaron en el sustrato metálico de una pieza de sección transversal del aluminio con recubrimiento OEP. En la figura 2.20 después de realizar una microindentación con carga de 20 N, se observan que las grietas inician en la interfase pero rápidamente se propagan en el recubrimiento. Esta propagación es producida debido a que la tenacidad del recubrimiento es relativamente más baja que la del aluminio.

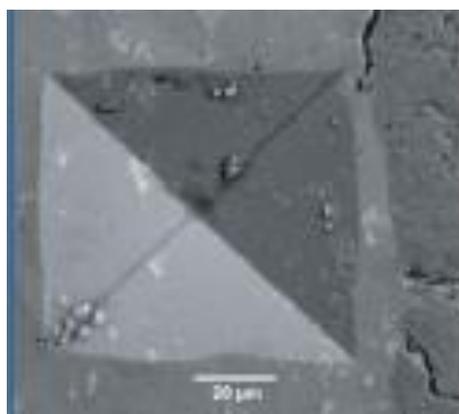


Figura 2.20 Indentación en el sustrato. Se induce la propagación de grietas a lo largo de la interfase.

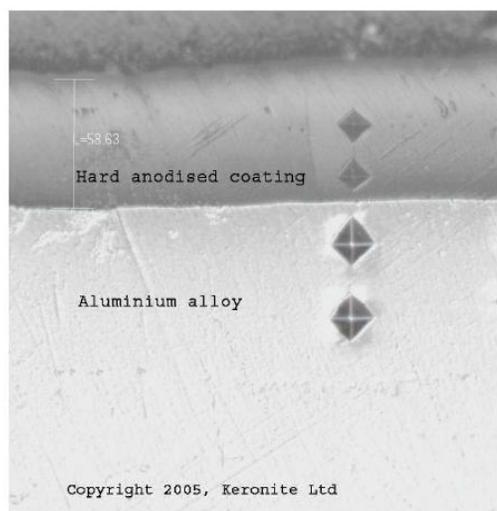


Figura 2.21 Dureza en un aluminio anodinado.

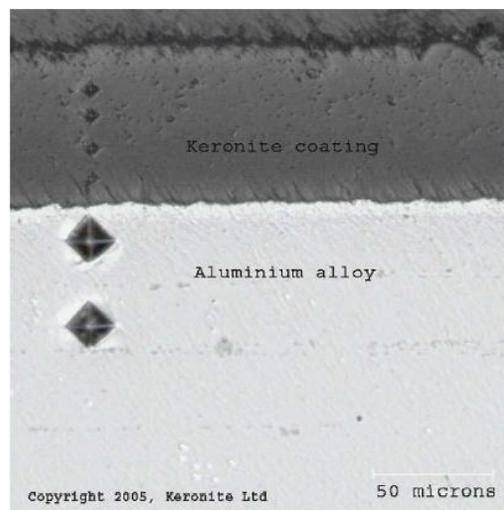


Figura 2.22 Dureza en un aluminio con recubrimiento OEP.

En las figura 2.21 y 2.22 se hace la comparación de la dureza tanto del sustrato como de los recubrimientos en un aluminio anodizado y el otro con recubierto OEP, la dureza en el sustrato del aluminio de la figura 2.21 es de 196 HV<sub>0.05</sub> y en el anodizado es de 406 HV<sub>0.05</sub> mientras que en el sustrato de aluminio de la figura 2.22 la dureza es de 194 HV<sub>0.05</sub> y en el recubrimiento Keronite de 1616 HV<sub>0.05</sub>. Se presenta alrededor de 4 veces más dureza en el recubrimiento OEP que en el anodizado [2].

Los datos de la figura 2.23 muestra la duraza local y el modulo de Young obtenido con un nanoindentador en una muestra transversal pulida de 80 μm de espesor, la dureza está en función de la distancia de la superficie exterior hacia el sustrato. La mayor dureza se registra en la superficie exterior mientras que la menor dureza se obtiene en el sustrato metálico.

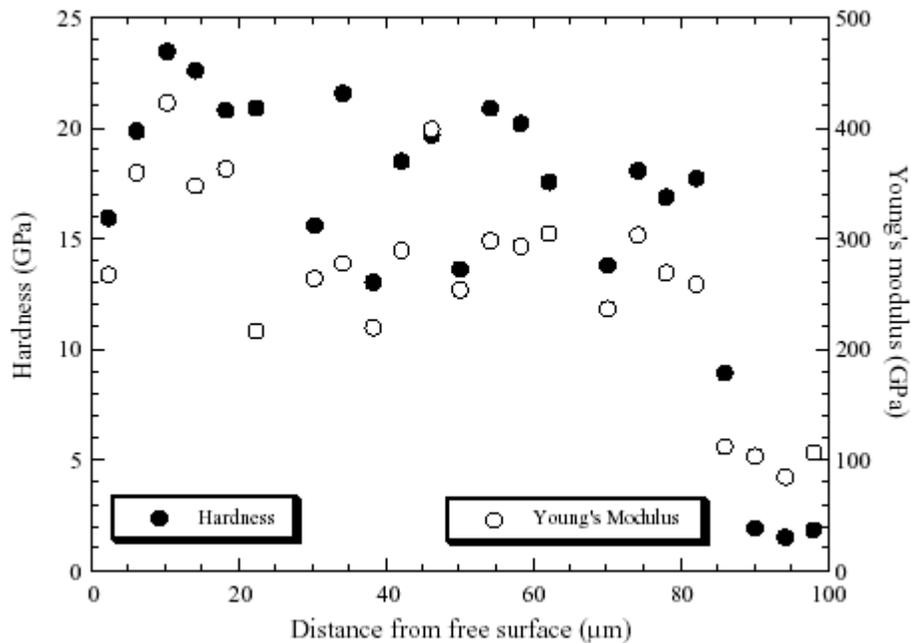


Figura 2.23 Perfiles de dureza y módulo de Young locales a través del grosor de una capa de 80 μm medido de la superficie exterior hacia el sustrato.

## 2.7 Propiedades termofísicas

J. A. Curran y T.W. Clyne investigaron acerca de las propiedades termofísicas del recubrimiento Keronite de sustrato aluminio 6082, primeramente midiendo la expansión térmica del recubrimiento sobre el plano. Ellos determinaron que la expansión térmica fue de  $8.2 \pm 0.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  y este valor no es dependiente del espesor del recubrimiento, el valor es muy cercano a los datos que se reportan de la alúmina, por lo tanto las grietas y la porosidad presente no resultaron ser un gran indicador que afecte la expansión térmica del recubrimiento [3].

La conductividad térmica del sustrato de la aleación de aluminio fue medida de manera independiente siendo su valor  $170 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , la conductividad térmica del recubrimiento se encontró en el orden de  $1.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  siendo un valor bajo en comparación a los valores reportados de alúmina. ( $32\text{-}34 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) Los investigadores explican que esta diferencia se debe a la gran proporción (30%) de alúmina amorfa a través del recubrimiento en conjunto de la porosidad y un tamaño de grano fino [7].

El modulo de Young global (recubrimiento y sustrato) local sobre el plano de un recubrimiento fue medido usando dos técnicas, primeramente en cantilever de un sustrato recubierto en ambas caras en donde los desplazamientos fueron medidos usando un extensómetro de escaneo láser. La siguiente expresión da la deflexión  $\delta y$ , exhibida por la viga, en la distancia  $x$  a lo largo de la longitud cuando se somete a una carga  $P$  una distancia  $L$  a lo largo de su longitud [3].

$$\delta y = \frac{Px^2}{6(E_s I_s + E_c I_c)} (3L - x) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde  $E_c$ ,  $E_s$  son los módulos de elasticidad del recubrimiento y del sustrato respectivamente, el correspondiente momento de inercia (Del eje neutral en el plano medio) son dados por

$$I_s = \frac{bh^3}{12} \text{ and } I_c = \frac{b}{12}(d^3 - h^3) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

En las cuales  $b$  es el espesor de la viga,  $d$  es el espesor total y  $h$  es el espesor del sustrato [3].

La segunda técnica que utilizaron para medir la rigidez o módulo de Young fue midiendo la curvatura  $k$  del espécimen inducida por inmersión asimétrica de dos materiales que forman una viga (el sustrato recubierto solo de un lado) en nitrógeno líquido usando la siguiente relación [3].

$$\kappa = \frac{6E_cE_s(t_c + t_s)t_c t_s(\alpha_c - \alpha_s)\Delta T}{E_c^2 t_c^4 + 4E_cE_s t_c^3 t_s + 6E_cE_s t_c^2 t_s^2 + 4E_cE_s t_c t_s^3 + E_s^2 t_s^4} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde  $\Delta T$  representa el cambio de temperatura,  $t_c$  y  $t_s$ , son los espesores del recubrimiento y del sustrato y  $\alpha_c$ ,  $\alpha_s$  son las expansiones térmicas del recubrimiento y del sustrato respectivamente [3]. La curvatura es uniforme a lo largo de su longitud, fue establecida de los desplazamientos medidos (realizados con el extensómetro de escaneo láser) utilizando la relación geométrica

$$\kappa = \frac{2}{\sqrt{(x^2 + \delta y^2)}} \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\delta y}{x} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En la cual  $\delta y$  es el desplazamiento lateral en la distancia  $x$  a lo largo de la longitud del espécimen. El modulo de Young fue obtenido de la ecuación 2.4 después de sustituir experimentalmente el valor de la curvatura [3].

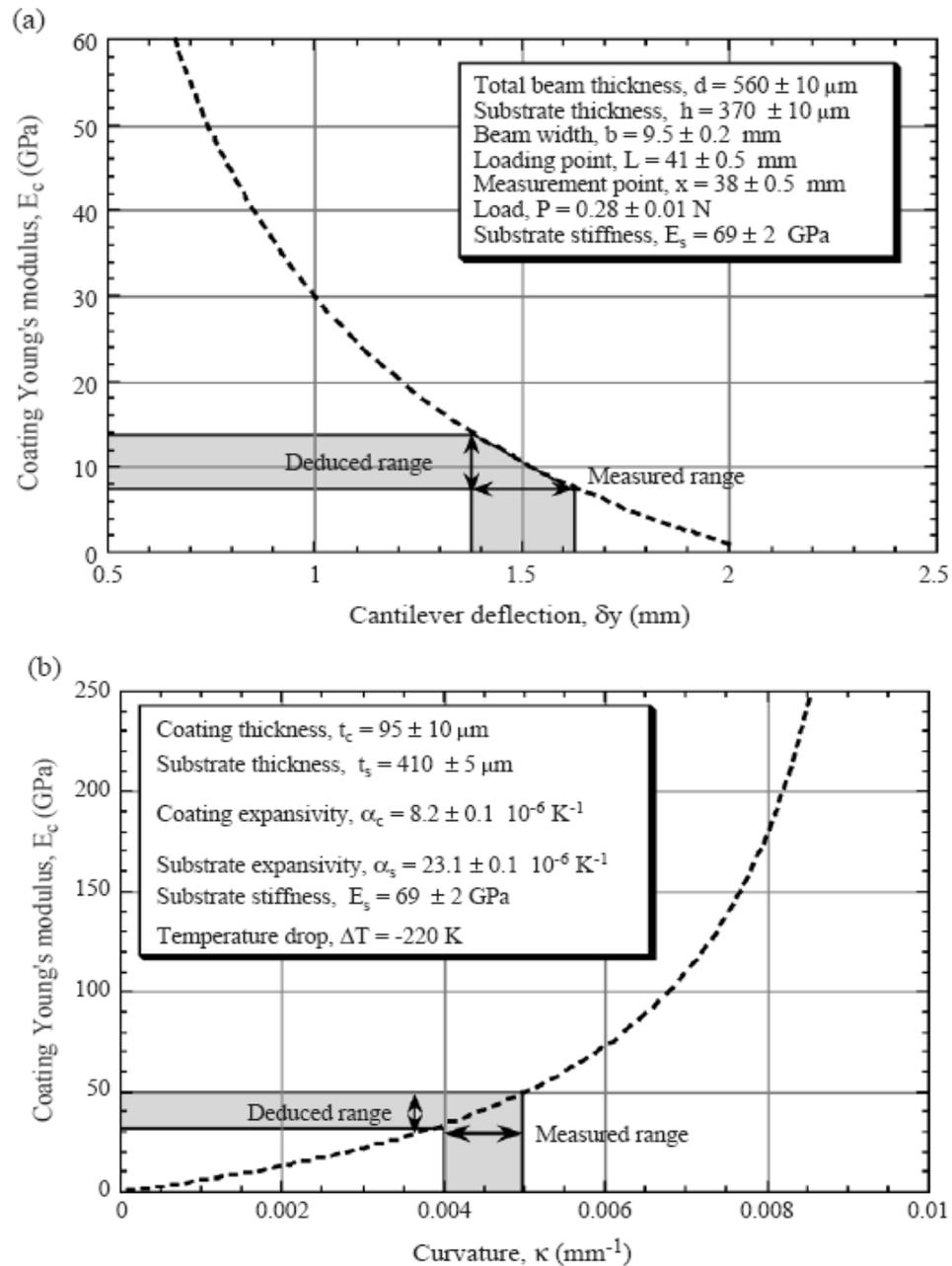


Figura 2.24 Modulo de Young global (sustrato y recubrimiento). Las gráficas representan el modulo de Young de las pruebas (a) Deflexión en cantilever y (b) Curvatura observada de la viga de dos materiales (De acuerdo con la ecuación 1) Los rangos específicos experimentalmente obtenidos del modulo de Young son remarcados en

Las gráficas en la figura 2.24 muestran los valores de módulo de Young de los recubrimientos, utilizando (a) deflexión de una viga en cantilever (sustrato recubierto por ambas caras) y (b) enfriamiento de una viga (sustrato recubierto solo en un lado). Se puede observar que existe cierta discrepancia en los resultados para las dos pruebas. El módulo de Young (rigidez) es relativamente mucho más bajo en comparación con el módulo de Young de la alúmina (~ 370 GPa) y de los valores obtenidos por indentación (figura 2.23) debido a la presencia de micro grietas y porosidad en el recubrimiento. La flexión del recubrimiento en la prueba de cantilever sugiere un valor de alrededor de 10 GPa, mientras que la viga enfriada indican un valor alrededor de 40 GPa. La diferencia entre las dos cifras obtenidas en dichas pruebas se debe a que en la prueba de cantilever tanto el recubrimiento como el sustrato se someten a tensión y en la prueba de enfriamiento el recubrimiento y el sustrato se comprimen y elevan la rigidez ya que las microgrietas se cierran [3].

## **2.8 Pruebas sobre el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma**

### **2.8.1 Pruebas de fragmentación**

Una estimación cualitativa de la adherencia de recubrimiento se puede obtener mediante la observación de formación de grietas en el recubrimiento adherido al sustrato durante la prueba de tracción. La figura 2.25 muestra que el espaciamiento de las grietas durante la prueba de fragmentación es aproximadamente igual al grosor del recubrimiento OEP. Esto indica una muy fuerte adherencia. Tomando la deformación del sustrato en el que empezaron a aparecer las grietas en el recubrimiento  $\epsilon_t$ , la resistencia a la tracción se evaluó en  $\sigma_t = 18-24$  MPa, lo que sugiere un esfuerzo de cizallamiento interfacial,  $\tau_i$ , de entre 36 MPa y 48 MPa [2].

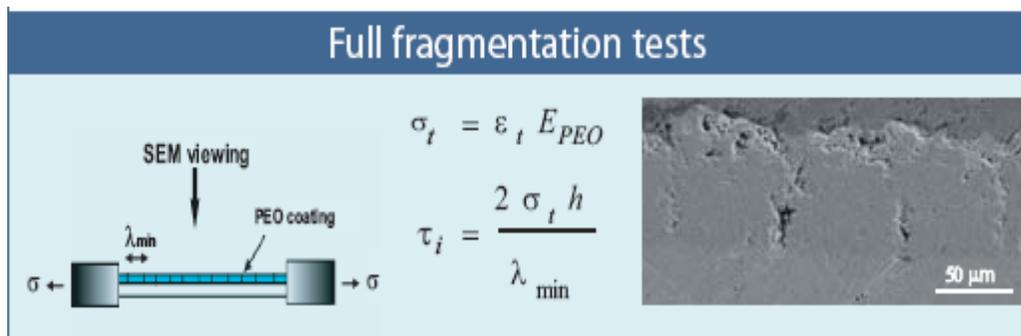


Figura 2.25 Esquema de ensayo de fragmentación y micrografía de la sección transversal de la pieza [2].

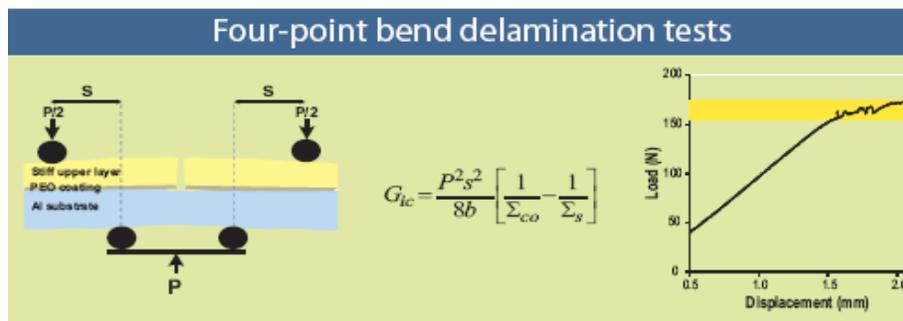


Figura 2.26 Esquema de la prueba de cuatro puntos, junto con la gráfica de desplazamiento en función de la carga [2].

La prueba de cuatro puntos ofrece una medida cuantitativa de la energía de fractura. Sin embargo, fue necesario añadir una capa superior rígida fuertemente adherida a la muestra (en la parte superior del óxido) figura 2.26 para proteger el recubrimiento de grietas y la desunión entre el recubrimiento y el sustrato. Diversos métodos fueron utilizados, incluyendo el espolvoreado por plasma de aluminio y adhesión epóxica de aluminio, en todos ellos se dio lugar a una nueva interfase mucho más débil que la interfase de interés [2].

La grieta propagada a lo largo de la nueva interfase entre el recubrimiento y la nueva capa superior, llega a la interfase del sustrato-recubrimiento. La energía máxima de deformación fue  $G_{ic} = 150 \text{ J m}^{-2}$ , por lo tanto, sólo se considera la interfase de interés. (Figura 2.27) [2].

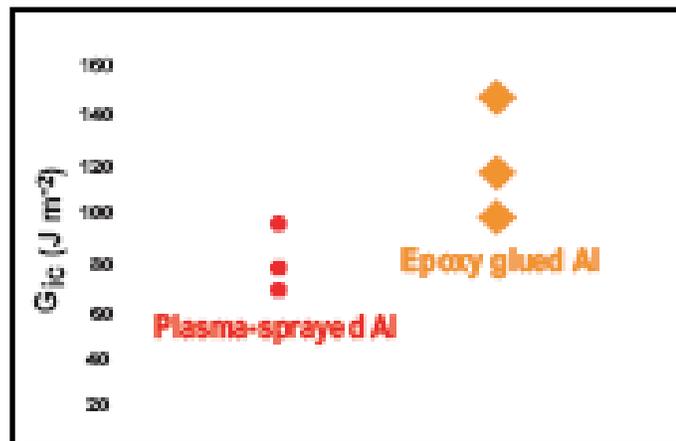


Figura 2.27 Energías de fractura de las diferentes capas superiores [2].

## 2.8.2 Pruebas de resistencia al desgaste

### 2.8.2.1 Prueba perno en disco

La resistencia al desgaste de Keronite se evaluó en pruebas de perno en disco y se comparó con un material anodizado (Mil-C-8625 tipo 3) y acero 5140 endurecido a 50 HRC [4].

Las variables de la prueba fueron las siguientes:

- Pernos: Anillos planos con diámetro de 20 mm
- Disco: Papel abrasivo P320
- Velocidad de giro: 0.35 mm/s
- Presión ejercida: 0.08 MPa
- El desgaste se reporta en función del peso perdido por distancia deslizada: (mg/m)

Los resultados reportados fueron los siguientes:

Recubrimiento OEP	0.14
Anodizado	0.55
Acero 5140 (50HRC)	1.47

La resistencia del recubrimiento OEP es aproximadamente 4 veces mayor que la del anodizado y más de diez veces la del acero 5140.

### 2.8.2.2 Prueba ASTM G65 arena seca en rueda de goma

En pruebas de abrasión realizadas sobre el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma bajo el estándar de la ASTM G65 “arena seca en rueda de goma” se obtuvieron valores muy bajos de pérdida en volumen del recubrimiento (Figura 2.28) La tasa volumétrica de desgaste se encuentra alrededor de  $5 \text{ mm}^3/\text{km}$  para las aleaciones de la serie 2000 y 5000. Se aprecia que para las mismas aleaciones sin recubrimiento hay una pérdida volumétrica mayor a los  $140 \text{ mm}^3/\text{km}$ , mientras que para el acero nitrurado el valor de pérdida volumétrica fue de alrededor de  $40 \text{ mm}^3/\text{km}$  [4].

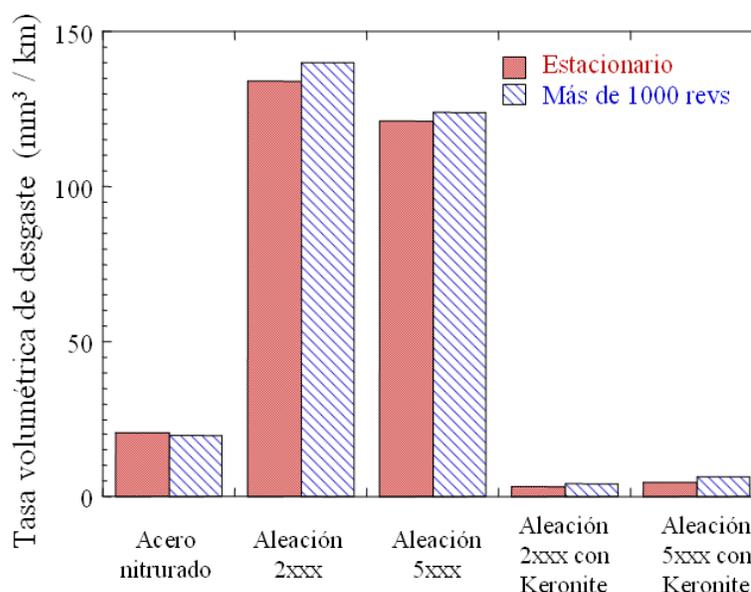


Figura 2.28 Tasa volumétrica de desgaste en distintos materiales utilizando la prueba “Arena seca en rueda de goma”

### 2.8.2.3 Prueba ASTM B117

En la prueba del estándar de la ASTM B117 (Prueba en niebla salina) el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma (Keronite) resultó ser muy estable químicamente debido a la gran resistencia a la corrosión que presentó por más de 2000 horas en niebla salina. En la imagen de la figura 2.29 se puede apreciar que la aleación de aluminio 6082-T6 recubierta con Keronite no presenta indicio de corrosión mientras que en la misma aleación sin recubrimiento presenta graves daños corrosivos [4].

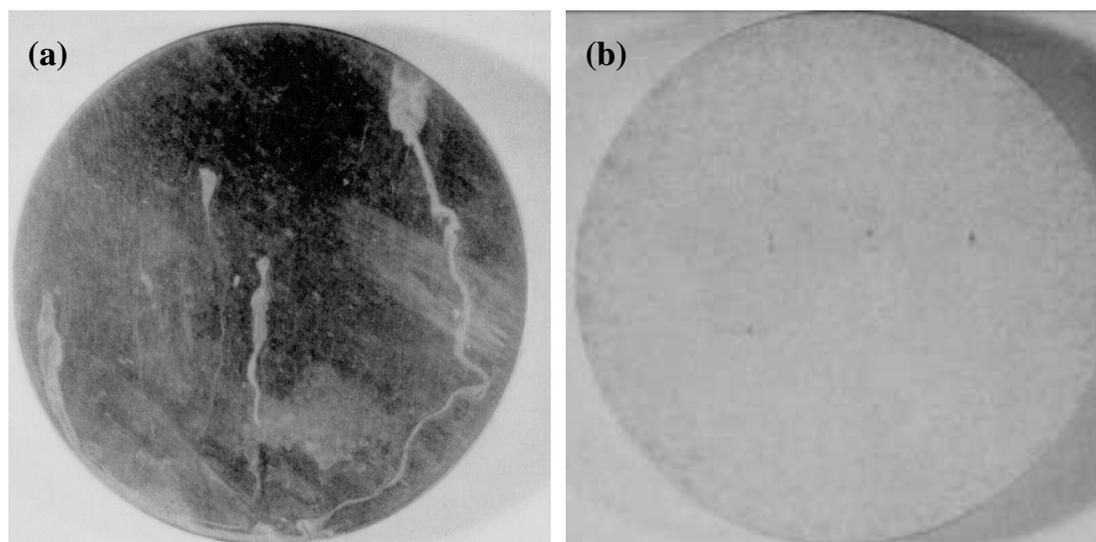


Figura 2.29 Discos de aleación de aluminio 6082-T6 sometidos a la prueba de corrosión. (a) Disco con daños corrosivos (b) Disco de la misma aleación recubierto de Keronite [4].

## **CAPITULO 3**

### **DESGASTE**

#### **3.1 Introducción**

La palabra “tribología” se deriva del término griego “tribos” el cual puede entenderse como “frotamiento o rozamiento”, así que la traducción literal de la palabra podría ser “la ciencia del frotamiento”. La tribología se define como: La ciencia y tecnología que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo y de los temas y prácticas relacionadas, la naturaleza y las consecuencias de las interacciones son la fricción y el desgaste de los materiales involucrados, por lo tanto la tribología estudia los temas relacionados con fricción, desgaste y lubricación para evitar el fenómeno de pérdida de masa [10].

El estudio de las interacciones superficiales requiere tener conocimiento de varias disciplinas incluyendo la física, la química, las matemáticas aplicadas, la mecánica de sólidos, la mecánica de fluidos, la termodinámica, la transferencia de calor, la ciencia de materiales, reología, lubricación, diseño de máquinas, desempeño y confiabilidad.

La tribología aplica un análisis operacional a problemas de gran importancia económica, llámese, confiabilidad, mantenimiento y desgaste del equipo técnico, abarcando desde la tecnología aeroespacial hasta aplicaciones domésticas. Esta disciplina brinda herramientas matemáticas y gráficas, que permiten diseñar y seleccionar un sistema tribológico para que un elemento mecánico o equipo técnico tenga el mínimo desgaste.

La tribología ha tenido gran despliegue y desarrollo en la industria mundial, porque ha logrado incidir positivamente en los aspectos técnico–económicos relacionados con el incremento de la durabilidad de las partes de las máquinas. La tribología como ciencia comenzó a tomar interés en el año 1966 donde un estudio realizado por el gobierno de Inglaterra el “Reporte Jost”, sugirió que en el Reino Unido se podían lograr ahorros de hasta 500 millones de libras esterlinas, al diseñar y construir maquinaria que tuviera el mínimo desgaste al estar en operación [10].

## **3.2 Mecanismos de desgaste**

El desgaste es la última consecuencia del proceso de interacción entre superficies en movimiento relativo ya sea deslizante o rodante, el desgaste es la gradual remoción del material de una o ambas superficies [11].

La resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca del material como lo es módulo de Young o su dureza, si no que ésta depende del sistema tribológico en el que opera.

Los principales mecanismos de desgaste son la corrosión, la erosión, la adhesión, la abrasión y la fatiga. Otros mecanismos de desgaste como el fretting, las picaduras y la cavitación son abarcados dentro de los principales mecanismos de desgaste.

### **3.2.1 Desgaste corrosivo**

En Estados Unidos de América de acuerdo con un estudio concluido en el año 2001 el combate a la corrosión cuesta aproximadamente 6% del producto nacional bruto. Esta cantidad que incluye costos tanto directos como indirectos alcanzó la cifra de aproximadamente 550,000 millones de dólares en 1998 [12].

El proceso de corrosión se presenta con la finalidad de reducir el nivel de energía libre de un sistema [13]. La composición y la integridad física de un material sólido se alteran en un ambiente corrosivo por ejemplo los metales y ciertos materiales cerámicos reaccionan en un ambiente gaseoso por lo general a elevadas temperaturas y el material puede destruirse debido a la formación de óxidos y otros compuestos. El desgaste corrosivo se define como la degradación de materiales en los cuales están involucrados los mecanismos de

corrosión y desgaste debido al frotamiento, la combinación de ambos procesos incrementa el daño característico causado por este fenómeno, ver figura 3.1. La deformación plástica por altos esfuerzos de contacto causa endurecimiento por deformación y es susceptible al ataque químico, de igual forma la deformación plástica causada por el mecanismo de desgaste por impacto puede hacer que las superficies sean más susceptibles a la corrosión [14].

El modelo de desgaste corrosivo se expresa en dos etapas.

1. Formación de una película de óxido en la superficie. Esta película de óxido puede operar como lubricante aunque en la mayoría de los materiales no es posible ya que dicha película es muy frágil [11].
2. Al ser esta capa de óxido frágil queda expuesta a los fenómenos de deslizamiento del sistema [11].

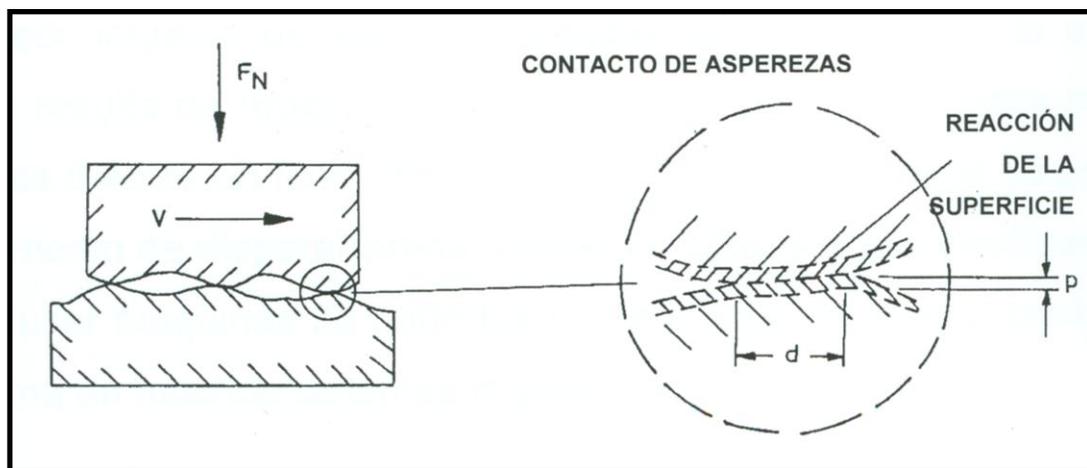


Figura 3.1 Desgaste corrosivo.  
Modelo representativo de la formación de la capa de óxido [11].

### 3.2.2 Desgaste erosivo

El desgaste erosivo representa un gasto o pérdida económica como todos los demás mecanismos de desgaste, en el año 2000 en el Reino Unido el departamento de la industria y comercio estimó los daños por erosión que fueron aproximadamente de 20 millones de euros por año [15].

La erosión de una superficie, se produce de tres formas:

1. Por choque de partículas sólidas.
2. Por choque de líquidos y lodos (partículas inmersas en líquidos).
3. Por cavitación.

La erosión por partículas sólidas es la pérdida de material en su superficie debido a los repetidos impactos de pequeñas partículas sólidas inmersas en un medio gaseoso, figura 3.2 [14] [16].

En la erosión por impacto de partículas sólidas, la forma, el tamaño, la velocidad y dureza de la partícula erosiva, así como la dureza de la superficie y el ángulo de impacto juegan un papel determinante en este mecanismo [17].

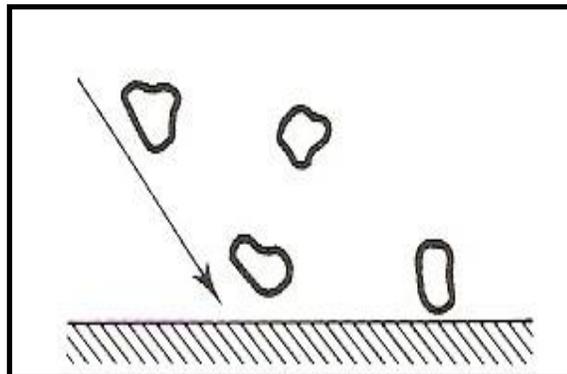


Figura 3.2 Ilustración de repetidos impactos de partículas sólidas sobre una superficie plana [14].

La erosión por partículas sólidas es un fenómeno no deseado en sistemas ingenieriles, como el caso de la transportación de sólidos, ver figura 3.3, en sistemas neumáticos, en turbinas, hélices, componentes de automóviles, en procesos de formado, etc. Por otra parte en algunos casos la erosión por partículas sólidas es útil como por ejemplo para aplicaciones de limpieza de equipos, cuando se dispara arena a presión (sandblast) sobre una superficie, ésta queda libre de óxidos y grasas [17].

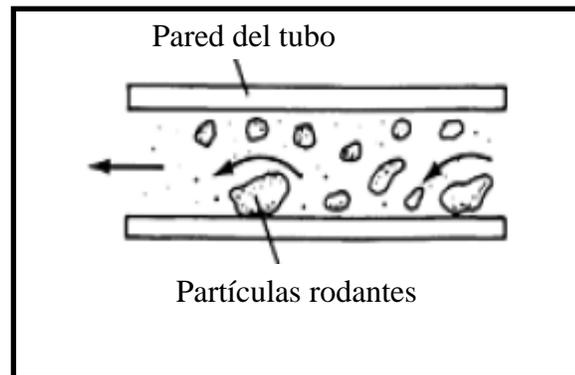


Figura 3.3 Ilustración de conducción de partículas sólidas [14].

La erosión por choques de líquidos ocurre cuando pequeñas gotas de un líquido a altas velocidades (alrededor de 100 m/s) inciden en una superficie, las altas presiones experimentadas superan el límite de elasticidad de la mayoría de los materiales por lo tanto las deformaciones plásticas o fracturas pueden resultar sólo de uno o de repetidos impactos generando desgaste erosivo y picaduras, los líquidos no necesariamente necesitan tener partículas sólidas dentro de él para producir el desgaste en las superficies sólidas [14].

El estándar ASTM G40 define la erosión por choque de líquidos como pérdida progresiva del material original de una superficie sólida debido a la exposición continua de impactos de gotas o chorros líquidos [18]. En la figura 3.4 se hace referencia a esta definición.

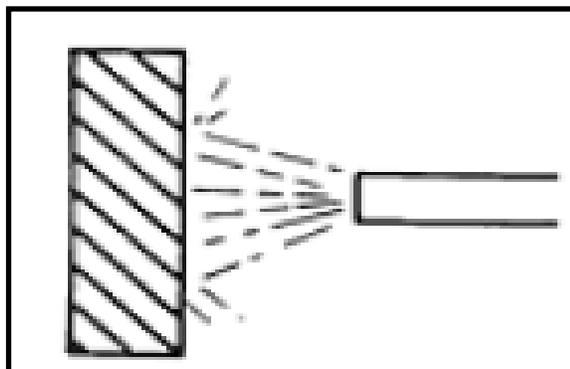


Figura 3.4 Ilustración de impacto de líquidos [14].

La erosión por lodos puede ser definida como la pérdida de material que experimenta una superficie debido al flujo de una mezcla de partículas sólidas dentro de un líquido a altas velocidades. En la figura 3.5 se representa a los lodos conducidos a través de un tubo, la pared del tubo experimentará la pérdida del material en su superficie debido a la interacción con los lodos. Éste mecanismo de erosión también se da en una superficie plana debido al choque de lodos a cierta velocidad y distancia entre la muestra y la boquilla.

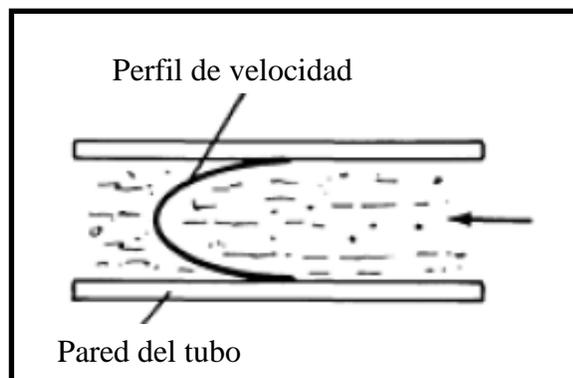


Figura 3.5 Ilustración de la conducción de lodos [14].

La cavitación, se define como la continua formación, crecimiento y colapso violento de cavidades o burbujas de aire o vapor dentro de un líquido que se somete a grandes esfuerzos y velocidades considerables. El colapso violento de las burbujas contra la superficie es la responsable del proceso de erosión [14].

La cavitación ocurre cuando un líquido que contiene un gas disuelto entra en una región de baja presión, las burbujas de gas, que se precipitan y crecen en el líquido en el ambiente de baja presión, se colapsan cuando subsecuentemente la presión aumenta. El choque localizado, producido por el colapso puede ejercer una presión de miles de atmósferas contra el material circundante. La cavitación ocurre con frecuencia en hélices de embarcaciones, en presas y vertederos, así como en bombas hidráulicas [14].

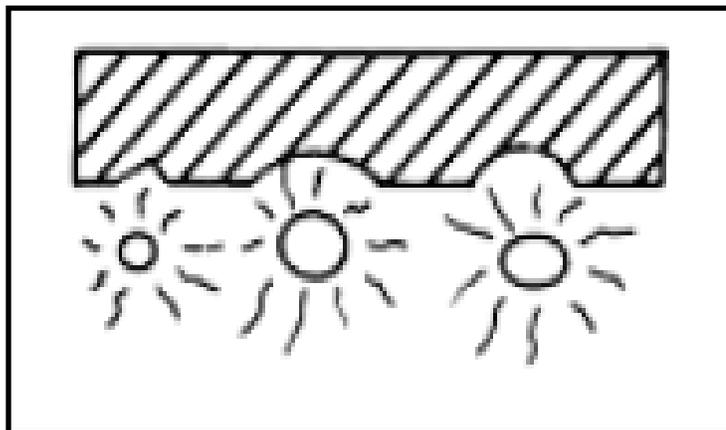


Figura 3.6 Cavitación. Burbujas disueltas en un líquido colapsando en el material circundante [14].

### 3.2.3 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies sólidas ya sean de materiales similares o diferentes se deslizan a presión una sobre la otra. Las proyecciones superficiales, es decir las asperezas se deforman plásticamente y finalmente se sueldan una con la otra a causa de las elevadas presiones localizadas [14]. Conforme continúa el deslizamiento se producirá un

desprendimiento de material de la superficie menos dura. Si el material es dúctil, la deformación que se produce antes de la separación de la partícula es mucho mayor. La partícula que ha sido separada de la aspereza puede permanecer unida a la otra aspereza como material transferido de una superficie a otra o puede ser liberada como partícula de desgaste. En algunos casos el punto de cedencia del material es excedido y las asperezas se deforman plásticamente hasta que el área real de contacto incrementa lo suficiente para soportar la carga aplicada, de tal modo que las superficies pueden adherirse. Esto causará que la soldadura en frío tome lugar. Deslizamientos continuos causarán que las uniones entre asperezas sean cizalladas y nuevas uniones sean formadas. Algunos factores como partículas de contaminantes pueden ayudar a minimizar esta adhesión las cuales se dispersan del área de contacto por el movimiento relativo tangencial que ocurre en la interfase [11]. Una de las pruebas comunes para determinar el desgaste por adhesión es la prueba perno en disco, (figura 3.7) el cual consiste de un perno que ejerce cierta presión sobre un disco que se mantiene girando. El desgaste se mide en masa perdida por metro recorrido.

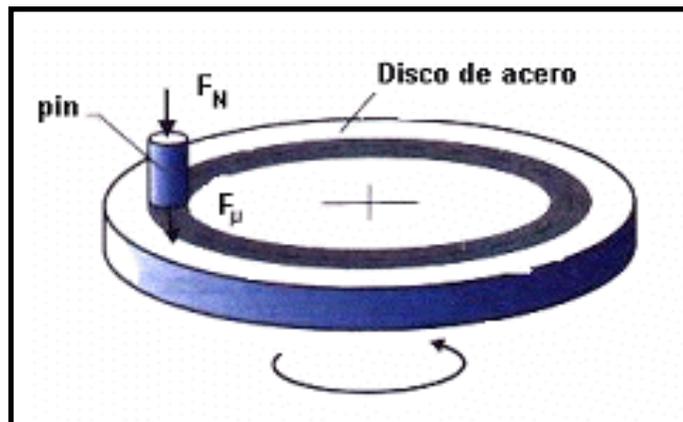


Figura 3.7 Representación de la prueba perno en disco. Pin (perno),  $F_N$  (fuerza del perno sobre el disco)  $F_\mu$  (fuerza de fricción).

