



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Caracterización De Un  
Recubrimiento Híbrido (Ni-  
Cr-Fe-B-Si-C)-SiC Proyectado  
Térmicamente.**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Contreras Ricardo Diego Alberto

**DIRECTOR DE TESIS**

M.C. Raúl Gilberto Valdez  
Navarro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres Baltazar Contreras López y María Ricardo Canuto por siempre acompañarme en cada paso que doy, también por darme la oportunidad de estudiar y cumplir uno de tantos sueños y tener su apoyo incondicional, por darme siempre el mejor de los ejemplos y hacerme la persona que soy, por darme la oportunidad de decidir y de vivir, por luchar conmigo a cada momento por eso y por todo muchas GRACIAS.*

*A mi hermana Karina, gracias por ser siempre un ejemplo de vida para mí y para todos, por tu fuerza y por compartir todo conmigo desde que nacimos, eres una inspiración.*

*A mi hermano Cesar, gracias por demostrarme que nunca hay que rendirnos y que siempre hay una segunda oportunidad para vivir.*

*A mi novia Abigail su apoyo y compañía, en toda esta aventura.*

*A mis amigos gracias por su amistad, alegría y apoyo en todo ese camino y por compartir la gran experiencia que es la UNAM.*

*Al M.C. Jorge Romero por el tiempo y apoyo en los análisis que sirvieron para la realización de esta tesis.*

*A el M.C. Raúl Gilberto Valdés Navarro por su guía en todo este trabajo, que al final de todo no habría sido posible sin su ayuda, por los conocimientos brindados y por su disposición, gracias.*

*Al técnico Emilio Cruz Guevara gracias por el apoyo brindado para la realización de algunos de los experimentos y además gracias por todos los conocimientos aportados para desenvolver un mejor trabajo en la vida laboral.*

*A la Dra. Alba Covelo Villar y el Dr. Miguel Ángel Hernández por el apoyo en la realización de pruebas y por brindar el uso de los equipos del laboratorio de CENISA. Además de su tiempo y paciencia para la realización de esta tesis*

*A la UNAM y la Facultad de ingeniería mi alma mater que me brindaron una experiencia inolvidable, ya que es un orgullo haber estudiado y dejado parte de mi vida en esta facultad y en esta universidad, que no tiene comparación con ninguna. Aquí nacemos como personas con corazón e ideales y crecemos para darle a la sociedad y a México lo mejor de nosotros. Muchas gracias porque para mí es un honor decir que soy parte de la UNAM mi segunda casa y la máxima casa de estudios de México.  
"Por mi raza hablará el espíritu"*

## INDICE

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	2
1.1. PROYECCIÓN TÉRMICA.....	2
1.1.1.Introducción a la proyección térmica.....	2
1.1.2.Clasificación de los procesos de proyección térmica.....	5
1.1.3.Descripción del proceso de proyección térmica con alimentación de polvo.....	7
1.1.4.Parámetros más importantes del proceso.....	9
1.1.5.Aplicaciones y propiedades de los Recubrimientos por Proyección Térmica (RPT)..	12
1.2. RECUBRIMIENTOS COMPUESTOS.....	13
1.2.1.Definición de un recubrimientos compuestos.....	13
1.2.2.Clasificación de recubrimientos compuestos.....	13
1.2.3.Descripción de MMC's reforzada con partículas cerámicas.....	14
1.2.4.Aplicaciones y propiedades de los recubrimientos MMC's reforzados con partículas.....	14
1.3. CORROSIÓN.....	15
1.1.1.Principios básicos de la corrosión.....	15
1.1.2.Clasificación de los tipos de corrosión.....	15
1.1.3.Métodos de protección de la corrosión.....	16
1.1.4.Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS).....	20
1.1.4.1. Diagramas de Bode.....	21
1.1.4.2. Diagramas de Nyquist.....	22
1.4. TRIBOLOGÍA.....	23
1.4.1.Definición de tribología.....	23
1.4.2.Definición de desgaste.....	23
1.4.3.Mecanismos de desgaste.....	24
1.4.4.Técnicas de determinación de desgaste.....	29
1.4.5.Coeficiente de desgaste.....	30
2. CAPÍTULO 2. EXPERIMENTACIÓN.....	31
2.1. PROYECCIÓN TÉRMICA.....	31
2.1.1.Preparación de sustrato.....	31
2.1.1.1. Limpieza.....	31
2.1.1.2. Rugosidad.....	31
2.1.2.Determinación de los parámetros del proceso.....	32
2.1.2.1. Material de deposición.....	32
2.1.2.2. Ángulo de proyección.....	32
2.1.2.3. Distancia de proyección.....	33
2.1.2.4. Consumo de polvo.....	33
2.1.2.5. Consumo de gases.....	34
2.1.2.6. Temperatura de precalentamiento.....	34
2.2. DESGASTE (PIN ON DISK).....	35
2.2.1.Preparación de probetas.....	35
2.2.1.1.1. Maquinado.....	35
2.2.1.1.2. Limpieza.....	35
2.2.2.Determinación de los parámetros de la prueba.....	36
2.2.2.1.1. Velocidad de rotación del disco.....	36

2.2.2.2.	Carga aplicada a las probetas.....	36
2.2.2.3.	Distancia recorrida.....	37
2.2.2.4.	Rugosidad del disco de prueba y de las probetas ensayadas.....	37
2.2.2.5.	Medición de peso de las probetas antes y después de la prueba.....	38
2.2.2.6.	Determinación de la dureza del recubrimiento.....	38
2.3.	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS).....	39
2.3.1	Contraelectrodo y Electrodo de referencia utilizados en el ensayo.....	39
2.3.2	Parámetros y armado de celdas para ensayo de corrosión.....	40
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		41
3.1.	Rugosidad.....	41
3.1.1	Rugosidad de las probetas a proyectar.....	41
3.1.2	Rugosidad del disco de desgaste.....	41
3.2.	Dureza y Microdureza.....	42
3.2.1	Dureza del disco de desgaste.....	42
3.2.2	Microdureza de los Recubrimientos.....	42
3.3.	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	44
3.4.	Análisis de composición química.....	49
3.5.	Desgaste (Pin on Disk).....	54
3.6.	Espectroscopía de Impedancia electroquímica (EIS).....	60
CONCLUSIONES.....		66
BIBLIOGRAFÍA.....		69

## OBJETIVOS

- Obtener un recubrimiento compuesto (Ni-Cr-Fe-B-Si-C)-SiC aplicado por proyección térmica por flama con sistema de alimentación de polvos sobre un acero de bajo carbono.
- Evaluar experimentalmente la resistencia al desgaste de los recubrimientos obtenidos por medio de la técnica pin-on disk.
- Evaluar experimentalmente la resistencia a la corrosión de los recubrimientos obtenidos, en un medio corrosivo de Sulfato de Sodio, por medio de la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (IES).

## HIPÓTESIS

Se espera que al depositar los recubrimientos compuestos (Ni-Cr-Fe-B-Si-C)-SiC por medio de la técnica de proyección térmica, la resistencia a la corrosión y al desgaste se modifique respecto al recubrimiento sin adición de carburos de silicio. Siendo que un material tiende a cambiar sus propiedades físicas y químicas al incorporarle partículas o fibras de otro material.

## INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos han sido históricamente utilizados como una protección contra fenómenos como la corrosión y el desgaste en distintos medios. La corrosión y el desgaste son problemas de gran importancia en la industria de procesos y manufactura así como en la vida útil de varios componentes; la degradación y falla de éstos repercute de gran manera en los sistemas utilizados por la industria. Algunas tecnologías son utilizadas para la deposición de superficies de protección que pueden resistir bajo condiciones específicas; estas se dividen en dos: en a) deposición de película delgada y b) deposición de película gruesa. Ambas tecnologías de recubrimiento también se pueden dividir en dos categorías: a) método de recubrimiento en seco (a temperatura ambiente o bajo cero) y b) mojado (parcialmente fundido), siendo la diferencia más importante el medio en que el material depositado es procesado. El primer grupo está conformado por los procesos de galvanoplastia, quimioplastia y galvanización en caliente, mientras que el segundo, entre varios métodos, la deposición de vapor, las técnicas de proyección térmica y soldadura. Este trabajo se enfocará en las técnicas de proyección térmica.

En este proyecto se utilizó el proceso de proyección térmica por flama con alimentación de polvo para la aplicación de un recubrimiento compuesto constituido por una matriz con base níquel y una fase cerámica de carburo de silicio con la intención de mejorar la resistencia al desgaste y a la corrosión de los recubrimientos generados. En este trabajo se describen los diferentes procesos que ocurren durante la formación del recubrimiento (comportamiento de las partículas metálicas y cerámicas, efecto de granallado sobre el sustrato metálico, entre otros) y se analizan cuáles son sus consecuencias sobre las propiedades del recubrimiento. Se han realizado ensayos de desgaste por abrasión (ensayo Pin-on-Disk), así como de corrosión (Espectroscopia de Impedancia Electroquímica IES), correlacionando los resultados obtenidos con el contenido de fase cerámica del recubrimiento.

En el capítulo 1 se mencionan parte de los antecedentes del proceso de proyección térmica, así como una descripción general de éste, sus clasificaciones, además de una explicación más detallada del proceso de proyección térmica por flama con alimentación de polvo. Se resaltan parámetros importantes que intervienen directamente en el proceso, los cuales representan una pieza clave para la generación de los recubrimientos. También se pueden encontrar las

definiciones y principios básicos de desgaste y corrosión necesarios para entender los efectos de estos procesos, así como las técnicas de medición del impacto que tienen los ensayos realizados para la determinación del grado de corrosión y desgaste en los recubrimientos.

El método de experimentación es descrito en el capítulo 2 donde se menciona qué tipo de materiales fueron requeridos para el experimento, de igual manera, desde el equipo hasta los parámetros para el proceso de proyección térmica por flama con alimentación de polvo que se utilizaron para deposición de los recubrimientos. Además se hace referencia a los equipos para los ensayos de desgaste y corrosión, así como al procedimiento de medición y los dispositivos que fueron elegidos para la obtención de datos necesarios para interpretación de los comportamientos de los recubrimientos a un medio corrosivo y a los procesos de desgaste.

Los datos que se obtuvieron a través de los ensayos de desgaste y corrosión, así como la interpretación de los mismos están contenidos en el capítulo 3. Además se realizó un análisis de la relación que hay entre los parámetros de materiales de deposición, características y proceso de proyección con los resultados que arrojaron los ensayos.

## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**

La invención de primer proceso de proyección térmica es atribuida a M.U. Schoop de Suiza en 1911 y es conocido como proyección por flama. Otro proceso de proyección térmica importante incluye la proyección de alambre, deposición por pistola de detonación (inventado por R.M. Poorman, H.B. Sargent y H. Lamprey patentado en 1955), proyección de plasma (inventada por D.M. Yenni patentado en 1962) y alta velocidad por oxi-combustible (inventado por G.H. Smith, J.F. Pelton y R.C. Eschenbach patentado en 1958). Una variante de la proyección de plasma usa un arco transferido para calentar la superficie a ser cubierta. Una variante de la proyección térmica usa un arco transferido para calentar la superficie a ser recubierta. La proyección térmica tiene una amplia ventaja contra otros procesos para la obtención de recubrimientos, debido a la extensa variedad de materiales que pueden ser utilizados para la fabricación de un recubrimiento, entre éstos pueden ser cerámicos, metales y hasta polímeros ya que no se degradan al ser fundidos. Otra ventaja, en muchos casos, es la capacidad de volver a recubrir o desgastar un revestimiento sin cambiar o dañar las propiedades o dimensiones de la pieza de trabajo. Una desventaja importante es la línea de visión del proceso, ya que la pistola solo puede cubrir lo que “ve”. Para este proceso también hay limitaciones de tamaño que no permite recubrir una cavidad pequeña en la cual no cabe la antorcha o la pistola. Los recubrimientos por medio de proyección térmica son formados usualmente por varias etapas de recorrido de una antorcha o una pistola sobre la superficie. El proceso de deposición en sí mismo puede cambiar sustancialmente la composición así como la estructura del material depositado. En consecuencia las propiedades y microestructura del recubrimiento son sumamente variados. La especificación de un recubrimiento no solamente implica la composición del polvo o alambre de partida sino también el tipo en general de proceso a ser utilizado. Las aplicaciones de los recubrimientos por proyección térmica son extremadamente variadas, pero las más grandes categorías de uso son en el mejoramiento en la resistencia a corrosión y/o desgaste de una superficie [1].

### **1.1. PROYECCIÓN TÉRMICA**

#### **1.1.1. Introducción a la proyección térmica**

La proyección térmica comprende un grupo de procesos de generación de recubrimientos que tienen la posibilidad de depositar tanto materiales metálicos como materiales no metálicos en una condición de fundición o parcialmente fundido para formar un recubrimiento.

Los procesos de proyección térmica comprenden: arcos de corriente continua (cc) o de radiofrecuencia (rf), descargas generadas por plasmas, arcos transferidos por plasmas (PTA), arcos de alambre, llamas, llamas de alta velocidad de oxi-combustible (HVOF), llamas de alta velocidad de aire-combustible (HVOF), pistolas de detonación (D-gun). Otra tecnología de proyección ha surgido recientemente; se llama la tecnología de proyección de gas dinámico frío, o proyección en frío (CS). En realidad no es una tecnología de proyección térmica ya que el flujo de gas de alta energía es producida por un gas relativamente frío comprimido ( $T < 800 \text{ }^\circ \text{C}$ ) en expansión en una boquilla [2].