### 3.2.4 Desgaste abrasivo

El daño abrasivo representa un tipo de desgaste muy severo, ocurre cuando dos superficies se encuentran deslizando relativamente una sobre la otra, una de ellas es significativamente más dura que la otra y con su mismo peso o al aplicar una carga normal las asperezas del cuerpo más duro penetran a la más suave produciendo remoción del material. Este tipo de desgaste es común en discos de arado, cuchillas de trascabos, trituradoras y molinos. En muchas aplicaciones automotrices (por ejemplo engranes, pistones y cilindros) el comportamiento del desgaste abrasivo significa una preocupación importante.

Dos tipos básicos de abrasión son el desgaste de dos cuerpos y de tres cuerpos. El desgaste de dos cuerpos ocurre cuando las protuberancias duras de una superficie son deslizadas contra otra, figura 3.8 (a), la abrasión de tres cuerpos, figura 3.8 (b), se presenta en sistemas donde partículas tienen la libertad de deslizarse o girar entre dos superficies en contacto, el caso de aceites lubricantes contaminados en un sistema de deslizamiento es un claro ejemplo de este tipo de abrasión. Los rangos de desgaste en la abrasión de tres cuerpos son generalmente más bajos, que en el sistema de abrasión de dos cuerpos [16] [17].

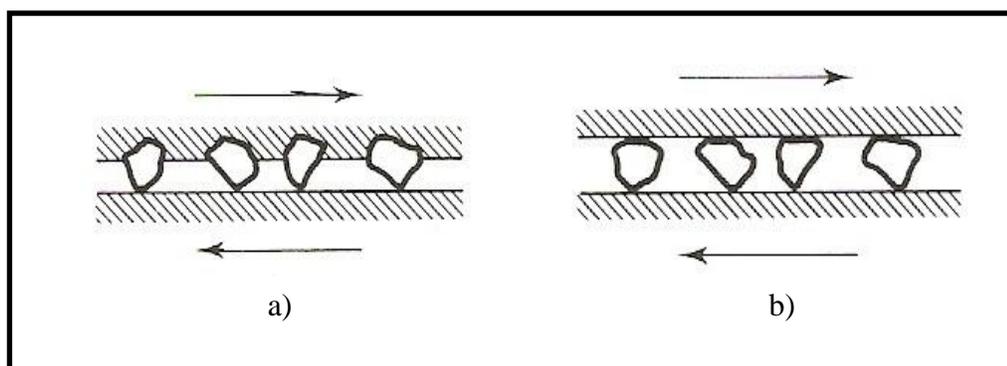


Figura 3.8 Tipos de abrasión.

a) Abrasión de dos cuerpos b) Abrasión de tres cuerpos [16].

### 3.2.5 Desgaste por fatiga de contacto

El desgaste por fatiga de contacto se da en los casos donde una de las superficies sufre desgaste debido a estar sometida a un proceso cíclico de cargas y descargas. La fatiga es la disminución de la resistencia de un material debida a esfuerzos repetitivos, que pueden ser mayores o menores que la resistencia de cedencia del material. Este fenómeno es muy común en los sistemas mecánicos, se presenta a escalas tanto macroscópicas como microscópicas. Este tipo de desgaste se observa en componentes sujetos a cargas dinámicas como álabes de turbina, resortes, cigüeñales y otros componentes de aviones y automóviles. La propagación de fisuras o grietas sub-superficiales hace que se desprendan fragmentos del material, estas fisuras pueden originarse en la superficie, en discontinuidades o en el interior del material en la región sub-superficial, por ejemplo se produce la nucleación de fisuras a cierta distancia debajo de la superficie debido a que allí se manifiestan las mayores tensiones sometiendo a compresión al material ubicado delante de las asperezas de contacto y tracción al material ubicado detrás. El coeficiente de fricción es factor determinante, ya que al estar las superficies lubricadas la adhesión es mínima, pero en sistemas con altos coeficientes de fricción, se tendrán zonas de intensa deformación muy cercana a la superficie, creando las grietas superficiales y sub-superficiales, las cuales coalescerán, ver figura 3.9 [17].

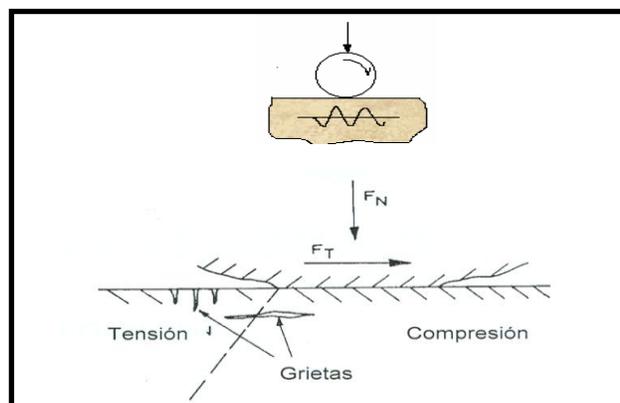


Figura 3.9 Propagación de grietas debido a los esfuerzos cíclicos sobre una superficie [17].

### 3.2.6 Desgaste por fretting (Corrosión por vibración)

El fretting se debe a la existencia de movimientos oscilatorios de amplitud pequeña entre dos superficies en contacto. El mecanismo se presenta cuando se mantiene el sistema sometido a un gran número de ciclos. Fretting ocurre entre componentes que tienen como función evitar el movimiento con un contacto muy intenso entre ellos, El medio ambiente juega un papel importante en este tipo de desgaste, ya que bajo condiciones húmedas ha sido mucho mayor que en condiciones secas, esto se debe a que el fretting es iniciado por adhesión, amplificado por corrosión y sus principales efectos son la abrasión. Un ejemplo se da en un remache (figura 3.10) en dicha figura se indican los lugares que se encuentran propensos al fretting. La deformación plástica por los altos esfuerzos de contacto causa endurecimiento por deformación y susceptibilidad al ataque químico, el atrapamiento de humedad debido a las hendiduras en este tipo de uniones provoca la corrosión, por último los mecanismos oscilatorios causan abrasión [11] [14], ver figura 3.11.

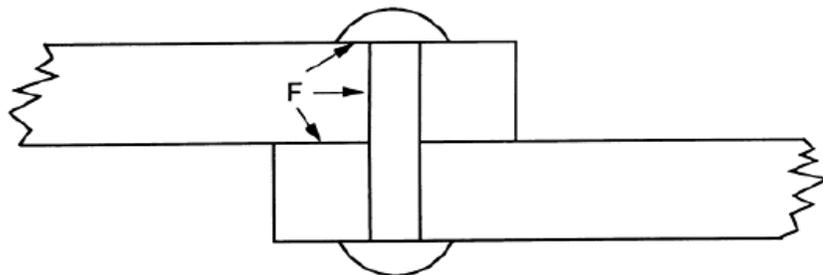


Figura 3.10 Desgaste por fretting, lugares propensos a fretting en un remache [14].



Figura 3.11 Fretting incurrido en un cojinete [14].

### 3.2.7 Desgaste oxidativo

El desgaste oxidativo es promovido por la oxidación en la superficie de los materiales que se encuentran en deslizamiento con poca o nula lubricación en presencia de aire u oxígeno [14]. Para el caso particular del acero se proponen dos mecanismos para explicarlo, ver figura 3.12.

1. El calor generado por la fricción en contacto deslizante, en presencia de oxígeno provoca la oxidación acelerada. El material oxidado se desprende en forma de laminillas delgadas a este tipo de comportamiento se le denomina desgaste por oxidación moderada.
2. A mayores velocidades de deslizamiento, la película de óxido es más gruesa, provocando que la temperatura entre las partes de contacto sea mucho mayor que el caso anterior, se produce deformación e incluso fusión local del óxido, a esta condición se le denomina desgaste por oxidación severa aunque puede presentar tasas de desgaste menores que la oxidación moderada.

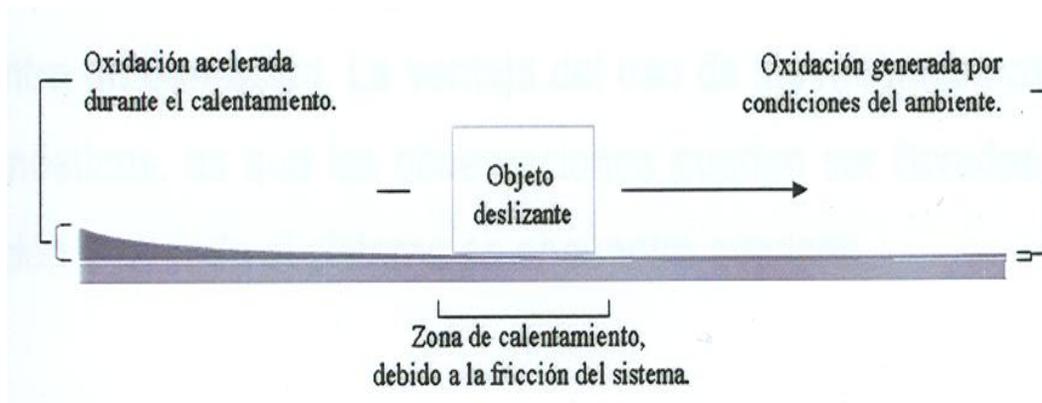


Figura 3.12 Representación del desgaste oxidativo. Crecimiento del óxido debido al calor generado por fricción en un contacto deslizante [17].

### 3.3 Erosión

La palabra erosión se deriva del latín “rodere” que significa roer o desgastar gradualmente [17].

Acorde a la norma ASTM (G40-88) la definición de erosión es: “Pérdida progresiva de material original de una superficie sólida debido a la interacción mecánica entre esa superficie y un fluido, un fluido multicomponente, o por el impacto de un líquido o partículas sólidas” [18].

Cuando se grafica la pérdida de peso de una muestra en función de la masa del erodente como en la figura 3.13, la erosión en el estado estacionario, es la pendiente de la relación de la línea recta que está dada como masa perdida por la unidad de masa de erodente [19].

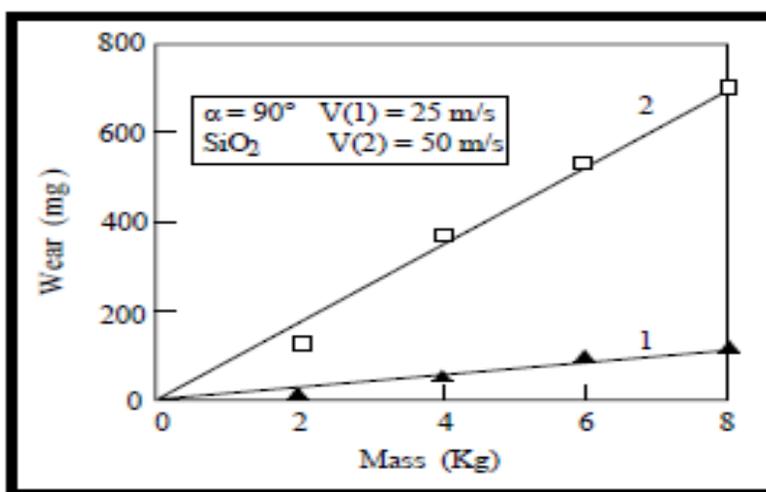


Figura 3.13 Erosión de un acero al carbono en función de la masa impactada.

La erosión de materiales metálicos es atribuida a dos tipos de daño. Uno es la remoción de material debido a la repetida deformación plástica y el otro es por la fuerza de corte. Estos procesos ocurren al mismo tiempo y la razón de cada contribución al daño total depende tanto del ángulo y la velocidad de impacto, así como las propiedades físicas y mecánicas de las partículas y del material impactado [20].

Una gran cantidad de factores han sido identificados en el fenómeno de erosión los cuales se clasifican en 3 principales categorías [21]. Las cuales son:

1.- Condiciones del flujo de fluido:

Ángulo de impacto, velocidad de la partícula, concentración de partículas en el fluido, rotación de la partícula, naturaleza del fluido y su temperatura.

2.- Propiedades de la partícula:

Tamaño, forma, dureza, fragilidad (resistencia a la fragmentación), densidad.

3.-Propiedades de la superficie:

Esfuerzos como función de la deformación; velocidad de deformación, temperatura, tenacidad a la fractura; dureza, nivel de esfuerzos y esfuerzos residuales, micro- estructura, topografía, ductilidad, fatiga y punto de fusión, entre otras. [21] [22] [23].

La pérdida de material debido a la erosión es dependiente de factores interrelacionados que incluyen las propiedades y la estructura de los materiales erosionados así como las condiciones del medio y las propiedades físicas y químicas de la partícula erosiva [24]. Por lo tanto la resistencia a la erosión no es una propiedad intrínseca del material, la resistencia a la erosión de un material depende del sistema tribológico en el que opere y es diferente para materiales frágiles y dúctiles. Muchos de los modelos y ecuaciones son

inadecuados para predecir la erosión en metales, cerámicos y compósitos de diferentes durezas cada uno [25]. Por ejemplo Meng y Ludema evaluaron un gran número de ecuaciones, de las cuales seleccionaron 28 para estudiarlas más a detalle. Éstas contenían 33 parámetros con un promedio de 5 parámetros por ecuación, los parámetros incluyen las características tanto de las partículas erosivas como las del material de estudio de erosión. A continuación se mencionan esos parámetros.

Como características de la partícula: Densidad, dureza, momento de inercia, redondez, masa promedio de partícula, tamaño, velocidad, velocidad de rebote, energía cinética.

Como características de la superficie del material: Densidad, dureza, esfuerzo de cedencia, módulo de Young, resistencia a la fractura, deformación crítica, profundidad de deformación, incremento de la deformación por impacto, conductividad térmica, temperatura de fusión, entalpía de fusión, esfuerzo por energía de deformación, resistencia a la erosión, capacidad calorífica, peso molecular del grano, parámetro de falla de Weibull, constante Lamé, diámetro de grano, ángulo de impacto, desgaste máximo, y energía cinética transferida de la partícula a la superficie.

La dureza resultó el parámetro más utilizado en los modelos matemáticos, pero insuficiente como una sola propiedad del material y no aplica para todos los sistemas de erosión [25].

### 3.3.1 Fuerzas involucradas

En el desgaste erosivo, diversas fuerzas pueden actuar en la partícula que está en contacto con la superficie. Las partículas vecinas pueden ejercer fuerzas de contacto y el flujo del fluido causa arrastre. En algunas condiciones la fuerza de gravedad puede tomar importancia, pero la fuerza dominante es la fuerza que desacelera la velocidad inicial del impacto de la partícula debido a la resistencia del flujo plástico del material de la superficie plana a ser penetrado, ésta es la fuerza de contacto ejercida por la superficie [16], ver figura 3.14.

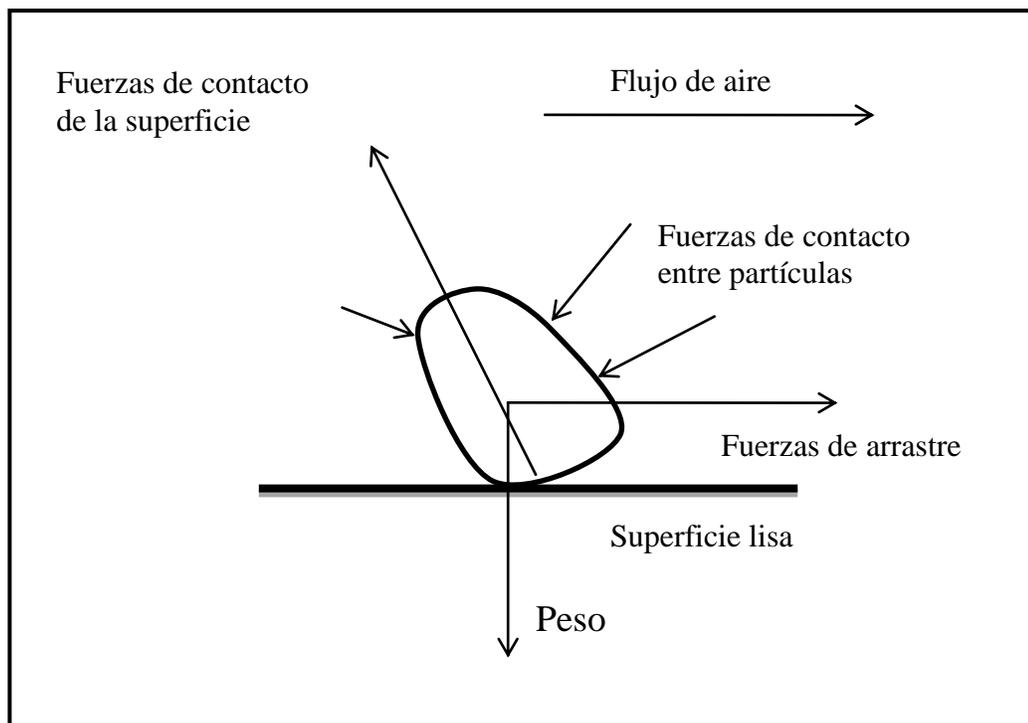


Figura 3.14 Representación de las fuerzas involucradas en el fenómeno de erosión.

### 3.3.2 Mecanismo

Se puede examinar el comportamiento de una partícula dura golpeando una superficie plana a un ángulo de  $90^\circ$  considerando a ésta como un material elastoplástico y a la partícula como un material completamente rígido (sin deformación) la única fuerza que se considera es la fuerza de contacto ejercida por la superficie. El flujo de material es totalmente plástico con una constante de indentación  $H$ . La figura 3.15 muestra el momento en que una partícula de cierta masa ( $m$ ) viajando a una determinada velocidad ( $V$ ) toca la superficie en un tiempo cero, a un tiempo mayor a cero la partícula experimenta una penetración sobre la superficie plana y a la vez una desaceleración debido a la resistencia del flujo plástico del material a ser penetrado, al llegar la partícula a su punto de reposo a un tiempo  $t=T$  ha penetrado una distancia " $x$ " y formando un área de contacto la cual está determinada por la forma o morfología de la partícula.

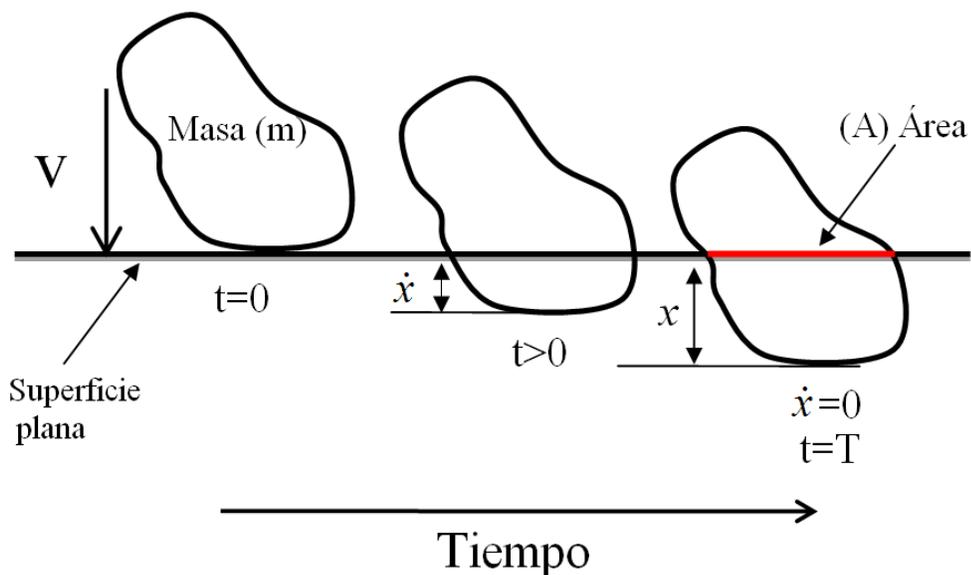


Figura 3.15 Representación de una partícula impactando a  $90^\circ$  una superficie plana.

La fuerza dominante que desacelera a la partícula será provocada por la presión del flujo plástico actuando sobre el área A y la ecuación de equilibrio de fuerzas queda expresada como:

$$m \left( \frac{dx^2}{dt^2} \right) = -HA \quad \text{Ecuación 3.1}$$

El trabajo realizado ejercido por la resistencia a ser penetrada de la superficie, será igual a la energía cinética inicial de la partícula. Esto puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$\int_0^x HAdx = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Y considerando la dureza como constante, el volumen del material desplazado será:

$$Vol = \frac{mv^2}{2H} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

El material desplazado de la indentación puede experimentar diversos destinos: 1) puede ser acomodado por deformación elástica del material lejos de la marca, 2) puede crear bordes por deformación plástica (labios) alrededor de la huella, o bien 3) puede ser removido como viruta dando lugar a la siguiente ecuación.

$$Masa_{removida} = k\rho \frac{mv^2}{2H} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material erosionado y el factor  $k$  representa la fracción de material que es removida. Esta ecuación predice que la erosión es inversamente proporcional a la dureza de la superficie, y el factor  $k$  es una medida de eficiencia del desprendimiento de la masa, el valor  $k$  toma el valor de 1 para el caso de que todo el material desplazado por la erosión fuera removido, los valores de  $k$  se encuentra dentro del intervalo de  $5 \times 10^{-3}$  a  $10^{-1}$  para los metales [16].

La masa total del material removido es la suma de los impactos de todas y cada una de las partículas erosivas sobre la superficie del material, así que la masa total removida es proporcional a la masa de las partículas erosivas que impactan en él, sugiriendo la siguiente ecuación de erosión "E":

$$E = \frac{\text{masa del material removido}}{\text{masa del erodente}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

### 3.3.3 Ángulo de impacto

Factores como la geometría de la deformación en los materiales debida al impacto de partículas duras depende de la velocidad, la forma y orientación de las partículas así como del ángulo de incidencia. En la erosión de los materiales dúctiles el ángulo de impacto es un factor que influye fuertemente en los resultados obtenidos. En la figura 3.16 se puede observar como el desgaste para materiales dúctiles (aluminio) muestra un máximo cuando los ángulos de impacto se encuentran entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$ , posteriormente para ángulos de impacto de  $90^\circ$  el desgaste se encuentra en valores de una tercera parte del máximo [16] [21].

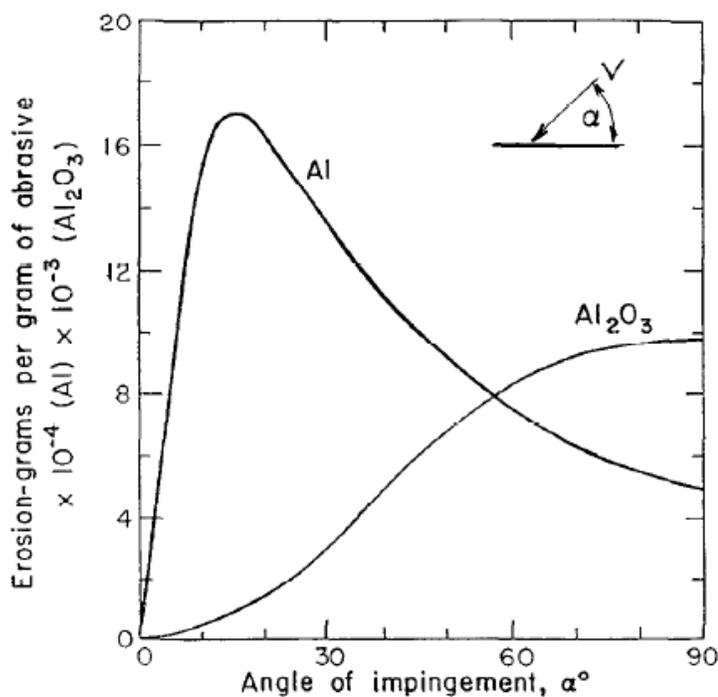


Figura 3.16 Comparación del índice de erosión del aluminio (material dúctil) y el óxido de aluminio (material frágil) utilizando como erodente SiC ( $127 \mu\text{m}$ ) a  $152\text{m s}^{-1}$ .

La figura 3.17 muestra los comportamientos analítico y experimental que encontró el investigador Finnie en materiales dúctiles. Para ángulos cercanos a la horizontal el material experimenta microcorte. Para ángulos mayores la superficie del material es deformada plásticamente dejando material acumulado (apilamiento) en los lados y hacia el frente de la partícula, la cual será desprendida por subsecuentes impactos. Se predice una curva del tipo  $\cos^2 \alpha$ , mostrada como curva 2 en la figura 3.17 [21].

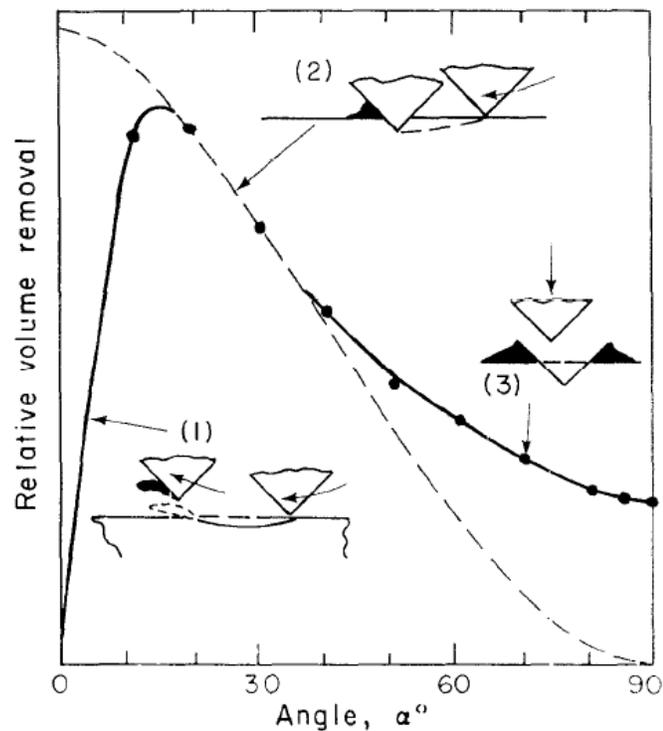


Figura 3.17 Mecanismos de desprendimiento de masa con respecto al ángulo de impacto. (1) Microcorte, (2) Apilamiento, (3) Indentación [21].

Cuando las partículas impactan a  $90^\circ$  éstas efectúan una indentación plástica alrededor de la zona de impacto creando un borde alrededor de la misma. El modelo analítico consideró una sola partícula sin remoción de material, los resultados experimentales difieren de este. Esto puede ser debido a que durante la erosión sólo los primeros impactos en la superficie serán a  $90^\circ$  posteriormente la deformación ocurrida por los impactos generará una

rugosidad en la superficie que lo conducirá que los próximos impactos se realicen a determinadas distribuciones de ángulos de impacto removiendo el material [21] [26].

El investigador Hutchings menciona tres tipos básicos de daños causados en metales por el impacto de partículas sólidas bajo un ángulo de incidencia de  $30^\circ$ . Los tres tipos de daños se encuentran ilustrados en la figura 3.18 donde la dirección de los impactos fue de izquierda a derecha [16].

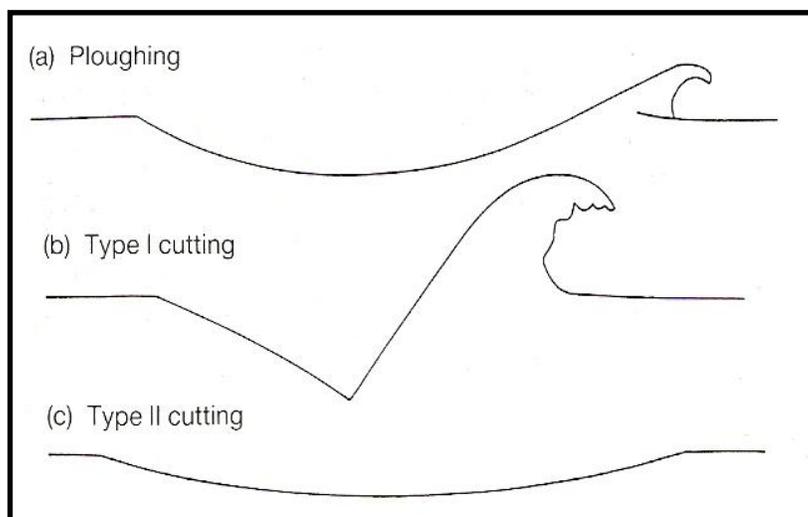


Figura 3.18 Típicas formas de corte en los sitios del impacto por partículas sólidas sobre un metal dúctil. (a) Arado, (b) Corte tipo I, (c) Corte tipo II.

Para partículas redondas, el desgaste ocasionado fue un arado en la superficie como se muestra en la figura 3.18 (a), el cual se caracterizó por desplazar el material hacia los lados y hacia el frente de la partícula. El material queda fuertemente deformado y futuros impactos de partículas en áreas cercanas, conducirán a la separación del material.

El tipo de daño causado por partículas angulares es dependiente de la orientación y de cómo es el giro de la partícula en el momento del impacto con

la superficie. En el caso del daño de corte I, mostrado en la figura 3.18 (b) las partículas impactadas giraron hacia delante, indentando la superficie y generando un acumulamiento de material el cual será vulnerable a desprenderse en futuros impactos. Por otra parte si la partícula gira hacia atrás al momento de impactarse, una acción de corte ocurrirá, desprendiendo el material de la superficie como es mostrado en la figura 3.18 (c).

La forma de las partículas influye en los patrones de deformación plástica alrededor de la indentación, por lo que respecta a las partículas redondeadas la deformación plástica localizada es menor y más impactos serán necesarios para remover los fragmentos de material de la superficie.

Un incremento en el ángulo de impacto tiene efectos similares. En un caso extremo donde partículas redondeadas se impactan contra una superficie a un ángulo de  $90^\circ$ , el material será removido por impactos vecinos, después de una serie de impactos que generan un ciclo de deformaciones plásticas. En la figura 3.19 (b) se puede apreciar una superficie de aluminio, la cual fue erosionada por partículas esféricas de vidrio a un ángulo de  $90^\circ$  y una velocidad de  $60 \text{ m s}^{-1}$  la erosión a ángulos bajos es mayor, aunado a esto si se utiliza una partícula angular el proceso será de corte como fue ilustrado en la figura 3.18 y dependerá en gran parte en el sentido de giro de la partícula antes y durante el impacto. Una superficie erosionada bajo este mecanismo puede verse en la figura 3.19 (a) donde partículas angulares de carburo de silicio fueron impactadas a un ángulo de  $30^\circ$  y a una velocidad de  $55 \text{ m s}^{-1}$  en acero de bajo carbono.

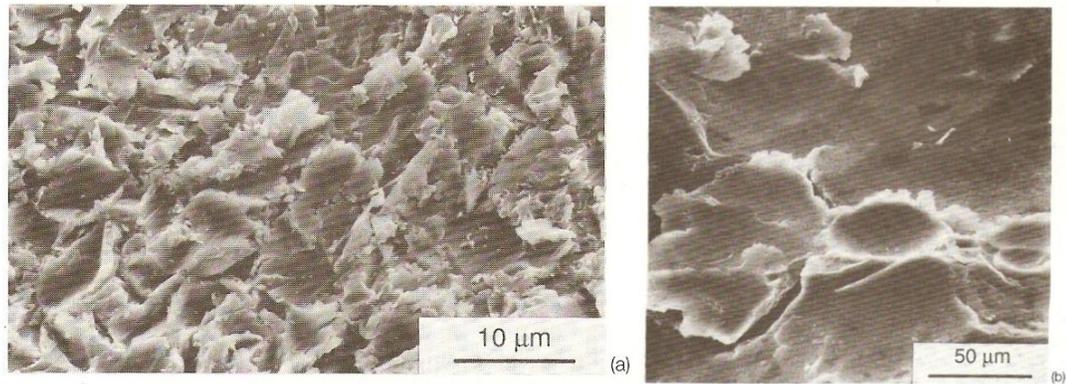


Figura 3.19 Superficies metálicas después de ser erosionadas. (a) Acero bajo carbono erosionado a  $30^\circ$  y  $55 \text{ m s}^{-1}$  con partículas angulares de carburo de silicio, (b) Aluminio erosionado a  $90^\circ$  por partículas esféricas de vidrio a  $60 \text{ m s}^{-1}$  [16].

Otros mecanismos han sido propuestos para la remoción de material debido al impacto a altos ángulos. Estos incluyen comportamiento frágil debido al endurecimiento por deformación, fatiga de bajos ciclos, efectos de temperatura debido a altas velocidades de deformación, desgaste por delaminación, y mecanismos de extrusión (surcado).

El mecanismo de formación de plaquetas [27] (platelet) en la erosión, difiere de los procesos de corte y surcado, los cuales fueron observados en impactos individuales tanto en partículas esféricas o angulares a ángulos bajos y es conocido que ocurren en erosión de múltiple impacto a estos ángulos. En estos procesos, el metal es removido de la superficie ya sea por un impacto o por un pequeño número de ellos, mientras que el material del cual las plaquetas son formadas a impacto normal son desprendidas de la superficie solo después de muchos ciclos de deformación plástica.

Levy [28] y sus colaboradores han indicado que es posible que el fenómeno de fatiga a bajo ciclo pueda ser responsable de la fisuración sub-superficial a altos ángulos de impacto. Este tipo de fractura sería causado principalmente por la componente normal alternante de la fuerza que actúa en la superficie la cual

puede causar en el material deformaciones plásticas compresivas y tensiles. La fisuración comenzaría probablemente más rápida y severamente en la zona plástica. Una vez que las fisuras se han comenzado a formar, la propagación causaría conexión de micro-fisuras y el material se fragmentaría [29].

Otra explicación para la fisuración sub-superficial está dada por investigadores en desgaste deslizante. En la teoría de la delaminación [28] [29] se cree que hay una capa reblandecida por trabajo causada por el proceso de desgaste debido a que las dislocaciones cerca de la superficie son capaces de alcanzar la superficie libre sin causar enmarañamiento o endurecimiento por trabajado. Sin embargo a cierta profundidad debajo de la superficie las dislocaciones ya no son capaces de moverse a la superficie y en lugar de eso se enmarañan y entonces no transmiten la energía del proceso de desgaste hacia fuera de la superficie o dentro del material. A esta profundidad los esfuerzos se incrementan y son eventualmente capaces de nuclear fisuras, especialmente en las interfases entre las partículas incoherentes de segunda fase y la matriz. Es posible que esta explicación pudiera también aplicarse a la erosión por partículas sólidas donde las velocidades de deformación son mucho más grandes que la mayoría de los procesos de desgaste. Sin embargo, la alta concentración de dislocaciones debajo de la superficie han sido asociados con impactos individuales y con condiciones de cavitación-erosión.

Naim y Bahadur [29] investigaron la pérdida de peso debido a la erosión después de impactos normales repetitivos en el mismo lugar. Ellos indicaron que el esfuerzo residual tensil causa nucleación de huecos y que eventualmente la propagación de fisuras en el sustrato conduce a la decohesión de una partícula de la región del cráter.

### 3.3.4 Propiedades de la partícula

#### 3.3.4.1 Dureza

La dureza es una de las propiedades esenciales de la partícula en relación a la cantidad de desgaste efectuado. Partículas con mayor dureza a la de la superficie a impactar causarán mayor desgaste que aquellas partículas con menor dureza que la superficie [16].

Este comportamiento es mostrado en la figura 3.20 donde las magnitudes de desgaste de metales y cerámicos para el sistema de abrasión de dos cuerpos empiezan a ser mucho mayores cuando la relación de la dureza de la partícula  $H_a$  y la dureza de la superficie  $H_s$  a impactar es mayor a 1.

El comportamiento se puede explicar con el estudio de la mecánica de contacto entre la partícula y una superficie plana. Si la superficie del material fluye plásticamente una vez que su punto de cedencia es excedido, ocurrirá un flujo plástico en la superficie cuando la presión de contacto alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial ( $3Y$ ) [8]. La deformación ocurrirá si la carga normal de la partícula es incrementada y solo si la partícula puede sostener la presión de contacto sin deformarse. Si la partícula falla por flujo plástico o fractura frágil antes de que la presión sobre la superficie alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial ( $3Y$ ) ocurrirá una insignificante deformación plástica en la superficie.

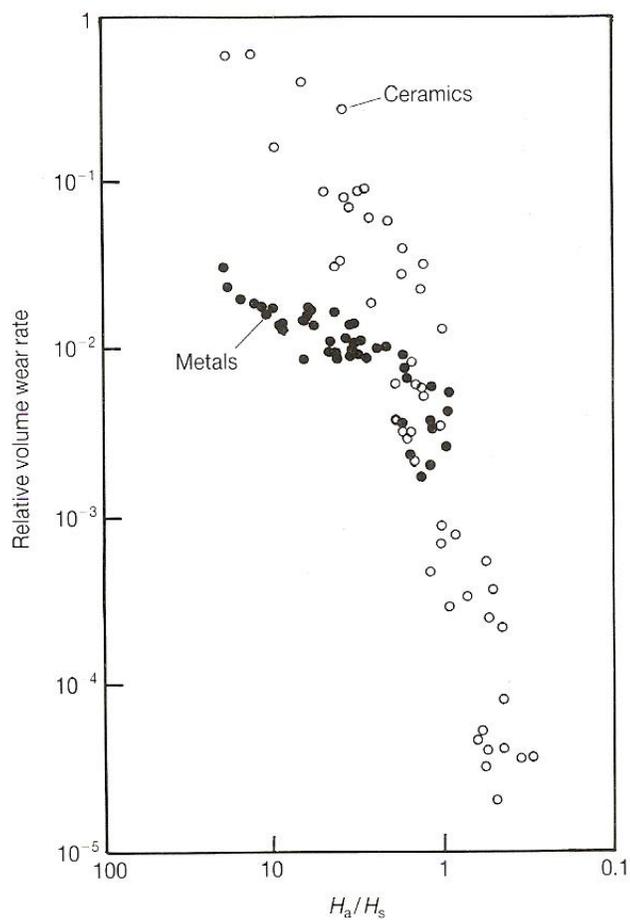


Figura 3.20 Volumen relativo de desgaste utilizando partículas cerámicas y metálicas para un sistema de desgaste de abrasión de dos cuerpos [16].

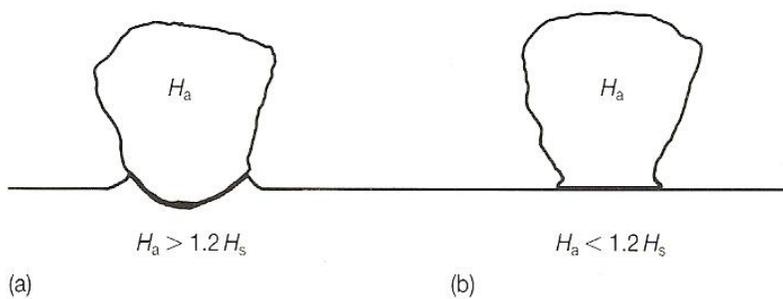


Figura 3.21 Ilustración del contacto entre una partícula y la superficie plana de un material bajo carga normal. (a)  $H_a > 1.2 H_s$  la partícula causará indentación, (b)  $H_a < 1.2 H_s$  ocurrirá deformación plástica en la partícula [16].

Para partículas esféricas presionadas contra la superficie, la presión de contacto máximo es alrededor de 0.8 veces la dureza de indentación. Podemos esperar que una partícula esférica con dureza  $H_a$  cause indentación plástica en una superficie de dureza  $H_s$  si  $H_a$  es menor a 0.8  $H_s$  esto es si  $H_a/H_s > 1.25$  figura para una relación  $H_a/H_s < 1.25$  la partícula será deformada plásticamente.

En la tabla 3.1 se muestran los valores típicos de dureza para diferentes materiales. La sílica es el abrasivo más común, formando cerca del 60% de la corteza terrestre, teniendo una dureza de alrededor de 800kg/mm (800HV). Por otra parte el acero martensítico puede llegar a tener una dureza menor a 1.25 veces la dureza de la sílica.

Tabla 3.1 Durezas Vickers típicas de distintos materiales abrasivos [16].

<b>Materiales abrasivos típicos</b>	<b>Dureza (HV)</b>
Diamante	6000-10000
Carburo de boro $B_4C$	2700-3700
Carburo de silicio	2100-2600
Alúmina (corindón)	1800-2000
Cuarzo (sílica)	750-1200
Garnets	600-1000
Magnetita ( $Fe_3O_4$ )	370-600
Vidrio	500
Flourita ( $CaF_2$ )	180-190

El efecto de la dureza relativa de la partícula abrasiva y de la superficie en su condición de endurecimiento por deformación es un factor importante. Los resultados generalmente confirman la predicción clásica de Tabor que un decremento en la eficiencia de corte ocurre cuando la dureza del abrasivo es menor que 1.2 veces la dureza de la superficie [21].

### 3.3.4.2 Forma de la partícula

El desgaste depende fuertemente de la forma de la partícula. Las partículas angulares causan mayor desgaste que partículas redondeadas. Las tres formas en las que pueden ser representadas las partículas erosivas son mostradas en la figura 3.22.



Figura 3.22 Clasificación AFS de la forma de la partícula.  
(Izquierda) angular, (centro) sub-angular, (derecha) redonda.

Un método para obtener la forma de la partícula es el factor de redondez, este puede ser definido como el área real de proyección  $A$  y el área de un círculo con el mismo perímetro.

$$\text{Factor de redondez} \quad F = \frac{4\pi A}{P^2} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Si  $F$  tiende a 1 la proyección es un círculo; a medida que se aleja de este valor tenderá a ser una partícula angular.

Levy llevó a cabo pruebas de erosión en aceros AISI 1020 impactando partículas angulares y esféricas a un ángulo de  $30^\circ$  a temperatura ambiente, encontró que los valores de erosión fueron 4 veces mayores con partículas angulares. Las partículas angulares causarán cráteres más profundos por lo cual se formarán bordes más grandes a diferencia de partículas redondas que produjeron cráteres redondeados y menos profundos [24].

### 3.3.4.3 Tamaño de partícula

Existen diferentes patrones de comportamiento en el desgaste por partículas sólidas tanto en abrasión como en erosión de materiales dúctiles donde está involucrado el tamaño de las partículas. Iain Finnie [15] [29] encontró que el desgaste es menor cuando el tamaño de las partículas es menor a  $100\ \mu\text{m}$ .

La figura 3.23 muestra los resultados obtenidos, donde partículas de  $10\ \mu\text{m}$  causan alrededor de una cuarta parte del desgaste que causan las partículas de  $100\ \mu\text{m}$ .

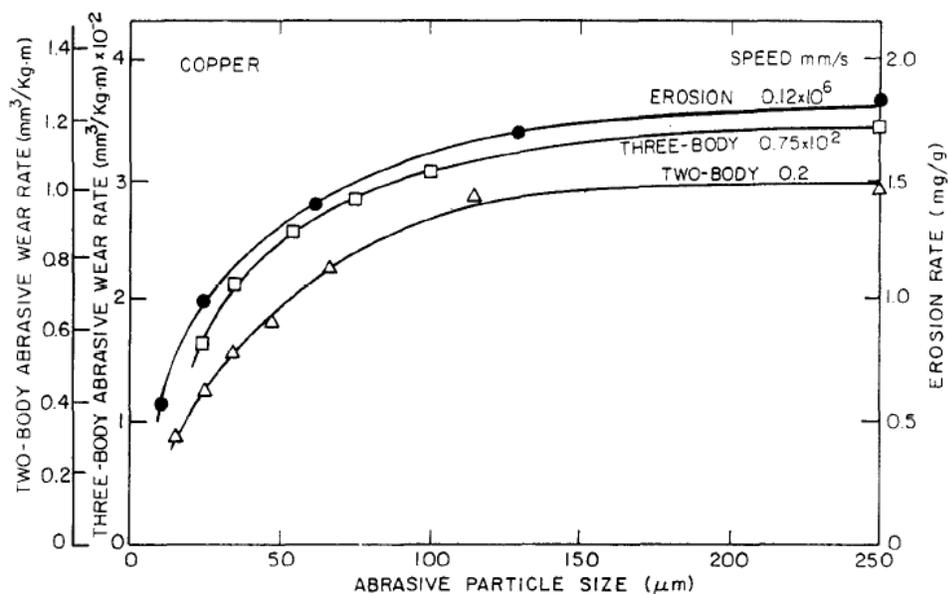


Figura 3.23 Desgaste en función del tamaño de la partícula. Desgaste de cobre por partículas de SiC bajo los sistemas (masa perdida / masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos (volumen removido / carga x distancia) [21].

Para materiales frágiles el desgaste involucra fractura frágil y existe una fuerte dependencia con el tamaño de partículas, llegándose a presentar incluso comportamientos dúctiles en el material. Cualquiera que sea el mecanismo dominante, las partículas pequeñas causan menor desgaste.

### 3.3.5 La dureza de la superficie

El incremento en la dureza de un material no tiene efecto o tiene efecto negativo en su relación a la resistencia a la erosión. La ecuación de la erosión (3.4) predice una erosión inversamente proporcional a la dureza de la superficie del material. Finnie [15] [29] encontró en sus experimentos que al elevar la dureza de un material sometido al desgaste, se incrementaba su resistencia al desgaste por abrasión o deslizamiento, pero no aplicaba para materiales bajo el mecanismo de erosión, encontrando solamente esta relación para metales puros en estado de recocido. (Siendo la excepción molibdeno y tungsteno).

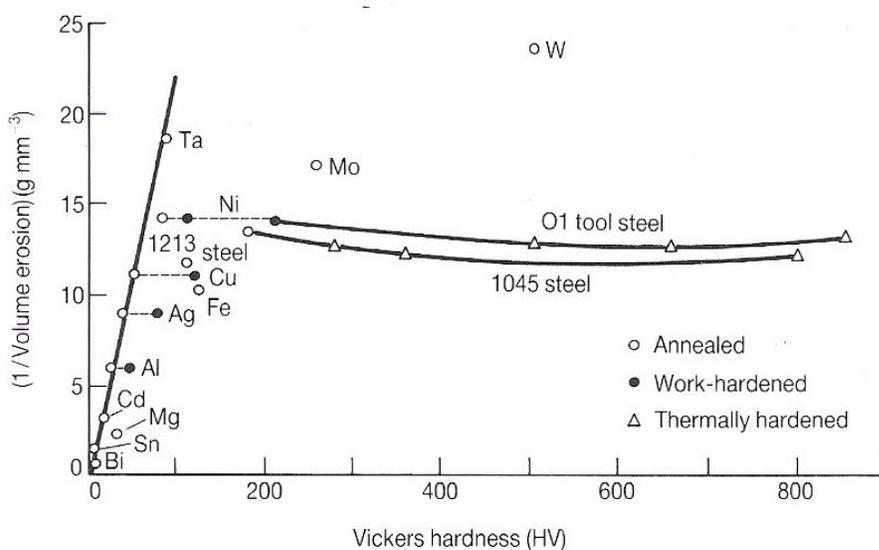


Figura 3.24 Dependencia de la resistencia a la erosión (1/volumen de erosión en mm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>) en metales puros y aceros de diferentes dureza y tratamientos térmicos.

Por otra parte, Ambrosini L. y Bahadur S. [29] [30] encontraron que la erosión tiende a incrementarse con un incremento en la dureza o resistencia tensil y decrece con el aumento de la ductilidad. Consecuentemente la relación entre la dureza y la resistencia a la erosión necesita ser clarificada. Levy y Jahanmir [23] [29] concluyeron que es la ductilidad del acero (SAE 1075), más que la dureza, la que gobierna la cantidad de erosión. Un revés al hallazgo de que la ductilidad mejora la resistencia a la erosión ha sido observado y reportado por Foley y Levy [29] [31]. Parece haber un límite en el cual puede ser tratada el descenso de resistencia por ductilidad en ganancia en resistencia a la erosión. McCabe y Sargent [23] [29] mencionan que Finnie y coautores mostraron que el trabajo en frío previo a la erosión no tiene efecto en la resistencia a la erosión de los materiales dúctiles, lo cual los conduce a concluir que la dureza Vickers no puede ser usada para estimar la resistencia a la erosión. De hecho, fue encontrado por Sheldon y Kanhere [29] [32] que el aluminio 6061 trabajado en frío se erosiona más rápido que el aluminio recocido de la misma composición arriba de una velocidad crítica de impacto.

C.K. Fang y T. Chiang [29] [33] muestran los resultados de pérdida de volumen contra ángulo de ataque para 5 materiales, ver Tabla 3.2. Las condiciones experimentales fueron: temperatura ambiente, 80% humedad relativa, SiC malla 24.

Tabla 3.2 Composición química de los metales evaluados.

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mg	Fe	Al	Zn
Acero AISI 430	0.11	0.89	0.88	-	-	17.85	-	Resto	-	-
Acero AISI 304	0.08	0.94	1.22	-	8.41	18.14		Resto	-	-
ARC- TEN	0.12	0.42	0.45	0.46	0.85	0.61	-	Resto	-	-
Latón	-	-	-	70.4	-	-	-	0.08	-	Resto
Al 6063	-	0.45	0.07	0.08	-	0.06	0.75	0.29	Resto	-

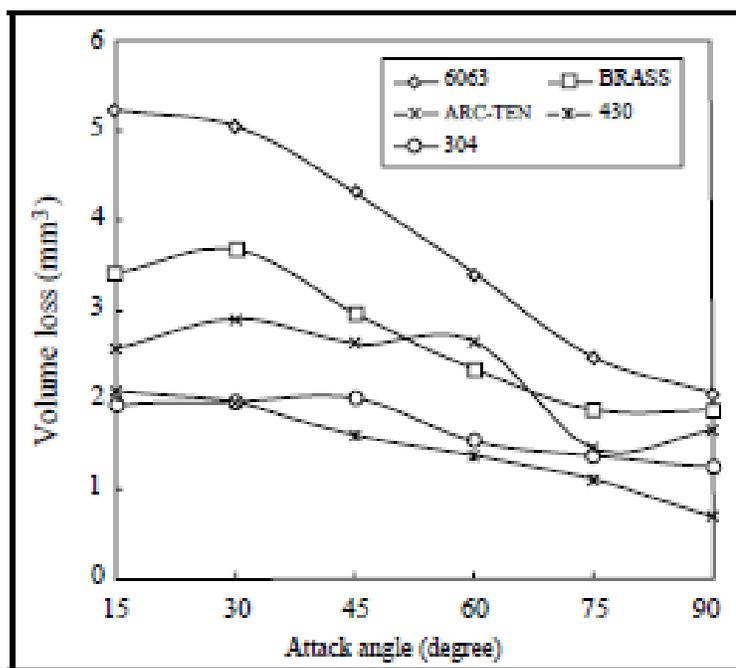


Figura 3.25 Pérdida de volumen contra ángulo de ataque para 5 materiales [33].

En la figura 3.26 se ilustra la naturaleza de la deformación sub-superficial por debajo de la partícula impactante, se ilustra para un material que se endurece por deformación, para uno perfectamente plástico y uno endurecible-reblandecible por deformación [22] [29]. En el caso de la partícula que impacta un material que tiene una gran capacidad positiva de endurecimiento por deformación ( $d\sigma/d\varepsilon > 0$ ,  $\sigma$ : esfuerzo;  $\varepsilon$ : deformación plástica verdadera) la deformación plástica por debajo de la partícula se esparce sobre un gran volumen, como se ilustra en la figura 3.26 (a) debido a que es energéticamente favorable. En contraste, si la partícula impacta un material el cual no tiene la capacidad de endurecerse por deformación, ( $d\sigma/d\varepsilon = 0$ ), la deformación por debajo de la partícula está inmediatamente localizada en las capas adyacentes a la superficie conduciendo a la formación de un labio como se muestra en la figura 3.26 (b). La figura 3.26 (c) representa un caso más realista donde el material exhibe una capacidad de endurecimiento por deformación a bajas deformaciones, pero un comportamiento de reblandecimiento por deformación a

deformaciones más altas. El incremento de temperatura en el material causada por deformación plástica a las altas velocidades relacionadas con la erosión, es responsable de éste comportamiento esfuerzo-deformación. Bajo tal condición el material se deforma homogéneamente hasta una deformación crítica en la cual  $d\sigma/d\varepsilon=0$ . A deformaciones mayores que esta deformación crítica,  $d\sigma/d\varepsilon < 0$ , y a partir de aquí la deformación plástica se localiza para formar un labio, como se muestra en la figura 3.26 (c). La deformación crítica entonces representa la deformación más allá de la cual la formación de labio se promueve, inducida por la localización de deformación plástica.

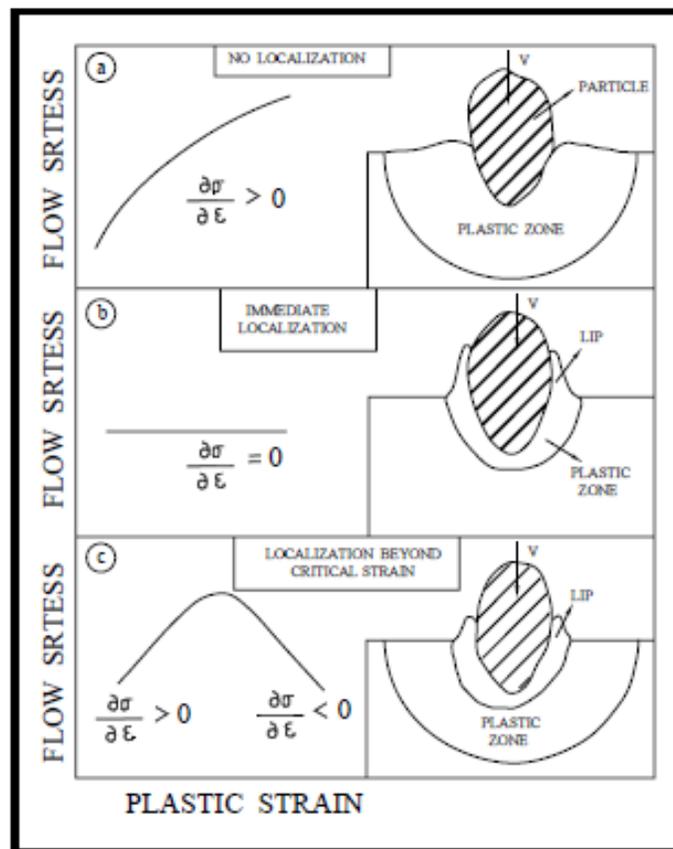


Figura 3.26 Ilustración de la influencia de la capacidad de endurecimiento por deformación de una material en su localización durante el impacto de una partícula [21].

El análisis del balance de energía durante el impacto indica que al menos 90% de la energía cinética inicial de la partícula es disipada en deformación plástica del material usado como blanco [27] [29]. La figura 3.27 ilustra como la energía cinética inicial de una partícula erosiva con impacto normal sobre una superficie plana es distribuida de determinadas formas, la energía cinética del rebote de la partícula impactante es estimada a partir de los coeficientes de restitución y se encuentra entre el 1 y el 10% de la energía cinética inicial de la partícula antes del impacto, la energía cedida hacia el material blanco en forma ondas elásticas puede ser estimada teóricamente.

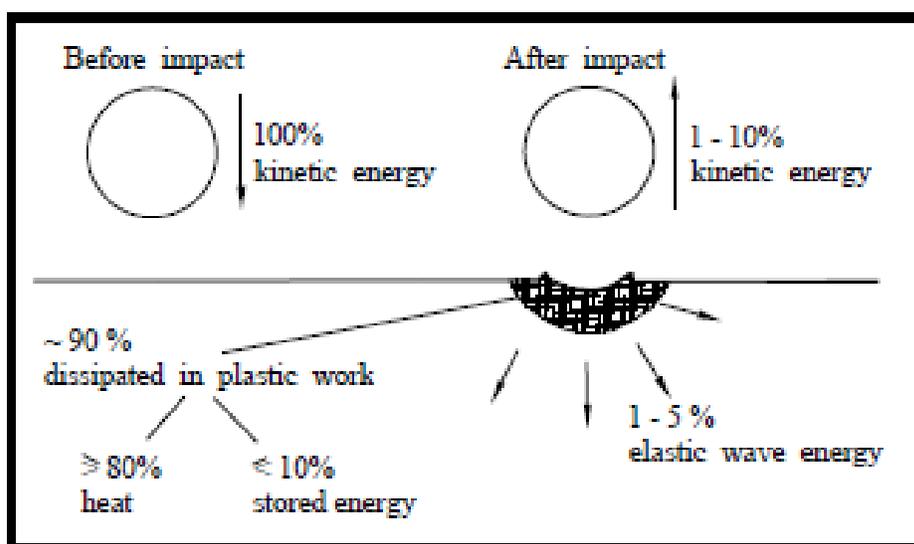


Figura 3.27 Balance de energías antes y después del impacto normal de una partícula erosiva esférica [27].

### 3.3.6 Desgaste erosivo por fractura frágil

Los metales estos exhiben un comportamiento frágil al incrementar su dureza. Cuando el impacto de partículas genera fractura frágil, el material es removido por la formación, propagación e intersección de grietas en la sub-superficie del material impactado propagándose hasta la superficie. En este mecanismo se tiene una insignificante contribución a los mecanismos asociados con el flujo plástico.

El modelo de Fisuración Hertziana bajo un indentador esférico fue el primero en utilizarse a finales de los 70's. La secuencia del mecanismo frágil es mostrada en la figura 3.28, para el punto inicial de contacto ocurren esfuerzos muy altos que serán relevados por el flujo plástico local. La zona deformada es identificada por la letra D Cuando la carga del indentador se incrementa a valores críticos los esfuerzos tensiles son desahogados en el plano vertical por la deformación de la grieta radial (M) Mayores incrementos de carga serán acompañados por la extensión progresiva de la grieta radial. Al disminuir la carga ejercida por el indentador la grieta radial (M) se cerrará. Mayores disminuciones de carga serán acompañadas de la formación de las grietas laterales (L) la formación de grietas laterales es conducida por los esfuerzos elásticos residuales causados por la relajación del material deformado a lo largo de la región de contacto. Cuando la carga es removida completamente las grietas laterales ascienden hacia la superficie conllevando al desprendimiento del material. Por lo tanto el volumen removido será proporcional al cuasi-cilindro generado por la grieta lateral (L) y la profundidad de la grieta radial (M) [16].

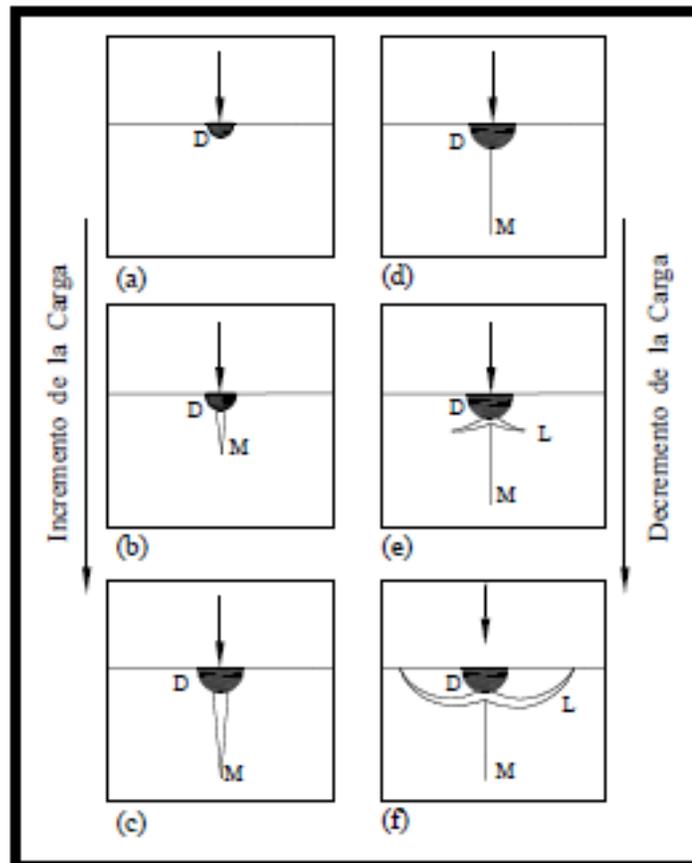


Figura 3.28 Secuencia de la fractura frágil.

Este mecanismo puede asimilarse al de erosión principalmente cuando el material es homogéneo y frágil y las partículas erosivas son lo suficientemente duras y angulares [16].

Los modelos propuestos para el mecanismo de fractura frágil han sido principalmente para ángulos de incidencia normales a la superficie, considerando que el componente normal de la velocidad puede ser usado para superficies erosionadas a ángulos oblicuos. A diferencia de los modelos propuestos para deformación plástica, los modelos de fractura frágil consideran a la tenacidad como la propiedad más importante del material a erosionar, así como el tamaño, densidad y velocidad de la partícula como los factores

esenciales en la energía cinética que determinará la cantidad de material removido [16] [21] [34].

Modelos como el realizado por Wiederhom predicen la erosión como:

$$\frac{E}{p} \propto r^{0.7} U^{2.4} \frac{\sigma^{0.2} H^{0.1}}{K_c^{1.3}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Algunas de las consideraciones que propone el modelo son que la erosión ( $E/p$  volumen removido por masa unitaria) estará en función del tamaño de la partícula “ $r$ ”, la velocidad así como la tenacidad del material a impactar ( $K_c$ ) [16].

La figura 3.29 muestra los resultados experimentales de erosión para un grupo de materiales frágiles graficados contra la ecuación 3.7 en el caso de materiales como el MgO el desprendimiento se dio en las fronteras de grano y no formó grietas laterales.

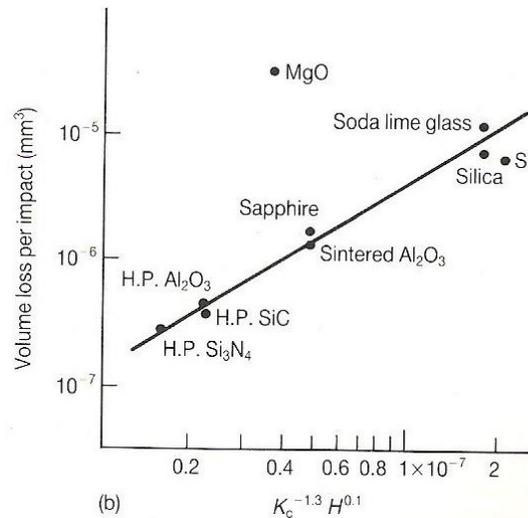


Figura 3.29 Erosión en materiales frágiles. Comparación de datos experimentales con el modelo analítico [16].

### 3.3.7 Transición dúctil-frágil

Se ha considerado que el ángulo de impacto juega un papel importante, pero este comportamiento depende de las condiciones de impacto presentadas en el sistema [17]. A continuación serán descritos los factores que conducen a un cambio de mecanismo en la erosión.

Los materiales dúctiles al incrementarles su dureza muestran un comportamiento aparentemente frágil. Aleaciones de alta dureza y baja ductilidad muestran su máximo intervalo de erosión a ángulos normales de impacto.

Guilden llevó a cabo pruebas en el acero AISI 52100 con cuatro diferentes tratamientos térmicos, en donde el acero con la mayor ductilidad y la más baja dureza (30 HRC) mostró un comportamiento dúctil, mientras que para el acero con alto valor de dureza (martensita sin revenir) mostró un comportamiento aparentemente frágil.

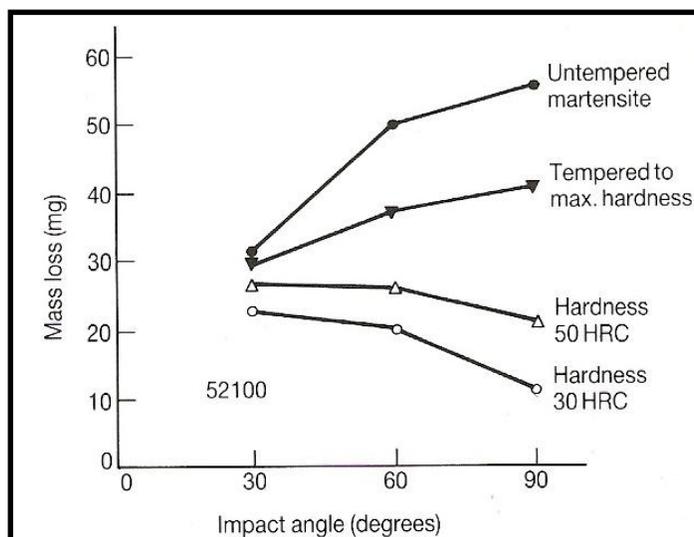


Figura 3.30 Transición dúctil frágil en el acero AISI 52100 (1% C, 1.5% Cr) con diferentes tratamientos térmicos en función del ángulo de impacto. (Erodente arena sílica a 153 m/s).

Los casos en los que se puede presentar principalmente un mecanismo de transición dúctil-frágil, es principalmente modificando la energía cinética de la partícula ya que al utilizar energías bajas, la fuerza de impacto con la que se golpeará la superficie será mínima lo que producirá que la grieta radial no sea lograda, alcanzando sólo a producir una micro-deformación. Los principales factores que modifican la energía cinética de la partícula son, su tamaño, densidad y velocidad. Materiales frágiles como cerámicos, vidrios y algunos polímeros muestran un comportamiento dúctil cuando son impactados con partículas muy pequeñas, debido a que el material es removido por micro-deformación plástica.

Finnie realizó un estudio de las erosiones en probetas de vidrio causadas por partículas de carburo de silicio en tamaños de 9, 21 y 127  $\mu\text{m}$ . La prueba fue realizada a ángulos de impacto de 0 a 90° y a una velocidad de partícula de 136  $\text{m s}^{-1}$  [17] [21].

La figura 3.31 muestra los valores de erosión de vidrio para cada una de los tamaños de partícula utilizados. Para el caso de las pruebas realizadas por el tamaño de 9  $\mu\text{m}$  se aprecia un comportamiento dúctil este mecanismo es debido a que el tamaño de la partícula contribuye en menor cantidad al valor de energía cinética causando que la energía de impacto en la superficie no produzca la grieta radial y sólo sea micro-deformación plástica. Debido a esto, los valores de erosión para esta condición se encuentran en el orden de  $10^{-4}$  mientras que los resultados encontrados por las pruebas donde se utilizaron los tamaños de partículas de 21 y 127  $\mu\text{m}$  presentaron una erosión del orden  $10^{-3}$  y  $10^{-2}$  respectivamente. Para el caso de los tamaños de partícula de 21 y 127  $\mu\text{m}$  la energía lograda fue suficiente para generar la grieta radial y lateral, propiciando así el desprendimiento de material.

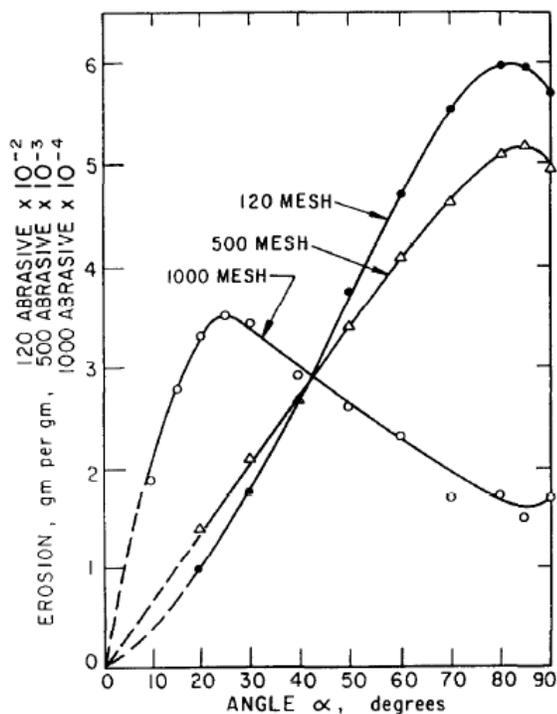


Figura 3.31 Comportamiento dúctil-frágil en la erosión de vidrio en función del ángulo de impacto. Erosionado con partículas de SiC de 127  $\mu\text{m}$  (malla 120), 21  $\mu\text{m}$  (malla 500) y 9  $\mu\text{m}$  (malla 1000).

### 3.3.8 Erosión en recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma

R.C. Barik, J.A. Wharton junto con otros investigadores [35]. Realizaron pruebas erosivas en un recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma de 100  $\mu\text{m}$  de espesor de la aleación de aluminio 6082, la erosión la realizaron con la prueba de choque de lodos utilizando partículas subangulares de arena en el rango de tamaño de 135 y 235  $\mu\text{m}$  y utilizando velocidades en el rango de 3 a 28  $\text{m s}^{-1}$  con energía cinética de ( $E_k = 0.016$  a 7.1  $\mu\text{J}$ ). En la Tabla 3.3 se pueden apreciar las condiciones experimentales de la prueba erosiva.

Tabla 3.3 Condiciones experimentales de la prueba por choque de lodos.

Velocidad del chorro (m s <sup>-1</sup> )	Tamaño de partícula (μm)	Energía cinética del erodente (μJ)	Concentración de arena (wt%)	Duración de la prueba (s)
28	235	7.1	2.1	120
16.5	135	0.46	2.1	1200
6	135	0.069	3.5	18,000
3	135	0.016	5.0	18,000

Para obtener la energía cinética ( $E_k$ ) y la pérdida volumétrica ( $V_u$ ) utilizaron los siguientes principios matemáticos.

$$E_k = \frac{1}{12} \rho_p \pi d^3 U_p^2 \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde  $\rho_p$  es la densidad del erodente y  $U_p$  es la velocidad del flujo en la boquilla.

$$V_u = M \pi d^3 / 6_p Q_v t C_t \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde  $M$  es la masa perdida,  $d$  es el diámetro principal del tamaño de la arena,  $\rho$  es la densidad del recubrimiento,  $Q_v$  es el flujo de los lodos,  $C_v$  es la fracción volumétrica de la arena y  $t$  es la duración de la prueba.

En la Tabla 3.4 se muestran los valores de erosión (masa y volumen perdidos) de los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma así como únicamente la

aleación de aluminio 6082. En la figura 3.32 se muestran micrografías de las huellas de erosión.

Tabla 3.4 Valores de erosión bajo la prueba de choque de lodos (agua y arena) para recubrimientos OEP y aleación de aluminio 6082.

Material/recubrimiento	Velocidad del chorro ( $\text{m s}^{-1}$ )	Energía cinética ( $\mu\text{J}$ )	Masa perdida (mg)	Volumen perdido ( $\mu\text{m}^3$ )
Recubrimiento OEP Al203	16.5	0.46	6.9	0.513
Recubrimiento OEP Al203	28.0	7.1	30.4	74.5
Aleación 6082	16.5	0.46	27.5	2.8
Aleación 6082	28	7.1	37.4	125

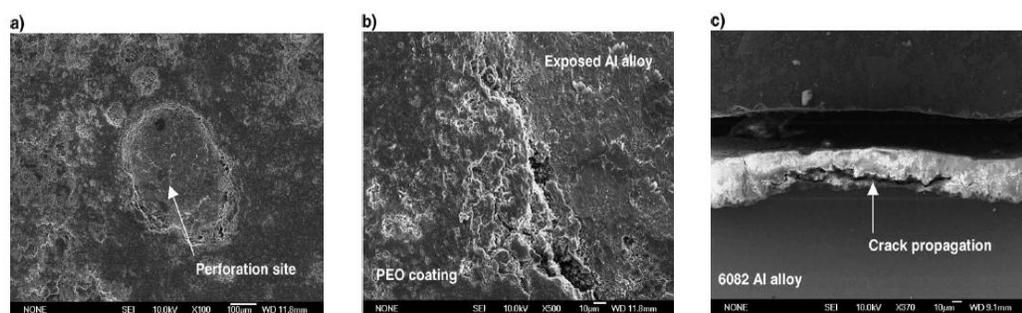


Figura 3.32 Micrografías MEB de los recubrimientos OEP después de la erosión (a) Huella de erosión en la superficie, (b) Borde de la huella erosión (c) Sección transversal de una huella de erosión.

## **CAPITULO 4**

### **MÉTODO DE DOBLE DISCO**

La velocidad de la partícula impactante es la variable más importante en la erosión, por lo tanto es necesario determinar la velocidad de las partículas en las pruebas que se lleven a cabo. Existen métodos para medir la velocidad de partícula erodente la ASTM G76 [40], recomienda tres tipos:

1. Fotografía de alta velocidad.
2. Velocímetro láser doppler.
3. Método de doble disco.

En el presente capítulo sólo se describe método de doble disco ya que será éste el empleado para medir la velocidad de la partícula erosiva en la presente tesis.

El método de doble disco consiste en una máquina que tiene una flecha o eje rotatorio en el que están montados dos discos separados una determinada distancia [16], ver figura 4.1. El disco superior tiene un orificio o ranura por la cual atravesarán las partículas erosivas para generar dos huellas en el disco inferior. Inicialmente se realiza una huella en estado de reposo del doble disco posicionando la ranura u orificio del disco superior a la salida de la boquilla. Después se hace revolucionar al doble disco a una velocidad angular constante para generar una segunda huella desfasada a la realizada en estado de reposo, esto se logra con las partículas erosivas que atraviesan por el orificio o ranura del disco superior. La huella de erosión desfasada con respecto a la primera huella proporciona una longitud de arco "S". Así que la velocidad de la partícula puede ser calculada a partir de la ecuación 4.1 con los datos de la velocidad de rotación de los discos, la distancia de separación, el radio desde el eje de giro hasta las huellas de erosión, y el arco "S". Este método es simple y ampliamente usado y el margen de error de este método es de alrededor de +/- 10% [16]. En la figura 4.1 se muestra un ensamble de doble disco empleado por Alan V. Levy [24].

$$V_p = \frac{2\pi RvL}{S} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

$V_p$ = Velocidad de partícula

$\pi$ = Constante de valor 3.1416

$R$ = Radio desde el eje hasta las huellas de erosión

$V$ = Velocidad rotacional

$L$ =Distancia de separación entre discos

$S$ = Arco entre huellas de erosión

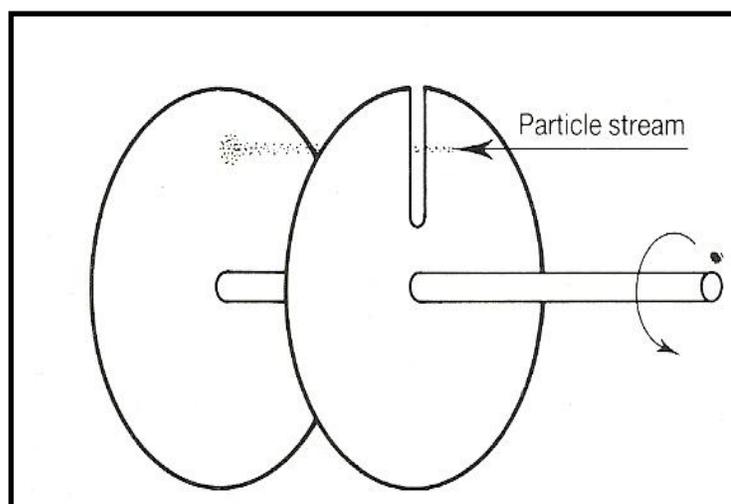


Figura 4.1 Ilustración esquemática del método de doble disco para la medición de partícula erosiva [16].

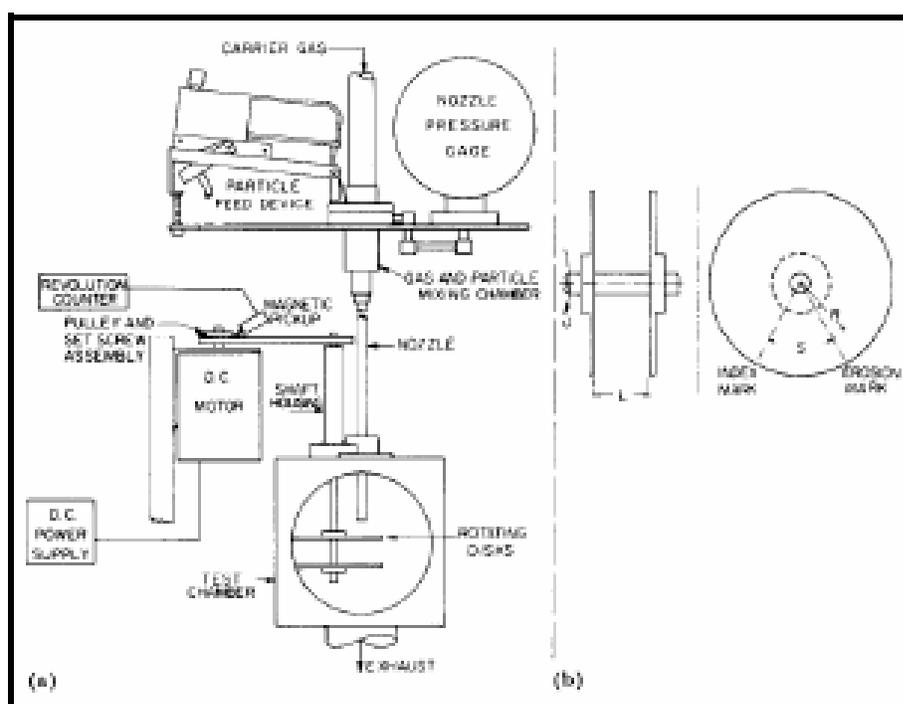


Figura 4.2 (a) Representación esquemática de la máquina de erosión integrado en ella el doble disco; (b) Las variables que intervienen para la medición de la velocidad de la partícula son: L: separación de discos; S: longitud de arco entre las marcas de erosión; R: radio a la distancia del arco; v: velocidad angular (rev/s); Velocidad de partícula  $(V_p) = 2\pi RvL / S$  [24].

Stevenson y Hutchings [37] realizaron experimentos comparativos de mediciones de velocidad de partícula usando el método de doble disco y un método óptico-electrónico. En el método de doble disco utilizaron las siguientes variables:

Diámetro de la boquilla: 4.9mm, 308 mm largo, 0.25  $\mu\text{m}$  de Ra. (Rugosidad promedio) Doble disco: diámetro de disco: 100mm, separación de 20.5 mm, a 11,220 rev/s.

El giro de los discos genera algo de turbulencia en el flujo de aire y esto puede conducir a un error sistemático en las mediciones de velocidad el cual es significativo para partículas inferiores a 100  $\mu\text{m}$  [37]. Los autores hacen una comparación de las velocidades determinadas por ambos métodos, variando la presión, así como el tamaño de partícula de arena sílica (125-150  $\mu\text{m}$ , 425-500  $\mu\text{m}$  y 600-700  $\mu\text{m}$ ). En todos los casos hubo buena concordancia entre los 85 resultados de los dos métodos, estando dentro del 5% sobre el intervalo de 17 a 85 m/s, aunque hubo una tendencia del doble disco a dar velocidades más altas que el método óptico-electrónico. Este error sistemático no fue mayor al 3%. En la figura 4.3 se reportan resultados de la velocidad de partícula para diferentes tamaños de arena sílica, los cuales se muestran en la figura 4.3.

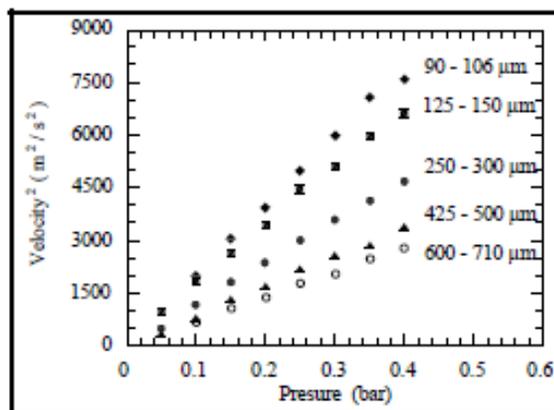


Figura 4.3 Velocidad de la partícula en función de la presión de arrastre para un intervalo de tamaños de arena sílica. La boquilla usada fue de 308mm de longitud y diámetro de 4.9mm [37].

P.J. Slikkerveer [38] en sus experimentos erosivos realizan comparaciones de la velocidad de la partícula por los métodos de doble disco y LDA (Laser Doppler Anemometer). Ellos utilizaron alúmina con tamaño de partícula en el intervalo de 9 a 200  $\mu\text{m}$ . La técnica del doble disco registró valores 15% más bajos que la técnica de LDA. Los autores atribuyen este efecto a la diferencia en los métodos de medición. La técnica LDA mide la velocidad de partículas individuales y calcula a partir de esto el número promediado de la velocidad. En la técnica doble disco, la distancia entre las dos marcas es medida. Debido a que las partículas más pesadas contienen mayor energía cinética, ellas dejarán una marca más fuerte que las más rápidas, pero más ligeras. Entonces el método de doble disco mide una menor velocidad promedio por la ponderación de las partículas masivas.

## **CAPITULO 5**

# **MOLDEO EN CAJA FRIA PARA LA OBTENCIÓN DE CORAZONES DE ARENA**

### **5.1 Introducción**

En la fundición el método de vaciado en arena es muy adecuado para obtener formas complejas, este procedimiento es la única solución técnica en mucho de los casos. La empresa Nemak utiliza distintos procesos para la fabricación de corazones, el proceso de caja fría para la fabricación de cabezas y monobloques, el proceso No Bake, proceso de caja caliente, y el proceso Shell exclusivamente para monobloques [39]. El proceso de caja fría tuvo sus inicios

a finales de los años 60's. Este proceso es el más utilizado por lo tanto es el que se describirá en el presente capítulo.

El nombre caja fría fue asignado al sistema original de fenol-uretano/amina, se amplió este término a cualquier proceso que utilice un gas catalizador en estado gaseoso para curar la arena recubierta con resina dentro de una caja para corazones a temperatura ambiente [40].