El material de recubrimiento puede estar en forma de polvo, barras de cerámicos, alambre y materiales fundidos. El principio de funcionamiento del sistema es una antorcha que genera la energía (ya sea, energía química para la combustión o energía eléctrica para procesos de plasma y arco), dentro de la corriente de gases calientes. El material para el recubrimiento es calentado hasta ser parcial o totalmente fundido, acelerado con la alta temperatura y con alta velocidad hacia

el sustrato. Los impactos del material del recubrimiento sobre el sustrato son en forma de una corriente de pequeñas gotas que son generadas por la fundición de polvo o de puntas de alambre o barras en la corriente de gases con alta energía. Las pequeñas gotas se aplanan o deforman sobre el sustrato para generar láminas llamadas "splats". Como se muestra en la Fig.1 [2], el apilamiento de múltiples splats forma el recubrimiento.

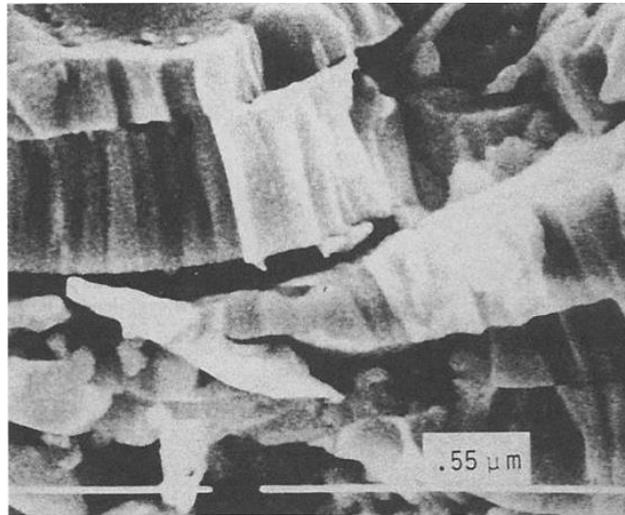


Fig. 1 Microestructura típica de un recubrimiento metálico de tungsteno proyectado por plasma que muestra la estructura transversal del splat.

Los procesos de proyección térmica son utilizados ampliamente para proyectar recubrimientos que mejoren la resistencia al desgaste, corrosión y algunas veces protección de la temperatura. La elección del proceso de deposición depende en gran medida de las propiedades para la aplicación y costo de deposición del recubrimiento que se quiera obtener. Este tipo de recubrimientos se caracteriza por la estructura laminar y el contacto real que hay entre los splats y el sustrato o por la previa deposición de láminas que determinan principalmente las propiedades del recubrimiento. El contacto real entre la superficie paralela del recubrimiento y el sustrato varía de un 20 a un 60%, aunque esto puede incrementarse con las velocidades de impacto de las partículas, siempre y cuando no se sobrecaliente o se encuentre por debajo de su punto de fusión.

En la proyección térmica también se pueden producir algunos defectos como poros globulares, formados durante la solidificación, partículas sin fundir o parcialmente fundidas también pueden producir defectos. Por otra parte, al proyectar en aire puede haber oxidación por calor o por partículas totalmente fundidas, lo cual puede ocurrir en el trayecto al sustrato [2].

Proyección térmica se puede definir como la aplicación de recubrimientos por medio de un dispositivo o sistema que propulsa material fundido a gran velocidad sobre la superficie de un componente preparado y limpio. Aunque esta definición no es suficiente para describir dicho proceso, para poder explicar el principio de la proyección térmica la Fig. 2 [3] puede ayudar. El material del recubrimiento es fundido con una fuente de calor, este líquido o fundición es propulsada por una corriente de gases y es proyectado en la superficie de un sustrato donde se solidifica en forma de capas sólidas [3].

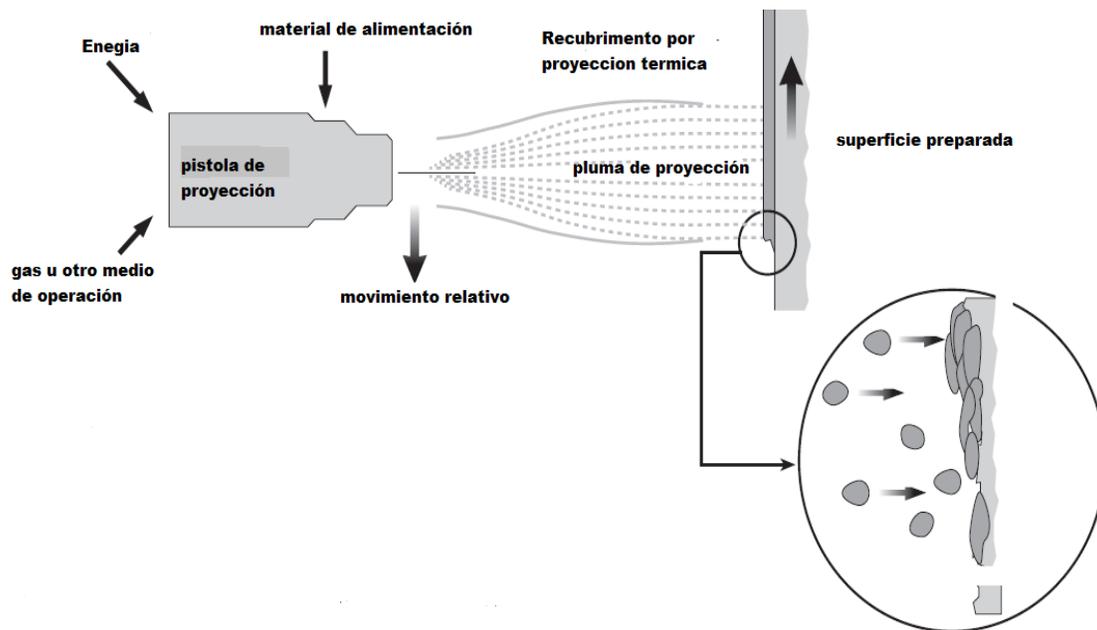


Fig. 2 Principio de la proyección térmica.

Antes de hablar de un recubrimiento se debe pensar en el sustrato o la superficie a ser recubierta. Este sustrato debe de soportar los procesos especiales para producir una rugosidad, ya que es necesario para una buena adherencia. La adherencia consiste en la unión mecánica entre el sustrato y el recubrimiento, una buena limpieza y un pretratamiento es de gran importancia para la superficie a ser recubierta. Antes de limpiar la superficie de impurezas por métodos mecánicos y químicos, se usan procedimientos de granallado para formar una rugosidad, esto hace que se active la superficie por la energía libre e incremente el área para la unión de la partículas proyectadas.

Las partículas del recubrimiento son impactadas contra la superficie a alta velocidad. El calor de las partículas es transferido a la base del material donde se contraen y solidifican formando un enlace con la rugosidad del sustrato. La adherencia del recubrimiento está basada en un “anclaje” mecánico.

Los materiales que pueden ser utilizados para proyección térmica son todos aquellos que no se degraden cuando son fundidos. Dependiendo del proceso de proyección podemos elegir la forma del material del recubrimiento que puede ser en polvo, varilla o alambre. Existen varios tipos de materiales en polvo que son enlistados en la Tabla 1 que pueden ser utilizados para proyectar según sus características y aplicaciones [3].

Tabla 1. Características de las clases comunes de materiales en polvo para proyección térmica.

Proceso de recubrimiento	Espesor típico del recubrimiento	Material del recubrimiento	Características	Ejemplos
PVD	1 – 5 $\mu\text{m}$ (40 – 200 $\mu\text{in}$ )	Ti(C,N)	Resistencia al desgaste	Maquinas-herramientas
CVD	1 – 50 $\mu\text{m}$ (40 – 2000 $\mu\text{in}$ )	SiC	Resistencia al desgaste	Recubrimientos de fibra
Polímeros horneados	1 – 10 $\mu\text{m}$ (40 – 40 $\mu\text{in}$ )	Polímeros	Resistencia a la corrosión, estéticas	Automóvil
<b>Proyección térmica</b>	<b>0.04 – 3 mm (0.0015 – 0.12 in)</b>	<b>Cerámicos como el WC y aleaciones metálicas de Zn</b>	<b>Resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste</b>	<b>Rodamientos</b>
Plata de cromo duro	10 – 100 $\mu\text{m}$ (40 – 4000 $\mu\text{in}$ )	Cromo	Resistencia al desgaste	Rollos
Soldadura	0.5 – 5 $\mu\text{m}$ (0.02– 0.2 $\mu\text{in}$ )	Acero, estelita	Resistencia al desgaste	Válvulas
Galvanizado	1 – 5 $\mu\text{m}$ (40 – 200 $\mu\text{in}$ )	Zinc	Resistencia a la corrosión	Hoja de acero
Superposición de soldadura	10 – 100 $\mu\text{m}$ (40 – 4000 $\mu\text{in}$ )	Aleaciones Ni-Cr-B-Si	Muy duro, superficie densa	Ejes

### 1.1.2. Clasificación de los procesos de proyección térmica[3]

Existen varios procesos aplicados para la proyección térmica de recubrimientos, los más importantes son:

- Proyección convencional por flama.
- Proyección por arco eléctrico con alambre.
- Proyección por plasma.
- Proyección de alta velocidad con oxi-combustible.

Procesos de proyección convencional por flama

- Proyección por flama con alambre.

El material del alambre proyectado es fundido por una llama de oxígeno-combustible. Como se muestra en la Fig. 3. El combustible puede ser acetileno, propano o hidrógeno. El alambre es concentrado dentro de la flama, donde es fundido y atomizado, y por medio de aire comprimido es dirigido hacia la superficie de la pieza de trabajo.

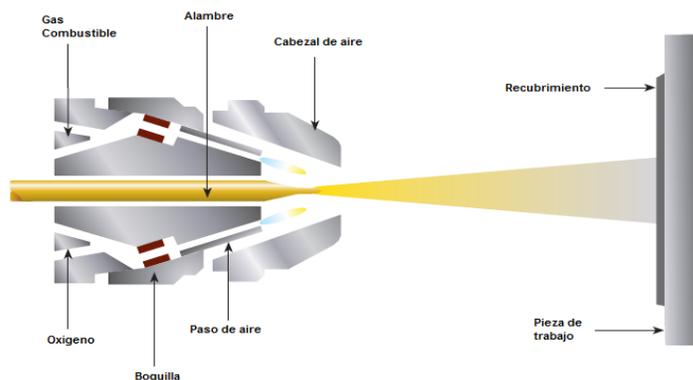


Fig. 3. Diagrama esquemático del proceso de proyección por flama con alambre.

- Proyección por arco eléctrico con alambre.

Con este proceso de proyección un arco es formado por el contacto de dos alambres metálicos con cargas opuestas, que son generalmente de la misma composición. El material del recubrimiento en forma alambre es fundido por la acción del arco, el aire comprimido atomiza y acelera el material fundido proyectándolo sobre la superficie del sustrato, como se muestra en la Fig. 4. La cantidad de material proyectado es ajustado mediante la alimentación de alambre, así como la constante del arco también puede ser mantenida.

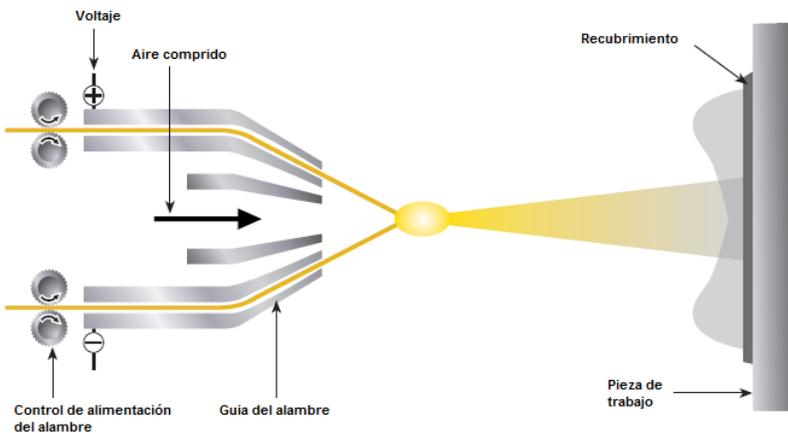


Fig. 4. Diagrama esquemático del proceso de proyección por arco eléctrico con alambre.

- Proyección por plasma

El principio de la proyección por plasma es descrito en la Fig. 5. Un arco de alta frecuencia es encendido entre un ánodo y un cátodo de tungsteno el gas que fluye entre los electrodos (He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> o algunas mezclas) es ionizado de modo que se forma una pluma de plasma de varios centímetros de longitud. La pluma de plasma puede llegar a una temperatura de más de 16000 K. El material proyectado es inyectado como polvo fuera de la boquilla de la pistola dentro de la pluma de plasma donde es fundido y lanzado por gases sobre la superficie del sustrato.

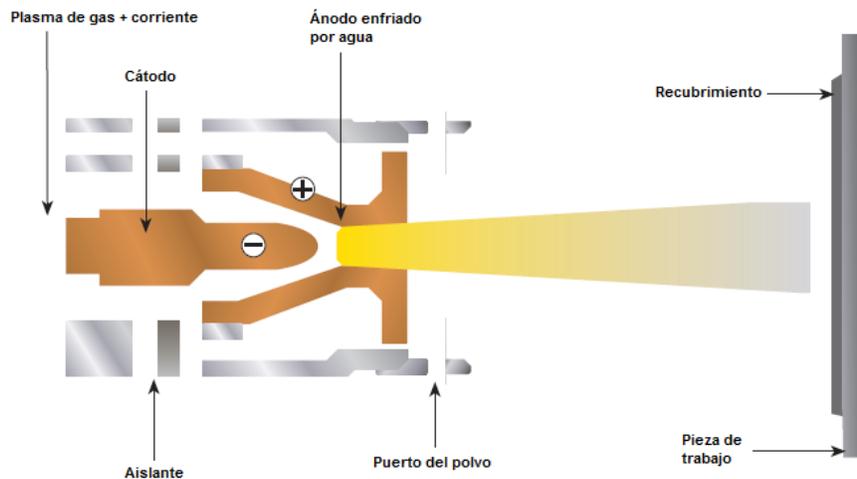


Fig. 5. Diagrama esquemático del proceso de proyección por plasma.