El proceso consiste en formar una mezcla de arena con dos componentes de resinas líquidas después esta mezcla es soplada dentro de las cavidades de los herramentales para la formación de corazones. Una vez formado el corazón con las dimensiones y forma de la caja para corazones, se inyecta un gas catalizador dentro del herramental causando la unión de las partículas de arena recubiertas con resina. Posteriormente se da un proceso de purgado suministrando aire limpio y seco para purgar el exceso del gas catalizador así como asegurar la correcta penetración del catalizador en el corazón. Finalmente el corazón es extraído del herramental y su ensamble con otros corazones en un molde servirán para la obtención de piezas fundidas [40].

Un herramental (figura 5.1) es una herramienta construida por varias partes móviles que trabajan alineadas y ajustadas entre si para llevar a cabo el proceso de moldeo o la fabricación de corazones.

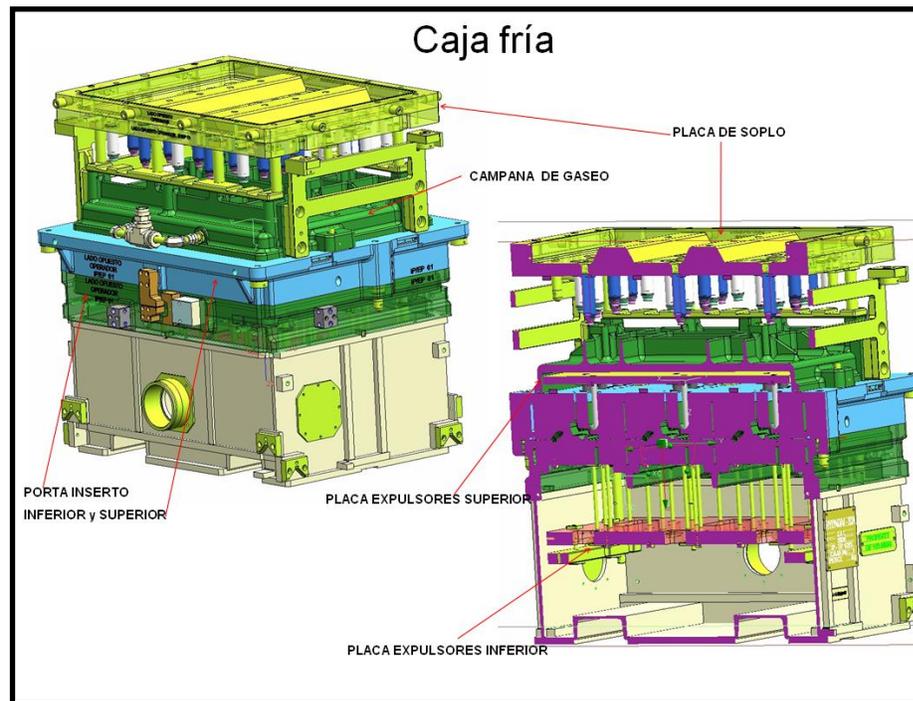


Figura 5.1 Ilustración de un herramental para caja fría. Cortesía Nematik.

Se le llama corazón al componente del molde que forma los huecos que se obtendrán en la pieza vaciada ya sea de cabezas o monobloques [40], ver figura 5.1.

Las propiedades requeridas en un corazón de arena son las siguientes:

- Deben resistir la presión que el metal ejerce en el momento del vaciado.
- Permitir la salida de los gases de combustión del propio corazón en el momento del vaciado.
- Deben permitir la contracción del metal en el momento de la solidificación, durante el enfriamiento de la pieza.
- Deben mantener la precisión en las dimensiones de la pieza vaciada.



Figura 5.2 Monobloque de motor de combustión interna y corazón de arena [4].

## 5.2 Química del proceso de caja fría

Las resinas son materias primas utilizadas en la fabricación de corazones en el proceso de caja fría que añadidas a la arena sílica forman una mezcla utilizada en las máquinas sopladoras para la fabricación de corazones.

Todos los sistemas fenólico-uretánicos se componen de tres partes, siendo estos una resina fenólica modificada denominada parte I, un poli-isocianato llamado parte II y una amina terciaria, parte III, la cual es utilizada como catalizador, este catalizador es inyectado en forma de gas en el herramental para el curado del corazón [40].

La parte I fenol formaldehído provee los grupos hidroxilos (OH) que durante la polimerización, reaccionan con el grupo iso-cianato (NCO) de la parte II para formar un polímero uretano sólido con la presencia de amina catalítica, el grupo iso-cianato (NCO), es el que da su utilidad en la reacción de polimerización y en la formación del puente que une a los granos de arena, contribuye a mantener la vida de banco que es el tiempo en el que la mezcla mantiene sus propiedades para ser usada y facilita el desarenado del corazón una vez que la pieza fue vaciada [40], ver figura 5.3.

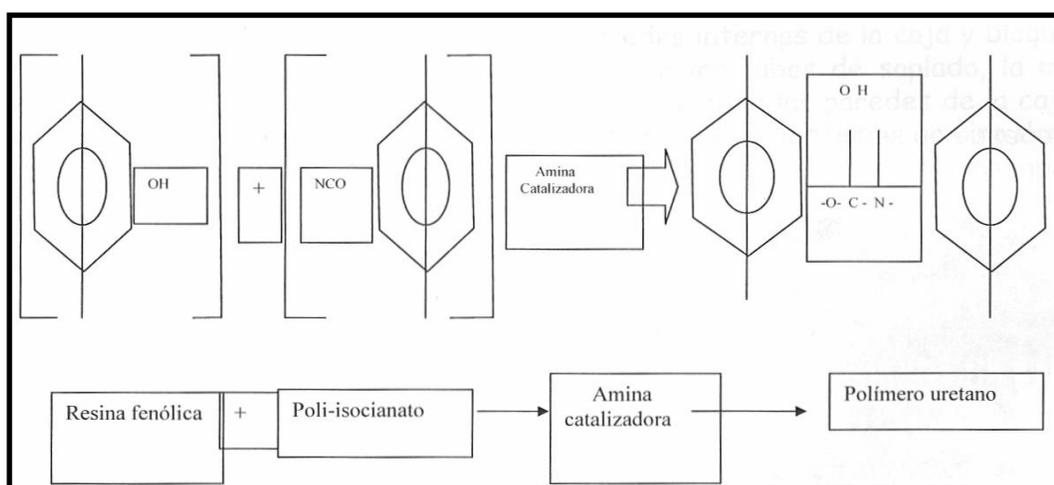


Figura 5.3 Ilustración de la química del proceso de caja fría.

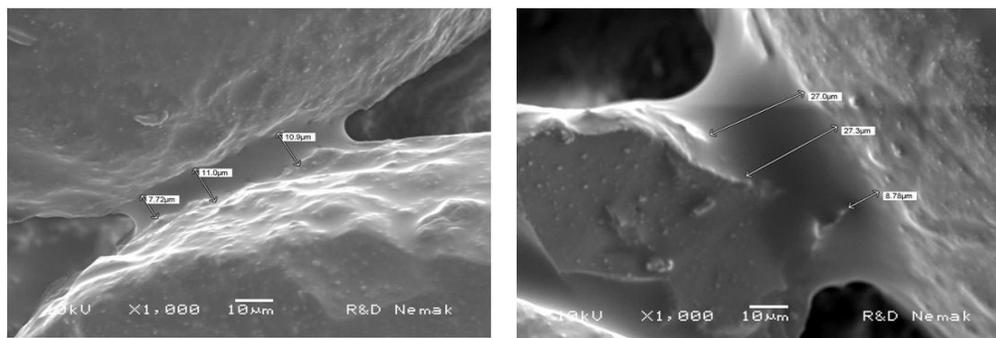


Figura 5.4 Puentes de resina uniéndose a los granos de arena [40].

Las propiedades de resistencia mecánica del corazón son drásticamente reducidas cuando el agua o la humedad entran en contacto con la parte II ya que el compuesto resultante no tiene la resistencia del uretano. Los sistemas fenólico-uretánicos han mejorado continuamente logrando incrementos en calidad debido al desarrollo de nuevas combinaciones entre las resinas base, aditivos y solventes.

## **5.3 Proceso de soplado**

### **5.3.1 Soplado**

Una vez que la mezcla arena con resina es obtenida en los mezcladores de arena a diferentes proporciones de resina, ésta se transporta a las máquinas sopladoras que es el equipo principal en el proceso de fabricación de corazones. La mezcla de arena con resina se sopla dentro de la caja de corazones con presiones de 4.825 y 5.515 bar (70 y 80 psi) durante 1 a 5 segundos aproximadamente llenando completamente las cavidades. Una buena compactación del corazón mejora su resistencia y beneficia el acabado superficial de la pieza. Existen herramientas para trabajar con bajas presiones de soplado donde se pueden obtener corazones bien compactados con presiones de 2.07 a 2.76 bar (30 a 40 Psi), esto puede ser logrado con un correcto diseño del herramienta [39].



Figura 5.5 Corazones extraídos del herramental. Foto cortesía Nemak.

El herramental posee boquillas de soplado las cuales tienen un área transversal que varía de  $1.5 \text{ cm}^2$  por  $0.454 \text{ kg}$  de arena en la cavidad ( $0.2 \text{ in}^2$  por libra), a  $2.25 \text{ cm}^2$  por  $0.454 \text{ kg}$  ( $0.35 \text{ in}^2$  por libra), dependiendo de la geometría de la cavidad [29].

La presión de soplado es un factor determinante en la calidad del corazón [39] [40]:

- Presiones bajas producen corazones de baja densidad y baja resistencia.
- Presiones altas provocan adherencia del corazón en la superficie de la caja ocasionando migración de la resina que recubre el grano de arena hacia la superficie de la caja aglomerando capas de resina sobre las paredes internas de la caja y bloque de ventilas, las capas de resina se forman enfrente de los tubos de soplado, la mezcla entra a altas velocidades, los granos de arena chocan con tanta fuerza que la resina que los cubre, se separa del grano y forma un fino depósito sobre las paredes causando 2 problemas:

a) Dificultad en el desmoldeo del corazón debido al aumento de la adherencia, provocando un mayor consumo de desmoldante para extraer el corazón, este exceso del desmoldante humecta el corazón y reduce su resistencia en el almacenamiento, además provoca que se forme una película de arena-resina-desmoldante excesivamente pegajosa en la superficie del corazón y que durante el vaciado de las piezas no se elimina totalmente, causando problemas de “arena pegada” en las paredes de la pieza vaciada.

b) Aumenta el número de corazones rotos por la misma dificultad de extracción de la caja.

### **5.3.2 Gaseo (curado)**

Es hacer pasar el gas catalizador (amina) calentada entre 80 y 90 °C y 2.07 y 2.76 bar (30 y 40 psi) introducido por los inyectores durante tiempos entre 2 y 8 segundos, a través de la mezcla de arena, causando así el curado (endurecido) instantáneo y formando un corazón completo [40].

### **5.3.3 Purgado**

Concluido el tiempo de gaseo, se pasa una corriente de aire seco y caliente a través del corazón a presiones entre 2.07 y 2.76, durante 10 a 25 segundos para arrastrar el gas (amina) hacia el sistema de extracción y posteriormente eliminarlo por neutralización química, con ácido sulfúrico en el lavador de gases [40].

### 5.3.4 Extracción e inspección

El corazón fabricado se extrae de la sopladora, en ese momento alcanza un 60 a 70 % de resistencia, dentro de las siguientes 8 horas alcanza su resistencia total [40].

Todos los corazones una vez extraídos de las cajas son revisados visualmente para comprobar que no tengan imperfecciones [40], ver figura 5.6.



Figura 5.6 Inspección de Corazones [39].

### 5.4 Control de la arena en el proceso de caja fría

Las principales características a controlar en la arena en el proceso de caja fría [39] son:

- Forma de la partícula.
- Granulometría (GFN).
- Temperatura.
- Humedad.
- pH y la demanda de ácido.

### 5.4.1 Forma de la partícula

La forma de la partícula, se dividen en angular, sub-angular, y redonda según la AFS (American Foundry Society) [29]. En las imágenes de la figura 5.7 se observa los tipos de partículas. El número de Krumbein también puede ser utilizado para determinar el grado de redondez.

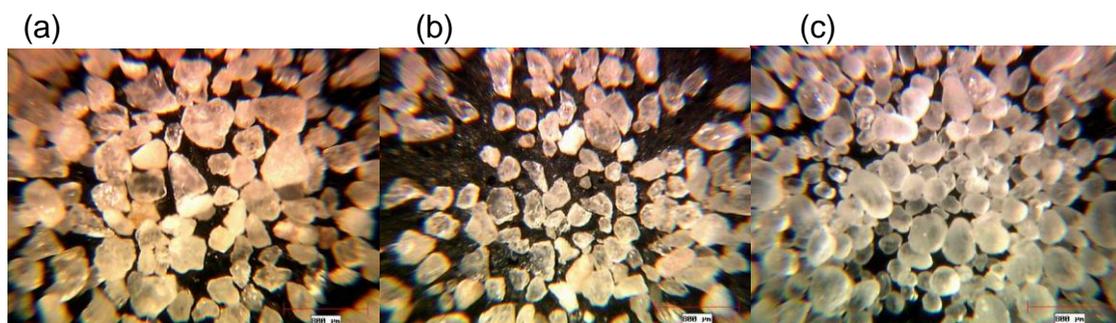


Figura 5.7 Tipos de arena. (a) Angular, (b) Sub-angular, (c) Redonda.

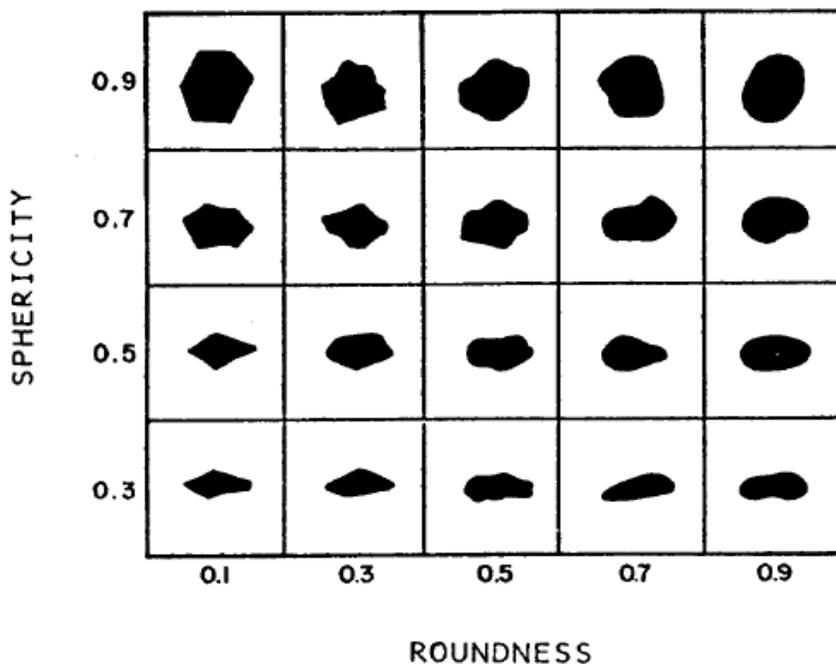


Figura 5.8 Número de Krumbein para diferentes formas de partícula [40].

La forma de la partícula afecta las propiedades físicas de los moldes. Los moldes elaborados con partículas redondas poseen una densidad mayor que los producidos con partículas angulares. Esto es debido a que una mayor cantidad de granos pueden ser compactados en un determinado volumen. Un grano redondo proporciona la mayor permeabilidad y requerirá la menor cantidad de resina para ser recubierto, caso contrario a las partículas sub-angular y angular. El uso de partículas redondas proporcionan una baja relación área superficial-volumen permitiendo usar bajos niveles de resina hasta en un 0.8%. A diferencia de las partículas angulares que proporcionan un alta relación área superficial volumen conduciendo a el uso de altos contenidos de resina [40].

#### 5.4.2 Granulometría

La granulometría es una característica que indica el tamaño y la distribución del grano de la arena. Se determina mediante la prueba de análisis de malla y se denomina tamaño de grano AFS (American Foundrymen's Society) GFN (Grain Fineness Number). Los resultados de la prueba determinaran si la arena es gruesa, mediana o fina [40].

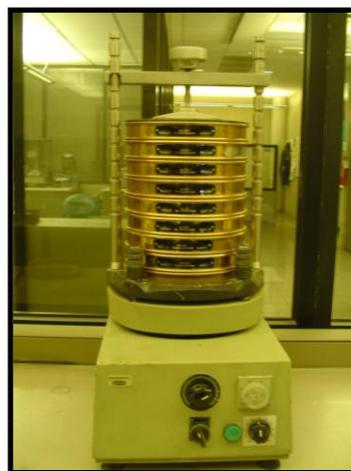


Figura 5.9 Equipo para retener las partículas en distintas mallas.  
Foto cortesía Nematik.

Se considera arena gruesa cuando se tiene un GFN menor a 45 y finos menor a 3%, la arena gruesa tiene una menor área de superficie, proporcionando las siguientes ventajas:

- Menor cantidad de resina para cubrir el grano.
- Mayor fluidez de la mezcla.
- Mejor permeabilidad del corazón para eliminar los gases durante el vaciado de la pieza.
- El usar menos resina se facilita el desarenado de la pieza, se reduce la suciedad del molde y la emisión de humos.

Se considera arena fina cuando se tiene un GFN mayor a 55 y finos mayor a 7%, la arena fina tiene una mayor área de superficie por lo que le da propiedades contrarias a las de la arena gruesa (aumenta la cantidad de resina, menor permeabilidad y desarenado, mayor suciedad y emisión de humos).

### **5.4.3 Temperatura de la arena**

El control de la temperatura es esencial en la producción de un molde, el intervalo ideal de temperatura en el proceso es entre 18 y 26° C. El trabajar con temperaturas por arriba de este intervalo acelera la reacción de las resinas, haciendo que se reduzca la vida de banco y la fluidez de la mezcla durante el soplado. Las mezclas con temperatura por debajo del intervalo provocarán que la reacción de las resinas sea retardada, produciendo corazones crudos y disminución de la eficiencia del mezclado en el molino al incrementar la viscosidad de las resinas [40].

#### **5.4.4 Humedad de la arena**

La presencia de la humedad mayor a 0.2% en la arena no es recomendable, debido a que reacciona con la resina degradando sus propiedades. El principal efecto es la disminución en la vida de banco y resistencia del corazón [39] [40].

Las principales fuentes de contaminación de humedad en la arena, resina y en proceso son:

- Condensación en los serpentines del sistema de enfriamiento de la arena.
- Silos y tolvas de almacenamiento mal sellados.
- Alta humedad relativa ambiental.
- Punto de rocío del aire comprimido mayor a -20 °C.
- Depósitos de resina y aditivos destapados.

#### **5.4.5 pH y demanda de ácido.**

El pH determina el contenido de sustancias alcalinas solubles en agua, mientras que el valor de la demanda de ácido determina las sustancias alcalinas solubles en ácido. La arena alcalina (con demanda de ácido mayor a 7 y pH mayor a 8) da menor vida de banco, debido a que los componentes alcalinos como el CaO neutralizan una porción de resina y además aceleran drásticamente la reacción entre las dos resinas [40].

Los factores que influyen para aumentar el pH y la demanda de ácido en la arena son:

- Alto contenido de finos; (malla 270) ya que en esta malla se concentran las arcillas que es de naturaleza básica.
- La recuperación térmica de la arena. Genera componentes alcalinos como el CaO y la  $Al_2O_3$  los cuales son acumulativos en cada reciclaje.

## **CAPITULO 6**

# **EXPERIMENTACIÓN**

### **6.1 Introducción**

En el presente capítulo se explicará la experimentación realizada sobre los recubrimientos de 80, 110, 120, y 150  $\mu\text{m}$  de espesor, que incluye medición del espesor y porcentaje de fases así como la porosidad presente utilizando microscopía óptica y electrónica de barrido en conjunto con el analizador de imágenes. Se presentarán las fases (cristales) de los recubrimientos obtenidas con difracción de rayos X, se mostrarán las huellas de indentación para determinar la macro y microdureza, se reportan también los valores de rugosidad promedio para cada espesor; se mencionará acerca de la preparación de probetas y partículas erodentes para la realización de las

pruebas erosivas, se describirá la maquina en donde se llevaron a cabo dichas pruebas, así como la caracterización de la partícula erosiva.

La empresa Arsitek, S.A. de C. V., de Monterrey proporcionó 12 soleras de la aleación de aluminio 6061 con recubrimiento Keronite (oxidación electrolítica de plasma) de espesores 80, 110, 120 y 150 micrómetros, las dimensiones de las soleras fueron de 100 cm x 7.62 cm x 1 cm.



Figura 6.1 Solera recubierta de Keronite con espesor de 150  $\mu\text{m}$ .

Los elementos presentes en la aleación de aluminio 6061 junto con los porcentajes en peso se presentan en la Tabla 6.1. Los principales aleantes son el silicio y el magnesio. El punto de fusión de la aleación es de 652  $^{\circ}\text{C}$  y posee una densidad de 2.709  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Tabla 6.1 Elementos presentes en la aleación de aluminio 6061.

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros c/u	Otros Total	Aluminio
% Mínimo	0.4	-	0.15	-	0.8	0.04	-	-	-	-	
% Máximo	0.8	0.7	0.4	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	0.05	0.15	Resto

## 6.2 Microscopía óptica

Se tomaron muestras de las soleras de los cuatro espesores de estudio de los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma para realizar la medición de las dimensiones de los espesores y observar su superficie, la medición se realizó con microscopio óptico y la superficie pudo ser estudiada con estereoscopio. En la figura 6.2 se puede observar que la dimensión del espesor es de  $124.3 \mu\text{m}$  cuando se suponía que midiera  $150 \mu\text{m}$ , por lo tanto se obtuvieron diferencias de hasta el 17 por ciento menos del espesor para los cuatro espesores de estudio.

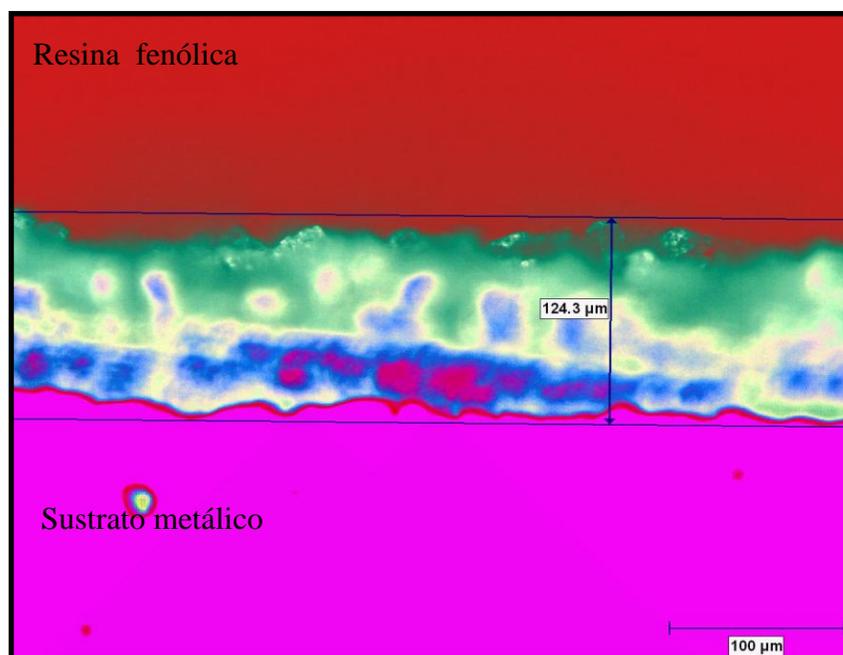


Figura 6.2 Medición del recubrimiento con microscopio óptico.

Al observar la superficie a simple vista y con estereoscopio óptico de los cuatro recubrimientos de estudio, se observaban una especie de manchas o sombras lo que les daba la apariencia de ser fases distintas, al realizar un análisis de fases en las superficies se obtuvieron diferentes porcentajes los cuales se presentan en la Tabla 6.2 siendo el espesor de 110  $\mu\text{m}$  el que tuvo mayor porcentaje de fase blanca y el espesor de 150  $\mu\text{m}$  el que tuvo el mayor porcentaje de fase oscura. En la figura 6.3 se pueden observar las superficies de los recubrimientos de 80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  obtenidas con estereoscopio.

Tabla 6.2 Porcentaje de fases blanca y oscura en la superficie de los cuatro espesores de estudio.

Fase	80 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$	120 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$
Blanca	63 %	93 %	85 %	37 %
Oscura	37 %	7 %	14 %	63 %

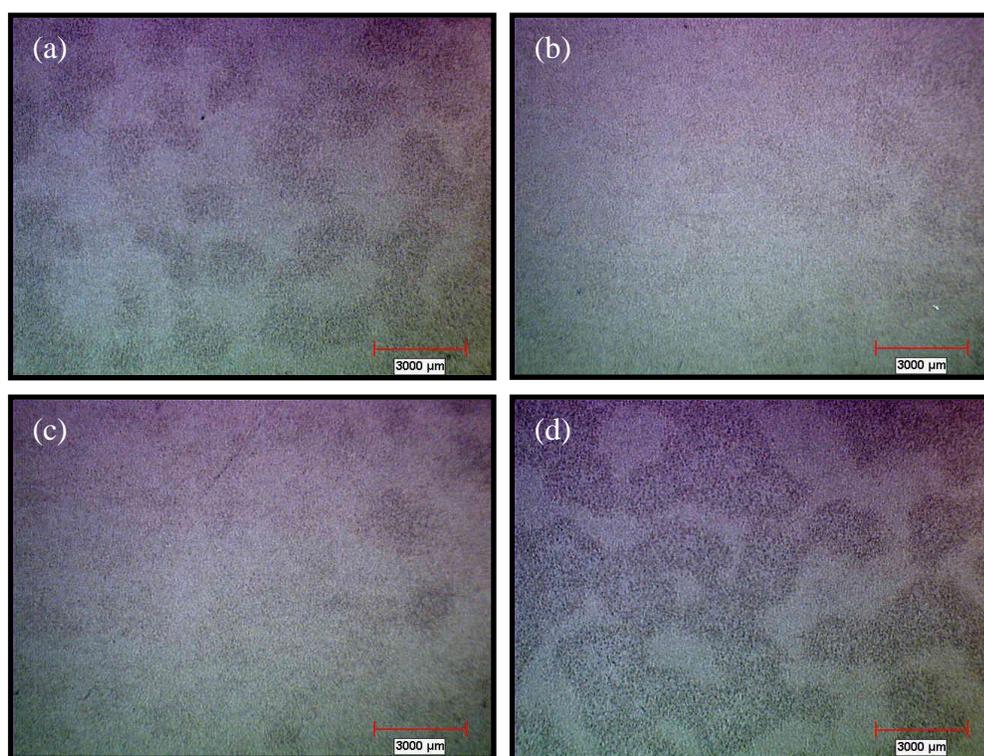


Figura 6.3 Superficie de los recubrimientos de oxidación electrolytica de plasma.  
(a) 80  $\mu\text{m}$ , (b) 110  $\mu\text{m}$ , (c) 120  $\mu\text{m}$  y (d) 150  $\mu\text{m}$ .

### 6.3 Microscopía electrónica de barrido

En la figura 6.4 (a) se aprecian imágenes de MEB del corte transversal de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  de espesor, se observan la capa superior porosa, la capa homogénea y la interfase entre el recubrimiento y la aleación que conforman las distintas capas del recubrimiento vistas en la sección 2.1. Se aprecian microgrietas que inician en la capa superior porosa y llegan hasta la capa homogénea. En la figura 6.4 (b) se aprecia un cráter con diámetro mayor a los 10  $\mu\text{m}$  y que llega hasta el sustrato metálico producto de la descarga eléctrica localizada en el proceso de crecimiento y deposición del óxido cerámico.

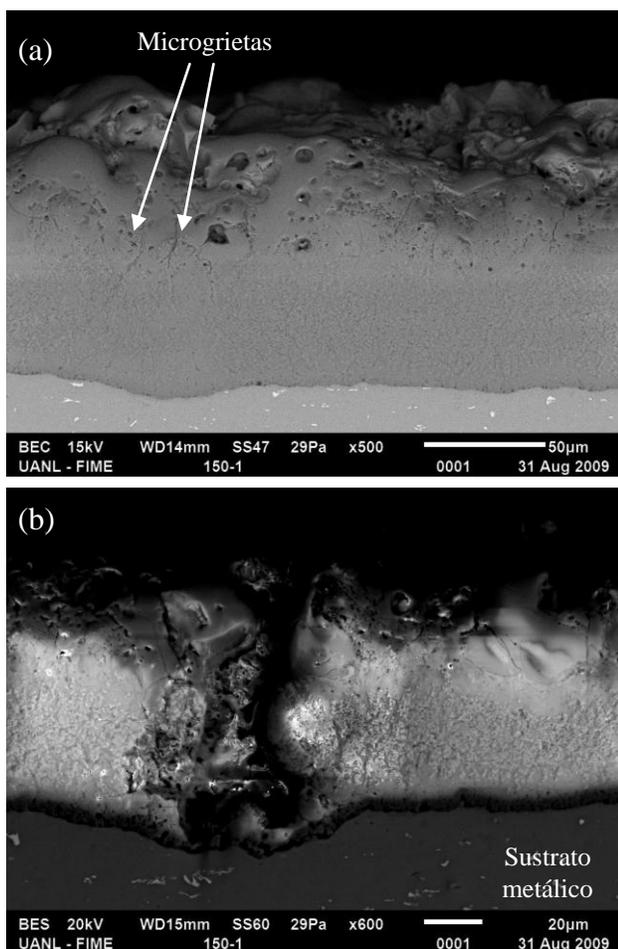


Figura 6.4 Corte transversal de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  de espesor. (a) Se aprecian las distintas capas que conforman al recubrimiento y micro grietas, (b) Cráter formado por la descarga eléctrica localizada.

En la figura 6.5, la cual es una micrografía MEB de la superficie de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  de espesor, lo más sobresaliente es un glóbulo aislado el cual encapsula aire debido al rápido enfriamiento del óxido al momento del crecimiento y deposición del recubrimiento cerámico. Cabe recordar que al baño electrolítico se le insufla aire que en conjunto con la vibración genera un crecimiento homogéneo del recubrimiento (sección 2.2). También se aprecian glóbulos reventados por la misma presión del gas encapsulado por lo cual se determina que son sumamente frágiles. También puede ser observada una gran porosidad producto de la evolución del gas (aire) en el recubrimiento cerámico.

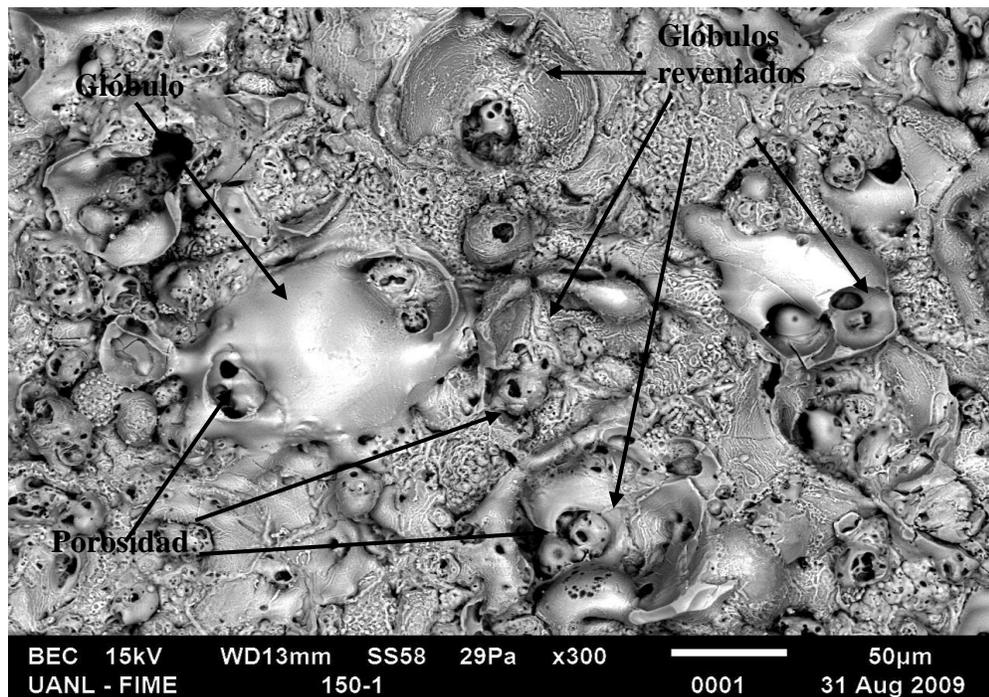


Figura 6.5 Imagen de un glóbulo que encapsula aire en la superficie de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  de espesor. Se aprecia una gran porosidad.

Con el microscopio electrónico de barrido también se realizaron mediciones del espesor del recubrimiento OEP encontrando los mismos porcentajes de hasta el 17% de diferencia obtenidos con el microscopio óptico. En la figura 6.6 se aprecian cortes transversales para observar los cuatro espesores, las imágenes del lado derecho muestran sus respectivas superficies las cuales presentan diferencias microestructurales. En los espesores de 110 y 120  $\mu\text{m}$  se aprecian mucho más de los glóbulos frágiles que encapsulan aire, en estos espesores se encontraron los mayores porcentajes de la morfología blanca en la superficie. Al realizar análisis químicos con la función EDXA (energy dispersive x-ray analysis) del microscopio electrónico de barrido (figuras 6.7 y 6.8) se encontraron los mismos elementos químicos por lo cual se concluye que esa apariencia de sombras o manchas encontradas con el estereoscopio las da la morfología que circunda a los glóbulos.

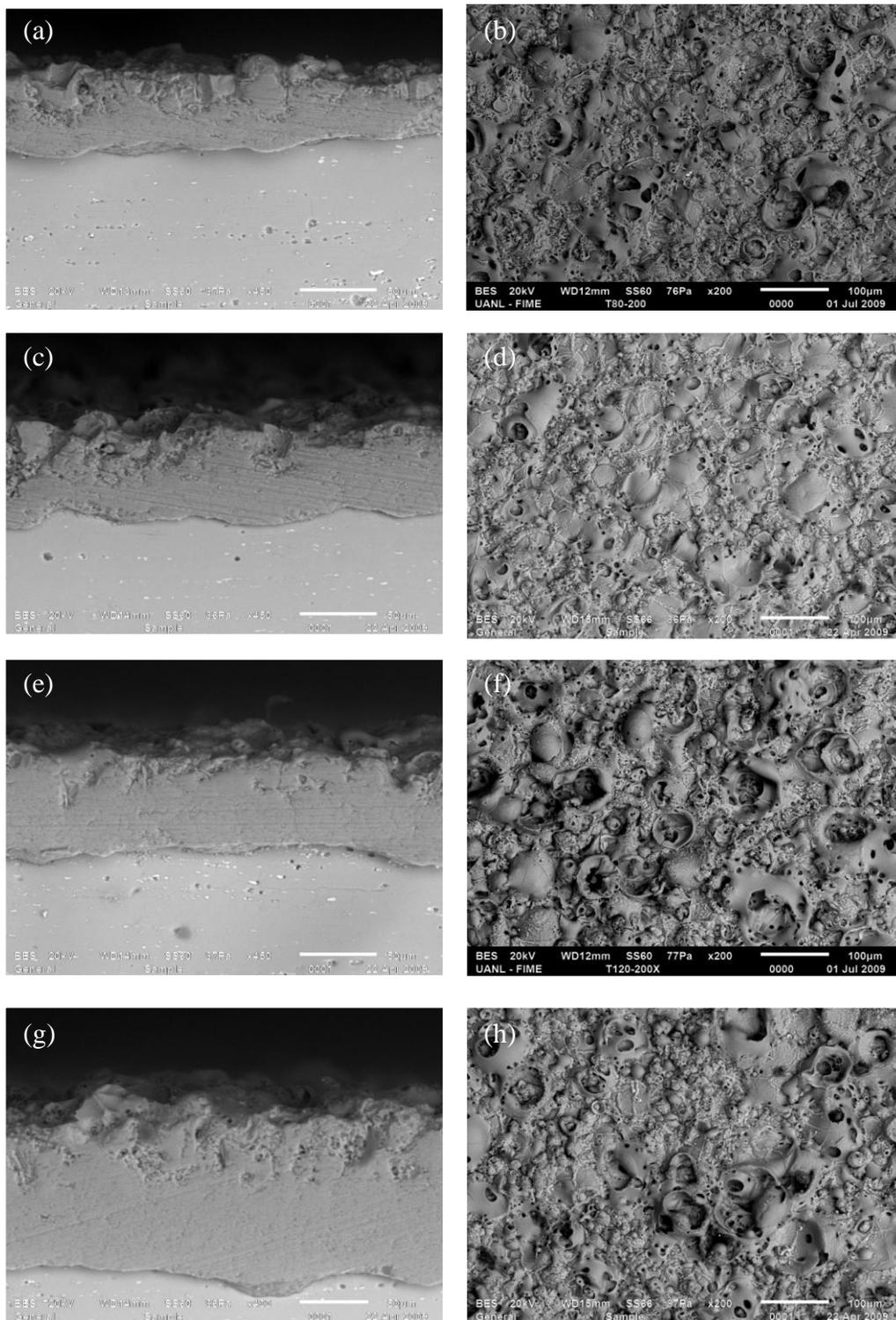


Figura 6.6 Imágenes transversales y de la superficie de los recubrimiento OEP.  
 (a) y (b) 80µm, (c) y (d) 110 µm, (e) y (f) 120µm, (g) y (h) 150 µm.

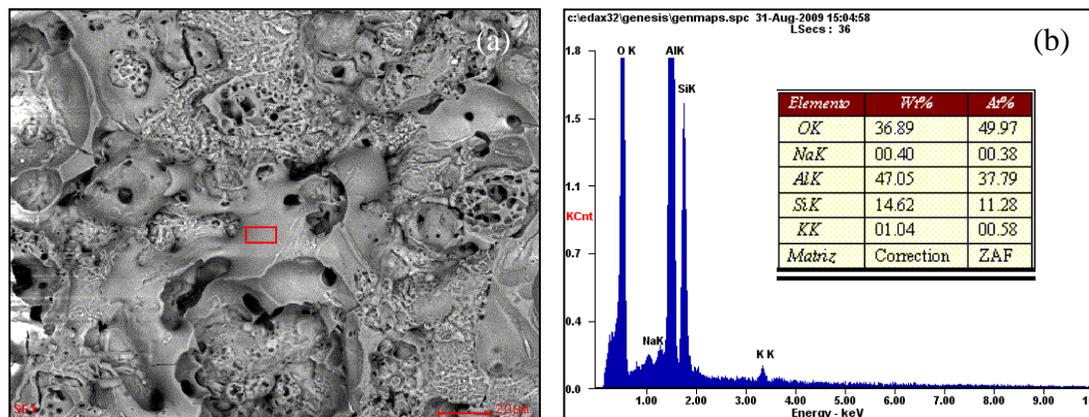


Figura 6.7 Superficie del recubrimiento OEP (a) Área en del glóbulo donde se realizó el análisis químico (b) Espectro de composición química.

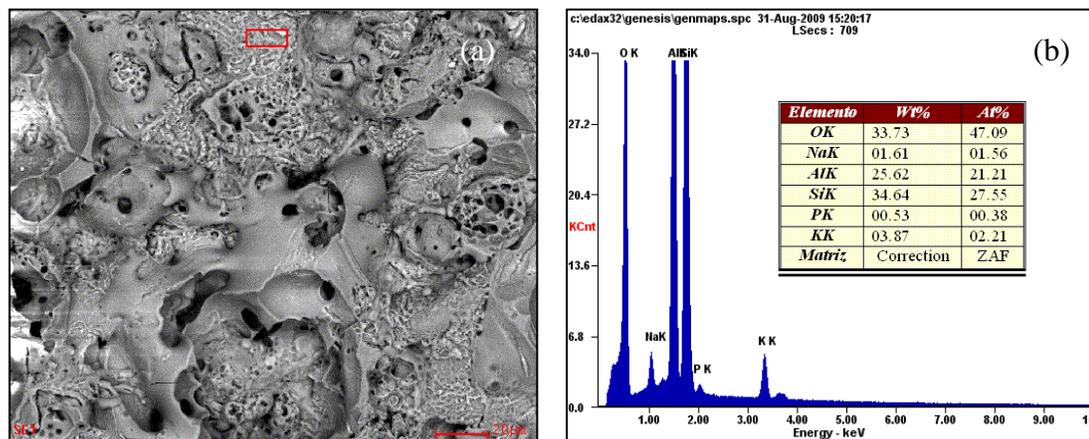


Figura 6.8 Superficie del recubrimiento OEP (a) Área circundante del glóbulo en donde se realizo el análisis químico (b) Espectro de composición química.

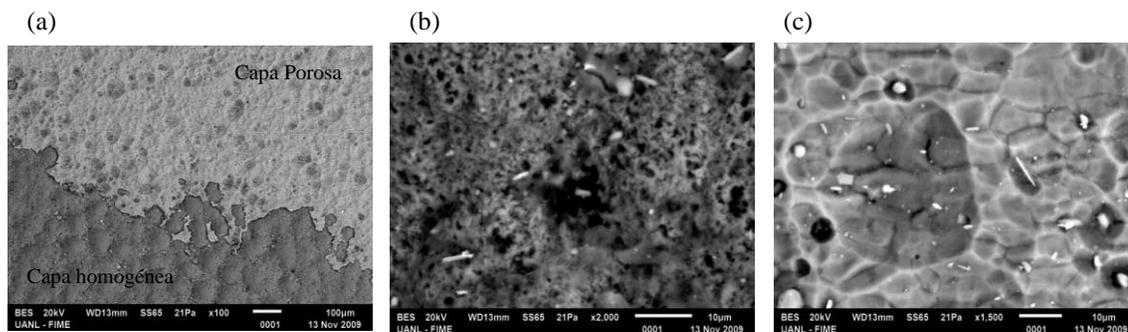


Figura 6.9 Micrografías MEB de la superficie inferior del recubrimiento OEP.  
 (a) Capa homogénea y porosa (b) Capa homogénea a 2000 aumentos y (c) Capa superior porosa vista en su parte inferior a 1500 aumentos.

Las imágenes de la figura 6.9 corresponden a micrografías del recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma en su parte inferior (que estaba unida al sustrato) el cual fue desprendido utilizando una solución acuosa al 1% en peso de potasa (POH). La figura 6.9 (a) muestra a la capa superior porosa y a la capa homogénea que integran al recubrimiento OEP, La figura 6.9 (b) corresponde a la capa homogénea vista a 2000 aumentos al centro se observa un cráter con tamaño de alrededor de los 10  $\mu\text{m}$  producto de las descargas eléctricas localizadas que atraviesan las distintas capas que conforman al recubrimiento en su proceso de crecimiento y deposición (sección 2.4), En la figura 6.9 (b) se aprecia la capa superior porosa a 1500 aumentos, esto se pudo lograr debido a que la capa homogénea fue removida mecánicamente presentando al descubierto la capa porosa, se puede corroborar el encapsulamiento de aire al momento del enfriamiento del óxido cerámico observando las formas cóncavas presentes en esta capa.

Las figura 6.10 muestra el análisis químico realizado en las diferentes capas que conforman al recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma de la aleación de aluminio 6061, en la capa superior porosa se encuentra un mayor porcentaje en peso y atómico del silicio y en la capa homogénea e interfase se

tiene menores porcentajes de silicio, los mayores porcentajes en esas áreas corresponden a los elementos químicos aluminio y oxígeno (Al y O).

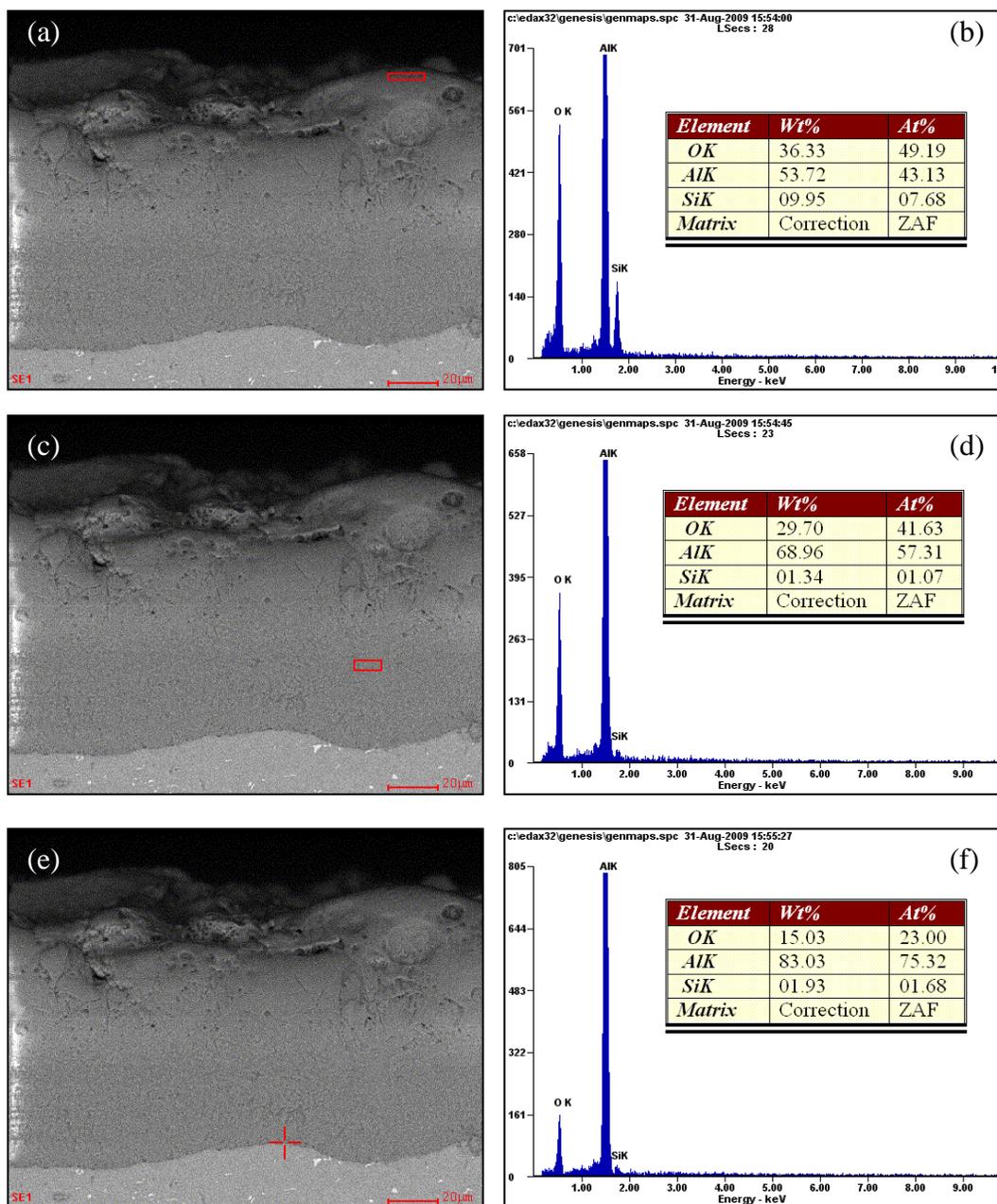


Figura 6. 10 Análisis químico (EDXA) en las áreas (rojo) de las diferentes capas que conforman al recubrimiento OEP. (a) y (b) Capa superior porosa, (c) y (d) Capa homogénea, (e) y (f) Interfase.

Con análisis de imágenes se determinó la porosidad en las superficies superiores del recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma con cortes transversales de las muestras. En la figura 6.11 se puede apreciar la porosidad en la capa superior de un espesor de 150  $\mu\text{m}$  la cual corresponde al 24 %, en el espesor de 120  $\mu\text{m}$  se encontró un porcentaje de 20 %, para el espesor de 110  $\mu\text{m}$  el porcentaje de porosidad fue cerca del 17 % y para el de 80  $\mu\text{m}$  alrededor del 15 % por lo tanto se determina que la porosidad aumenta conforme se incrementa del espesor.

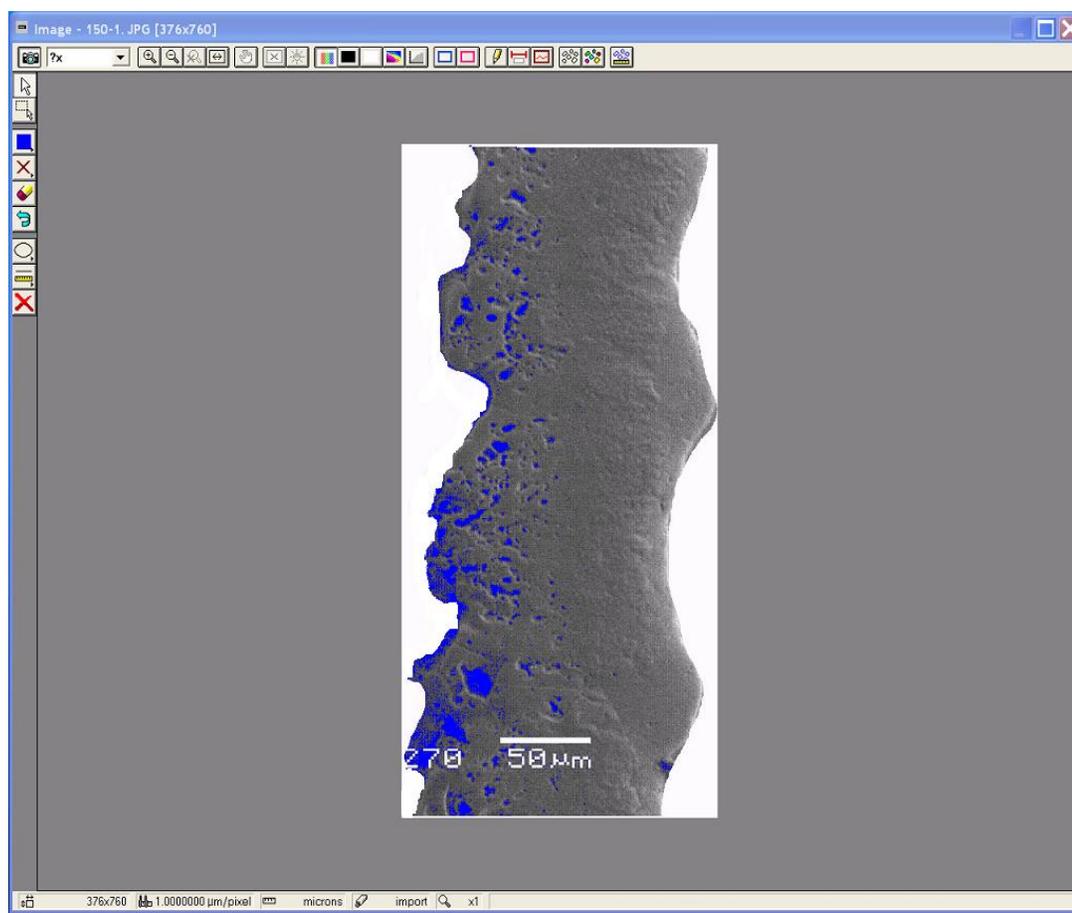


Figura 6.11 Corte transversal de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  OEP en el cual se midió la porosidad con análisis de imágenes.

## 6.4 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una técnica que consiste en hacer pasar un haz de rayos X a través de un material. El haz se incide en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y, por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal [6] aplicando la ley de Bragg:

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{d_{hkl}} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde:

$\theta$  = Ángulo de Bragg (ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión)

$\lambda$  = Longitud de onda de rayos X

$d_{hkl}$  = Distancia entre los planos de la red cristalina.

Los cristales encontrados con esta técnica en los cuatro recubrimientos OEP de estudio son: Mullita la cual es un aluminosilicato de estequiometría  $\text{Al}_4\text{SiO}_8$ , la alúmina en diferentes fases como la  $\alpha$ -alúmina,  $\gamma$ -alúmina y aluminio. En la figura 6.12 se aprecia en el difractograma sobre los 4 recubrimientos que a medida que el espesor decrece empiezan a aparecer intensidades (picos) que indican la presencia de cristales de aluminio seguramente por la penetración de rayos X hasta el sustrato metálico.

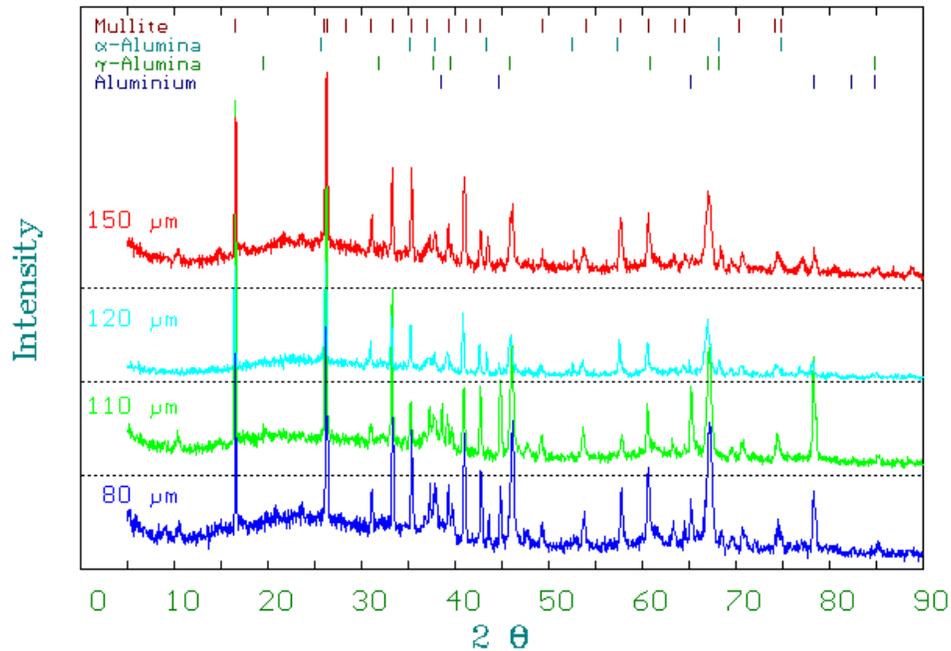


Figura 6.12 Difractograma de rayos X representativo de los recubrimientos.

## 6.5 Micro y macrodureza

La dureza es la resistencia de un material a ser penetrado o rayado, en la figura 6.13 se puede observar las huellas de indentación en el sustrato metálico y en un recubrimiento OEP de 150  $\mu\text{m}$  de la aleación de aluminio 6061.

La fórmula empleada para determinar la dureza Vickers (HV) es la siguiente:

$$HV = \frac{1854.4 * P}{d^2} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde:

$P$ = La carga aplicada

$d$ = Promedio de la longitud de las diagonales de la huella.

La microdureza promedio en los cuatro espesores prácticamente fue la misma no habiendo una relación con el incremento del espesor. Se emplearon 50 g de carga encontrando 101 HV en el sustrato metálico y 1590 HV en el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma.

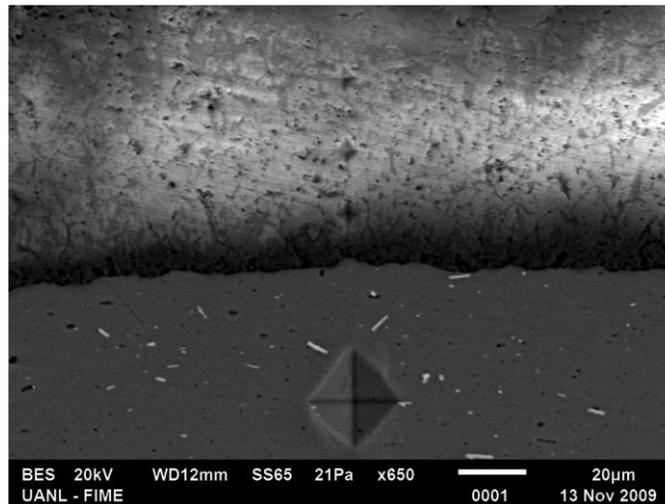


Figura 6.13 Huellas de indentación sobre el sustrato metálico y el recubrimiento OEP de la aleación de aluminio 6061.

Se realizó el ensayo de dureza Brinell (HB) para obtener la macrodureza en los cuatro espesores del recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma, en la figura 6.14 se pueden apreciar las huellas de indentación sobre los espesores de 80  $\mu\text{m}$ , 110  $\mu\text{m}$ , 120  $\mu\text{m}$ , y 150  $\mu\text{m}$  y en la Tabla 6.3 su respectivas durezas Brinell utilizando la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \left( \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}} \right) \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Donde:

$P$ = carga aplicada

$D$ = Diámetro de la de la bola (indentador)

$d$ = Diámetro de la huella de indentación

En la Tabla 6.3 también se aprecia la resistencia a la tensión del material para los cuatro espesores con la relación: Resistencia a la tensión = 500 HB [6]

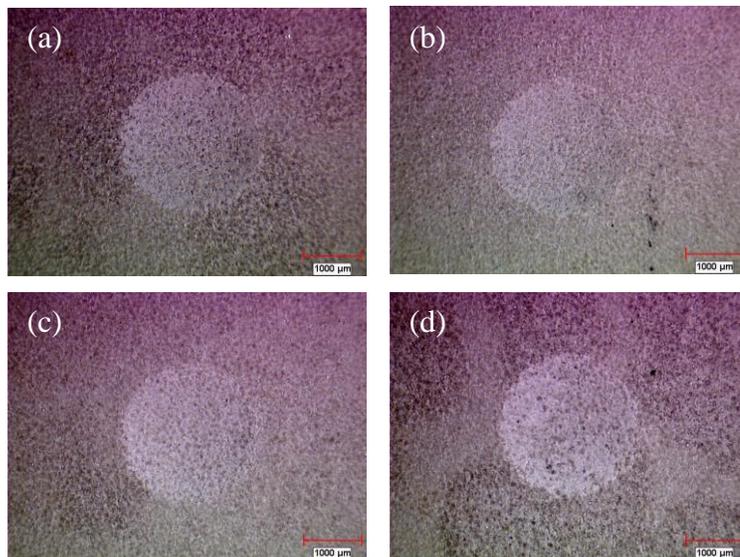


Figura 6.14 Huellas de indentación para los espesores de (a) 80  $\mu\text{m}$ , (b) 110  $\mu\text{m}$ , (c) 120  $\mu\text{m}$  y (d) 150  $\mu\text{m}$  de los recubrimientos OEP.

Tabla 6.3 Durezas Brinell y esfuerzo a la tensión para los cuatro espesores de recubrimientos OEP.

Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Dureza Brinell (HB) ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	Esfuerzo a la tensión ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
80	101.8916	50,945.8
110	105.2702	52,635.1
120	115.5503	57,775.2
150	103.1555	51,577.8

## 6.6 Rugosidad

Se realizó la medición de la rugosidad promedio ( $R_a$ ) sobre la superficie de las doce soleras con los cuatro espesores de estudio (80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$ ) y en las placas de la aleación de aluminio 6061 sin recubrimiento. Las placas sin recubrimiento fueron previamente pulidas. Los valores promedio de la rugosidad se presentan en la Tabla 6.4.

El valor de la rugosidad promedio de las placas pulidas hasta llegar a acabado espejo es de 0.034  $\mu\text{m}$  un valor muy por debajo de 1  $\mu\text{m}$  tal como lo recomienda el estándar de erosión G76 de la ASTM, se aprecia que a medida que aumenta el recubrimiento se tiene mayor rugosidad promedio ( $R_a$ ).

Tabla 6.4 Rugosidad promedio para las placas de la aleación de aluminio 6061 y recubrimientos OEP.

Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidad promedio $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
Aleación sin recubrimiento	0.034
80	3.27
110	3.39
120	3.51
150	4.08

(a)



(b)

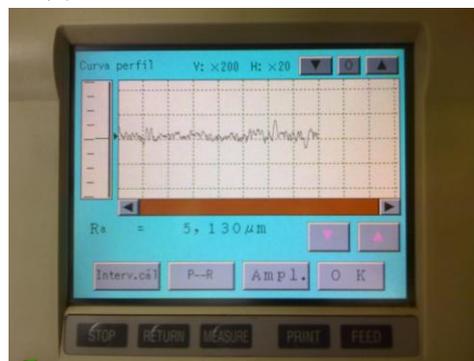


Figura 6.15 Medición de la rugosidad promedio ( $R_a$ ) (a) Medición en una placa con recubrimiento OEP (b) Lector electrónico de la rugosidad promedio ( $R_a$ ).

## 6.7 Preparación de muestras

Como preparación de muestras o probetas las soleras se cortaron en forma de placas a dos dimensiones diferentes: 5 cm x 4 cm y 5 cm x 8 cm, asegurando que el chorro de arena impactara completamente sobre las superficies de las placas. Inmediatamente después de cortadas las placas se limpiaron en acetona y ultrasonido para pesarlas en una báscula de resolución de diez milésimas de gramo sugerida por el estándar de erosión de la ASTM, ver figura 6.17. Después de erosionadas las placas se volvieron a limpiar y pesar para obtener su masa perdida y calcular el valor de erosión.



Figura 6.16 Probetas en forma de placas cortadas con dimensiones de 5 cm x 4 cm y 5 cm x 8 cm.



Figura 6.17 Limpieza de probetas con acetona en ultrasonido.

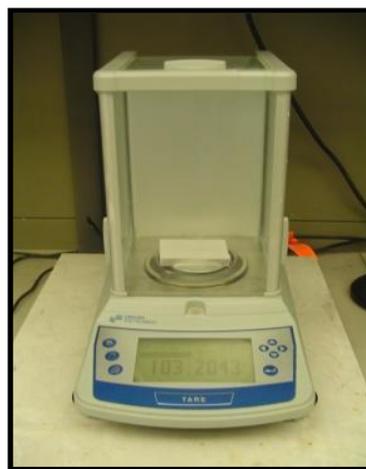


Figura 6.18 Medición del peso de las probetas en una báscula de resolución de diezmilésimas de gramo.

## 6.8 Preparación de arena

Se recolectaron finos de arena de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) del sistema de recolección de polvos de la empresa Nemark, S. A. para después cribarse con la malla 320 y así obtener un tamaño de partículas promedio de  $50 \mu\text{m}$  que posteriormente fueron almacenadas en pequeñas bolsas con 2 g (figura 6.19) cada una para realizar la prueba de erosión siguiendo el estándar G76 de la ASTM. La arena seca fue obtenida directamente de la línea de producción de corazones de arena, en la línea de producción la arena recuperada pasa a un dispersor rotatorio en el cual se distribuyen uniformemente los tamaños de partícula, se recolectó la arena en bolsas de un kilogramo, posteriormente se tomaron muestras de arena para realizar la medición granulométrica (AFS).



Figura 6.19 Finos de tamaño promedio de  $50 \mu\text{m}$  y arena seca 1 kg.



Figura 6.20 Arena con resinas al 0.8% en peso.

Se utilizaron arenas con resinas (figura 6.20) 5 kg por cada prueba utilizando el 0.8 % y como parte I y II el 50 %. El utilizar arena recubierta con resinas reproduce el proceso real de erosión en las cajas para corazones de arena.

## 6.9 Distribución granulométrica de la partícula

Los resultados de la distribución granulométrica de la arena se encuentran en la Tabla 6.5 y se muestran graficados en la figura 6.21, los valores corresponden al promedio de 10 mediciones del lote de arena seca y con resinas.

El AFS obtenido es de 52 con un contenido 0.5 % de finos. En los valores de la gráfica se observa que más del 99 % de las partículas tiene un tamaño mayor a los 100 micrómetros por lo cual pueden considerarse altamente erosivas tal como se vio en la sección 3.3.4.3

Tabla 6.5 Distribución granulométrica de la arena empleada para las pruebas de erosión.

<b>DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ARENA</b>						
No. Malla	Acumulado	Gramos	%	Factor	Producto	Tamaño (µm)
40	1,7998	1,7998	7,29	30	218,75	425
50	9,986377	8,186577	33,17	40	1326,66	300
70	18,85582	8,869438	35,93	50	1796,65	212
100	23,28574	4,429923	17,95	70	1256,29	150
140	24,5509	1,265162	5,13	100	512,56	106
200	24,66877	0,117869	0,48	140	66,85	75
270	24,68243	0,013662	0,06	200	11,07	53
Fondo	24,68332	0,000892	0,00	300	1,08	<53
Total	25,0054	24,68332	100		5189,91	

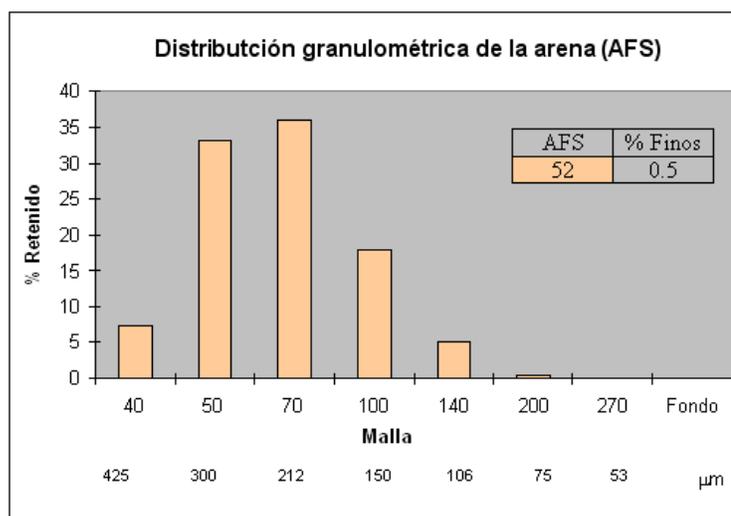


Figura 6.21 Gráfica de la distribución granulométrica de las partículas de arena.

### 6.9.1 Factor de redondez

El factor de redondez de las partículas fue determinado a partir de la ecuación 3.6. Los resultados se presentan en la Tabla 6.4 y las imágenes más representativas de la arena de tamaños de 53, 75, 106, 150, 212, 300, 425 micrómetros se observan en la figura 6.22, de dichas imágenes se escogieron diez partículas para realizar las proyecciones de área necesarias y obtener un dato representativo del valor del factor de redondez.

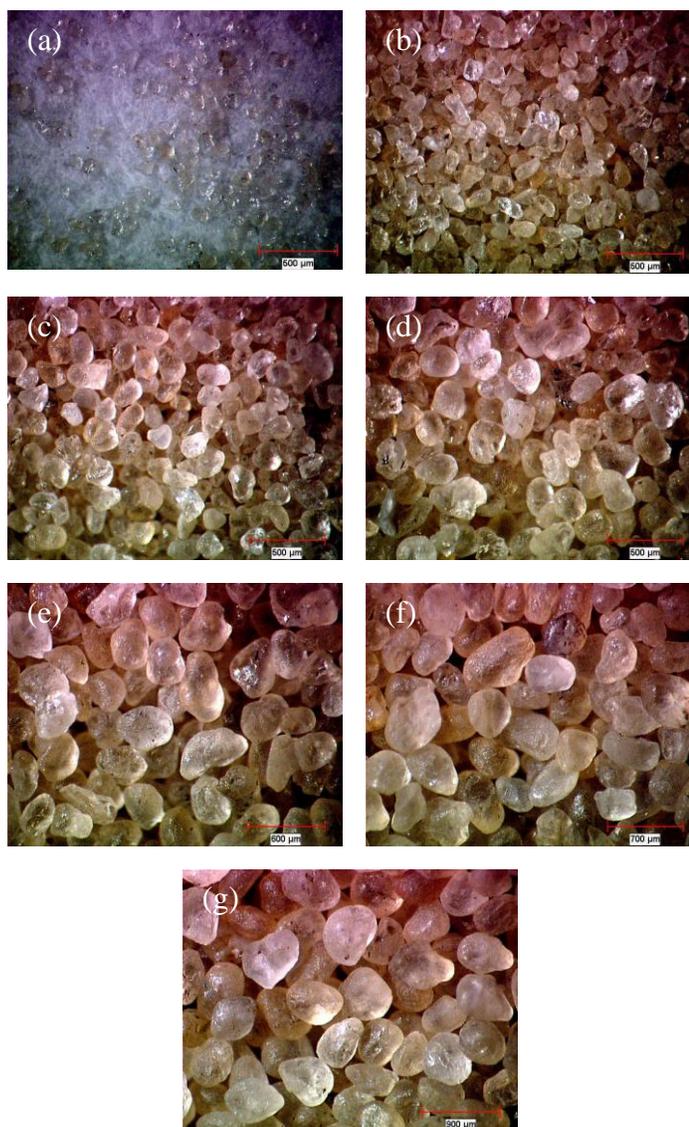


Figura 6.22 Arena de tamaños (a) 53 $\mu\text{m}$  (b) 75  $\mu\text{m}$  (c) 106  $\mu\text{m}$  (d) 150  $\mu\text{m}$  (e) 212  $\mu\text{m}$  (f) 300  $\mu\text{m}$  (g) 425  $\mu\text{m}$ .

Tabla 6.6 Factor de redondez para diferentes mallas y tamaño de partícula.

<i>Figura</i>	<b>Malla</b>	<b>Tamaño <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Redondez (F)</b>
a	270	53	0.983
b	200	75	0.905
c	140	106	0.918
d	100	150	0.955
e	70	212	0.907
f	50	300	0.714
g	40	425	0.919

En la Tabla 6.6 se puede apreciar que el factor de redondez para la mayoría de las mallas y tamaños de partículas es mayor al 0.90 por lo cual se considera que las partículas son del tipo redondas.

## 6.10 Pruebas erosivas

Se realizaron dos tipos de pruebas erosivas, la primera siguiendo el estándar de erosión G76 de la ASTM y la segunda bajo la prueba erosiva FIME-NEMAK ésta última recrea la erosión acelerada que sufren las cajas para corazones.

Las condiciones que pide el estándar G76 se muestran a continuación.

### 1.-Estándar de erosión G76 de la ASTM

Método estándar para la realización de pruebas de erosión por el impacto de partículas sólidas utilizando un flujo de gas.

- Temperatura ambiente.
- Boquilla de 1.5 mm de diámetro interno.
- Distancia de boquilla a probeta 10 mm.
- Aire seco (-40 °C de punto de rocío).
- 1.38 bar (20 psi) de presión.
- Alúmina como erodente el cual se cambió a arena sílica.
- Partículas abrasivas de tamaño promedio 50  $\mu\text{m}$ .
- Alimentación de erodente 2 g/min.
- Medición de velocidad de partícula.
- 5 minutos como tiempo de exposición.
- Ángulo de 90 grados.

El punto seis menciona que se utiliza alúmina como erodente sin embargo permite utilizar otros erodentes siempre y cuando se haga la notificación del material empleado, para esta prueba se utilizó arena sílica de estequiometría  $\text{SiO}_2$ .

La forma en que se debe realizar la prueba de erosión FIME-NEMAK es la siguiente:

## 2. Metodología de pruebas de erosión FIME-NEMAK

- Temperatura ambiente.
- Boquilla de 5 mm de diámetro interno.
- Distancia de boquilla a probeta 5 cm.
- Aire seco (-40 °C de punto de rocío).
- 0.69 y 1.38 bar (10 y 20 psi) de presión.
- Erodente: arena sílica seca y con resina.
- Carga de erodente: 1 kg arena seca y 5 kg de arena con resina.
- Ángulos de 90°, 60°, 40°, y 20°.

La prueba de erosión FIME-NEMAK reproduce el desgaste por erosión acelerado que sufren las cajas para corazones de los herramientales de moldeo; la mayoría de las condiciones de operación son diferentes en las dos pruebas, en lo único que son similares es que las dos utilizan aire seco -40 °C de punto de rocío y se realizan a temperatura ambiente.

## 6.11 Descripción de la máquina erosiva

La máquina en donde se realizaron las pruebas erosivas se muestra en la figura 6.23 se encuentra en las instalaciones de la empresa Nematik, S.A. La máquina fue diseñada y construida por los estudiantes Álvaro Treviño, Eduardo Rodríguez y Julián Rodríguez bajo la asesoría y dirección del Dr. Alberto Pérez del Programa Doctoral de Ingeniería en Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León con el apoyo de Nematik, S.A.

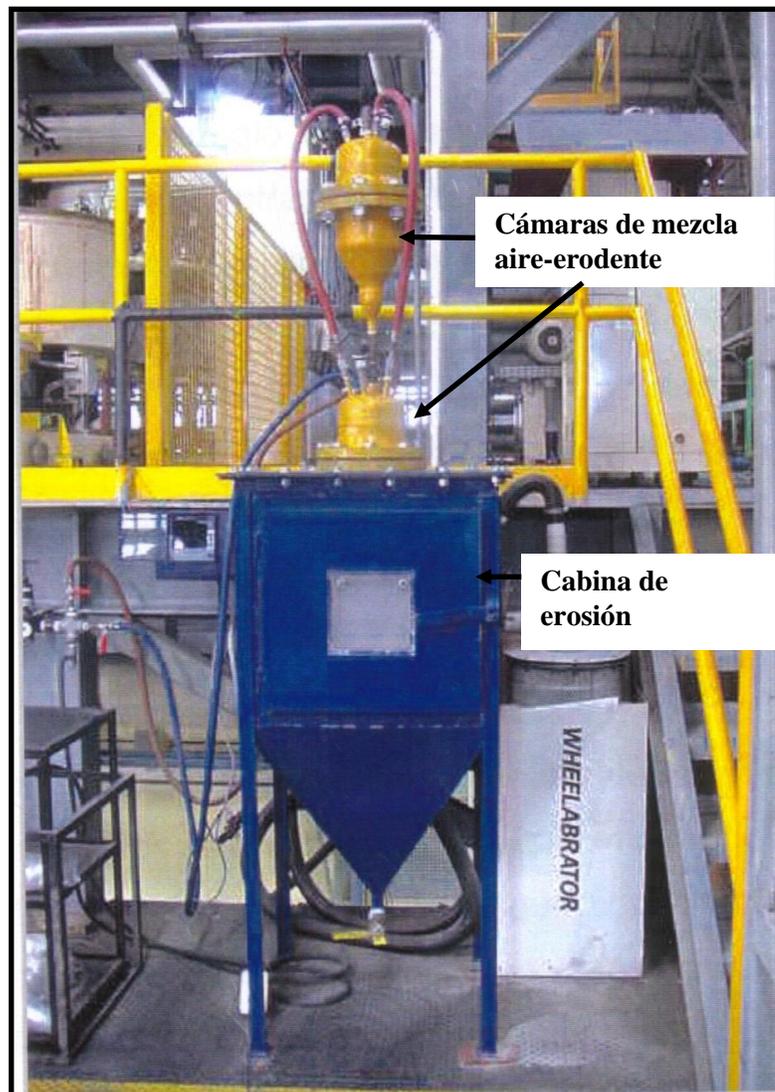


Figura 6.23 Máquina de erosión FIME II [29].

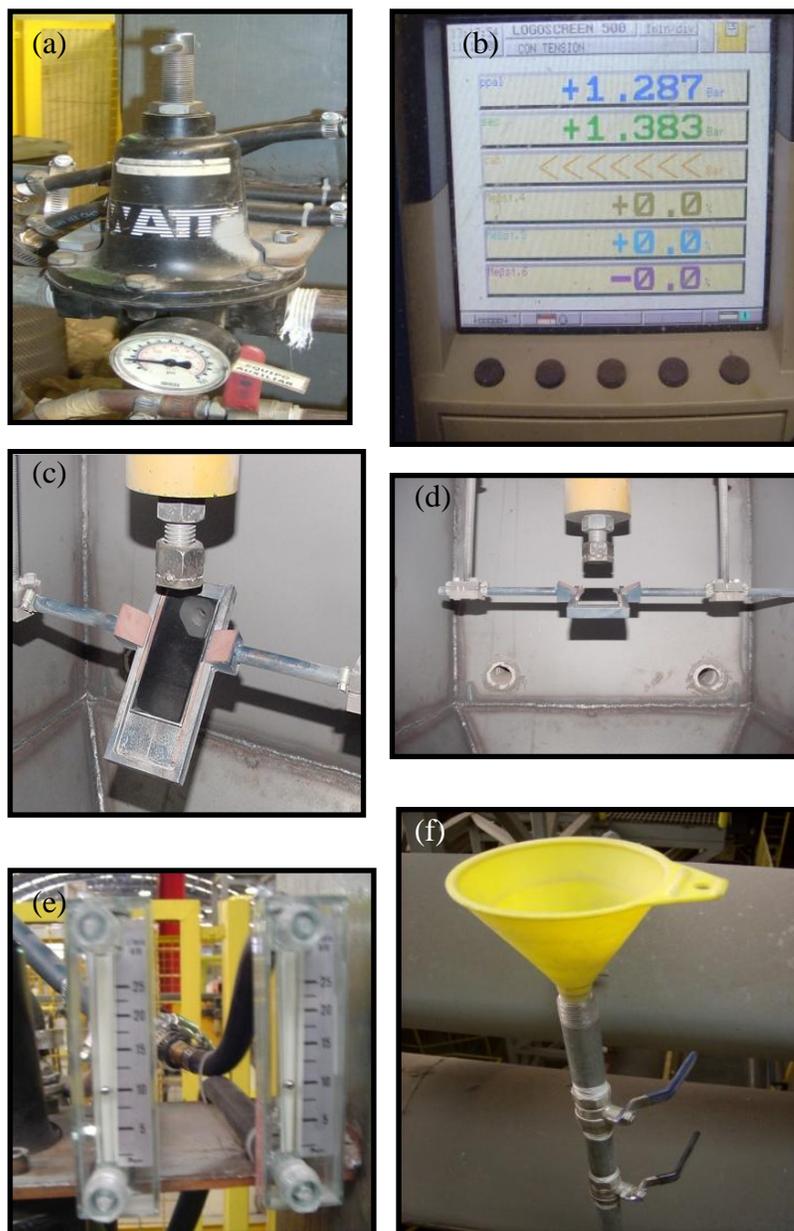


Figura 6.24 Componentes de la Máquina de Erosión FIME II  
 (a) Regulador de presión, (b) Lector electrónico de presiones en las cámaras de mezcla,  
 (c) y (d) porta muestras, (e) flujómetros y (f) Doble válvula.

La máquina cuenta con dos cámaras de mezcla aire-erodente y una cabina en donde internamente se llevan a cabo los ensayos erosivos ver figura 6.23. Otros de los componentes de la máquina se muestran en la figura 6.24 correspondientes a un regulador de presión marca Watt figura 6.24 (a), que alcanza presiones de hasta 11.032 bar (160 psi), la figura 6.24 (b) corresponde a una pantalla electrónica para el monitoreo y registro de la presión de aire dentro de las cámaras de mezcla aire-erodente. La figura 6.24 (c) y (d) corresponde al porta muestras el cual puede posicionarse a la distancia y ángulo deseado de la boquilla, el diámetro interno de la boquilla es de 1.27 cm (media pulgada) por lo cual pueden colocarse otras boquillas de menor diámetro. La figura 6.24 (e) es de dos flujómetros de gas colocados en las líneas de alimentación de aire, fue necesario colocar dos válvulas, figura 6.23 (f), en el conducto por donde se alimenta el erodente a la máquina con la finalidad de realizar el ensayo de la prueba estándar de erosión G76 de la ASTM la cual sugiere que la alimentación del erodente sea de 2 g por minuto. Para una mayor referencia del diseño y construcción de la máquina consultar las referencias [17] y [29].

Con la versatilidad de la máquina se pueden tener una gran variedad de condiciones experimentales de erosión tales como distancias y ángulos de impacto, presiones, tamaños de partícula, cantidad de erodente, entre otras.

## **6.12 Determinación de las presiones del sistema**

Las presiones del sistema fueron determinadas por los estudiantes que realizaron sus investigaciones previas a esta tesis. Las presiones proporcionales son 0.69 y 1.38 bar (10 y 20 Psi) cuando la presión de la línea corresponde a 90 Psi. Para una mayor referencia de las determinaciones de la presión se puede consultar las referencias [17] y [29].

# **CAPITULO 7**

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS EROSIVAS**

### **7.1 Introducción**

En este capítulo se presentan los resultados cualitativos y cuantitativos de las pruebas erosivas realizadas bajo la metodología del estándar G76 de la ASTM y la prueba de erosión FIME-NEMAK a los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma de espesores 80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  y a las placas de la misma aleación sin recubrimiento. Se muestran fotografías e imágenes MEB de las placas erosionadas bajo las dos pruebas de erosión. Se presenta la velocidad de partícula para las diferentes condiciones de erosión. Se realiza la comparación del valor de erosión de la aleación de aluminio 6061 sin recubrimiento contra los valores de erosión de los espesores de estudio OEP y contra los valores del acero H13, los valores de erosión del acero H13 fueron previamente obtenidos a esta tesis.

## 7.2 Prueba del estándar de erosión G76 de la ASTM

Estos ensayos se realizaron únicamente al ángulo de impacto de 90° a una presión de 1.38 bar (20 Psi), se utilizaron 10 g de arena sílica ( $\text{SiO}_2$ ) como erodente por prueba, el erodente utilizado fue alimentando dos gramos cada minuto por un espacio de cinco minutos. Las partículas utilizadas fueron de 50  $\mu\text{m}$  de tamaño promedio tal como lo pide el método estándar para la realización de pruebas de erosión por el impacto de partículas sólidas utilizando un flujo de gas, otras de las condiciones fue la de utilizar una boquilla de diámetro interno de 1.5 mm con separación de 10 mm de la probeta y la boquilla.