### - Proyección a Alta Velocidad con Oxi-Combustible (HVOF)

Este proceso ha sido recientemente incorporado a la familia de procesos de proyección térmica, con el uso del chorro supersónico, que lo distingue de la proyección térmica con flama convencional, la velocidad de impacto de la partícula sobre el sustrato es muy alta, resultando en la mejora de las características del recubrimiento. Como se muestra en la Fig. 6, el mecanismo difiere de la proyección con flama por una expansión del chorro a la salida de la pistola. Los gases de combustible pueden ser: propano, propileno, acetileno, hidrogeno y gas natural, así como el combustible líquido queroseno.

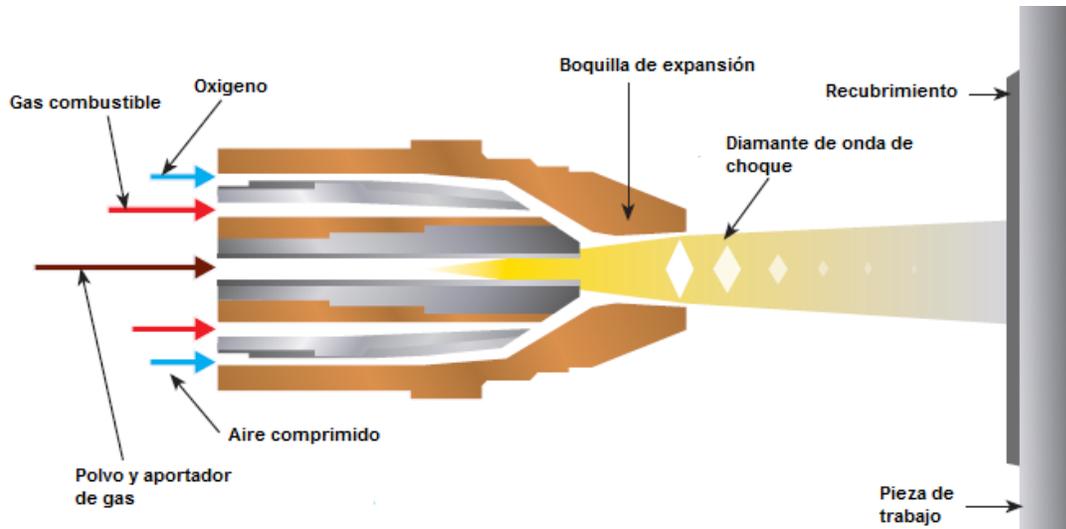


Fig. 6. Diagrama esquemático del proceso a alta velocidad con Oxi-Combustible (HVOF).

#### 1.1.3. Descripción del proceso de proyección térmica con alimentación de polvo [2].

Proyección con llama utiliza gas combustible como fuente de calor para fundir el material de recubrimiento. Las pistolas de proyección con llama están disponibles para los materiales, ya sea en forma de varilla, alambre, o en polvo. La mayoría de pistolas de proyección con llama pueden ser adaptadas para utilizar varias combinaciones de gases para equilibrar las propiedades del recubrimiento y costos del proceso. Acetileno, propano, acetileno-metil-propadieno (MAPP) de gas, y el hidrógeno, junto con el oxígeno, se utilizan comúnmente gases de proyección con llama. En general, el cambio de la tapa de la boquilla y/o el aire es todo lo que es necesario para adaptar la pistola a diferentes aleaciones, tamaños de alambre, o gases. El principio de funcionamiento de la pistola de proyección puede ser observado en la Figura 7, que ilustra el uso de polvo como material de alimentación. La entrada de gas es axial y el polvo puede ser introducido axialmente o radialmente en la flama. Las partículas de material son fundidas en la flama y aceleradas en dirección al sustrato. La relación de la mezcla oxígeno combustible puede variar en el rango de 2:1 a 2:0.8, resultando en una atmósfera carburante u oxidante, respectivamente. La aleación en polvo se inyecta a temperatura ambiente, en donde la aleación micro pulverizada y la flama acetilénica tiene la misma trayectoria, lo que da origen a una transferencia de calor de flama a la partícula, por lo tanto, la partícula es calentada, elevando sucesivamente su temperatura hasta plastificarla, en algunos casos, la partícula permanecerá el tiempo suficiente en la flama, como

para ser fundida, además de elevar el nivel de energía térmica de la partícula, dicha partícula es fuertemente acelerada por la expansión de los gases de combustión, por lo que también experimenta un fuerte incremento en términos de energía cinética [2].

El proceso de proyección térmica de combustión por medio de polvo metálico como materia prima, utiliza la mezcla de los polvos metálicos con una corriente de gas, que pueden ser aire o un gas combustible. Esta corriente se alimenta en un inyector central, rodeándose por un orificio anular. El orificio anular se alimenta con una mezcla combustible gas y oxígeno, que daría normalmente una llama en el soplete y el paso del polvo a través de la flama da lugar a la fusión de la mayor parte de las partículas. El aire comprimido u otro gas son alimentados a través de orificios anulares que rodean los puertos del gas, con el objetivo de proyectar hacia el sustrato las partículas fundidas del polvo.

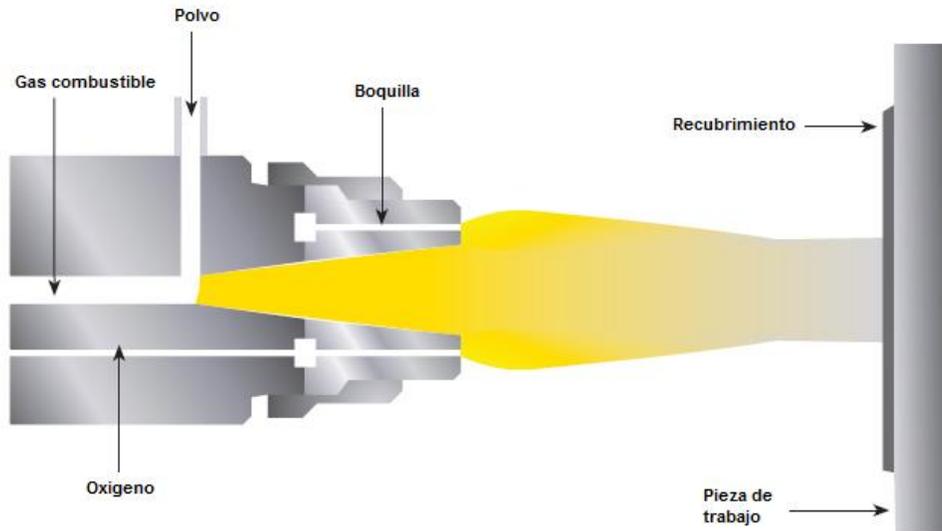


Fig. 7. Diagrama esquemático del proceso de proyección por flama con polvos.

Temperaturas y características de la llama dependen de la relación oxígeno-combustible y la presión. Las temperaturas aproximadas para la combustión estequiométrica a 1 [atm] durante algunas combinaciones de oxicorte se muestran en la Tabla 2 [1]. El proceso de proyección con llama se caracteriza por una baja inversión de capital, las altas tasas de deposición y eficiencia, y la relativa facilidad de operación y el costo de mantenimiento de los equipos. En general, los recubrimientos proyectados con llama exhiben resistencias de unión inferiores, mayor porosidad, un rango de temperatura de trabajo más estrecho y una mayor transmisión de calor al sustrato que la mayoría de otros procesos de proyección térmica. El proceso de proyección térmica con llama se utiliza ampliamente para la recuperación de las piezas desgastadas o fuera de la tolerancia, frecuentemente usando aleaciones a base de níquel. Las aleaciones de bronce se pueden usar para algunos rodamientos y áreas de sellado. Las mezclas de carburo de tungsteno y aleaciones a base de níquel se pueden utilizar para resistencia al desgaste. El zinc se aplica comúnmente para resistencia a la corrosión en puentes y otras estructuras.

Tabla 2. Temperaturas máximas de fuentes de calor.

Fuente de Calor	Temperatura aproximada (Combustión estequiométrica)
Propano-Oxígeno	2526 °C (4579 °F)
Gas natural-Oxígeno	2538 °C (4600 °F)
Hidrógeno-Oxígeno	2843 °C (5240 °F)
Metilacetileno/Propadieno-Oxígeno	2927 °C (5301 °F)
Acetileno-Oxígeno	3087 °C (5589 °F)
Arco de plasma	2200 a 28,000 °C (4000 a 50,000 °F)

#### 1.1.4. Parámetros más importantes del proceso [4].

Hay muchas variables en los procesos de proyección térmica, que van desde unas pocas hasta varias. Las posibles combinaciones de parámetros que pueden producir un recubrimiento "adecuado" son asombrosas. Además de la manipulación, los parámetros que afectan directamente a las características de un recubrimiento se pueden simplificar en los que afectan al tiempo, temperatura y masa, mismos que deben mantenerse constantes con el fin de estabilizar el proceso. Con el fin de estabilizar un proceso de proyección térmica, la manipulación, el tiempo, la temperatura y la masa deben mantenerse constantes.

Las variables de manipulación incluyen:

- Distancia de punto muerto: la distancia desde la punta de la boquilla de la pistola a la pieza a revestir.
- La velocidad de la superficie: la velocidad relativa entre la pistola y la pieza.
- Pitch o incremento: la distancia que la pistola se trasladó con cada trazo siguiente de la manipulación de la pistola o de la revolución de la parte.
- Ángulo de incidencia: la variación de la corriente de proyección de la normal o 90° a la superficie de la parte.

La variable de tiempo es controlada en parte por:

- El diseño de la pistola (por ejemplo, la geometría de diámetro y diámetro de salida).
- El flujo total de gas del arco/flama, es decir, flujos de gas primario más secundario (la relación de combustible-oxígeno es un parámetro significativo en los procesos de proyección a la llama).
- La energía disponible, eléctrica o química, que actúa sobre los gases del arco/llama.

La temperatura se controla en parte por:

- El consumo de gases como por el tiempo.

- La energía disponible que actúa sobre el sistema.

La masa es una variable compleja, y tal vez la más importante, en el sentido de que más allá de las especificaciones, es la más difícil de controlar debido a que la materia prima es generalmente una mercancía comprada. La masa del material de proyección que se suministra a la pistola tiene varias características importantes. Las variables comunes a todas las materias primas incluyen la composición química, punto de fusión, propiedades termofísicas y el coeficiente de expansión térmica.

A continuación se presentan algunas de las variables únicas de la materia prima en polvo. La microestructura del recubrimiento formado por la acumulación de estas partículas depende de los parámetros (i) de impacto de partículas (temperatura de la partícula, estado fundido, velocidad y tamaño), (ii) las condiciones del sustrato (forma, rugosidad, la química de superficie), (iii) el control de la temperatura del sustrato y el revestimiento antes (precalentamiento), durante y después (enfriamiento), pulverización y (iv) el patrón de pulverización.

Algunas observaciones generales se pueden expresar:

- Diferentes materiales requieren diferentes condiciones de deposición.
- Propiedades de revestimiento específicos (de alta densidad o porosidad deseada) pueden requerir de partículas específicas características de velocidad / temperatura.
- Los flujos de calor al sustrato dependen del método de recubrimiento y para algunos materiales de sustrato que tienen que ser minimizada.
- Precalentamiento del sustrato y control de la temperatura durante la pulverización fuertemente afectan a las propiedades de recubrimiento y, en particular, las tensiones residuales.
- Y con frecuencia existe un balance entre calidad de recubrimiento y la economía del proceso.

Las características más importantes del polvo en proyección térmica incluyen:

- Tamaño de las partículas.
- Forma de la partícula / morfología que afecta a la capacidad de alimentación de un polvo.
- Granulometría.
- Método de producción.
- Densidad aparente.

Cuando estas variables están controladas por las especificaciones del trabajo, el flujo de masa y velocidad de avance es todo lo que está bajo el control directo del operario.

Los procesos de proyección por llama utilizan la energía disponible en los enlaces químicos de gases combustibles. En estos procesos de combustión, la fusión y la expansión de la energía del chorro de flama se producen por la ruptura de enlaces moleculares en el gas combustible y el número de enlaces rotos por unidad de tiempo [4].

### 1.1.5. Aplicaciones y propiedades de los Recubrimientos por Proyección Térmica (RPT).

La protección contra la corrosión de las grandes estructuras de acero, tales como puentes, oleoductos, tanques de petróleo, torres, antenas de radio y televisión y grandes instalaciones de fabricación en la metalurgia, la química, la energía y otras industrias es un tema clave. La protección de las estructuras expuestas a ambientes húmedos y el agua de mar como barcos, plataformas marinas, puertos marítimos, es aún más difícil. En la mayoría de los casos, la superficie a proteger es miles e incluso decenas de miles de metros cuadrados, lo que requiere que los costos del recubrimiento sean competitivos con los de los métodos tradicionales como los de la pintura. La tasa de recubrimiento debe ser de al menos  $10 \left[ \frac{m^2}{h} \right]$  y el recubrimiento debe ser, si es posible, depositado en una sola pasada; el equipo debe ser móvil y autónomo para el funcionamiento en condiciones de campo y puede trabajar bajo control manual, la automatización es generalmente difícil para operaciones a gran escala, y la distancia final de la pistola de proyección puede ser de hasta 30 [m] de otros elementos del equipo. La proyección por flama y arco cumplen tales requisitos. Estos equipos se utilizan ampliamente en la industria porque la inversión es más bien baja y la adherencia del recubrimiento es generalmente buena (más de 20 [MPa]), con casi ningún calentamiento del sustrato. Sin embargo recubrimientos obtenidos por estos métodos son relativamente porosos (hasta 20%). Esta porosidad puede ser reducida por granallado justo después de la proyección. Por ejemplo las porosidades iniciales de 4 a 14% (dependiendo de las condiciones de proyección) de recubrimientos de aluminio depositadas por arco-alambre se redujo a 0.16 hasta 0.83% después de ser granallado con SiC de 0.21 a 0.3 [mm] de diámetro.