La figura 7.1 muestra las huellas de erosión sobre las placas de los cuatro espesores de estudio. Cualitativamente se puede apreciar que hay destrucción del recubrimiento en los cuatro espesores, en las huellas de erosión situadas al centro de las placas el área de color gris metálico corresponde al sustrato metálico de la aleación de aluminio.

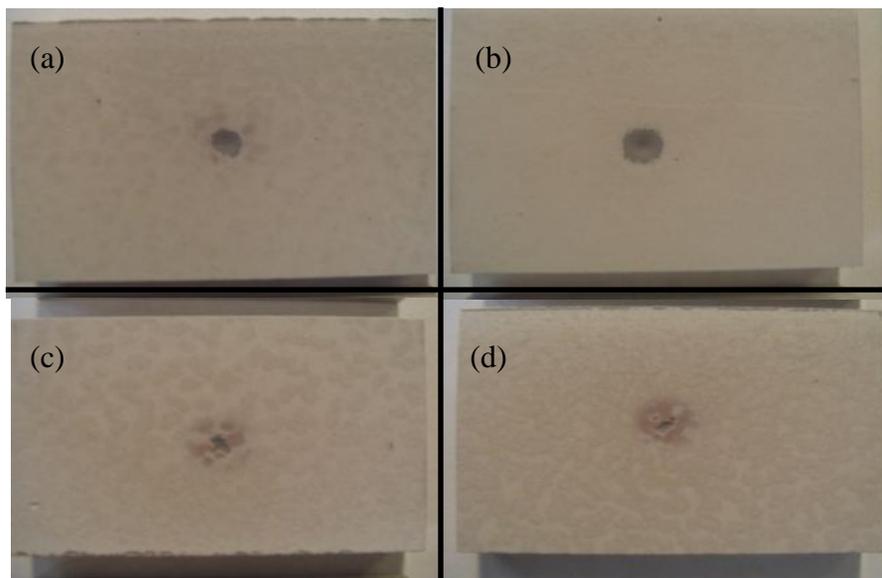


Figura 7.1 Huellas de erosión sobre las placas recubiertas con espesores de (a) 80  $\mu\text{m}$ , (b) 110  $\mu\text{m}$ , (c) 120  $\mu\text{m}$  y (d) 150  $\mu\text{m}$ , bajo metodología del estándar de la ASTM.

Las imágenes de la figura 7.2 corresponden a las huellas de erosión de los recubrimientos de 80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  obtenidas con estereoscopio, las figuras 7.2 (a) y (d) son de las marcas producto de la erosión en los espesores de 80 y 150  $\mu\text{m}$ , estos muestran una huella de erosión en la que el avance de la remoción del recubrimiento se detiene al llegar al borde de la morfología de color oscuro y sigue su trayecto circundando dicho borde, las área promedio de destrucción del recubrimiento son 8.39  $\text{mm}^2$  y 3.02  $\text{mm}^2$  respectivamente, el volumen de masa perdida obtenido experimentalmente rellenando la huella de erosión con un material de densidad conocida asciende a 3.53  $\text{mm}^3$  y 3.24  $\text{mm}^3$  respectivamente.

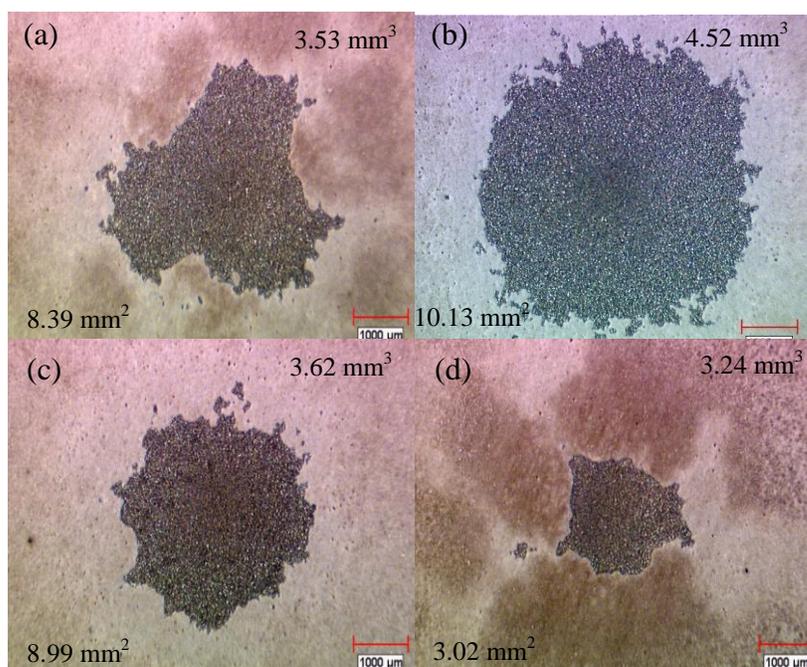


Figura 7.2 Huellas de erosión de las placas de aluminio con recubrimiento OEP bajo el estándar de erosión de la ASTM. Espesores de (a) 80  $\mu\text{m}$ , (b) 110  $\mu\text{m}$ , (c) 120  $\mu\text{m}$  y (d) 150  $\mu\text{m}$ .

Las huellas de erosión en los recubrimientos de 110 y 120  $\mu\text{m}$  de espesor se pueden apreciar en la figura 7.2 (b) y (c). La destrucción del recubrimiento tiene una apariencia redonda bien definida con la mayor pérdida de masa al centro del impacto. Estos recubrimientos presentaron una mayor área y volumen de

masa perdida,  $10.13 \text{ mm}^2$ ,  $8.99 \text{ mm}^2$  y  $4.52 \text{ mm}^3$ ,  $3.62 \text{ mm}^3$  respectivamente, estos espesores muestran menos resistencia al desgaste por erosión.

Los resultados cuantitativos de esta prueba se presentan graficados en la figura 7.3 en forma de masa perdida por masa del erodente. Estos valores también pueden ser apreciados en la Tabla 7.1. Los valores de cada punto corresponden al promedio de cinco ensayos realizados. La pérdida de masa es muy similar para cada espesor erosionado. Los valores se encuentran comprendidos entre  $0.87$  y  $1.21 \text{ mg g}^{-1}$ . El espesor de  $110 \text{ }\mu\text{m}$  es el que presenta la menor pérdida en masa lo cual es debido a que este recubrimiento tiene menor densidad por tener una gran cantidad de glóbulos que encapsulan aire los cuales son altamente frágiles tal como se apreció en las imágenes de MEB de la sección 6.3. Otra de las consideraciones a tomar en cuenta para el valor mínimo de erosión del recubrimiento de  $110 \text{ }\mu\text{m}$  es que tiene mayor área de destrucción o desprendimiento del recubrimiento quedando expuesto el sustrato altamente dúctil en el cual partículas de arena se incrustaron haciéndolo ganar masa del erodente, esto se verá posteriormente con imágenes MEB en este capítulo.

El valor promedio de las desviaciones estándar de los pesos de las placas antes y después de la erosión arrojó una incertidumbre de la medición de  $\pm 3 \times 10^{-4} \text{ g}$  para esta prueba.

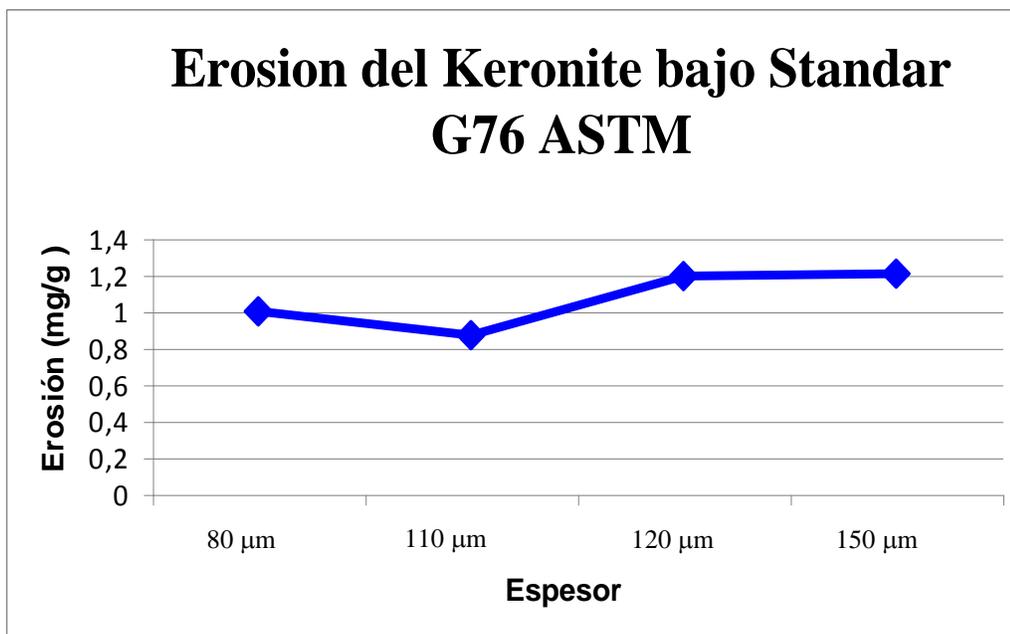


Figura 7.3 Grafica de erosión ( $\text{mg g}^{-1}$ ) en función del espesor de los recubrimientos OEP.

Tabla 7.1 Valores de erosión ( $\text{mg g}^{-1}$ ) correspondientes a la gráfica de la figura 7.1

<b>Espeor <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Erosión (<math>\text{mg/g}</math>)</b>
<b>80</b>	<b>1</b>
<b>110</b>	<b>0.87</b>
<b>120</b>	<b>1.19</b>
<b>150</b>	<b>1.21</b>

La velocidad de partícula en la prueba erosiva del estándar G76 de la ASTM, con tamaño promedio de  $50\ \mu\text{m}$  utilizando el método de doble disco y la ecuación 4.1 es de  $76.2\ \text{m s}^{-1}$ . En la figura 7.4 se pueden apreciar las huellas de erosión en el disco inferior tanto en estado de reposo y en movimiento del doble disco, la huella realizada en movimiento rotacional del disco tiene una apariencia elíptica. La figura 7.5 (a) corresponde a la medición de la velocidad del doble disco la cual es de  $6550.2\ \text{RPM}$  igual a  $109.17\ \text{rev s}^{-1}$  medida con un tacómetro digital, la figura 7.5 (b) es una fotografía del disco inferior con las huellas de erosión con ángulos de separación de  $5^\circ$  y  $5.5^\circ$  por lo tanto el arco promedio entre dichas huellas es de  $4.5 \times 10^{-3}\ \text{m}$ , el radio desde el centro a la huella de erosión es de  $0.05\ \text{m}$  y la distancia entre los discos  $0.01\ \text{m}$ .

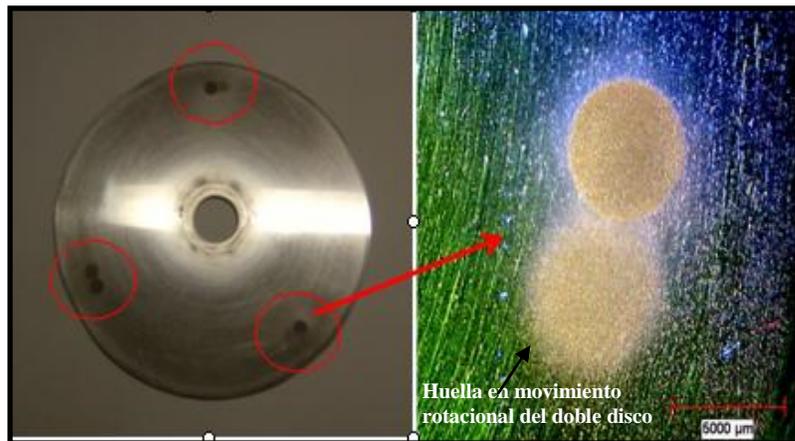


Figura 7.4 Huellas de erosión en disco inferior.



Figura 7.5 Medición de velocidad de partícula. (a) Velocidad rotacional (b) Medición del ángulo entre huellas estacionaria y rotacional.

### 7.3 Prueba de erosión FIME-NEMAK arena seca como erodente

Esta prueba se realizó utilizando la presión de 0.69 bar (10 psi), el material erodente fue arena seca ( $\text{SiO}_2$ ) con un AFS de 52 y un porcentaje de finos de 0.5; puesto que se observó la destrucción del recubrimiento para los cuatro espesores de estudio, no fue necesario utilizar la presión de 1.38 bar (20 psi); la distancia de las muestras a la boquilla fue de 0.05 m. La figura 7.6 muestra la erosión sobre el recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  de espesor a los ángulos de impacto de 20°, 40°, 60° y 90°; para los espesores de 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  se encontró el mismo comportamiento.

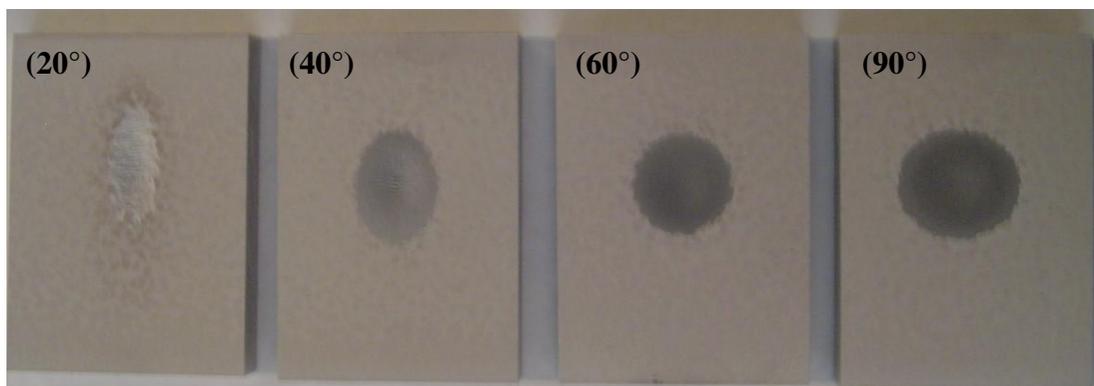


Figura 7.6 Fotografía de las huellas de erosión del recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  de espesor para los ángulos de 20°, 40°, 60° y 90°.

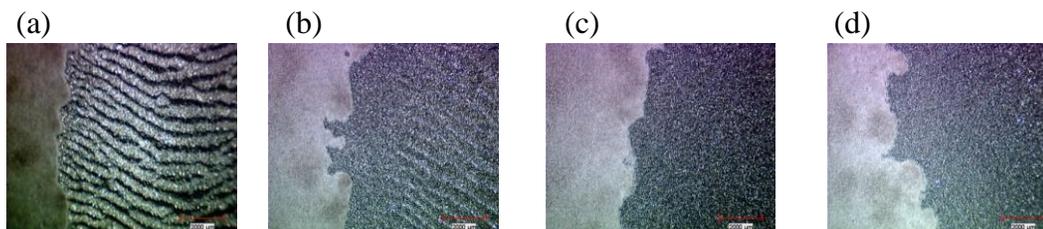


Figura 7.7 Huellas del borde de erosión para los ángulos de 20°, 40°, 60° y 90° en el recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  de espesor, imágenes obtenidas con estereoscopio.

Se aprecia que a medida que disminuye el ángulo de impacto (figura 7.6) se tiene una menor área de destrucción del recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  ya que forma huellas elípticas a ángulos bajos de impacto y una huella de erosión redonda al ángulo de 90°; 2.33  $\text{cm}^2$ , 3.02  $\text{cm}^2$ , 3.29  $\text{cm}^2$  y 4.16  $\text{cm}^2$  son las áreas del recubrimiento desprendidas o destruidas para los ángulos de impacto 20°, 40°, 60° y 90° respectivamente. 0.06112  $\text{cm}^3$ , 0.06939  $\text{cm}^3$ , 0.05122  $\text{cm}^3$  y 0.04096  $\text{cm}^3$  son los volúmenes de masa perdida respectivamente para los ángulos de impacto de estudio, el área al centro de color gris metálico corresponde al sustrato metálico de la aleación de aluminio 6061.

En la figura 7.7 se aprecian las ampliaciones del borde de las huellas de erosión para los cuatro ángulos de impacto, se aprecia que la marca de destrucción del recubrimiento ocasionada por los impactos de las partículas sólidas circunda a la morfología de color oscuro. En las huellas de erosión a los ángulos de impacto de 20° y 40° se observan bandas de deformación en el sustrato metálico que también se les pudiera llamar estrías, las cuales son producto de la deformación plástica y acumulamiento de material.

Los valores cuantitativos de erosión de esta prueba se aprecian en las gráficas de las figuras 7.8 y 7.9 las dos representan los mismos valores (Tabla 7.2), la gráfica de la figura 7.8 está en función del espesor y en función del ángulo de impacto la gráfica de la figura 7.9.

Los valores de erosión de esta prueba se encuentran comprendidos entre 0.1188 y 0.2365 ( $\text{g g}^{-1}$ ). Para los ángulos de 90°, 60° y 40° el espesor de 110  $\mu\text{m}$  es el que presenta la menor pérdida en masa. Hay un comportamiento similar al obtenido con la prueba del estándar de erosión G76 de la ASTM, para el ángulo de 20° el recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  es el que tuvo la menor pérdida en masa. En la figura 7.9 se observa que el comportamiento erosivo de los cuatro

espesores es de mecanismo dúctil como el encontrado por Finnie [16] [21] visto en la sección 3.3.3; la menor erosión es a los ángulos de impacto de 60° y 90°, en estos ángulos se tiene una mayor área de destrucción de los recubrimientos por lo tanto una mayor área del sustrato quedó expuesta a los impactos del erodente causando endurecimiento por deformación, éste endurecimiento causó una mayor resistencia al desprendimiento de masa del sustrato por los impactos de las partículas y aunado a la ganancia de masa por las incrustaciones de partículas de arena hizo que para éstos ángulos resultara la menor pérdida en masa global; al tener un comportamiento dúctil de erosión se puede pensar que los recubrimientos fueron desprendidos o destruidos bajo el diámetro del chorro de arena a los primeros instantes de la prueba erosiva.

El flujo del erodente a través de la boquilla de 5 mm de diámetro es de  $5.5 \text{ g s}^{-1}$  y por unidad de área transversal ( $\text{mm}^2$ )  $0.28 \text{ g mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , la velocidad de partícula obtenida utilizando el método de doble disco a la distancia de 1 cm de la boquilla fue de 71.3 m/s, cabe aclarar que la distancia de la boquilla a la muestra es de 5 cm y no se pudo realizar la medición a esa distancia debido a que el arco sería relativamente grande resultando una gran incertidumbre en su medición; para los pesos obtenidos de las muestras antes y después de la erosión la incertidumbre fue de  $\pm 3 \times 10^{-4} \text{ g}$

El diámetro interno de la boquilla fue revisado cada 10 ensayos de erosión y no excedió más del 10 % del diámetro inicial tal como lo sugiere la norma G76 de la ASTM.

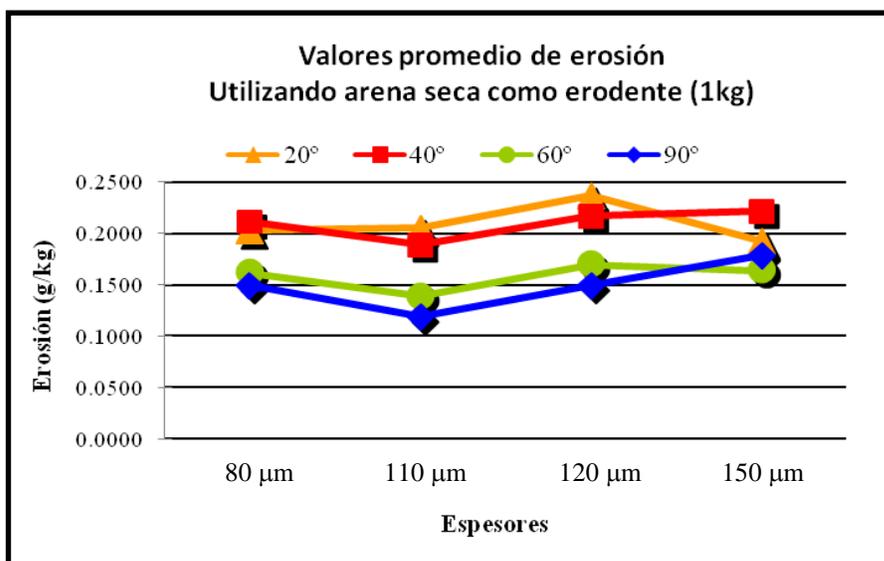


Figura 7.8 Gráfica de erosión en función del espesor utilizando arena seca como erodente.

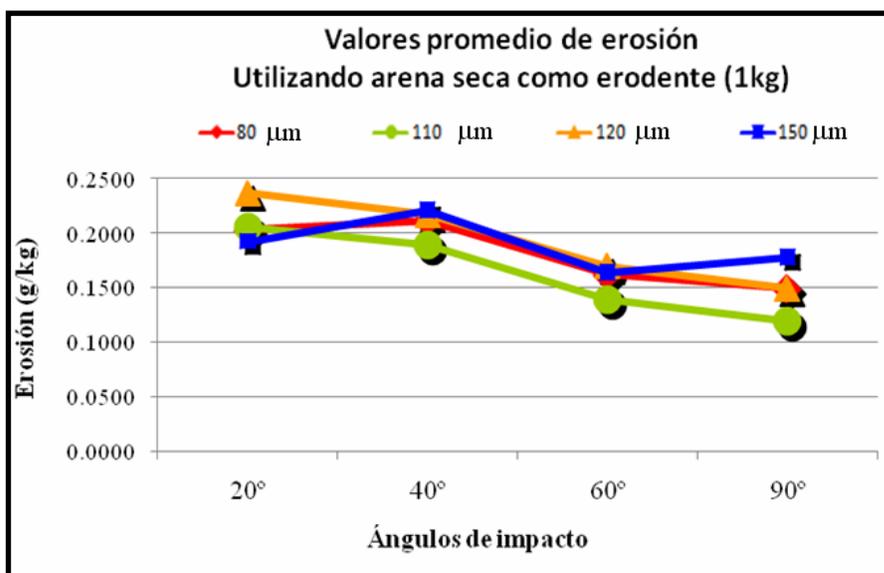


Figura 7.9 Gráfica de erosión en función del ángulo de impacto utilizando arena seca como erodente.

Tabla 7.2 Valores de erosión (g/kg) para los recubrimientos OEP de espesores 80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  a los ángulos de impacto 20°, 40°, 60° y 90°. Erodente arena seca y 0.69 bar de presión.

Micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) /ánaulo	20°	40°	60°	90°
80	0.2025	0.2111	0.1618	0.1491
110	0.2051	0.1887	0.1388	0.1188
120	0.2365	0.2168	0.1695	0.1492
150	0.1923	0.2213	0.1639	0.1780

#### 7.4 Prueba de erosión FIME-NEMAK arena con resinas como erodente

Estos ensayos se realizaron utilizando 5 kilogramos de arena recubierta con resinas al 0.8 % en peso y como parte I y parte II el 50 % (sección 5.2), los ángulos de impacto del erodente sobre el recubrimiento fueron 20°, 40°, 60° y 90° primeramente a la presión de 0.69 bar (10 psi), posteriormente para los recubrimientos a los ángulos de impacto que no sufrieron destrucción en su totalidad dentro del diámetro del chorro del erodente se realizaron ensayos a la presión de 1.38 bar (20 psi). El diámetro de la boquilla para esta prueba fue de 12.7 mm (media pulgada) debido a que el diámetro de 5 mm utilizado en la prueba con arena seca era muy estrecho y por la poca fluidez de la arena con resina, ésta no salía en su totalidad quedando atrapada en la cámara de mezcla aire-erodente. No fue necesario utilizar una columna de arena puesto que los 5 kg cabían perfectamente en la cámara de mezcla, ver figura 7.10, así que generando turbulencia en dicha cámara y con el diámetro de 12.7 mm de la boquilla, la arena con resina salía en su totalidad a través de la boquilla impactando la muestra por lo tanto el valor de erosión se obtuvo con la masa perdida de las probetas entre los 5 kg de erodente.



Figura 7.10 Cámara de mezcla con carga de 5 kg de arena con resinas [2].

Las figura 7.11 y 7.12 se aprecian las huellas de erosión más representativas para los espesores de 80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  a los ángulos de impacto de 20°, 40°, 60° y 90°, el impacto de la arena sobre las muestras es de izquierda a derecha, no para el ángulo de 90° el cual tiene un impacto perpendicular, la línea cortada delimita los espesores y los ángulos para los cuales no hay destrucción o desprendimiento del recubrimiento para después quedar el sustrato expuesto. Se aprecia que a medida que disminuye el espesor y el ángulo de impacto se tiene mayor resistencia a la erosión, el espesor de 80  $\mu\text{m}$  no presentó desprendimiento del sustrato de aluminio para los cuatro ángulos de impacto, el espesor de 110  $\mu\text{m}$  no fue desprendido para los ángulos de impacto de 40° y 20°, los espesores de 120 y 150  $\mu\text{m}$  mostraron mayor resistencia sólo al ángulo de impacto de 20°. Para el espesor de 150  $\mu\text{m}$  al ángulo de impacto de 90° (figura 7.11) se aprecia que parcialmente hay destrucción del recubrimiento, la fase de color oscuro presenta mayor resistencia a la erosión y permanece al centro en el sustrato metálico como se observó en las marcas erosivas de las pruebas anteriores.

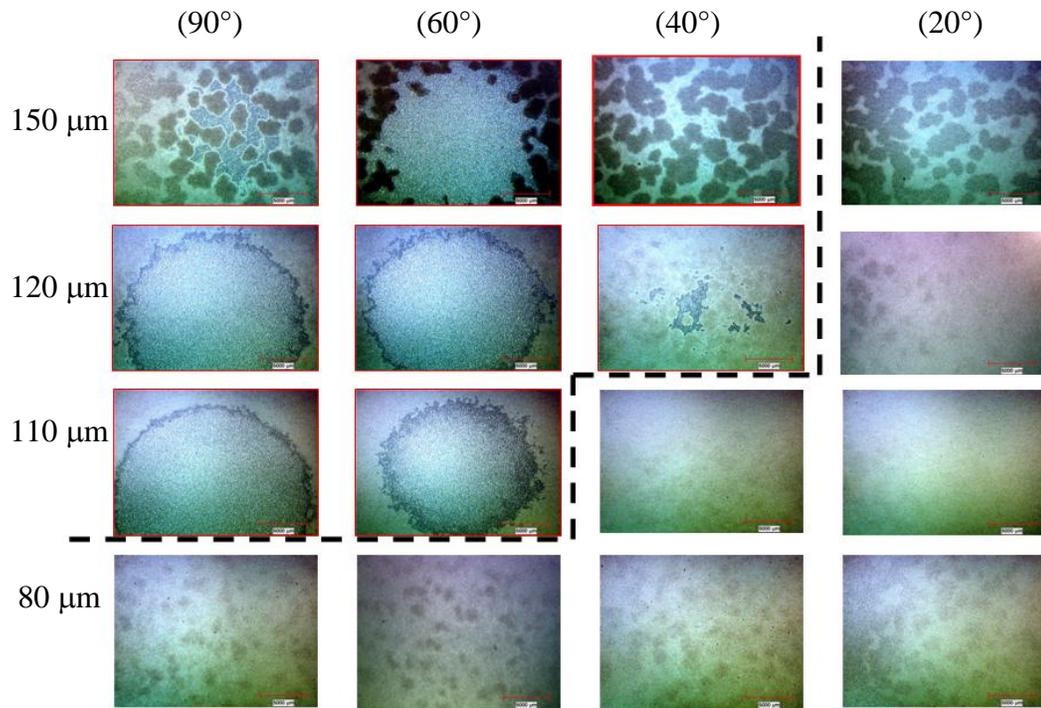


Figura 7.11 Imágenes de las huellas de erosión utilizando arena con resina como erodente y 0.69 bar de presión. La línea cortada delimita a los espesores y a los ángulos que no sufrieron desprendimiento del sustrato.

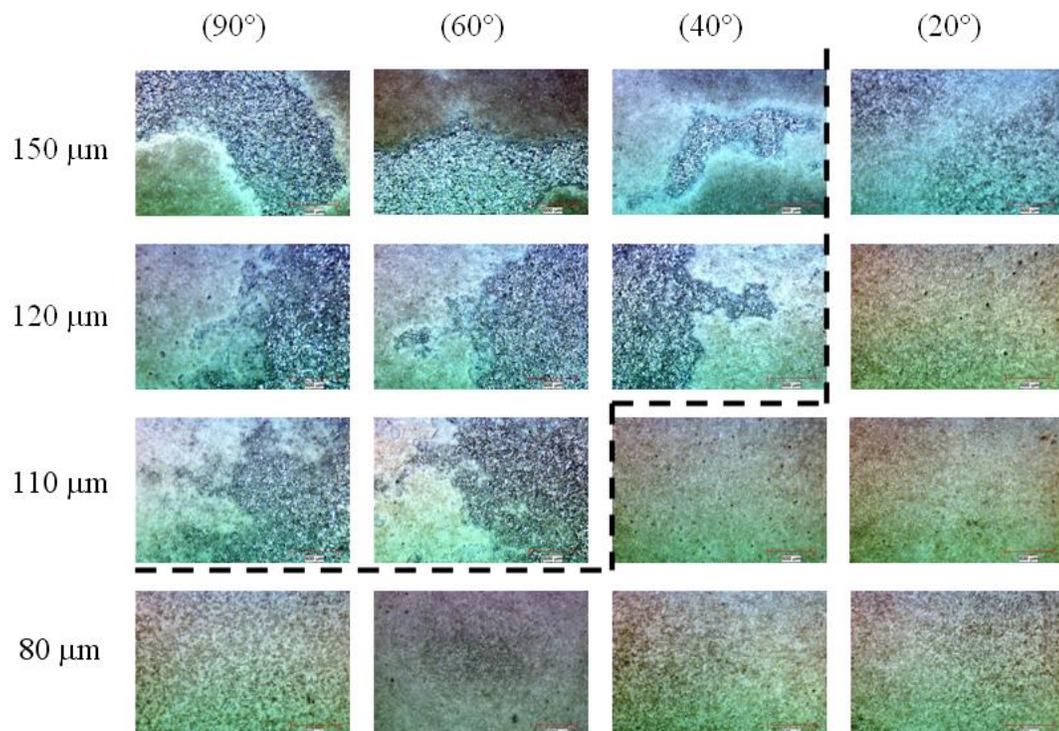


Figura 7.12 Imágenes de las huellas de erosión a mayores aumentos utilizando arena con resina como erodente y 0.69 bar de presión.

Para los espesores de 120 y 110  $\mu\text{m}$  a los ángulos de impacto de 90° y 60° se presenta una marca de erosión redonda siendo destruida el área completamente del recubrimiento que estuvo en interacción con el diámetro del chorro de arena que lo impactó, para los espesores de 120 y 150  $\mu\text{m}$  al ángulo de impacto de 40° se aprecia un mínimo de destrucción de los recubrimientos.

En la figura 7.12 muestra a mayores aumentos la zona de desprendimiento del recubrimiento, se observa que el espesor de 80  $\mu\text{m}$  fue el que más resistió a la erosión para los cuatro ángulos de impacto utilizando la presión de 0.69 bar (10 psi) esto puede ser debido a que el recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  fue el que presentó menor porosidad, cabe recordar (sección 2.4.3) que la presencia de porosidad puede tener efectos negativos en el material como la reducción del módulo de elasticidad y su dureza. El espesor de 110  $\mu\text{m}$  no tuvo destrucción al ángulo de impacto de 20° y 40°, así como también los espesores 120 y 150  $\mu\text{m}$  al ángulo de impacto de 20°, por lo tanto éstos recubrimientos a esos ángulos de impacto por presentar mayor resistencia a la erosión fueron llevados a otra prueba erosiva incrementando al doble la presión (1.38 bar) de la cámara de mezcla. Las figuras 7.13 y 7.14 muestran las marcas de erosión sobre dichos espesores a los determinados ángulos de impacto utilizando la presión de 1.38 bar, al realizar con escrutinio la revisión de estos espesores se encontró que los espesores de 80 y 150  $\mu\text{m}$  al ángulo de 20° son los únicos que resistieron a la erosión a esa segunda presión, el espesor de 80  $\mu\text{m}$  presenta destrucción parcial del recubrimiento a los ángulos de 40°, 60° y 90°, los espesores de 110 y 120  $\mu\text{m}$  presentan desprendimiento del sustrato o destrucción en su totalidad abarcada el área de interacción con diámetro del chorro de arena para los ángulos de 40° y 20°, éstos espesores no presentan estrías o bandas de deformación en el sustrato como las observadas empleando arena seca como erodente a esos ángulos de impacto ya que la velocidad de la partícula es menor que en la prueba de arena seca y por lo tanto no tiene la suficiente energía para deformar el sustrato.

Los valores cuantitativos se aprecian en las graficas de las figuras 7.15 y 7.16 con 0.69 bar de presión en función del espesor y ángulo de impacto respectivamente y en las figuras 7.17 y 7.18 utilizando 1.38 bar de presión. Los valores de erosión para esta prueba utilizando 0.69 bar de presión se encuentran comprendidos entre 0.00289 y 0.01840 g kg<sup>-1</sup>, el espesor de 80 μm es el que tiene la menor pérdida en masa para los cuatro ángulos de impacto. El espesor de 120 μm a los ángulos de impacto de 90° y 60° presenta la mayor pérdida en masa. El ángulo de impacto de 90° presenta menor pérdida en masa para los espesores de 80 y 150 μm. Para los espesores de 110 y 120 μm se tiene una erosión de mecanismo frágil y para los espesores de 80 y 150 μm se presenta un mecanismo frágil para los ángulos de impacto de 20°, 40° y 60° disminuyendo el valor de erosión al ángulo de 90°, habrá que recordar y tomar en cuenta que el recubrimiento se encuentra en un sustrato altamente dúctil por lo cual hay un comportamiento primeramente frágil el cual después tiende a dúctil con el mínimo valor de erosión al ángulo de 90° esto se concluye al ver la imagen del espesor de 150 μm al ángulo de impacto de 90° donde se aprecia parcialmente la destrucción del recubrimiento quedando el sustrato al descubierto y con ello endurecimiento por deformación con pérdidas mínimas de masa de la aleación de aluminio y masa ganada del erodente.

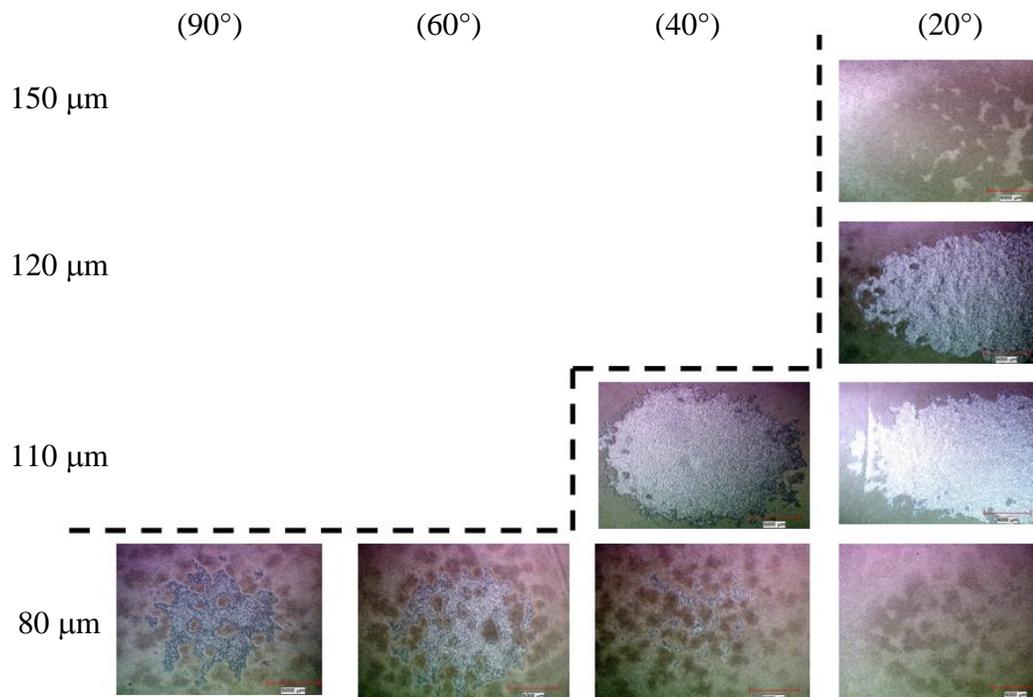


Figura 7.13 Imágenes de las huellas de erosión utilizando arena con resina como erodente y 1.38 bar de presión. Los espesores de 80 y 150  $\mu\text{m}$  no presentaron desprendimiento del sustrato metálico al ángulo de impacto de 20°.

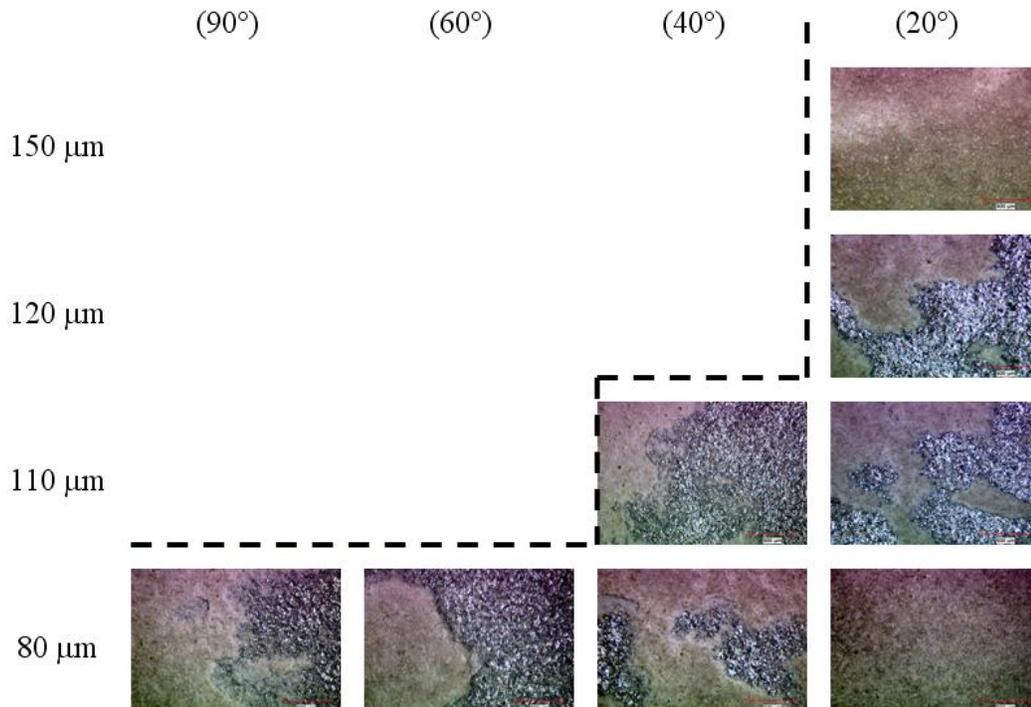


Figura 7.14 Imágenes a mayores aumentos de las huellas de erosión utilizando arena con resina como erodente y 1.38 bar de presión.

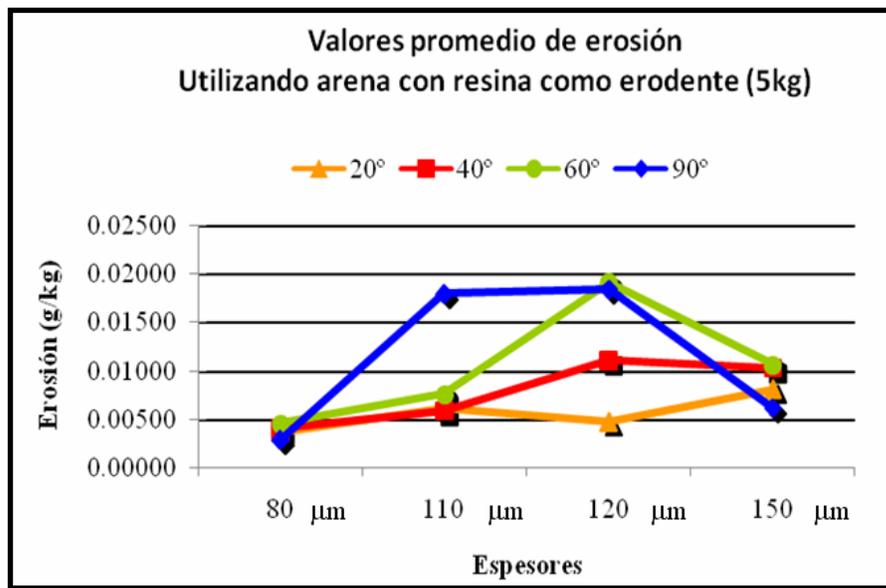


Figura 7.15 Gráfica de los recubrimientos OEP representando los valores de erosión en función del espesor (80,110, 120 y 150 μm). Arena con resina como erodente.