Por lo tanto, el principal uso de recubrimientos por proyección térmica es como revestimiento de sacrificio con espesores típicos entre 50 y 500 [ $\mu\text{m}$ ]. Tales revestimientos deben tener un comportamiento relativamente catódico a los iones del metal a proteger, en casi todos los casos los aceros. La protección catódica puede ser porosa sin ninguna corrosión del metal por debajo. Algunos metales utilizados son entonces zinc, aluminio y zinc-aluminio. Derivados del zinc son mejor que el aluminio en condiciones alcalinas, mientras que el aluminio es mejor en condiciones ácidas. Si la resistencia al desgaste se debe mejorar, los revestimientos de aluminio pueden ser rociados con partículas de alúmina, por ejemplo, utilizado por alambres tubulares. Para la protección del acero de refuerzo en el hormigón, el zinc se usa generalmente, pero también se ha utilizado el titanio. En ese caso, el recubrimiento se aplica directamente sobre el sustrato de hormigón. Sin embargo con la proyección arco-alambre, la atomización de las puntas de los alambres debe realizarse con nitrógeno para limitar lo más posible la formación de  $\text{TiO}_2$ . El aluminio se debe evitar donde pueda producirse gas termita. Esto es debido a la reacción del óxido de hierro y aluminio cuando esta mezcla combustible es encendida por un impacto. Por lo tanto, deben evitarse siempre que hay un peligro de termita-chispas. Otro interés de tales revestimientos es en sus propiedades anti-incrustantes. El ensuciamiento biomarino es la acumulación no deseada de organismos marinos en las superficies artificiales que están inmersos en el mar. El ensuciamiento biomarino se produce en los cascos de buques, que conduce a un aumento en el peso de la nave y la fricción para navegar. Se ha estudiado el comportamiento de varios recubrimientos por proyección térmica. Se utilizaron los siguientes polvos como material de revestimiento: polvos de aleación de aluminio-cobre, polvos de mezcla de aluminio-cobre, polvos de mezcla de aluminio y zinc y un polvo de zinc. Después de la inmersión en el mar, los recubrimientos de aluminio-cobre mostraron deficientes propiedades anticorrosivas y

antiincrustantes. El recubrimiento de aluminio-zinc con alto contenido de zinc y el revestimiento de zinc poseía las mejores propiedades anti-corrosión y anti-ensuciamiento [2].

## **1.2. RECUBRIMIENTOS COMPUESTOS**

### **1.2.1. Definición de un recubrimiento compuesto.**

Los metales son materiales de ingeniería extremadamente versátiles. Un material metálico puede presentar una amplia gama de propiedades fácilmente controlables a través de la selección adecuada de composición de la aleación y el método de procesamiento termomecánico. El amplio uso de aleaciones metálicas en la ingeniería refleja no sólo su resistencia y tenacidad si no también la facilidad relativa y el bajo costo de fabricación de componentes de ingeniería por una amplia gama de procesos de fabricación. El desarrollo de los MMC's ha reflejado la necesidad de lograr combinaciones de propiedades más allá de las alcanzables en metales "puros". Por lo tanto, los recubrimientos compuestos resultan de la adición de partículas a un metal que pueden actuar como "refuerzos", y que por lo tanto pueden proporcionar una mayor rigidez específica junto con una mejor resistencia a la fatiga y al desgaste, o quizás aumento de la fuerza específica en combinación con las características térmicas deseadas (por ejemplo, la reducción del coeficiente de expansión térmica y de conductividad) en el MMC resultante. Sin embargo, el costo de lograr mejoras de propiedad sigue siendo un reto en muchas aplicaciones potenciales MMC's [5].

### **1.2.2. Clasificación de recubrimientos compuestos.**

Existen diferentes tipos de recubrimientos compuestos. La mayor parte de los recubrimientos compuestos en el uso industrial se basa en las matrices poliméricas termoestables y termoplásticas. Por lo general, algunos recubrimientos son reforzados con fibras cerámicas alineadas, tales como vidrio o carbono, que comúnmente exhiben marcadas anisotropías, ya que la matriz es más débil y menos rígida que las fibras. Recientemente, ha habido un interés considerable en recubrimientos compuestos de matriz metálica (MMC's), tales como aluminio reforzado con partículas cerámicas o fibras cortas, y de titanio que contienen fibras de gran diámetro. Las mejoras de propiedad buscada con la introducción de refuerzo son a menudo menores para los polímeros, con mejoras en el rendimiento de alta temperatura o propiedades tribológicas de mayor interés. Mientras que diversas aplicaciones industriales se han desarrollado o están siendo exploradas para los MMC's, su uso comercial es todavía bastante limitado en comparación con los compuestos de polímero (PMC's). Por último, recubrimientos compuestos a base de materiales de cerámicos (CMC's) también están siendo estudiados. El objetivo en estas situaciones es generalmente impartir tenacidad a la matriz con la introducción de otros componentes, ya que la rigidez y la resistencia es poco probable que sean afectados. Tales materiales están todavía, en su mayor parte en las primeras etapas de desarrollo, en parte porque son más difíciles de fabricar [6].

### **1.2.3. Descripción de Compuestos de Matriz Metálica reforzada con partículas cerámicas.**

Los materiales compuestos de matriz metálica (MMC) son materiales que están constituidos por dos materiales diferentes y se obtienen por incorporación en una matriz metálica, de uno o más elementos “reforzantes”, partículas cerámicas o metálicas. De modo que sus propiedades, tanto mecánicas como termofísicas, no son la suma de las propiedades que presentan cada uno de los materiales por separado, sino que dependen de la existencia de una intercara nueva. Por tanto, los MMC combinan las propiedades de los materiales o elementos que la forman, de manera que presentan las principales propiedades de cada uno de sus constituyentes, lo que permite, en cierta manera, la fabricación de materiales a medida en función de las futuras aplicaciones.

El carburo de silicio, SiC, es uno de los materiales de refuerzo de mayor interés, debido no sólo a las altas propiedades mecánicas que presenta sino a su bajo peso específico, lo que hace de él un material con un amplio campo de aplicación cuando sea necesario que el material compuesto presente ambas propiedades. Si a este hecho se une el avance tanto en la tecnología para su fabricación como el costo de producción, hace que este material sea, si cabe, aún más atractivo a la hora de ser utilizado como material de refuerzo

La principal ventaja que ofrecen los materiales compuestos es la posibilidad de ajustar sus propiedades en función del tipo de matriz y refuerzo empleados. La amplia variedad que existe de MMC's hace que las propiedades de estos materiales presenten un amplio intervalo de valores y por consiguiente de aplicaciones. Numerosos son los metales empleados como matrices, siendo los más comunes el Al, Ti, Mg, aleaciones de Cu y superaleaciones. La morfología de los refuerzos empleados pueden ser tipo fibra continua, fibra discontinua y partículas. Las características que presentan los MMC's van a estar influenciadas por una serie de factores, que se pueden enumerar del siguiente modo:

- Propiedades del refuerzo, forma y distribución.
- Fracción de volumen de refuerzo en el material compuesto.
- Propiedades de la matriz, incluyendo el efecto de la porosidad.
- Propiedades de la interfaz refuerzo/matriz.

La calidad de la interfaz está determinada por la mojabilidad, que varía en función del tratamiento superficial al que haya sido sometido el refuerzo, previamente a la fabricación del material compuesto, como tensiones residuales provocadas por tratamientos térmicos y mecánicos a los que ha sido sometido [7].

### **1.2.4. Aplicaciones y propiedades de los recubrimientos MMC's reforzados con partículas.**

Las ventajas potenciales de los recubrimientos MMC's son los tipos de aplicaciones para las que es probable que sean atractivos. Se han publicado las funciones generales de su uso para la aplicación en el automóvil, campos de la ingeniería aeronáutica, astronáutica y algunos otros. Mientras que las aplicaciones comerciales están empezando a surgir, dos factores han sido importantes para mantener la producción de volumen muy por debajo de las expectativas iniciales. En primer lugar, la industria aeroespacial requiere grandes márgenes de seguridad, que son difíciles de satisfacer en vista de la relativa baja tenacidad de MMC's, y materiales de largos tiempos de prueba. Esto quiere decir que, en el momento, no hay componentes de MMC's en aviones. En segundo lugar. La industria del automóvil es altamente sensible al costo. Esto ha descartado sistemas de fibras continuas, y ha estimulado avances considerables en los costos de procesamiento eficaces de fundición de Al/partículas y la tecnología de fundición Al/fibra [8].

### **1.3. CORROSIÓN[9]**

#### **1.3.1. Principios básicos de la corrosión.**

Una definición bastante aceptable de la corrosión es el deterioro que sufre un material a consecuencia de un ataque químico por su entorno. Siempre que la corrosión esté originada por reacción química, la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura y de la concentración de los reactivos y de los productos. Otros factores, como el esfuerzo mecánico y la erosión también, pueden contribuir al deterioro. La mayor parte de la corrosión de los materiales concierne al ataque químico de los metales, el cual ocurre principalmente por ataque electroquímico, ya que los metales tienen electrones libres que son capaces de establecer pilas electroquímicas dentro de los mismos. Las reacciones electroquímicas exigen un electrolito conductor, cuyo soporte es habitualmente el agua. De aquí que en ocasiones se le denomine "corrosión acuosa". Muchos metales sufren corrosión en mayor o menor grado por el agua y la atmósfera. Los metales también pueden ser corroídos por ataque químico directo procedente de soluciones químicas.

Otro tipo de degradación de los metales que sucede por reacción química con el medio, es lo que se conoce como "corrosión seca", que constituye en ocasiones una degradación importante de los metales especialmente cuando va acompañado de altas temperaturas. Materiales no metálicos como las cerámicas y los polímeros no sufren el ataque electroquímico pero pueden ser deteriorados por ataques químicos directos. Por ejemplo, los materiales cerámicos refractarios pueden ser atacados químicamente a altas temperaturas por las sales fundidas. Los polímeros orgánicos pueden ser deteriorados por el ataque químico de disolventes orgánicos. El agua es absorbida por algunos polímeros orgánicos, provocando en ellos cambios dimensionales o en sus propiedades. La acción combinada de oxígeno y radiación ultravioleta es susceptible de destruir algunos polímeros, incluso a temperatura ambiente.

Un principio natural en todos los campos de las ingenierías es la degradación de las máquinas y piezas en servicio. La corrosión constituye una de las fuentes importantes de degradación de las piezas diseñados por el ingeniero. Combatir la corrosión significa: prolongar el tiempo de servicio de una pieza, disminuir su mantenimiento, diseñar con menor costo para un tiempo definido de servicio, o, cuando no, impedir accidentes que pueden provenir de fracturas súbitas, consecuencias del proceso corrosivo.

#### **1.3.2. Clasificación de los tipos de corrosión.**

Los tipos de corrosión pueden clasificarse convenientemente de acuerdo con la apariencia del metal corroído. La identificación puede realizarse de muchas formas, pero todas ellas se encuentran interrelacionadas en alguna manera. Como ejemplo, podemos establecer la siguiente clasificación:

- Corrosión por deterioro uniforme o general.
- Corrosión por esfuerzo.
- Corrosión galvánica o entre dos metales.
- Corrosión erosiva.
- Corrosión por picadura.
- Corrosión por grieta.
- Corrosión intergranular.

- Corrosión bajo tensión.
- Corrosión por desgaste.
- Disolución selectiva o desaleante.
- Corrosión seca.

### 1.3.3. Métodos de protección de la corrosión.

#### Protección anódica.

La protección anódica está fundamentada en la pasivación de un metal anódico cuando se le somete a un potencial más positivo que el potencial de corrosión. Para ciertos metales y electrolitos sucede que al aumentar el potencial aumenta fuertemente la oxidación hasta alcanzar una intensidad máxima. A partir de este punto y para pequeños incrementos del potencial la densidad de corriente disminuye hasta la corriente pasiva, que indica unos bajos valores de corrosión. Este bajo nivel de oxidación se mantiene para valores de la tensión mayores al potencial eléctrico, pero no tanto para llegar a la destrucción de la capa pasiva, transpasiva. Los electrolitos que pueden proteger a cada metal o aleación son seleccionados, de acuerdo con la tabla de iones que los pasivan formando una película pasiva protectora en la superficie. Así el acero puede protegerse anódicamente por los iones sulfúrico, fosfórico o álcalis; pero no con los iones cloro. Sin embargo el titanio puede protegerse por los iones cloro.

*La protección anódica se aplica a aleaciones que se pasivan con rapidez para pequeñas densidades de corriente.*

#### Protección catódica.

Es la que se consigue con una fuerte polarización catódica por medio de una fuente que suministra corriente eléctrica a través de un ánodo auxiliar. La Fig. 8a muestra el montaje básico y la Fig.8b el diagrama con la polarización del cátodo.

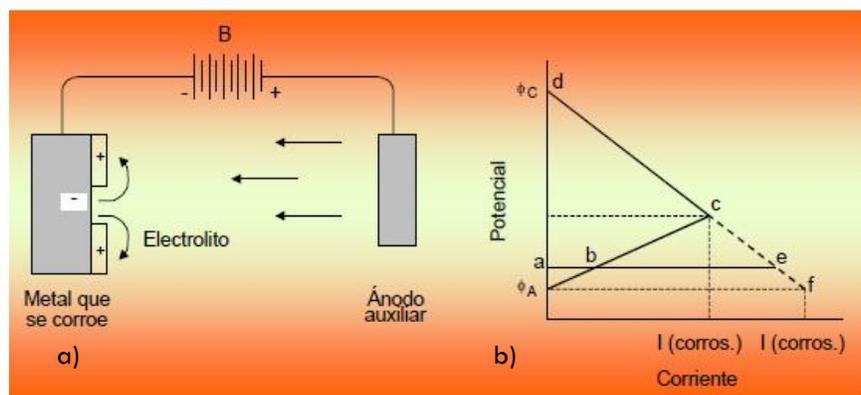


Fig. 8 a) Circuito de protección catódica por corriente impresa. b) Diagrama de polarización por protección catódica.

La corriente abandona el ánodo auxiliar y entra en el metal a proteger a través de sus áreas anódicas y catódicas que constituyen su microestructura. Cuando las áreas catódicas se polarizan

por una corriente externa  $I$  aplicada no existe diferencia de potencial con las áreas anódicas, lo que inhibe totalmente el proceso de corrosión en éstas. Existen dos métodos diferenciados de procesos que se describen a continuación.

#### A - Corriente impresa.

El esquema es el indicado en la Fig. 8a y su aplicación para protección de tuberías se realiza en la Fig. 9a. Requiere una fuente de corriente continua que alimenta a un ánodo auxiliar situado a una cierta distancia de la tubería, ésta se conecta al polo negativo mientras un ánodo en el positivo. Es aconsejable la baja resistividad del suelo de interconexión que desempeña el papel de conductor. El ánodo es un metal menos electronegativo que la muestra protegida.

#### B - Ánodos de sacrificio.

En este sistema no existe fuente de alimentación externa, y el suministro de electrones se realiza por el proceso corrosivo en el ánodo auxiliar que es más electronegativo que el material a proteger, tal como aparece reflejado en la Fig. 9b. Habitualmente se usan ánodos de magnesio aleados con aluminio y zinc.

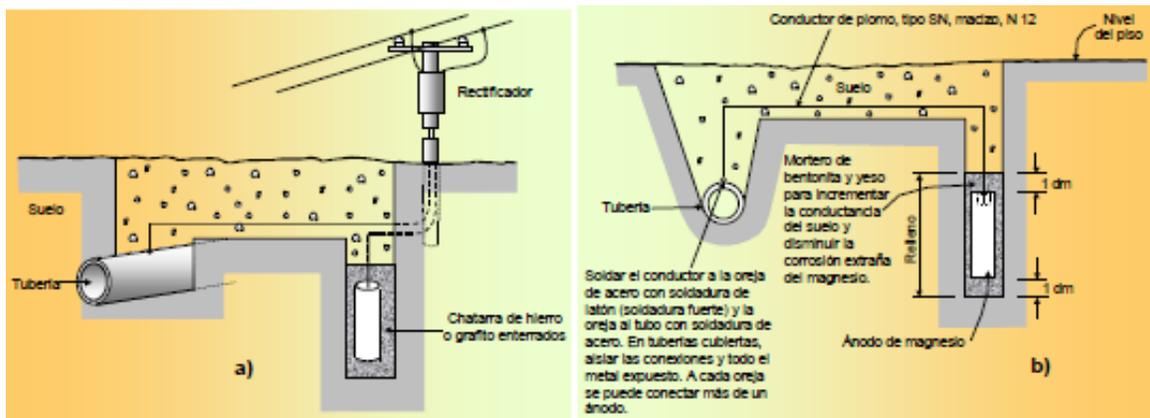


Fig. 9 Tubería protegida anódicamente: a) por corriente impresa, b) por ánodos de sacrificio.

Obviamente el ánodo se consume durante su período de servicio y es necesaria su reposición.

*La protección catódica se fundamenta en la igualación de los potenciales de las áreas anódicas y catódicas del material por el flujo de electrones suministrado bien por una fuente eléctrica, corriente impresa, bien por un ánodo consumible, ánodo de sacrificio.*

#### Protección mediante recubrimientos.

Los recubrimientos metálicos, inorgánicos y orgánicos, se aplican a los metales para prevenir o reducir la corrosión y estos pueden clasificarse como se muestra a continuación:

##### A) Recubrimientos con películas orgánicas.

Las pinturas son un método universal para proteger contra la corrosión, además de sus efectos decorativos. El principio está basado en crear una barrera de protección que impida el contacto directo del metal con el electrolito. Para ello se requieren la aplicación de capas de imprimación, con la misión de procurar una adherencia óptima con la superficie del metal, y sucesivas capas de

pinturas compatibles que disminuyan la probabilidad de acceso del electrolito a la superficie metálica. Una capa de pintura tiene una textura continua pero con microporos, Fig. 10. La aplicación de sucesivas capas favorece el aislamiento de la capa metálica.

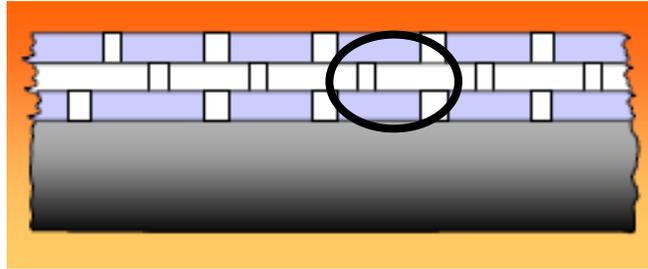


Fig. 10 Textura de una chapa pintada.

Una pintura debe tener buena adherencia y elementos inhibidores de la corrosión, ya que el agrietamiento inhibe la acción benéfica de la pintura al quedar la chapa desnuda.

La protección con pinturas se optimiza químicamente por el efecto barrera e inhibidor de los constituyentes y mecánicamente por el mayor grueso de película e inexistencia de agrietamiento de capa.

#### B) Recubrimientos con películas metálicas.

Los recubrimientos metálicos se obtienen por diversos procedimientos, fundamentalmente por inmersión en caliente o electrodeposición. El principio de protección frente a la corrosión es diferente según la naturaleza del metal de recubrimiento, tales como:

- Recubrimientos con metales menos electronegativos. La protección se realiza por el principio del efecto barrera analizado con las pinturas, pero con el inconveniente de que si existe poros o agrietamiento, como se muestra en la Fig 11b, el metal base actúa como ánodo.
- Recubrimiento con metales más electronegativos. La protección se realiza por el principio de protección anódica, en la variante de ánodos de sacrificio, con una alta densidad de superficie anódica y baja de metal catódico a proteger, Fig. 11a.

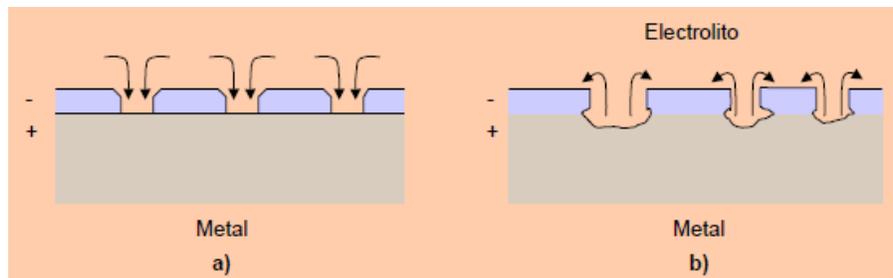


Fig. 11 Protección: a) con metal anódico de sacrificio, y b) con metal noble.

Entre los ejemplos de protecciones nobles tenemos el niquelado, cromado, estañado que se usa también como efecto decorativo.

Como en el caso de las pinturas *la resistencia a la corrosión del metal protegido se optimiza con el espesor de la capa depositada, la fase cristalina constituyente y la menor densidad de poros o grietas del depósito.*

Ejemplos de este tipo de protecciones las encontramos en el recubrimiento de zinc sobre acero para obtener el acero galvanizado. También la deposición de una fina capa de estaño en una hoja de acero para producir hojalata para latas de conserva. La deposición puede realizarse en varias capas. Igual procedimiento se sigue en el cromado que se aplica a automóviles. Esta electrodeposición consta de tres capas: (1) una interior de cobre para lograr la adhesión del recubrimiento al acero; (2) una capa intermedia de níquel para conseguir una buena resistencia a la corrosión, y (3) una fina capa de cromo para dar buena apariencia.

### C) Otros recubrimientos

Para algunas aplicaciones es deseable cubrir el acero con un recubrimiento cerámico que le confiera un acabado terso y duradero. El acero se recubre normalmente con una capa de porcelana formada por una fina capa de vidrio fundido en la superficie del acero de tal modo que se adhiera bien y presente un coeficiente de expansión ajustado al metal base. En algunas industrias químicas se ha impuesto el uso de recipientes de acero vidriados ya que son fáciles de limpiar y tienen gran resistencia a la corrosión [9].

### 1.3.4. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en ingles), es un método electroquímico utilizado en los estudios de corrosión, en cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta correspondiente.

En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante en estas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico utilizado procesa las mediciones de potencial-tiempo y corriente-tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada [10].

El montaje experimental es prácticamente idéntico para la medición de las curvas de polarización, como se muestra en la Fig. 12, pero, a diferencia de este, se mide el desajuste de fase respecto a la frecuencia del potencial aplicado. Lo que requiere el uso de un analizador de frecuencias.

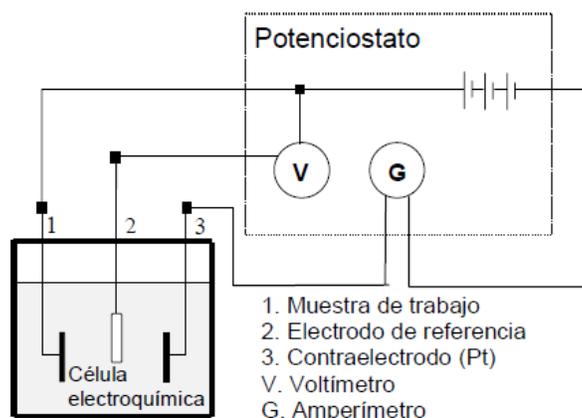


Fig. 12 Sistema eléctrico de un ensayo de polarización.

A partir de las mediciones de desajuste y de amplitud de la corriente resultante, es posible obtener la impedancia de transferencia electroquímica del material estudiado, en forma de número complejo, del cual pueden ser separadas las componentes real e imaginaria mediante un análisis matemático adecuado.

En los casos de estudios de corrosión que utilizan la técnica EIS, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc. Combinados de tal manera que reproduzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados "circuitos eléctricos equivalentes".

A partir de un esquema eléctrico dado, es posible representar de diversas formas los parámetros obtenidos en los experimentos de espectroscopia de impedancias. Por ejemplo, en la Fig. 13 se representa un sencillo circuito, utilizado para modelar una interfaz metal-solución conductora [11].

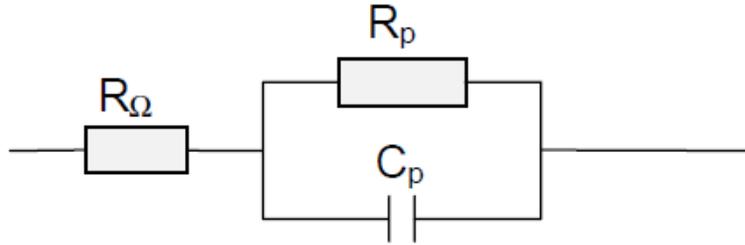


Fig. 13 Esquema eléctrico análogo.

### 1.3.4.1. Diagramas de Bode.

El diagrama de Bode permite conocer la impedancia de transferencia tanto del material como del medio de trabajo, que se muestra en la Fig. 14. Ahora bien, para lograr unos buenos resultados es necesario trabajar con un rango de frecuencias muy dinámico, de un mínimo de 7 décadas, con un límite inferior sumamente bajo de al menos 1 mHz ( $10^{-3}$ Hz). Esto obliga a los ensayos de larga duración, incluso mediante manipulación matemática por transformadas rápidas de Fourier de una superposición de frecuencias para reducir el tiempo de ensayo necesario. Además de obtener los parámetros ya mencionados, la espectroscopia de impedancias permite conocer otros parámetros tras un proceso de calibración con patrones conocidos. Entre los que se pueden calcular destacan el área real de la probeta estudiada (esto es, la formación de picaduras u otros procesos de degradación del material), la existencia de capas en la superficie de la probeta, su espesor y características. La respuesta del material cuando se encuentra sometido a potenciales diferentes del natural, etc. Diversas aplicaciones industriales usan esta técnica para el control de calidad de metales cubiertos con capas de pintura o dieléctricos, y su comportamiento en medios corrosivos. Debido a la elevada cantidad de información que se puede obtener, y a la elevada sensibilidad que presenta las variaciones del medio, del equipo o del sistema estudiado, esta técnica requiere la realización de ensayos en condiciones muy controladas [11].