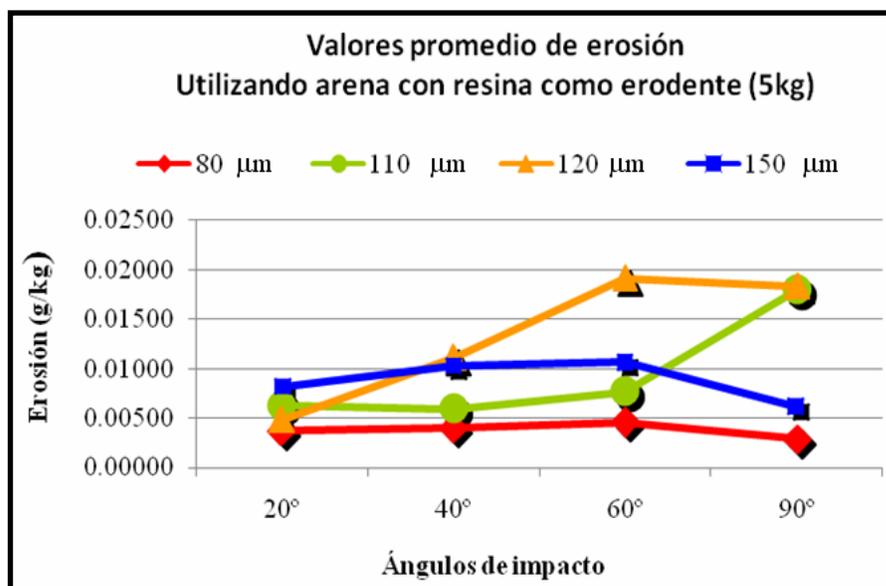


Figura 7.16 Gráfica de los recubrimientos OEP representando los valores de erosión en función del ángulo. Arena con resina como erodente.

Tabla 7.3 Valores de erosión (g/kg) para los recubrimientos OEP de espesores 80, 110, 120 y 150 μm a los ángulos de impacto 20°, 40°, 60° y 90°. Erodente arena con resina y 0.69 bar de

Micrómetros/ángulo	20°	40°	60°	90°
80	0.00374	0.00403	0.00461	0.00289
110	0.00627	0.00590	0.00764	0.01792
120	0.00482	0.01113	0.01917	0.01840
150	0.00817	0.01030	0.01068	0.00616

La figura 7.17 representa la grafica de erosión del recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  de espesor la cual se encuentra en función del ángulo de impacto utilizando las presiones de 0.69 y 1.38 bar. Hay mayor erosión a la presión de 1.38 bar que para la presión de 0.69 bar, se presenta una diferencia de hasta tres veces más en el ángulo de impacto de 90°.

Se aprecia prácticamente el mismo comportamiento para las dos presiones, se incrementa el valor de erosión desde el ángulo de 20° hasta el ángulo de 60° el cual disminuye ligeramente al ángulo de 90°.

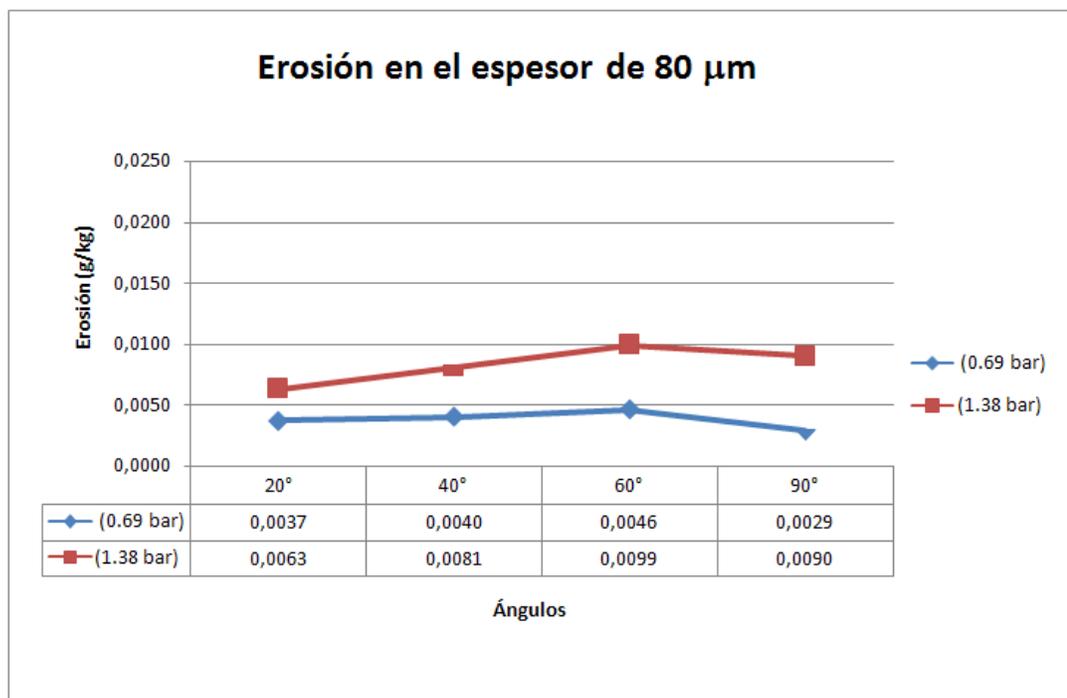


Figura 7.17 Gráfica del recubrimiento OEP de 80  $\mu\text{m}$  de espesor para las presiones de 0.69 y 1.38 bar.

La figura 7.18 corresponde a la gráfica de los espesores de 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  para las presiones de 0.69 y 1.38 bar a los ángulos de impacto de 20° y 40°, a estas condiciones se tuvo mayor resistencia a la erosión utilizando la presión de 0.69 bar. En dicha gráfica se aprecian dos comportamientos, para los dos ángulos de impacto a la presión de 1.38 bar la erosión decrece conforme aumenta el espesor, teniendo los menores valores en el espesor de 150  $\mu\text{m}$ . Para la presión de 0.69 bar hay mayor erosión conforme aumenta el espesor.

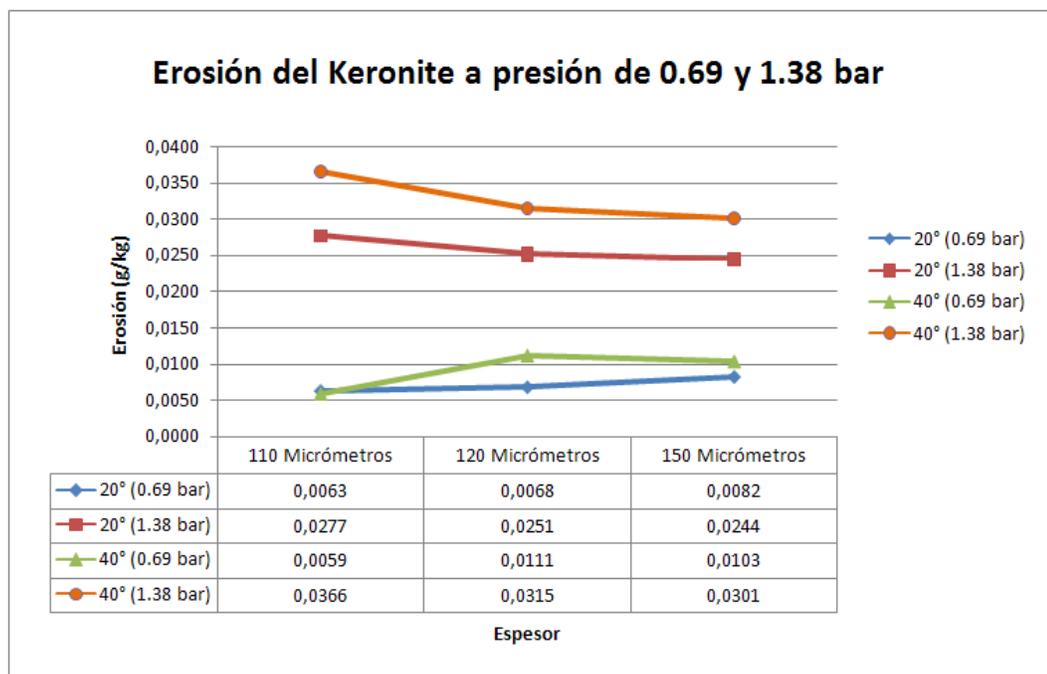


Figura 7.18 Gráfica de los recubrimientos OEP de 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  de espesor a los ángulos de impacto de 20° y 40°.

Al realizar estudios de difracción de rayos X sobre una placa erosionada de 150  $\mu\text{m}$  de espesor al ángulo de impacto de  $90^\circ$  y comparándola con la difracción de rayos X de una muestra del mismo espesor sin erosionar se puede apreciar que la placa erosionada presenta parcialmente destrucción del recubrimiento quedando la fase oscura anclada en el sustrato metálico la cual presenta mayor resistencia a la erosión, las intensidades en la placa erosionada (picos) más sobresalientes (figura 7.19) corresponden al aluminio y siguiendo con mayor proporción las intensidades de  $\alpha$ -alúmina por lo tanto se concluye que la fase oscura es más resistente a la erosión y corresponde a la  $\alpha$ -alúmina (corindón).

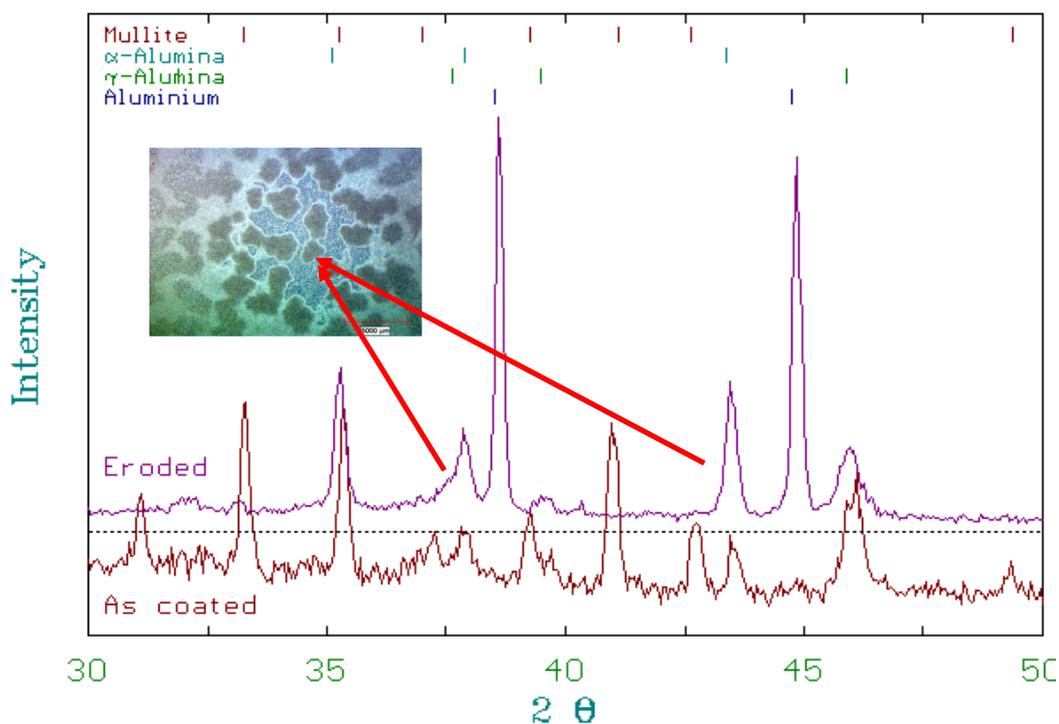


Figura 7.19 Espectro de difracción de rayos X de una muestra erosionada y otra sin erosionar de 150  $\mu\text{m}$  de espesor.

Los valores de erosión utilizando arena con resina como erodente se encuentran muy por debajo de los valores utilizando arena seca y esto es debido a que el sistema tribológico cambia significativamente para ambos casos, Eduardo Rodríguez [29] explica este comportamiento:

En el caso de arena recubierta con resina, se ha cambiado substancialmente el sistema tribológico. En la figura 7.20 (1) y (2) se representa un modelo ideal de una partícula angular de arena sílica sin recubrir y una partícula de arena sílica recubierta de resina polimérica.

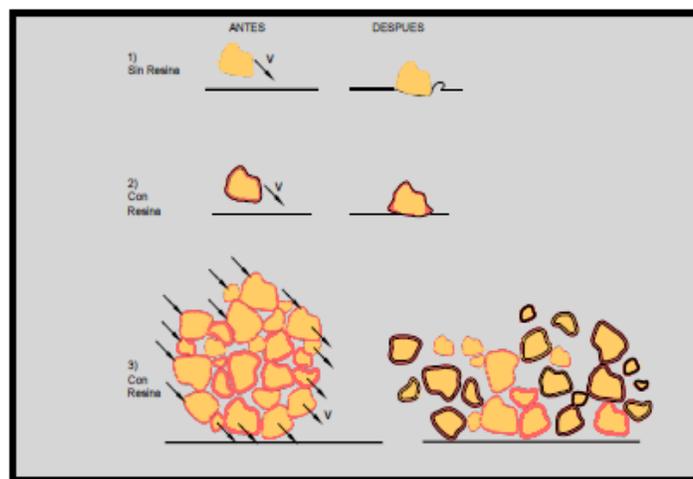


Figura 7.20 Modelo idealizado de impacto de partículas duras sobre una superficie (1) Partícula sin recubrimiento. (2) Partículas con recubrimiento. (3) Aglomerado de partículas con recubrimiento [29].

En la figura 7.20 (1), la partícula actúa como una partícula dura perfectamente rígida. La partícula no sufre deformación o deterioro. Toda o casi toda la energía cinética de la partícula se transforma en energía absorbida por la superficie impactada en forma de deformación elástica, deformación plástica, formación y propagación de grietas, calor, ondas y vibraciones generadas por el impacto. En la figura 7.20 (2), la resina absorbe gran parte de la energía del impacto. En un caso ideal, el recubrimiento absorbe toda la energía y la superficie no sufre daño significativo. La capa absorbe la energía en forma de deformación elástica, plástica, calor generado, etc. Lo anterior explica por que la arena con resina presenta niveles de erosión mucho menor que la arena

seca, además de la disipación adicional de energía en el rompimiento de enlaces secundarios que provocan la formación de aglomerados de granos de arena, figura 7.20 (3).

La figura 7.21 corresponde a la gráfica de erosión de las placas de aluminio sin recubrimiento cerámico utilizando 5 kg de arena con resina como erodente por cada prueba. Existe mayor erosión a la presión de la cámara de mezcla aire-erodente de 1.38 bar que a la presión de 0.69 bar. El comportamiento de erosión para ambas presiones es de mecanismo dúctil presentando las máximas erosiones a ángulos bajos de impacto (20° y 40°). La figura 7.22 muestra las superficies erosionadas.

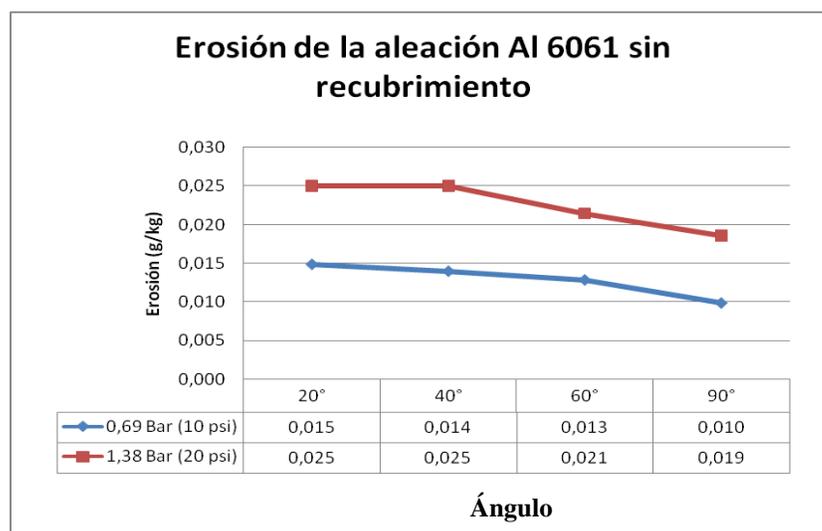


Figura 7.21 Gráfica de erosión para las placas de aluminio de la aleación 6061 sin recubrimiento OEP. Los valores están dados en  $\text{mg kg}^{-1}$ .

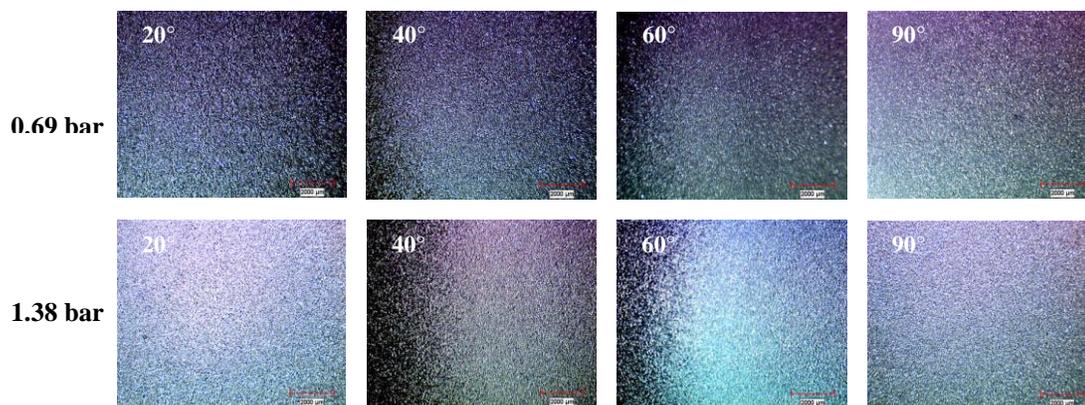


Figura 7.22 Imágenes de la marca de erosión de las placas de la aleación de aluminio 6061 sin recubrimiento cerámico.

En una investigación de erosión previa a ésta se realizó la medición de la velocidad de la arena con resinas utilizando un video convencional y al tener las mismas condiciones de erosión (máquina, presiones, 5 kg de arena, 0.8 % en peso de resinas) no fue necesario medirla con el método de doble disco. Los valores de velocidad que reporta Eduardo Rodríguez [2] para la presión de 0.69 y 1.38 bar son 6-8 y 9-10  $\text{m s}^{-1}$  respectivamente. Sólo se midió el flujo de la arena a través de la boquilla (figuras 7.23 y 7.24) para corroborarlo con los valores previamente obtenidos, el flujo de la arena con resina utilizando la presión de 0.69 bar en unidad de  $\text{mm}^2$  (área transversal de la boquilla) es  $6.6 \text{ g mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y para la presión de 1.38 bar  $8.55 \text{ mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  valores muy similares a los previamente encontrados.



Figura 7.23 Arena con resinas impactando a una placa con recubrimiento OEP al ángulo de 20°.



Figura 7.24 Imagen del la medición del flujo de arena a través de la boquilla realizada con un video.

Al realizar la comparación relacionando los valores de erosión encontrados en la aleación de aluminio 6061 sin recubrimiento y en el recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma (Keronite) de 80  $\mu\text{m}$  al ángulo de impacto de 90° ya que a éstas condiciones y en ese espesor se obtuvieron los menores índices de erosión (figura 7.16 y 7.17) se encontró que el recubrimiento Keronite presenta cerca de 4 veces menos desgaste por erosión que la aleación sin recubrimiento cumpliéndose parcialmente la hipótesis (sección 1.4). Al hacer la relación con el acero H13 con 55 Rockwell C de dureza previamente estudiado, (figura 7.25) siendo su valor de erosión al ángulo de impacto de 90° de 0.076 mg/kg, por lo tanto el recubrimiento Keronite tuvo cerca de 40 veces más desgaste que el acero.

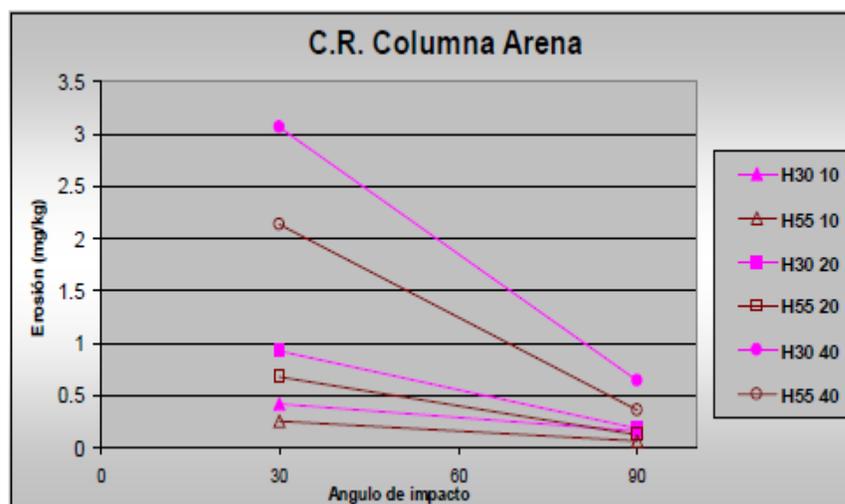


Figura 7.25 Gráfica de los resultados de los ensayos de erosión con arena con resinas para diferentes durezas del acero H13 [29].

Tabla 7.4 Valores de erosión del acero H13 con distintas durezas utilizando arena con resinas como erodente [29].

	Presión, Bar, (Psi)	Ángulo (°)	E (mg/kg)
H30	0.69 (10)	30	0.422998
H30	0.69 (10)	90	0.16
H30	1.28 (20)	30	0.926441
H30	1.28 (20)	90	0.192771
H55	0.69 (10)	30	0.257426
H55	0.69 (10)	90	0.076152
H55	1.28 (20)	30	0.685371
H55	1.28 (20)	90	0.13253
H30	2.75 (40)	30	3.066929
H30	2.75 (40)	90	0.644269
H55	2.75 (40)	30	2.134694
H55	2.75 (40)	90	0.36

## 7.5 Imágenes MEB de las superficies erosionadas

### 7.5.1 Erosión bajo el estándar G76 de la ASTM

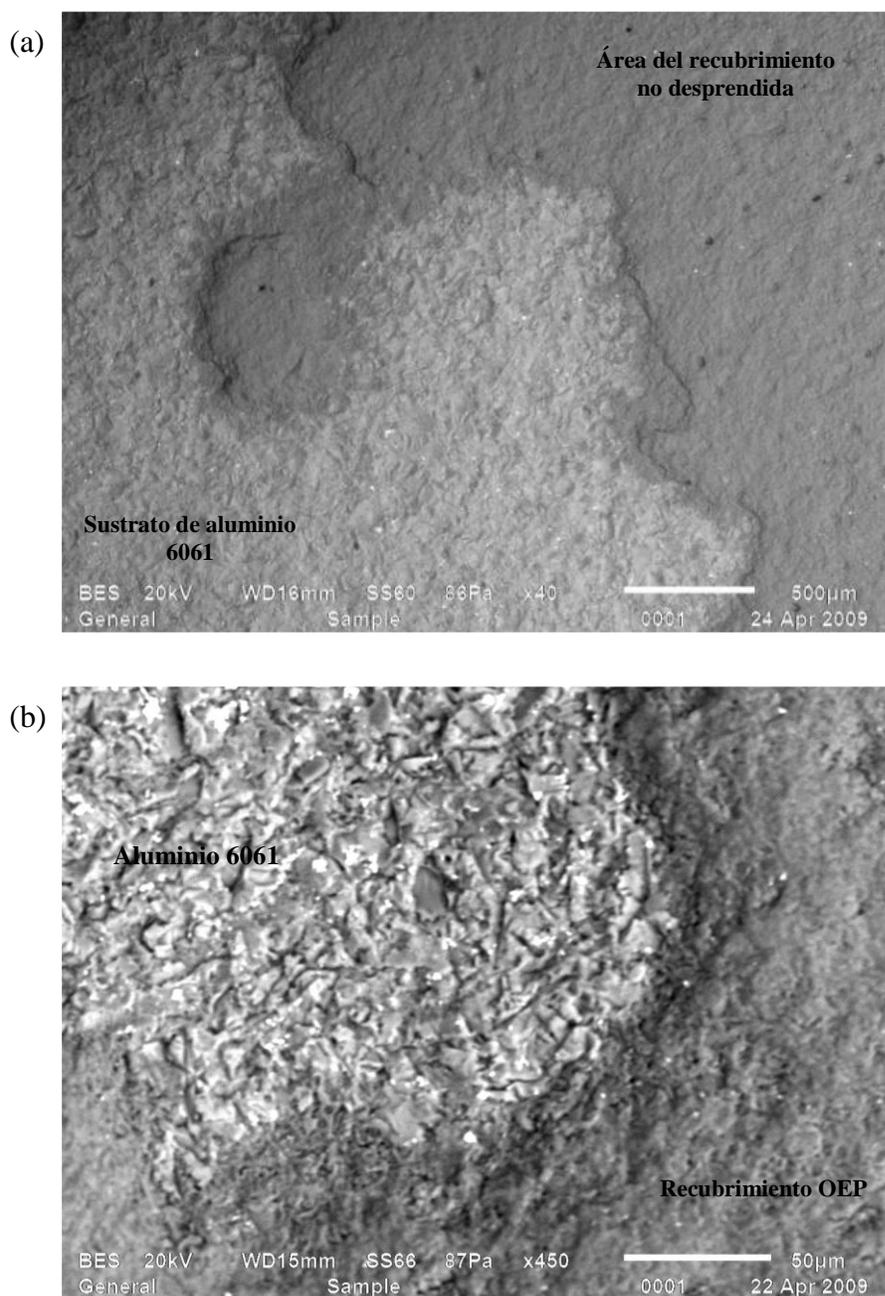


Figura 7.26 Micrografías MEB del borde de la huella de destrucción del recubrimiento OEP bajo la prueba del estándar de erosión de la ASTM.

Las micrografías de la figura 7.26 corresponden al borde de la marca de erosión sobre un recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  de espesor, se aprecia la exposición del sustrato de aluminio después que el recubrimiento fue destruido con una gran deformación plástica producto de los impactos de las partículas de arena. La figura 7.27 es del área del recubrimiento que no presentó destrucción, se observa que no presenta más la capa superior porosa la cual fue destruida por los impactos de las partículas quedando la capa homogénea, se observa que la superficie presenta un gran daño apreciándose partículas próximas a desprenderse y microgrietas.

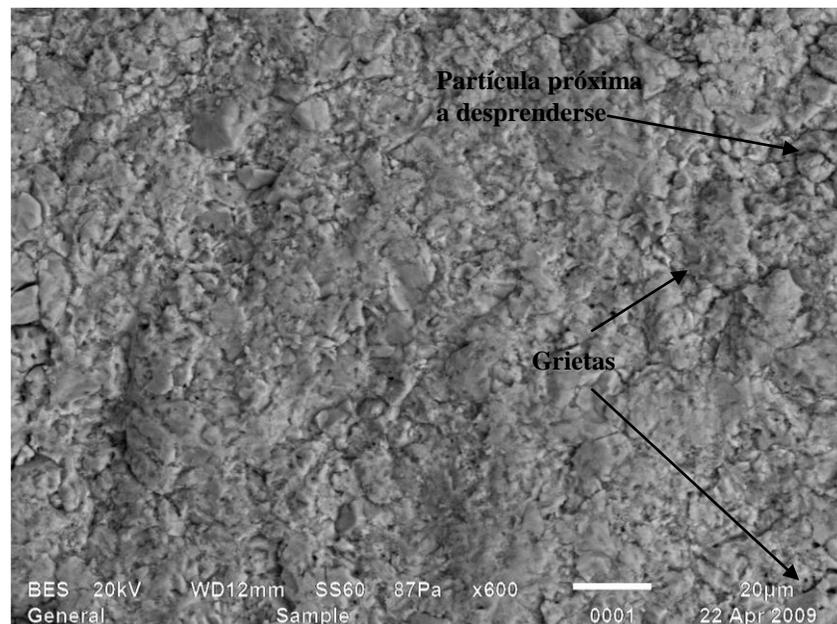


Figura 7.27 Micrografía MEB del área del recubrimiento que no fue desprendida del sustrato.

Se encontraron partículas de arena en el sustrato metálico, la figura 7.28 muestra una partícula angular fuertemente incrustada en el sustrato de la aleación de aluminio 6061 corroborada con la función EDXA del microscopio electrónico de barrido (figura 7.29)

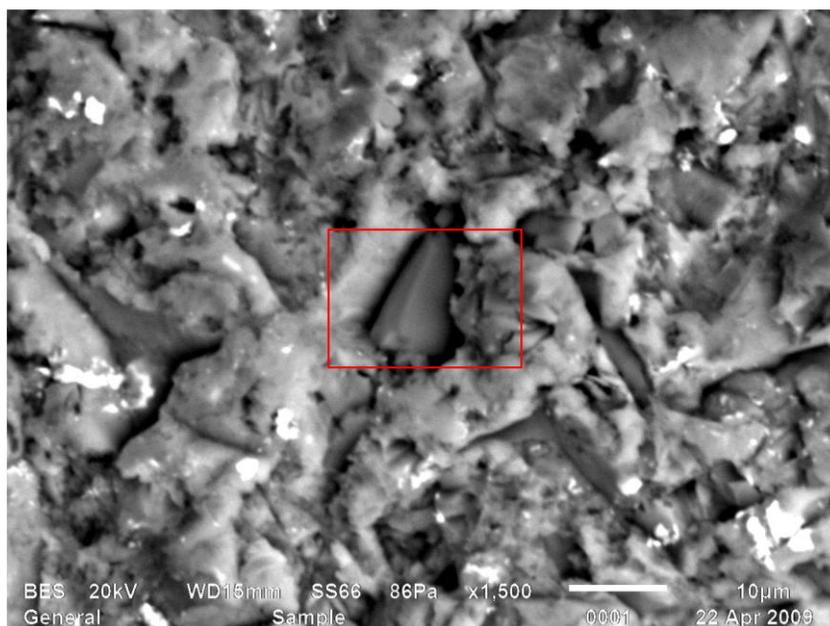


Figura 7.28 Partícula angular de arena incrustada en el sustrato metálico.

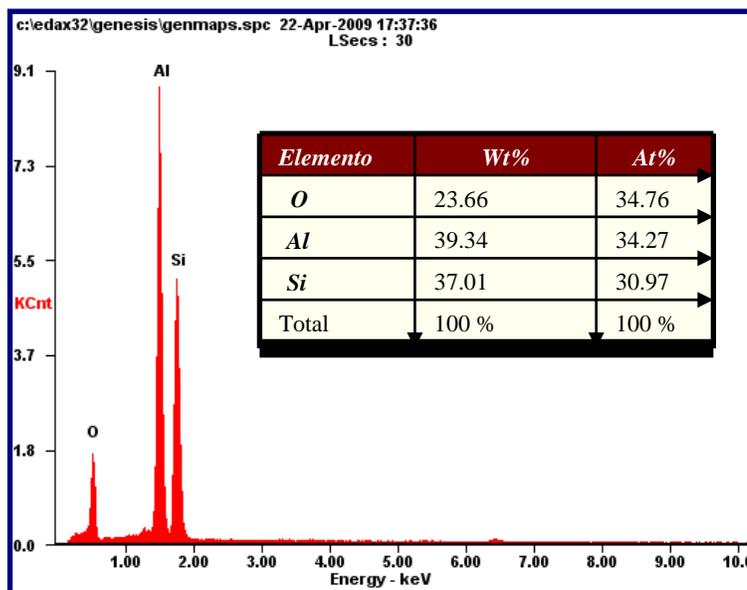


Figura 7.29 Espectro de análisis. Función EDXA del microscopio electrónico de barrido.

## 7.5.2 Erosión bajo la metodología FIME-NEMAK utilizando arena seca como erodente

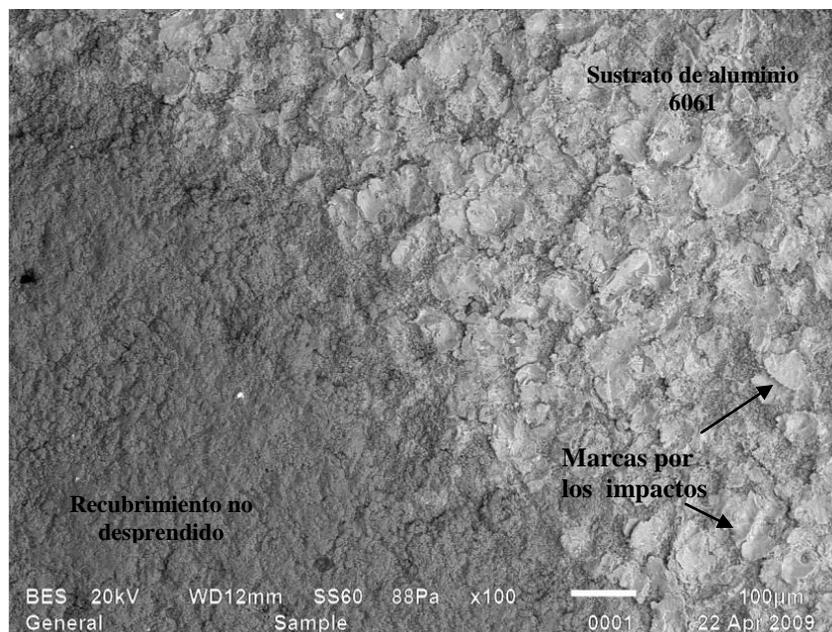


Figura 7.30 Micrografía MEB del borde de la huella de erosión al ángulo de impacto de 90°.

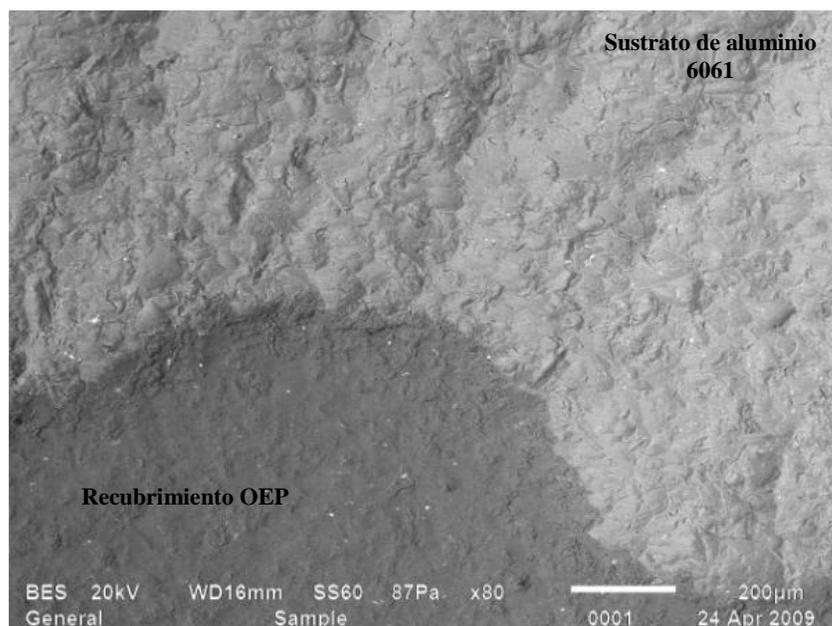


Figura 7.31 Micrografía MEB del borde de la huella de erosión al ángulo de impacto de 40°.

La imagen 7.30 corresponde a una micrografía MEB del borde de la marca de erosión o de destrucción de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  de espesor al ángulo de impacto de 90°, se aprecia que el sustrato metálico presenta la deformación plástica individual de cada impacto por partícula que tienen una apariencia redonda como se vio en las secciones 3.3.2 y 6.8.1.

En la figura 7.31 el área más oscura corresponde al recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  de espesor al ángulo de impacto de 40°, el área clara es del sustrato de aluminio en el cual empiezan a parecer las bandas de deformación (estrías) y en la figura 7.32 estas estrías se aprecian con más claridad producto de las deformaciones y acumulamiento de material por los impactos a bajos ángulos.

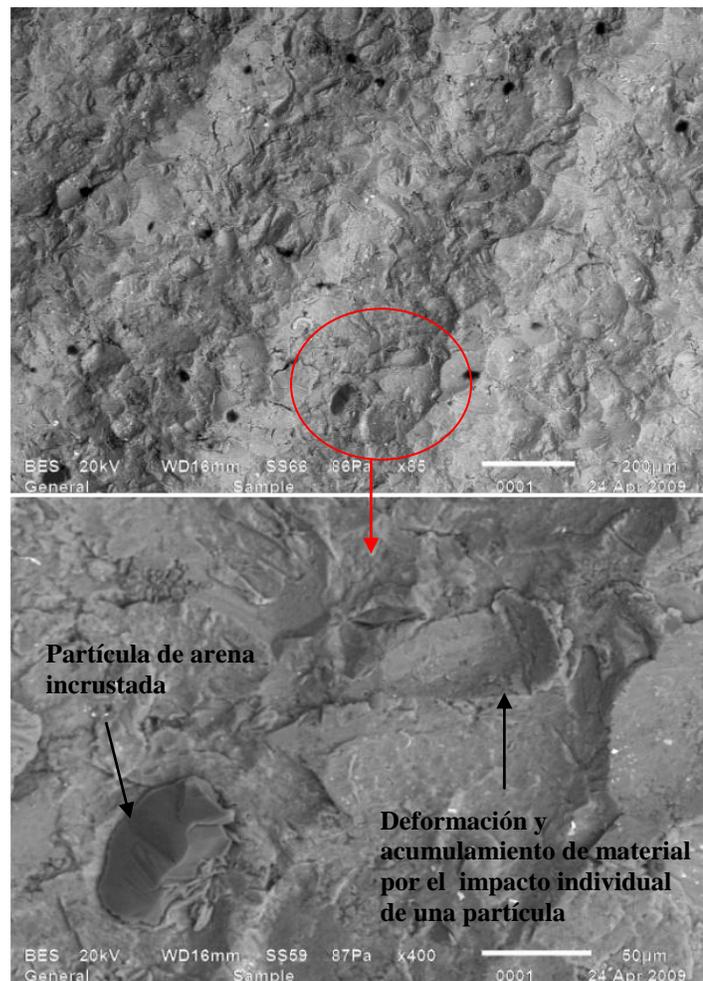


Figura 7.32 Micrografía MEB de sustrato de aluminio después de destruido el recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  al ángulo de impacto de 20°.

### 7.5.3 Erosión bajo la metodología FIME-NEMAK utilizando arena con resina como erodente

Las imágenes de la figura 7.33 corresponden a un recubrimiento OEP de 150  $\mu\text{m}$  de espesor erosionado a 90° con 0.69 bar de presión y utilizando arena con resinas como erodente. En la figura 7.33 (a) se aprecia el borde de la huella de erosión mientras que en la figura 7.33 (b) solo se observa el área del recubrimiento sin mucho daño aparente después de haber sido desprendida la capa porosa, la capa homogénea vista con un mayor aumento en la figura 7.33 (c) se aprecia con más detalle el daño ocasionado por la erosión.