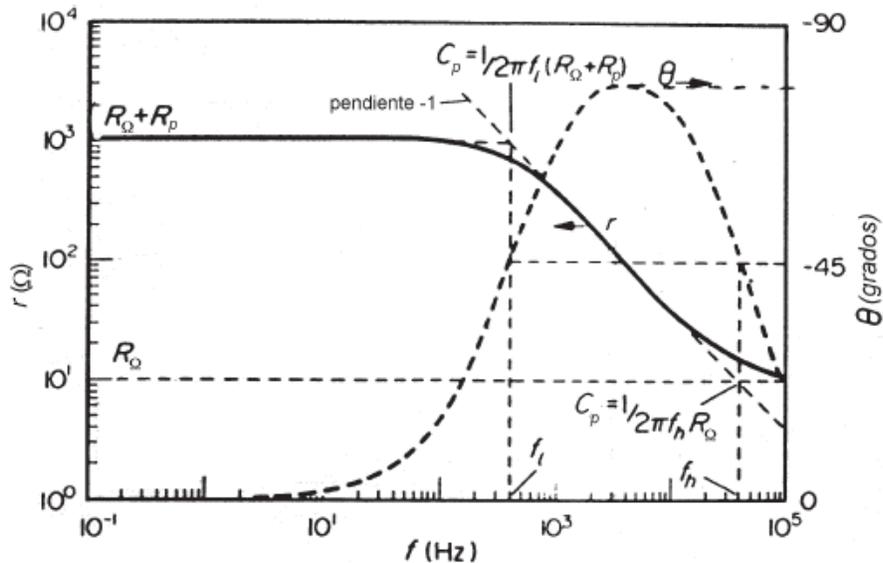


Fig. 14 Gráfico de Bode del esquema eléctrico de la figura 13.

### 1.3.4.2. Diagramas de Nyquist.

El gráfico de Nyquist permite identificar diferentes parámetros obtenidos en el ensayo de espectroscopia de impedancias; por ejemplo se pueden obtener  $R_p$  (la resistencia de transferencia de cargas del material estudiado),  $C_p$  (capacidad de la interfaz estudiada) y  $R_\Omega$  (resistencia eléctrica del medio de trabajo). A partir de dichos parámetros, se pueden realizar comparaciones y estimaciones del comportamiento frente a la corrosión del material estudiado. El gráfico se muestra en la Fig. 15., donde  $b$  y  $a$  son las componentes real e imaginaria de la impedancia [11].

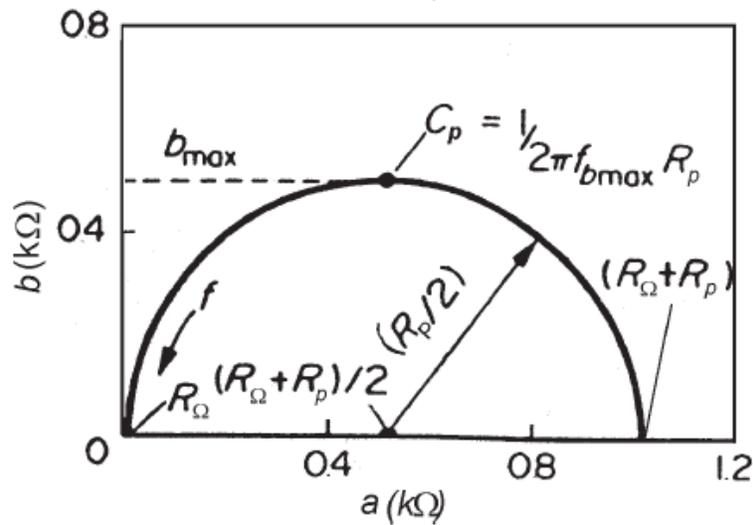


Fig. 15 Gráfico de Nyquist del esquema de la figura 13 .

## **1.4. TRIBOLOGÍA[12]**

### **1.4.1. Definición de tribología.**

La tribología es el campo de la ciencia y la tecnología que estudia el contacto de las superficies en movimiento relativo, lo que significa que trata con los fenómenos relacionados con la fricción, desgaste y lubricación.

Recientemente los tribólogos han hecho un incremento en el uso de otro enfoque para la fricción y control del desgaste, que es utilizar tratamientos superficiales y recubrimientos. Esto ha llevado al crecimiento de una nueva disciplina llamada ingeniería de superficies. El crecimiento ha sido alentado por dos factores importantes. El primero ha sido el desarrollo de nuevos recubrimientos y métodos de tratamiento, que proporcionan recubrimientos característicos y propiedades triboquímicas que antes eran inalcanzables. La segunda razón para el desarrollo en esta área temática ha sido el reconocimiento de los ingenieros y los científicos en materiales, que la superficie es la parte más importante en muchos componentes en la ingeniería. Es en la superficie donde se originan las fallas, ya sea por desgaste, fatiga o corrosión. La superficie tiene una influencia dominante en tiempo de vida, costo y rendimiento, incluyendo en el mantenimiento de maquinaria.

La superficie también tiene otros atributos funcionalmente importantes no confinados a las propiedades mecánicas o químicas, como térmicas, eléctricas, magnéticas y características ópticas que influyen en la selección del material de la superficie. La retención de las propiedades físicas de las superficies es claramente esencial a lo largo de la vida de un producto. Es una razón adicional por la cual se mejora la durabilidad de la superficie con la selección adecuada de un recubrimiento esto es fundamental para la eficacia de cualquier producto.

### **1.4.2. Definición de desgaste.**

El desgaste es comúnmente definido como la eliminación de material desde superficies sólidas como resultado del contacto de una superficie en movimiento sobre otra. Por lo tanto, ambas: fricción y desgaste son simultáneamente resultados del mismo proceso de contacto tribológico que tiene lugar entre dos superficies en movimiento. Como sea, su interrelación no es bien entendida. Es común encontrar que la baja fricción corresponde a bajo desgaste y que alta fricción a alto desgaste tal y como se muestra en el conjunto experimental de resultados en la Tabla 3.

Esta no es una regla general y hay varios ejemplos de un comportamiento contradictorio. La Tabla 3 también ilustra otras características típicas. Los valores de coeficiente de desgaste también pueden cambiar, en diferentes condiciones por varios órdenes de magnitud. Esto puede contrastarse con el coeficiente de fricción, que raramente cambia por más de un simple orden de magnitud, a menos que un lubricante sea introducido o el contacto sea removido, y en este caso el desgaste podría mostrar un mayor cambio.

Tabla 3 Valores del coeficiente de fricción en los contactos de deslizamiento en seco.

Materiales en contacto	Coefficiente de fricción
Oro sobre oro	1-2
Hierro sobre hierro	0.8-1.5
Aluminio sobre aluminio	0.8-1.2
Cobre sobre cobre	0.8-1.2
Plata sobre plata	0.8-1
Fundición gris sobre fundición gris	0.8-1
Acero suave sobre acero suave	0.7-0.9
Cobre sobre acero suave	0.6-0.7
Titanio sobre titanio	0.5-0.6
Aluminio sobre acero suave	0.5-0.6
Plata sobre acero	0.5
Materiales de freno	0.5
Titanio sobre acero suave	0.4-0.6
Oro sobre acero suave	0.4-0.5
Arenisca sobre arenisca	0.35
Carburo de titanio sobre carburo de titanio	0.3-0.7
Oxido de aluminio sobre oxido de aluminio	0.3-0.6
Granito sobre granito	0.3
Caucho sobre acero	0.3-3
Nitruro de titanio sobre nitruro de titanio	0.25-0.5
Cuero sobre hierro	0.25
Polimida sobre superficie dura	0.2-0.4
Poliamida (Nylon) sobre superficie dura	0.15-0.3
Madera dura sobre madera dura	0.15
Diamante sobre diamante	0.1-0.2
Deslizamiento seco en general	0.1 a 1.0
Lubricante sólido de grafito sobre superficie dura	0.05-0.15
PTFE (teflon) sobre superficie dura	0.05-0.1
Lubricante sólido MoS <sub>2</sub> sobre superficie dura	0.05-0.1
Fullerenos (C <sub>60</sub> ) sobre superficie dura	0.05-0.1
Fricción de rodamiento (bolas y rodamientos)	0.001-0.01
DLC sobre DLC en nitrógeno seco o argón	0.001-0.01
Superficie de recubrimiento MoS <sub>2</sub> sobre acero en alto vacío	Menos de 0.001

#### 1.4.3. Mecanismos de desgaste.

El mecanismo de desgaste se clasifica por medio del proceso por el cual el material es removido por contacto en una superficie. Los típicos mecanismos de desgaste son el adhesivo, abrasivo, por fatiga y desgaste químico. Es muy común que en un contacto real, más que un mecanismo de desgaste es acción del mismo tiempo. La combinación precisa de mecanismos de desgaste depende de las condiciones de contacto y resultado de un tipo específico de desgaste.

El modo de desgaste se clasifica por el tipo de contacto, que es caracterizado por una clase específica de movimiento, geometría y medio ambiente. Ejemplos de modos de desgaste son desgaste por deslizamiento, desgaste por rodamiento, agitación, erosión, desgaste por impacto y cavitación. Un modo de falla por desgaste es típicamente referenciado en base a cómo reacciona la superficie después del contacto, por ejemplo raspones, picaduras, puntuación, desconchado, incautación y delaminación. El modo de desgaste define un cierto conjunto de condiciones donde la relación entre parámetros es similar y por lo tanto, los diferentes efectos son más fáciles y exactos para ser descritos y formulados matemáticamente. Un ejemplo de esto es la tasa de ecuaciones de desgaste usadas en las gráficas de desgaste, mostradas en la gráfica de la Fig. 16

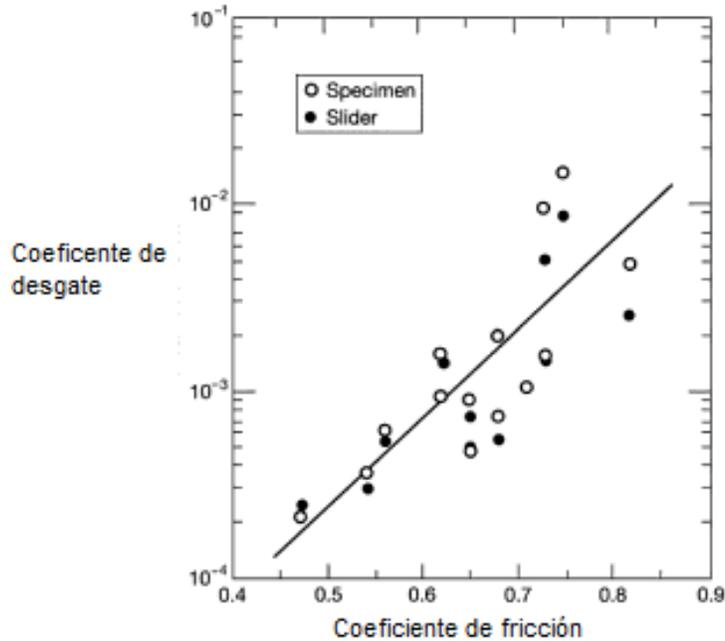


Fig. 16 Grafica. Coeficiente de desgaste de diferentes aceros como una función del coeficiente de fricción.

Sin embargo, no hay aún un acuerdo general sobre la clasificación de los mecanismos y modos de desgaste. Los mecanismos básicos de desgaste se enlistan a continuación y muestran en la Fig. 17.

- Desgaste adhesivo.
- Desgaste abrasivo.
- Desgaste por fatiga.
- Desgaste químico.

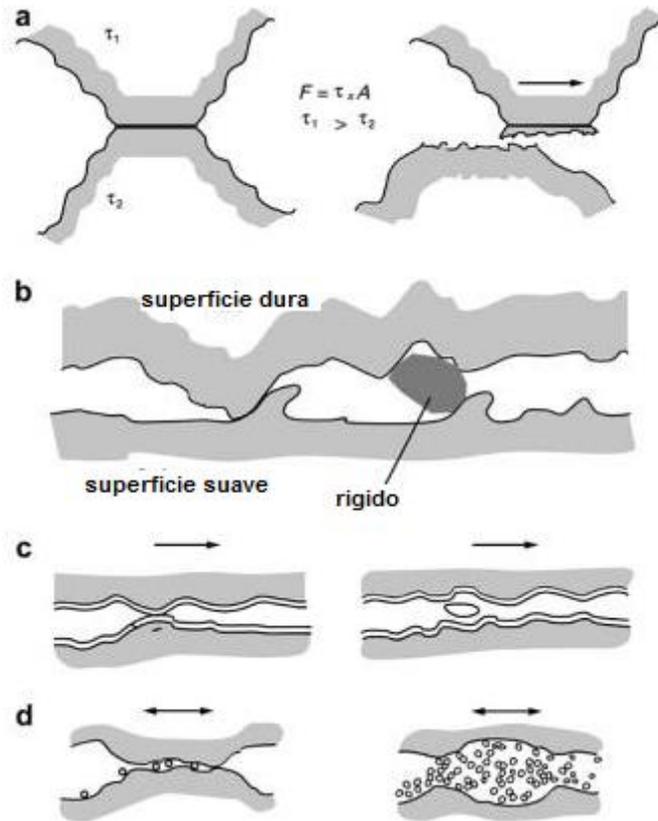


Fig. 17 Los mecanismos básicos de desgaste son (a) adhesivo, (b) abrasivo, (c) fatiga y (d) desgaste químico.

### Desgaste adhesivo

Cuando las asperezas de una superficie entran en contacto con las asperezas de una superficie contraria, éstas pueden adherirse fuertemente entre sí y formar uniones de asperezas como se mostró en la Fig. 17a. El movimiento relativo tangencial de la superficie provoca la separación, en mayor medida, de las asperezas más suaves y así el material es removido. En el desgaste adhesivo las propiedades del material de la superficie, así como la posible protección de películas superficiales o contaminantes, juegan un papel importante.

La teoría del desgaste adhesivo, ha sido criticada por los siguientes motivos:

- Parece poco probable que la interfaz sea más fuerte que cualquiera de los materiales debido a las impurezas.
- No puede explicar el desgaste de la superficie más dura que se observa con frecuencia.
- No puede explicar la creación de partículas de desgaste sueltas.
- El trabajo máximo requerido para generar partículas de desgaste es de dos a tres órdenes de magnitud menor que el trabajo externo realizado.
- No se puede explicar la relación entre la fricción y el desgaste.
- No se tiene en cuenta la microestructura y parámetros metalúrgicos.

Hay, aun así, suficiente evidencia experimental en la referencia dada anteriormente para probar que el desgaste adhesivo se produce en muchas situaciones de deslizamiento. Sin embargo parece que los mecanismos de desgaste adhesivo no necesariamente tienen un papel tan dominante en contactos reales como tradicionalmente se había considerado. Sin embargo, hay las condiciones como desgaste por deslizamiento en vacío o atmósfera inerte, o cuando una temperatura de destello de aspereza es lo suficientemente grande para promover la adhesión de aspereza, en el que el efecto de desgaste adhesivo probablemente sea el mecanismo dominante. Se ha observado que la influencia de la humedad es considerable en el deslizamiento en seco del acero contra el acero en condiciones normales, mientras que el comportamiento de la fricción es menos afectado. En los modos de falla como raspones e incautación los efectos del desgaste adhesivo son muy importantes [12].

#### Desgaste abrasivo y deformación de aspereza

El desgaste por deformación plástica toma ambos lugares en desgaste abrasivo y en deformación de aspereza como se mostró en la Fig. 17b. El desgaste abrasivo ocurre en contactos donde una de las superficies es considerablemente más dura que la otra o dónde las partículas duras son introducidas al contacto. Las asperezas de la superficie dura son presionadas en la superficie más suave que resulta en el flujo plástico del material más blando alrededor del más duro. Cuando la superficie dura se mueve tangencialmente, tiene lugar el arado y la remoción del material más blando, lo que resulta en surcos y arañazos en la superficie. Dependiendo de la geometría de la superficie dura y del grado de penetración, la remoción de material puede tomar diferentes formas, como pueden ser el arado, la formación de cuñas o cortes. El arado por desgaste abrasivo está presente en gran medida en equipos de minería y movimiento de tierra. Los modos de desgaste como abrasión por ranurado, abrasión por molienda y abrasión por erosión pueden ser los más sobresalientes. La acción de cortar un metal ha sido descrita como desgaste abrasivo a gran escala. La deformación de aspereza es debida a la rugosidad y ondulación de las superficies en contacto. Una colisión de dos asperezas resulta en deformación plástica de una o ambas, que conducen a la eliminación de material de las asperezas. Los contactos deslizantes de la superficie causan deformaciones plásticas grandes y endurecimiento por deformación en la superficie. La deformación plástica cambia la microestructura cerca de la superficie de manera que hace al material más resistente a cortes locales. Esto conduce a la transferencia de material y elementos del entorno para producir una película de grano ultrafino. La microestructura tan fina en este material de transferencia es estabilizada por la mezcla, en forma de aleación mecánica de una segunda fase. El entremezclado mecánico como resultado de la deformación de aspereza también puede cambiar la composición química del volumen cerca de la superficie. El perfil de profundidad en la Fig. 18 muestra el cambio en la composición química de una superficie de hierro fundido gris antes y después de ser lubricado con aceite para deslizamiento en contra de un perno de acero a una presión de menos de 100 [MPa]. La zona modificada exhibe una extensión de más de 150 [nm]. Las distribuciones de calcio, oxígeno y sodio tienen su máximo debajo de la superficie, indicando claramente la mezcla mecánica.

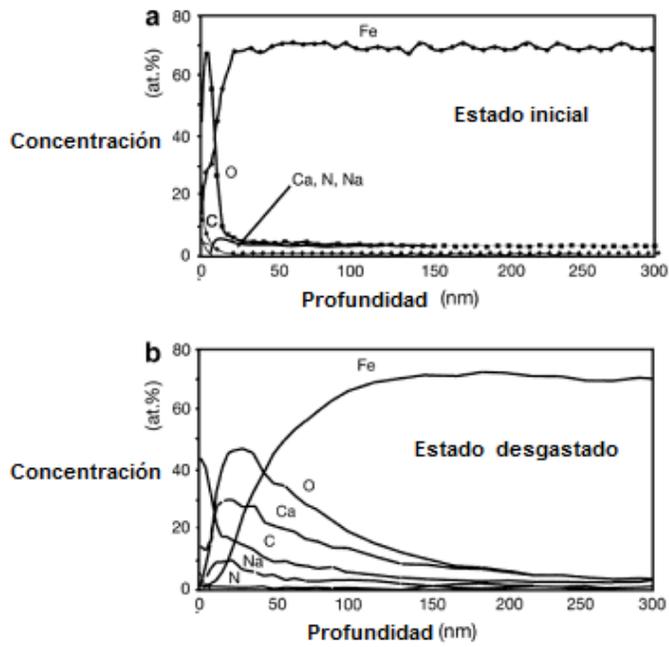


Fig. 18 Perfil de profundidad por espectroscopia de barrido de electrones de fundición gris: (a) El estado inicial, (b) Estado desgastado después de 200 horas de deslizamiento.

#### 1.4.4. Técnicas de determinación de desgaste.

Debido a la complejidad del proceso de desgaste, que depende de los materiales, condiciones de contacto y parámetros ambientales en un número de diferentes combinaciones, no ha sido posible formular una ecuación universal de desgaste. Un enfoque más general se muestran los intervalos de validez de seis modos diferentes de desgaste en un mapa de desgaste con presión de contacto normalizado y de la velocidad normalizada como coordenadas y también dan ecuaciones de desgaste para cada modo de desgaste. Los modos de desgaste identificados son desgaste ultra-suave, desgaste de delaminación, desgaste por oxidación leve, desgaste por oxidación grave, desgaste por fundición e incautación. La representación es, sin embargo, limitada a un par de deslizamiento del acero en una máquina pin-on-disk como se muestra en Fig. 19 [12].

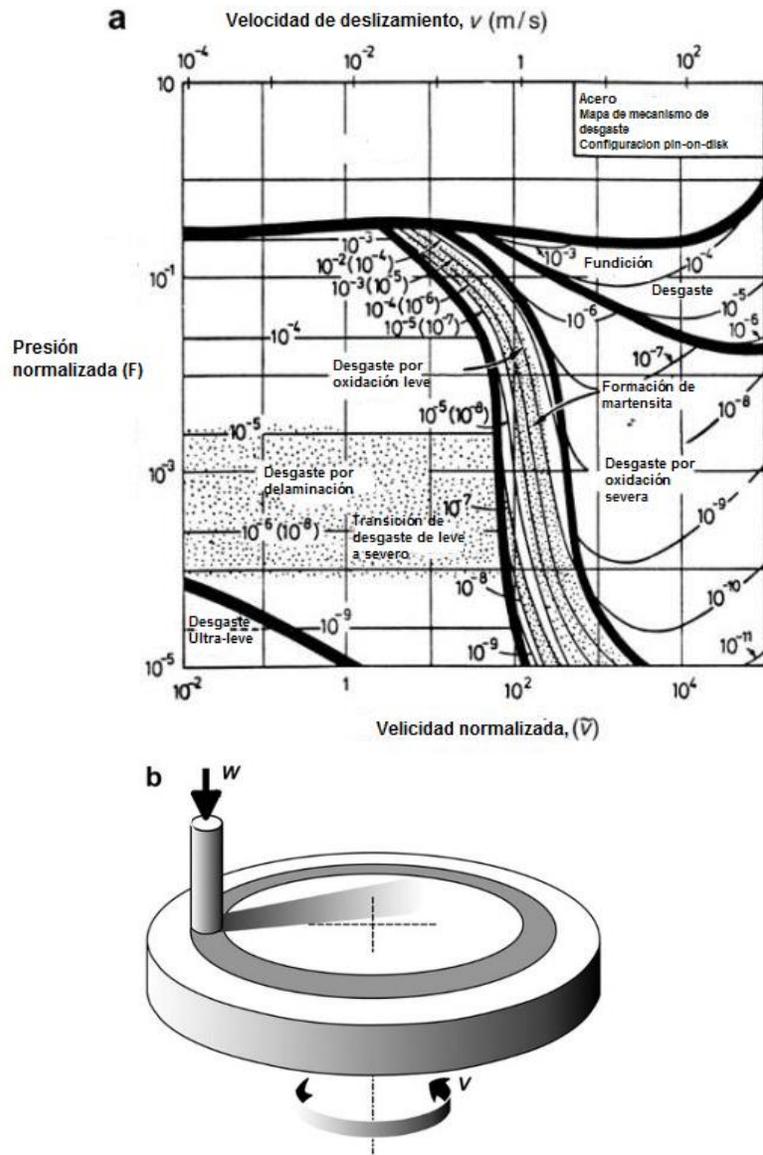


Fig. 19 (a) El mapa de desgaste de Lim y Ashby para un par de acero deslizante. (b) El dispositivo de prueba de pin-on-disk utilizado.

#### 1.4.5. Coeficiente de desgaste.

Es posible observar algunas características comunes al estudiar las ecuaciones de desgaste propuestos para los diferentes modos de desgaste. A menudo, el volumen desgastado es directamente proporcional a la carga normal y la distancia de movimiento e inversamente proporcional a la dureza del material. Esta relación se puede formular como:

$$V = K * \frac{w * s}{H} \quad \text{Ec.1.}$$

Donde  $V$  es el volumen desgastado,  $w$  es la carga normal,  $s$  es la distancia recorrida,  $H$  es la dureza y  $K$  es una constante, frecuentemente llamado coeficiente de desgaste. Incluso si la relación es válida en muchos casos, no debe considerarse como una ecuación desgaste universal porque hay varios ejemplos de contactos tribológicas en los que es válido [12].

Para un diseño y materiales con fines de desarrollo es necesario tener algún parámetro cuantitativo universal para el desgaste. Utilizar el volumen de material eliminado no es útil o ilustrativo debido a la muy diferente condición de prueba en uso. La llamada relación Holm o Archard de desgaste se utiliza a menudo para la formulación de la tasa de desgaste (también llamada tasa de desgaste específico) que es un valor práctico y más general para la cantidad de desgaste. Se utilizará para la tasa de desgaste  $K'$ , el valor de la constante  $K$  dividida por la dureza  $H$ , en conformidad con la práctica común. Por lo tanto la tasa de desgaste es:

$$K' = \frac{V}{w * s} \quad \text{Ec.2.}$$

La tasa de desgaste normalmente se expresa con las dimensiones ( $10^{-6}[\frac{mm^3}{Nm}]$ ). Incluso si esto no es en todos los aspectos de la forma ideal de expresar el desgaste es en algunas ocasiones el más adecuado, y tiene un amplio soporte. También hay un argumento físico claro para el uso de la tasa de desgaste como se definió anteriormente, ya que es el volumen desgastado dividido entre la entrada de energía mecánica en el contacto. La entrada de energía de contacto se puede describir como el producto de la carga normal, la velocidad y el tiempo de aplicado, que de nuevo es el mismo que el producto de carga y la distancia que se encontró en la ecuación. En la literatura es, sin embargo, más a menudo posible encontrar datos para el coeficiente de fricción que para la tasa de desgaste. Esto es lamentable, porque en muchos casos sería más relevante para comparar las propiedades de desgaste que las propiedades de fricción.

## CAPÍTULO 2. EXPERIMENTACIÓN

### 2.1. PROYECCIÓN TÉRMICA

#### 2.1.1. Preparación de sustrato.

La limpieza y la rugosidad del sustrato tienen un papel de gran importancia para la adherencia correcta del recubrimiento. Es importante que el grado de limpieza de la superficie sea mantenido hasta la proyección térmica. El material del sustrato utilizado para la realización de este trabajo fue un acero AISI 1018 (solera estirada en frío Cold Rolled), cuya composición química aproximada fue %C 0.18, %Mn 0.7, %P 0.40, %S 0.05, %Si 0.25, Las probetas se cortaron hasta conseguir las dimensiones de 1x1x 1/8 [in].

##### 2.1.1.1. Rugosidad.

Para generar una rugosidad apropiada se utilizó granalla de óxido de aluminio negro proyectado con una pistola Shot Blasting de la marca Cony modelo H57. El tiempo granallado fue de 2 [min] a una distancia de 10 [cm] para producir una rugosidad de 8 a 10 [ $\mu$  m], esto variando algunos parámetros del granallado para tener una rugosidad apropiada para una buena adherencia al sustrato [14]. La determinación de la rugosidad del recubrimiento fue hecha con un rugosímetro de la marca Mitutoyo y modelo SurfTest-420 que cuenta con un palpador de punta de diamante de forma cónica que tiene un diámetro de 5 [ $\mu$ m] y un recorrido de 5 [mm]. Las probetas granalladas se muestran en la Fig. 20.



Fig. 20 Probetas granalladas

##### 2.1.1.2. Limpieza.

En este trabajo se utilizaron dos procedimientos de limpieza: La limpieza ultrasónica y la limpieza clásica con acetona. La limpieza ultrasónica puede ser usada para eliminar contaminantes en áreas ocultas, también puede ser utilizada para remover partículas sueltas de la superficie del sustrato. Así, se limpiaron superficialmente cada una de las probetas, mediante limpieza ultrasónica con un equipo de la marca Elma modelo 310 durante 5 [min]. Por otro lado la acetona se utilizó para remover aceites en la superficie que podrían afectar la adherencia del recubrimiento. Por lo tanto, la superficie fue protegida contra la manipulación inadecuada y los contaminantes de la superficie [4].