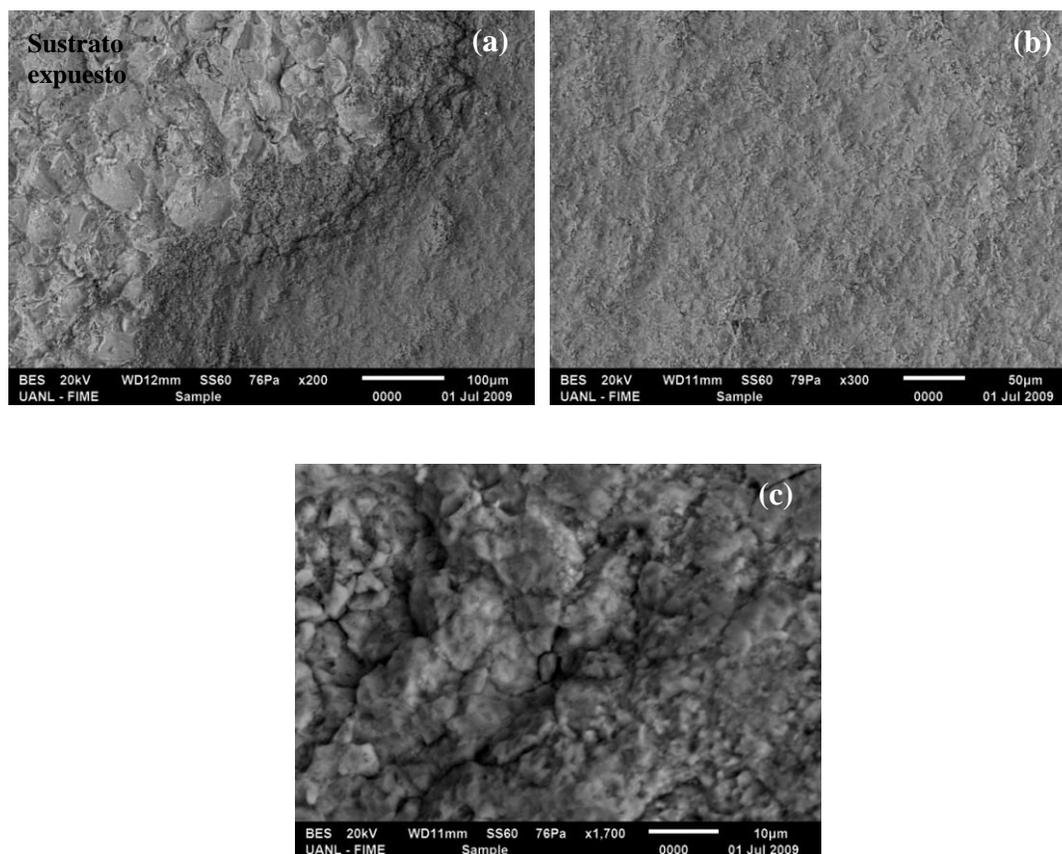


Figura 7.33 Espesor de 150  $\mu\text{m}$  erosionado a 90° (a) Borde de la marca erosiva, (b) Área del recubrimiento a 300 aumentos, (c) Área del recubrimiento a 1,700 aumentos.

Paulatinamente el recubrimiento fue desprendido del sustrato metálico, las imágenes de la figura 7.34 corresponden a un recubrimiento de  $120\ \mu\text{m}$  de espesor después de haber sido erosionado.

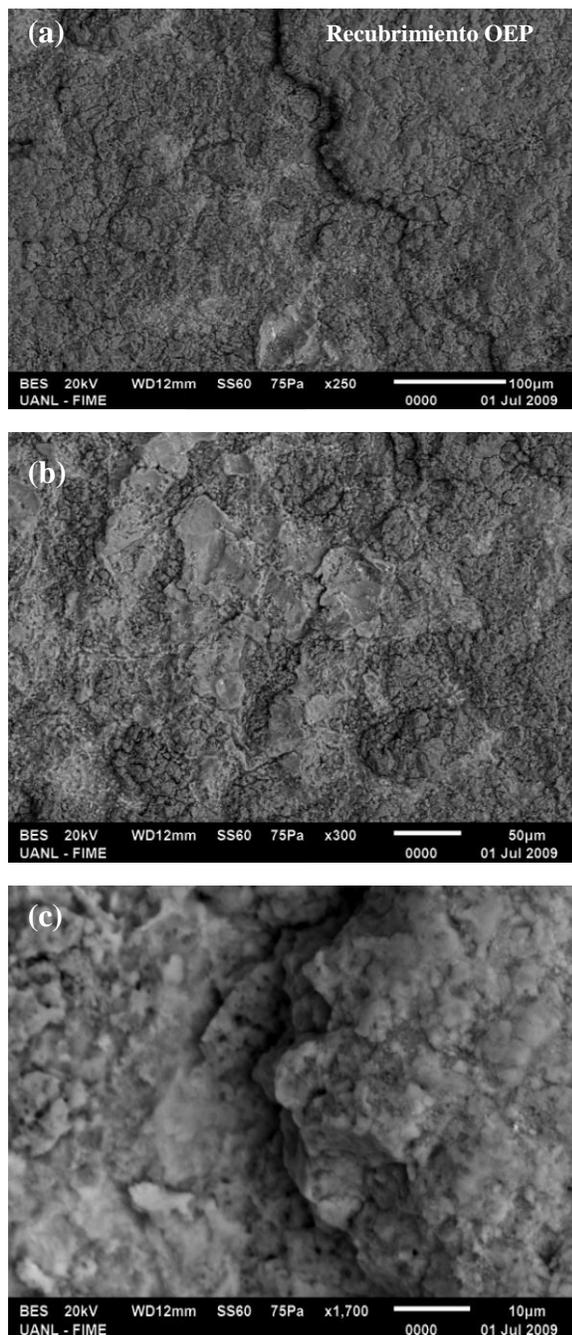


Figura 7.34 Espesor de  $120\ \mu\text{m}$  erosionado a  $90^\circ$  (a) Borde de la marca erosiva, (b) Área del recubrimiento a 300 aumentos, (c) Área del recubrimiento a 1,700 aumentos.

Los recubrimientos de 110  $\mu\text{m}$  de espesor erosionados al ángulo de impacto de  $20^\circ$  y utilizando 0.69 bar de presión muestran áreas más erosionadas que otras, la figura 7.35 (c) muestra con claridad la fragmentación del recubrimiento a lo largo de una grieta que atraviesa por el centro de la imagen.

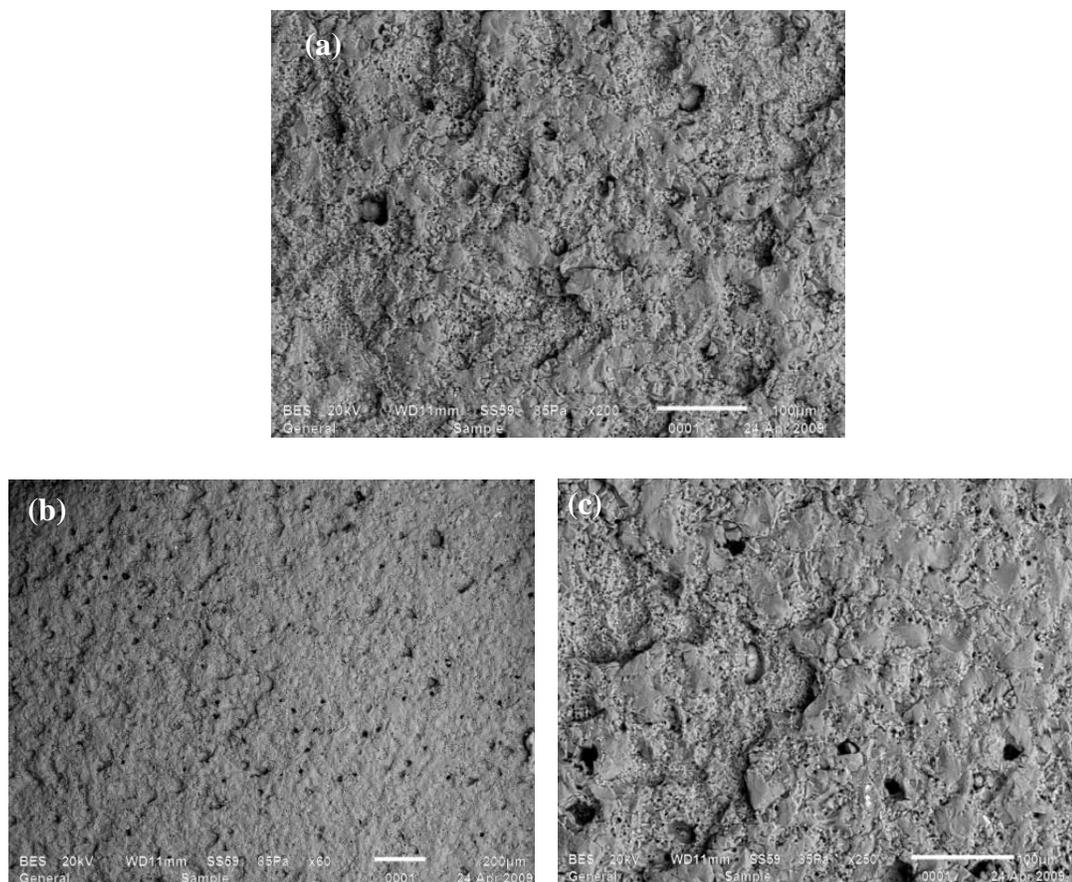


Figura 7.35 Superficies del recubrimiento OEP de 110  $\mu\text{m}$  de espesor erosionado a  $20^\circ$ .

El recubrimiento presenta cráteres propios que pudieran confundirse con los producto del impacto de las partículas sólidas sobre el recubrimiento. Estos cráteres son propios del recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma, producto de las descargas eléctricas localizadas al momento del crecimiento y deposición del recubrimiento cerámico, figura 7.36.

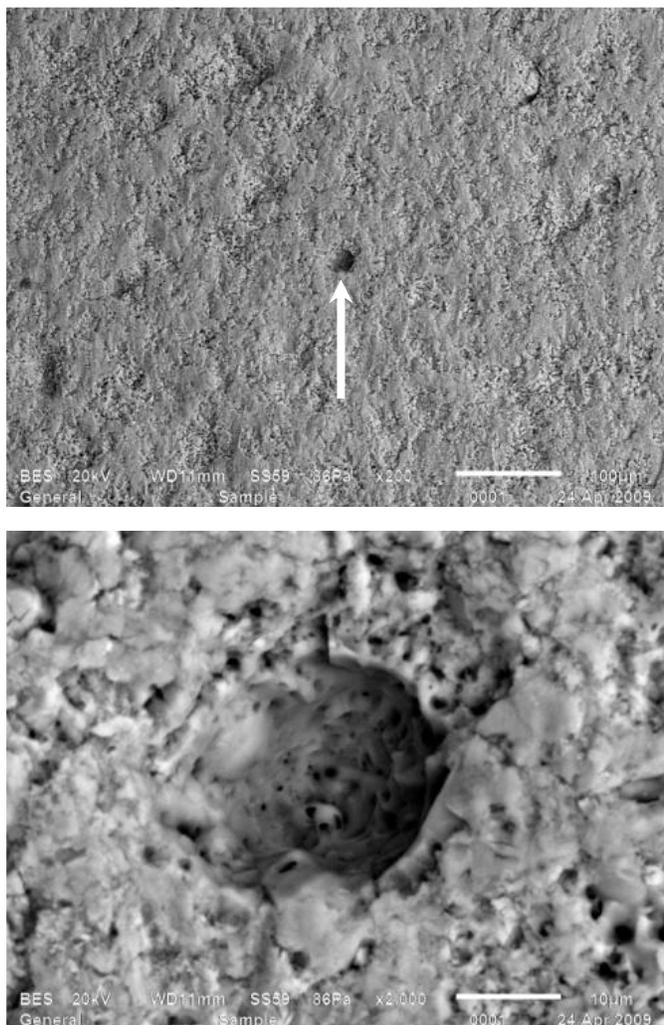


Figura 7.36 Superficies del recubrimiento OEP de 110 µm de espesor a 20°.

La figura 7.37 corresponde a las superficies de recubrimientos de 80  $\mu\text{m}$  de espesor después de impactada con arena con resina; a mayores magnitudes se aprecia la fragmentación del material, figuras 7.37 (b) y (c).

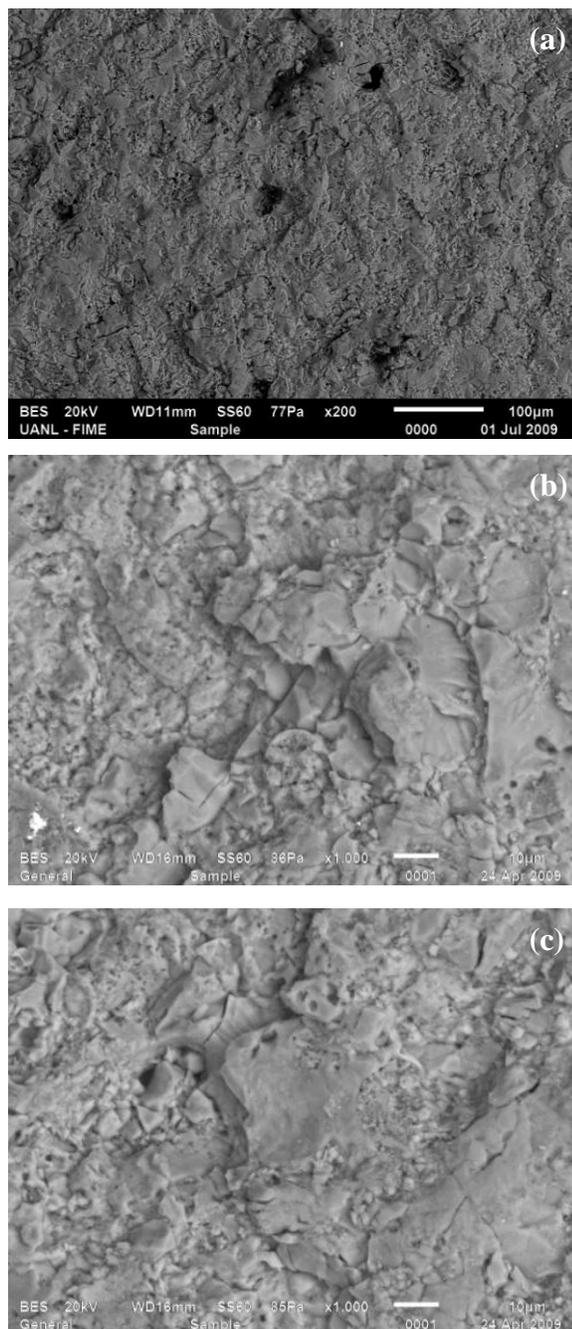


Figura 7.37 Superficie de recubrimientos de 80  $\mu\text{m}$  de espesor erosionados a 90° de impacto.

Las imágenes de la figura 7.38 muestran un corte transversal de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  de espesor erosionado al ángulo de  $90^\circ$  en la sección próxima a la fase del corindón que quedo anclada al sustrato metálico y no fue destruida o desprendida por completo, se aprecia que no hay deformación plástica del sustrato por debajo del recubrimiento, por lo tanto una gran parte de la energía cinética fue absorbida por el recubrimiento generando su desprendimiento así como la propagación de grietas a lo largo del recubrimiento.

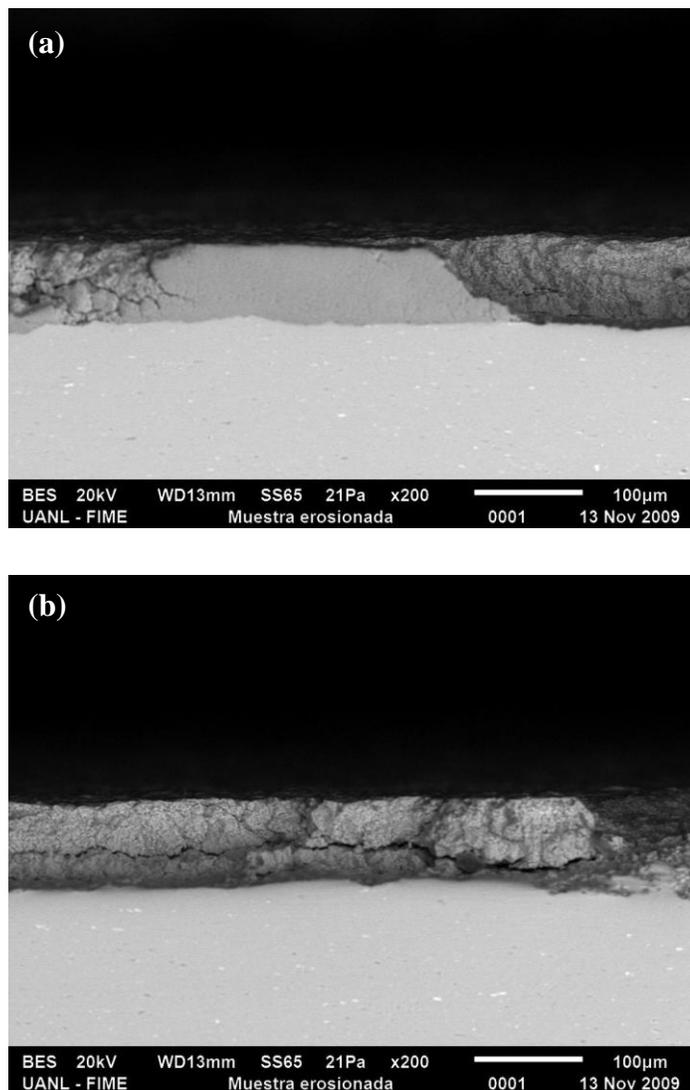


Figura 7.38 Sección transversal de un recubrimiento de 150  $\mu\text{m}$  después de erosionado a  $90^\circ$ .

## CAPITULO 8

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Conclusiones

En la prueba de erosión del estándar de la ASTM y en la metodología FIME-NEMAK en la que se utilizó arena seca como erodente hay destrucción del recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma en los cuatro espesores de estudio a los cuatro ángulos de incidencia.

En la prueba de erosión de la metodología FIME-NEMAK en la que se utilizó la mezcla arena con resina como erodente no hay destrucción del recubrimiento de 80  $\mu\text{m}$  de espesor para los cuatro ángulos de incidencia utilizando la presión de 0.69 bar (10 psi).

En los espesores de 80 y 150  $\mu\text{m}$  al ángulo de incidencia de  $20^\circ$  no hay destrucción del recubrimiento utilizando la mezcla arena con resina como erodente a las dos presiones 0.69 y 1.38 bar (10 y 20 psi).

La alta dureza Vickers encontrada en los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma no contribuyó a que los espesores presentaran mayor resistencia a la erosión.

La fase de  $\alpha$ -alúmina (corindón) del recubrimiento de oxidación electrolítica de plasma es la que presentó mayor resistencia a la erosión.

Los valores cuantitativos permitieron comparar el desgaste por erosión de la aleación de aluminio 6061 contra el recubrimiento EOP de 80  $\mu\text{m}$  de espesor y el acero H13 con 55 Rockwell C, el recubrimiento presentó cerca de 4 veces menos desgaste que la aleación sin recubrir pero resultó cerca de 40 veces con mayor desgaste que el acero H13

Una vez hecha la comparación de la erosión en el acero H13 y en el recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma de 80  $\mu\text{m}$  de espesor bajo condiciones reales de desgaste se concluye que el recubrimiento por ser frágil no es recomendable para la aplicación en herramientas de moldeo.

## 8.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar pruebas de erosión en el recubrimiento Keronite de espesores menores a 80  $\mu\text{m}$  puesto que hay menor capa porosa por lo cual puede presentar mayor resistencia al desgaste por erosión. La porosidad contribuye a la fragilidad del recubrimiento. Se recomienda que en el proceso de obtención se pueda controlar la capa porosa así como la rugosidad.

Se recomienda que el recubrimiento sea completamente de  $\alpha$ -alúmina (corindón) por presentar en este estudio mayor resistencia a la erosión.

Se recomienda que el recubrimiento OEP de mecanismos sujetos al desgaste por erosión que la forma operativa con las mismas características que las encontradas en esta tesis sean los espesores de 80 y 150  $\mu\text{m}$  a ángulos de impacto de 20°.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Soderberg S, Hogmark S, Engman U and Swahn H. Tribology International, december 1981, 333-343.
- [2] A. Plati, J.A. Curran & T.W. Clyne “ Adhesión of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings” Poster of Gordon Laboratory. Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge.
- [3] J.A. Curran, T.W. Clyne “Thermo-Physical properties of plasma electrolytic oxide coating on aluminium” Surface & Coatings Technology 199 (2005) 168– 176.
- [4] Maritza Lozano, Lars Olrik, Bill Buchman, Arturo Juárez, Rafael Colás “Tratamientos termoquímicos para mejorar las características y propiedades de aleaciones de aluminio”, Presentación CONGRESO del IMEDAL. MTY, junio 2008.
- [5] J.A. Curran “Plasma Electrolytic Oxide Coatings”  
<http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/jac/james.html>
- [6] J.A. Curran, T.W. Clyne “Porosity in plasma electrolytic oxide coatings” Acta Materialia 54 (2006) 1985–1993.
- [7] J.A. Curran, T.W. Clyne “The thermal conductivity of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium and magnesium” Surface & Coatings Technology 199 (2005) 177– 183.
- [8] Van TB, Brown SD, wirtz GP, ACS Bull 1977; 56:563-6
- [9] J.A. Curran & T.W. Clyne. “The Structure and Morphology of Plasma Electrolytic Oxide Coatings on Aluminium” Poster of Gordon Laboratory. Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge.
- [10] Pérez Unzueta Alberto. Notas del curso Tribología, FIME UANL 2008
- [11] Such and Saka Bhushan, Bharat and Gupta, B. K Handbook of Tribology Materials, Coatings and Surface treatments. pp 2.1, 2.10, 2.13, 2.16, 2.17, 2.19, 2.20, 2.29.

- [12] Koch, g. H. et al. "Corrosion Cost and Preventive Strategies in The United State" CC technologies and NACE International, 2001
- [13] Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé. "Ciencia e Ingeniería de los Materiales" 4ta. Edición. pp. 110, 259, 944.
- [14] ASM Handbook Volume 18. "Wear". ASM International Materials Park Ohio 1990 10 th Edition
- [15] Wood, R.J.K., Jones, T.F., Ganeshalingam, J. & Miles, N.J. 2004. "Comparison of predicted and experimental erosion estimates in slurry ducts". Wear, 256 (2004), pp 937-947.
- [16] Hutchings I.M. "Tribology Friction and Wear of engineering Materials". Edward Arnold U.K. 1 st Edition. (1992). pp 133, 134, 135, 150-152, 171-173, 175.177, 182-186, 194.
- [17] Treviño Acevedo Álvaro M. Tesis de Maestría "Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión". FIME-UANL, México (2004).
- [18] ASTM G 40-04. "Standard Terminology Relating Wear and Erosion".
- [19] Feng Z. Ball A. "The Erosion of Four Materials Using Seven Eroducts-Towards an Understanding"; Wear. (1999). pp. 233-235, 674-684.
- [20] Yabuki Akhihiro, Matsuwaki Kazuo, Matsumura Masanobu. "Critical Impact Velocity in the Solid Particles Impact Erosion of Metallic Materials". Wear, 233- 235 (1999). 468-475.
- [21] Iain, Finnie. "Some Reflections on the Past and Future of Erosion". Wear. 1-10 (1995). 186-187.
- [22] Sundararajan G. "The Solid Particle Erosion of Metallic Materials: The Rationalization of the Influence of Material Variables"; Wear (1995) pp 186-187,129-144.
- [23] McCabe Laura, Sargent Gordon, Conrad Hans: "Effect of Microstructure on the Erosion of the Steel by Solid Particles"; Wear (1985). pp. 105, 257-277.

- [24] Levy Alan V. "Solid Particle Erosion and Erosion-Corrosion of Materials". ASM (1995). pp 1,4,11,66,67.
- [25] Meng H.C., Ludema K.C. "Wear Models and Predictive Equations: Their Form and Content"; Wear. 181-183 (1995) 443-457.
- [26] Finnie I., Stevik G.R., Ridgely J.R.: "The Influence of Impingement angle on the erosion of Ductile Metals by Angular Abrasive Particles"; Wear 152 (1992) 91-98.
- [27] Hutchings I.M: "A Model for the Erosion of Metals by Spherical Particles at Normal Incidence". Wear 70 (1981) 269-281.
- [28] Levy Alan V. "The Solid Particle Erosion Behavior of Steel as a Function of Microstructure"; Wear 68 (1981) 269-287.
- [29] Rodríguez de Anda Eduardo. Tesis Doctoral "Desgaste erosivo en aleaciones para cajas de corazones" FIME-UANL, México (2006)
- [30] Ambrosini L., Bahadur S.: "Erosion of AISI 4140 Steel". Wear 117 (1987). 37-48.
- [31] Foley T., Levy A. "The Erosion of Heat Treated Steels". Wear 91 (1983). 45-64.
- [32] Sheldon G.L., Kanhere Ashok: "An Investigation of Impingement Erosion Using Single Particles"; Wear 21 (1972) 195-209.
- [33] Fang C.K., Chuang T.H.: "Surface Morphologies and Erosion Rates of Metallic Building Materials After Sandblasting"; Wear 230 (1999) 156-164.
- [34] Wensink Henk, Elwenspoek Mico C.: "A Closer Look at the Ductile-Brittle transition in Solid Particle Erosion"; Wear 253 (2002) 1035-1043.
- [35] R.C. Barik, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, K.R. Stokes, R.L.Jones "Corrosion, erosion and erosion-corrosion performance of plasma Electrolytic oxidation (PEO) deposited  $Al_2O_3$  coatings". Surface & Coatings Technology 199 (2005) 158-157.
- [36] ASTM G 76-04. "Standard Practice for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets"

- [37] Stevenson A.N.J., Hutchings I.M.: "Scaling Laws for Particle Velocity in the gas blast erosion test"; *Wear* 181-183 (1995) 56-62.
- [38] Slikkerveer P.J., Bouten P.C.P., in't Veld F.H., Scholten H. "Erosion and Damage by Sharp Particles". *Wear* 217 (1998) 237-250.
- [39] Manual de Capacitación, "Proceso de Corazones", NEMAK, S.A. R&D México. (2003).
- [40] Velasco Abraham, Velásquez Juan Pablo, Curso de Capacitación "Proceso de producción de Corazones", NEMAK, S.A. R&D. México. (2008).

## Lista de Figuras

Figura	Descripción	Página
1.1	Erosión en cajas para corazones de arena.	4
1.2	Valores de erosión en distintos materiales.	5
2.1	Capas que integran el recubrimiento OEP.	10
2.2	Superficie del recubrimiento OEP.	10
2.3	Vista transversal del recubrimiento OEP.	10
2.4	Forma curva y control dimensional del recubrimiento.	10
2.5	Ilustración de la celda electrolítica.	12
2.6	Solera y disco tratándose termo-químicamente.	12
2.7	Equipo para realizar la oxidación electrolítica de plasma.	13
2.8	Etapas del proceso de deposición del óxido cerámico sobre la aleación ligera.	14
2.9	Espectro de difracción de rayos X para un recubrimiento sobre la aleación de aluminio 6082.	15
2.10	Gráfica de la proporción de fases a través del recubrimiento de 100 $\mu\text{m}$ .	16
2.11	Niveles bajos de porosidad <3%.	18
2.12	Nivel de porosidad alrededor del 5%.	18
2.13	Micrografías MEB mostrando la superficie de los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma de diferentes espesores.	19

2.14	Rugosidad de la superficie y densidad de cráteres visibles en función del espesor del recubrimiento.	20
2.15	Porosidad interconectada.	20
2.16	Parte inferior del recubrimiento OEP.	21
2.17	Porosimetría por intrusión de mercurio.	23
2.18	Perfil de esfuerzos aproximado a través del espesor.	26
2.19	Curvatura uniforme en un recubrimiento OEP.	26
2.20	Indentación en el sustrato.	27
2.21	Dureza en un aluminio anodinado.	27
2.22	Dureza en un aluminio con recubrimiento OEP.	27
2.23	Perfiles de dureza y módulo de Young locales a través del grosor de una capa de 80 $\mu\text{m}$ medido de la superficie exterior hacia el sustrato.	28
2.24	Modulo de Young global (sustrato y recubrimiento).	33
2.25	Esquema de ensayo de fragmentación y micrografía de la sección transversal de la pieza.	33
2.26	Esquema de la prueba de cuatro puntos, junto con la gráfica de desplazamiento en función de la carga.	32
2.27	Energías de fractura de las diferentes capas superiores.	34
2.28	Tasa volumétrica de desgaste en distintos materiales utilizando la prueba "Arena seca en rueda de goma"	35
2.29	Discos de aleación de aluminio 6082-T6 sometidos a la prueba de corrosión.	36

3.1	Desgaste corrosivo.	40
3.2	Ilustración de repetidos impactos de partículas sólidas sobre una superficie plana	41
3.3	Ilustración de conducción de partículas sólidas.	42
3.4	Ilustración de impacto de líquidos.	43
3.5	Ilustración de la conducción de lodos.	43
3.6	Cavitación.	44
3.7	Representación de la prueba perno en disco.	45
3.8	Tipos de abrasión.	46
3.9	Propagación de grietas debido a los esfuerzos cíclicos sobre una superficie.	47
3.10	Desgaste por fretting, lugares propensos a fretting en un remache.	48
3.11	Fretting incurrido en un cojinete.	48
3.12	Representación del desgaste oxidativo.	49
3.13	Erosión de un acero al carbono en función de la masa impactada.	50
3.14	Representación de las fuerzas involucradas en el fenómeno de erosión.	53
3.15	Representación de una partícula impactando a 90° una superficie plana.	54
3.16	Comparación del índice de erosión del aluminio (material dúctil) y el óxido de aluminio (material frágil) utilizando como erodente SiC (127 $\mu\text{m}$ ) a 152m $\text{s}^{-1}$	57
3.17	Mecanismos de desprendimiento de masa con respecto al ángulo de impacto.	58

3.18	Típicas formas de corte en los sitios del impacto por partículas sólidas sobre un metal dúctil	59
3.19	Superficies metálicas después de ser erosionadas.	61
3.20	Volumen relativo de desgaste utilizando partículas cerámicas y metálicas para un sistema de desgaste de abrasión de dos cuerpos.	64
3.21	Ilustración del contacto entre una partícula y la superficie plana de un material bajo carga normal.	64
3.22	Clasificación AFS de la forma de la partícula.	66
3.23	Desgaste en función del tamaño de la partícula	67
3.24	Dependencia de la resistencia a la erosión ( $1/\text{volumen de erosión en mm}^3 \text{ g}^{-1}$ ) en metales puros y aceros de diferentes dureza y tratamientos térmicos.	68
3.25	Pérdida de volumen contra ángulo de ataque para 5 materiales	70
3.26	Ilustración de la influencia de la capacidad de endurecimiento por deformación de un material en su localización durante el impacto de una partícula.	71
3.27	Balance de energías antes y después del impacto normal de una partícula erosiva esférica.	72
3.28	Secuencia de la fractura frágil.	74
3.29	Erosión en materiales frágiles.	75
3.30	Transición dúctil frágil en el acero AISI 52100 (1% C, 1.5% Cr) con diferentes tratamientos térmicos en función del ángulo de impacto.	76
3.31	Comportamiento dúctil-frágil en la erosión de vidrio en función del ángulo de impacto.	78
3.32	Micrografías MEB de los recubrimientos OEP después de la erosión.	80

4.1	Ilustración esquemática del método de doble disco para la medición de partícula erosiva.	83
4.2	Representación esquemática de la máquina de erosión integrado en ella el doble disco.	83
4.3	Velocidad de la partícula en función de la presión de arrastre para un intervalo de tamaños de arena sílica.	84
5.1	Ilustración de un herramental para caja fría.	88
5.2	Monobloque de motor de combustión interna y corazón de arena.	89
5.3	Ilustración de la química del proceso de caja fría.	90
5.4	Puentes de resina uniendo a los granos de arena.	90
5.5	Corazones extraídos del herramental.	92
5.6	Inspección de Corazones.	94
5.7	Tipos de arena.	95
5.8	Número de Krumbein para diferentes formas de partícula.	95
5.9	Equipo para retener las partículas en distintas mallas.	96
6.1	Solera recubierta de Keronite con espesor de 150 $\mu\text{m}$ .	101
6.2	Medición del recubrimiento con microscopio óptico.	102
6.3	Superficie de los recubrimientos de oxidación electrolítica de plasma.	103
6.4	Corte transversal de un recubrimiento de 150 $\mu\text{m}$ de espesor.	104
6.5	Imagen de un glóbulo que encapsula aire en la superficie de un recubrimiento de 150 $\mu\text{m}$ de espesor.	105
6.6	Imágenes transversales y de la superficie de los recubrimientos OEP.	107

6.7	Superficie del recubrimiento OEP (a) Área en del glóbulo donde se realizó el análisis químico (b) Espectro de composición química.	108
6.8	Superficie del recubrimiento OEP (a) Área circundante del glóbulo en donde se realizo el análisis químico (b) Espectro de composición química.	108
6.9	Micrografías MEB de la superficie inferior del recubrimiento OEP.	109
6.10	Análisis químico (EDXA) en las diferentes capas que conforman al recubrimiento OEP.	110
6.11	Corte transversal de un recubrimiento de 150 $\mu\text{m}$ OEP en el cual se midió la porosidad con análisis de imágenes.	111
6.12	Difractograma de rayos X representativo de los recubrimientos.	113
6.13	Huellas de indentación sobre el sustrato metálico y el recubrimiento OEP de la aleación de aluminio 6061.	114
6.14	Huellas de indentación para los espesores de (a) 80 $\mu\text{m}$ , (b) 110 $\mu\text{m}$ , (c) 120 $\mu\text{m}$ y (d) 150 $\mu\text{m}$ de los recubrimientos OEP.	115
6.15	Medición de la rugosidad promedio ( $R_a$ ).	116
6.16	Probetas en forma de placas cortadas con dimensiones de 5 cm x 4 cm y 5 cm x 8 cm.	117
6.17	Limpieza de probetas con acetona en ultrasonido.	117
6.18	Medición del peso de las probetas en una báscula de resolución de diezmilésimas de gramo.	117
6.19	Finos de tamaño promedio de 50 $\mu\text{m}$ y arena seca 1 kg.	118
6.20	Arena con resinas al 0.8% en peso.	118
6.21	Grafica de la distribución granulométrica de las partículas de arena.	119

6.22	Arena de tamaños (a) 53 $\mu\text{m}$ , (b) 75 $\mu\text{m}$ , (c) 106 $\mu\text{m}$ , (d) 150 $\mu\text{m}$ , (e) 212 $\mu\text{m}$ , (f) 300 $\mu\text{m}$ , (g) 425 $\mu\text{m}$ .	120
6.23	Máquina de erosión FIME II.	124
6.24	Componentes de la Máquina de Erosión FIME II.	125
7.1	Huellas de erosión sobre las placas recubiertas con espesores de (a) 80 $\mu\text{m}$ , (b) 110 $\mu\text{m}$ , (c) 120 $\mu\text{m}$ y (d) 150 $\mu\text{m}$ , bajo metodología del estándar de la ASTM.	128
7.2	Huellas de erosión de las placas de aluminio con recubrimiento OEP bajo el estándar de erosión de la ASTM. Espesores: (a) 80 $\mu\text{m}$ , (b) 110 $\mu\text{m}$ , (c) 120 $\mu\text{m}$ y (d) 150 $\mu\text{m}$ .	129
7.3	Gráfica de erosión ( $\text{mg g}^{-1}$ ) en función del espesor de los recubrimientos OEP.	131
7.4	Huellas de erosión en disco inferior.	132
7.5	Medición de velocidad de partícula.	132
7.6	Fotografía de las huellas de erosión del recubrimiento de 80 $\mu\text{m}$ de espesor para los ángulos de 20°, 40°, 60° y 90°.	133
7.7	Huellas del borde de erosión para los ángulos de 20°, 40°, 60° y 90° en el recubrimiento de 80 $\mu\text{m}$ de espesor.	133
7.8	Gráfica de erosión en función del espesor utilizando arena seca como erodente.	136
7.9	Gráfica de erosión en función del ángulo de impacto utilizando arena seca como erodente.	136
7.10	Cámara de mezcla con carga de 5 kg de arena con resinas.	137
7.11	Imágenes de las huellas de erosión utilizando arena con resina como erodente y 0.69 bar de presión.	139
7.12	Imágenes de las huellas de erosión a mayores aumentos utilizando arena con resina como erodente y 0.69 bar de presión.	139

7.13	Imágenes de las huellas de erosión utilizando arena con resina como erodente y 1.38 bar de presión.	142
7.14	Imágenes a mayores aumentos de las huellas de erosión utilizando arena con resina como erodente y 1.38 bar de presión.	142
7.15	Gráfica de los recubrimientos OEP representando los valores de erosión en función del espesor (80,110, 120 y 150 $\mu\text{m}$ ). Arena con resina como erodente.	143
7.16	Gráfica de los recubrimientos OEP representando los valores de erosión en función del ángulo. Arena con resina como erodente.	143
7.17	Gráfica del recubrimiento OEP de 80 $\mu\text{m}$ de espesor para las presiones de 0.69 y 1.38 bar	144
7.18	Gráfica de los recubrimientos OEP de 110, 120 y 150 $\mu\text{m}$ de espesor a los ángulos de impacto de 20° y 40°.	145
7.19	Espectro de difracción de rayos X de una muestra erosionada y otra sin erosionar de 150 $\mu\text{m}$ de espesor.	146
7.20	Modelo idealizado de impacto de partículas duras sobre una superficie.	147
7.21	Gráfica de erosión para las placas de aluminio de la aleación 6061 sin recubrimiento OEP.	148
7.22	Imágenes de la marca de erosión de las placas de la aleación de aluminio 6061 sin recubrimiento cerámico.	148
7.23	Arena con resinas impactando a una placa con recubrimiento OEP al ángulo de 20°.	149
7.24	Imagen de la medición del flujo de arena a través de la boquilla realizada con un video.	149

7.25	Gráfica de los resultados de los ensayos de erosión con arena con resinas para diferentes durezas del acero H13.	150
7.26	Micrografías MEB del borde de la huella de destrucción del recubrimiento OEP bajo la prueba del estándar de erosión de la ASTM.	151
7.27	Micrografía MEB a 600 aumentos del área del recubrimiento que no fue desprendida del sustrato	152
7.28	Partícula angular de arena incrustada en el sustrato metálico.	153
7.29	Espectro de análisis. Función EDXA del microscopio electrónico de barrido.	153
7.30	Micrografía MEB del borde de la huella de erosión al ángulo de impacto de 90°.	154
7.31	Micrografía MEB del borde de la huella de erosión al ángulo de impacto de 40°.	154
7.32	Micrografía MEB de sustrato de aluminio después de destruido el recubrimiento de 150 $\mu\text{m}$ al ángulo de impacto de 20°.	155
7.33	Espesor de 150 $\mu\text{m}$ erosionado a 90° (a) Borde de la marca erosiva, (b) Área del recubrimiento a 300 aumentos, (c) Área del recubrimiento a 1,700 aumentos.	156
7.34	Espesor de 150 $\mu\text{m}$ erosionado a 90°.	157
7.35	Superficies del recubrimiento OEP de 110 $\mu\text{m}$ de espesor erosionado a 20°.	158
7.36	Superficies del recubrimiento OEP de 110 $\mu\text{m}$ de espesor a 20°	159
7.37	Superficie de recubrimientos de 80 $\mu\text{m}$ de espesor erosionados a 90° de impacto.	160
7.38	Sección transversal de un recubrimiento de 150 $\mu\text{m}$ después de erosionado a 90°.	161

## Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Página
2.1	Densidad y fracción volumétrica de las distintas fases de alúmina presentes en el recubrimiento Keronite de 100 $\mu\text{m}$ de espesor.	16
3.1	Durezas Vickers típicas de distintos materiales abrasivos.	65
3.2	Composición química de los metales evaluados.	69
3.3	Condiciones experimentales de la prueba por choque de lodos.	79
3.4	Valores de erosión bajo la prueba de choque de lodos (agua y arena) para recubrimientos OEP y aleación de aluminio 6082.	80
6.1	Elementos presentes en la aleación de aluminio 6061.	101
6.2	Porcentaje de fases blanca y oscura en la superficie de los cuatro espesores de estudio.	103
6.3	Durezas Brinell y esfuerzo a la tensión para los cuatro espesores de recubrimientos OEP.	115
6.4	Rugosidad promedio para las placas de la aleación de aluminio 6061 y recubrimientos OEP.	116
6.5	Distribución granulométrica de la arena empleada para las pruebas de erosión.	119
6.6	Factor de redondez para diferentes mallas y tamaño de partícula.	121
7.1	Valores de erosión ( $\text{mg g}^{-1}$ ) correspondientes a la gráfica de la figura 7.1.	131
7.2	Valores de erosión ( $\text{g/kg}$ ) para los recubrimientos OEP de espesores 80, 110, 120 y 150 $\mu\text{m}$ a los ángulos de impacto 20°, 40°, 60° y 90°. Erodente arena seca y 0.69 bar de presión.	136

- 7.3 Valores de erosión (g/kg) para los recubrimientos OEP de espesores 80, 110, 120 y 150  $\mu\text{m}$  a los ángulos de impacto 20°, 40°, 60° y 90°. Erodente arena con resina y 0.69 bar de presión. 143
- 7.4 Valores de erosión del acero H13 con distintas durezas utilizando arena con resinas como erodente. 150

## **RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO**

**Mario Ernesto Treviño Torres**

**Candidato a obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.**

**Tesis: Estudio del desgaste por erosión en aleaciones de baja densidad**

Mario Ernesto Treviño Torres nació en Monterrey, Nuevo León, el 30 de abril de 1979. Hijo de la Sra. Catalina Torres Medina y el Sr. Ernesto Treviño Treviño.

Cursó sus estudios profesionales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Administrador, en el año 2006.

En agosto del 2007 inicia sus estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en Materiales, becado por el consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) dentro del Programa Doctoral de Ingeniería en Materiales (PDIM) de esta misma facultad.