## 2.1.2. Determinación de los parámetros del proceso.

### 2.1.2.1. Material de deposición.

Se utilizó un polvo Metco 12C y polvo de Carburo de silicio. El polvo METCO 12C con una composición química Ni-Cr-Fe-B-Si-C, con una dureza de HRC 35-40 de base Niquel-Cromo con una temperatura de fusión aproximada de 1046 °C (1915 °F). Los valores de composición química fueron: %Cr 7.5, %B 1.7, %Si 3.5, %C 0.25, %Fe2.5. El otro polvo se denomina con el nombre comercial de Carburo de Silicio (SiC). Este polvo presenta una malla 80, lo que indica que se han formado por sinterización y posterior trituración. La mezcla de los polvos se hizo en un molino de bolas 8000Dmixer/mil que se puede observar en la Fig.21b, con un tiempo de mezcla de 5[min] con capacidad de 10 [g] y usando un diámetro de bola de 1 [cm] que muestra la Fig.21a; se realizaron dos mezclas con diferentes porcentajes de carburo de silicio, una con el 5% y otra de 10%. Como se muestra en la Fig. 21c.



Fig. 21 Equipos y dispositivos utilizados para mezcla de polvos, (a) Diámetro de bola, (b) Dispositivo para las mezclas, (c) Bascula para medir el porcentaje de polvos.

### 2.1.2.2. Ángulo de proyección.

Se utilizó un ángulo de proyección de 90° respecto al plano de la superficie de las probetas con la intención de obtener una buena cohesión entre los splats por la fuerza de impacto y una buena adherencia del recubrimiento con el sustrato. Además de que se disminuyó la porosidad al colocarse adecuadamente cada splat sobre otro al llegar a la superficie del sustrato. Con esto también se mejoró la eficiencia de deposición del material sobre el sustrato, además de facilitar la deposición en cada probeta [4].

### 2.1.2.3. Distancia de proyección.

La distancia a la que se proyectó fue de 25 [cm] entre la boquilla y la superficie del sustrato, manteniéndose constante durante la deposición. Esta distancia se aprecia en la Fig. 22. La distancia de proyección está relacionada directamente con el nivel o el grado de fundición que tienen las partículas del recubrimiento. De este modo se consiguió que las partículas tuvieran un mejor reacomodo y un contacto mayor entre ellas, al llegar fundidas al sustrato [4].

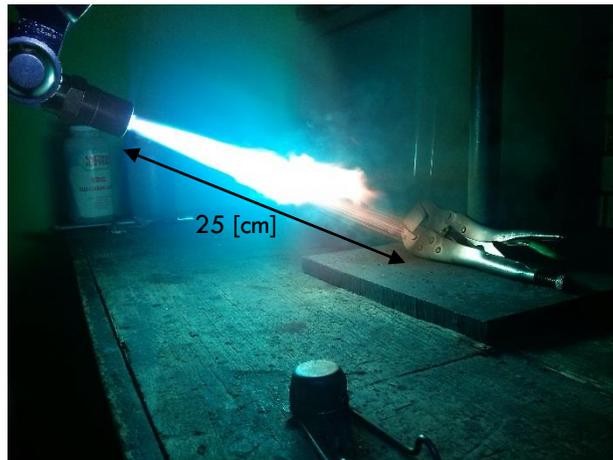


Fig. 22 Distancia de la boquilla de la pistola a la superficie del sustrato.

### 2.1.2.4. Consumo de polvo.

El consumo de material se midió proyectando sobre una lámina sin preparación superficial. Así el material depositado en la lámina y el sobrante que no se adhería fue removido para ser pesado, dicho procedimiento se observa en la Fig. 23 [19]. El tiempo de proyección está relacionado directamente con el consumo de material, estos dos parámetros definen el espesor del recubrimiento, por lo cual el tiempo de proyección que se utilizó fue de 8[s].



Fig. 23 Procedimiento para calcular el consumo de polvo [4].

### 2.1.2.5. Consumo de gases.

Se siguieron las recomendaciones específicas del fabricante de cada material para la realización del proceso, las cuales fueron: características de llama: color, tamaño y proximidad con respecto a la pieza; además, características y manejo del combustible (oxi-acetileno). Para esta aplicación uno de los aspectos más importante a tener en cuenta son las presiones de los gases de combustión del proceso, que se deben manejar (1.2 bar para oxígeno y 0.9 bar para el acetileno, que se muestra en la Fig. 25) con una relación de 4:3, estos valores de presión sugeridos en la hoja de datos del polvo 12C, así como los valores de gasto volumétrico del fluxómetro (50 [scfh](standard cubic feet per hour) de oxígeno y 30 [scfh] de acetileno que se puede observar en la Fig. 24 que se obtuvieron con la proyección de varias probetas con diferentes parámetros hasta llegar a los más apropiados. Con la comparación a simple vista y el análisis en el SEM también ayudaron a obtener estos parámetros.



Fig. 24 Dispositivos de medición de gasto y presión de gases.

### 2.1.2.6. Temperatura de precalentamiento.

Se precalentó el sustrato de manera uniforme desde una distancia de aproximadamente 100 a 125 [mm] (4 - 5 in) moviendo la flama hacia atrás y adelante sobre la superficie a una temperatura de aproximadamente 315-540 °C (600-1.000 ° F) [15]. Se realizó el precalentamiento del sustrato anteriormente descrito para aumentar la adherencia entre la superficie de éste y la capa de (NiCrFeBSiC)-SiC una con el 5% de SiC y otra con el 10% de SiC con el equipo de proyección térmica de polvo Sulzer Metco 5P-II [15].

## 2.2 DESGASTE (PIN ON DISK)

### 2.2.1. Preparación de probetas.

#### 2.2.1.1. Maquinado

El tipo de probetas que se utilizó para los ensayos de desgaste fueron las especificadas en el manual de operación de la máquina de desgaste y fricción tipo punta y disco (pin-on-disk) fabricado por Swansea Tribology Centre, modelo Cignus, como se observan en la Fig. 25, con las dimensiones que se muestran en la Fig. 26. Las probetas fueron granalladas y se limpiaron para ser proyectadas sobre la superficie circular que se señala en la Fig. 25, superficie que estuvo en contacto con el plato de desgaste.



Fig. 25 Probetas de desgaste.

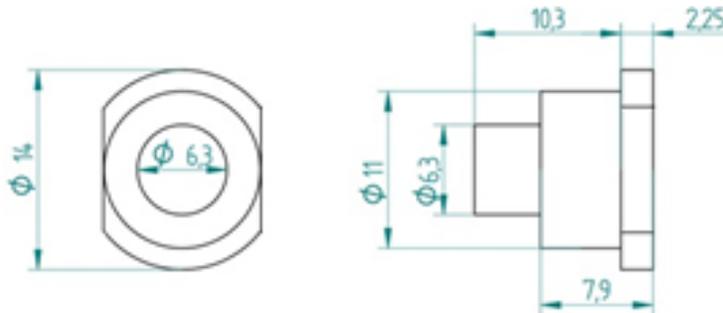


Fig.26 Dimensiones de las probetas de desgaste.

#### 2.2.1.2. Limpieza.

Las probetas fueron tratadas en limpieza ultrasónica como se muestran en la Fig. 27 para eliminar grasas y óxidos que pudieran afectar el nivel de adherencia entre la superficie de trabajo y el recubrimiento durante el proceso de proyección térmica. También se limpiaron las probetas con una solución de agua y etanol antes y después de ser sometidas a las pruebas de desgaste, para eliminar partículas sueltas que pudieran arrojar un error en la medición del peso de las probetas ensayadas.



Fig. 27 Limpieza Ultrasónica para las probetas de desgaste.

## 2.2.2 Determinación de los parámetros de la prueba.

### 2.2.2.1 Velocidad de rotación del disco.

La velocidad del disco se fijó en 150 [rpm] y se ajustó con un tacómetro de contacto en la máquina de ensayos de desgaste. Normalmente a mayor velocidad mayor volumen de desgaste y por ende mayor es el valor del coeficiente de desgaste K, se procuró la velocidad más baja para que el desgaste fuera solo del recubrimiento y no del sustrato. El tiempo que se dejó transcurrir la prueba fue de 20.5 [min]. Este tiempo (t) fue calculado a partir de la velocidad angular (rpm), la distancia recorrida (x) que fueron 1000 [m] y el radio del disco de sujeción ( $\varphi$ ) que fue de 0.051[m], parámetros fijos que incluimos en la formula siguiente:

$$x = (rpm)(2\pi)(\varphi)(t) \quad \text{Ec.3.}$$



Fig. 28 Giro del disco de desgaste

### 2.2.2.2 Carga aplicada a las probetas.

La carga aplicada a las probetas para la prueba de desgaste fue el ejercido solo por el plato de sujeción de probetas para desgaste que resultó de 1 kgf. El disco de sujeción se muestra en la Fig. 29.

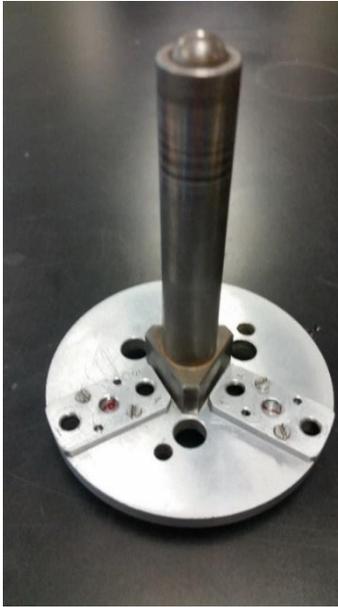


Fig. 29 Disco de sujeción de probetas de desgaste.

#### 2.2.2.3 Distancia recorrida.

La distancia que las probetas recorrieron fue de 1000m esto referenciado a la norma ASTM G99 que especifica las pruebas de desgaste.

#### 2.2.2.4 Rugosidad del disco de prueba.

Se tomaron varias mediciones para la determinación cuantitativa de la rugosidad del disco de desgaste haciendo uso del mismo rugosímetro empleado con anterioridad en la determinación de la rugosidad de las probetas de proyección. El procedimiento se observa en la Fig. 30.

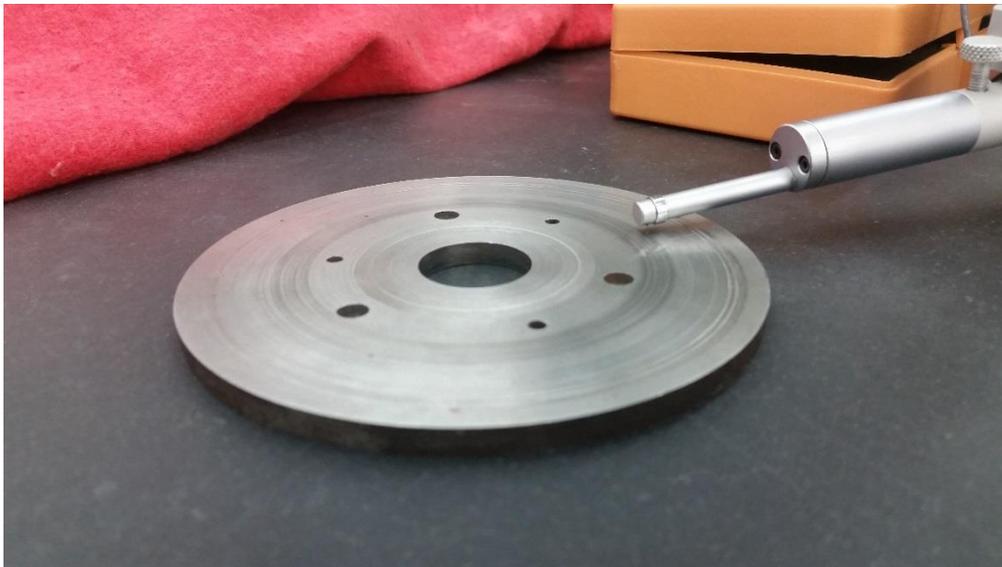


Fig. 30 Medición de rugosidad del disco de desgaste.

### 2.2.2.5 Medición de peso de las probetas antes y después de la prueba.

Posterior a la limpieza ultrasónica y a la prueba de desgaste se pesaron las probetas utilizando para ello una balanza analítica marca Ohaus modelo Pioneer que muestra la Fig. 31, con una sensibilidad de 0.0001 [g]. En la Tabla 4 se muestran los valores de masa obtenidos. Ya calculada la diferencia de peso de las probetas al ser ensayadas se introdujo el dato al cálculo para obtener el coeficiente de desgaste.

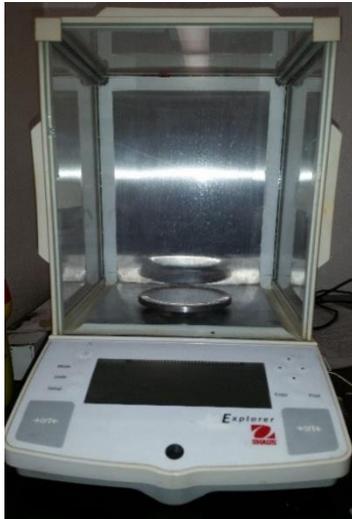


Fig. 31 Balanza analítica marca Ohaus modelo Pioneer

Tabla 4 valores de peso antes y después de la prueba.

No. Probeta	Peso Inicial [g]	Peso Final [g]
Acero 1018 1	8.9873	8.6134
Acero 1018 2	8.9501	8.8969
12C 1	9.1798	9.1782
12C 2	9.1430	9.1409
12C-SiC5% 1	9.1950	9.1912
12C-SiC5% 2	9.2285	9.2250
12C-SiC10% 1	9.1886	9.1740
12C-SiC10% 2	9.2936	9.2750

### 2.2.2.6 Determinación de la dureza del recubrimiento.

La medición de la dureza de los recubrimientos y el sustrato fueron realizadas en un microdurómetro de la marca Shimadzu del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, que se puede observar en la Fig. 32. La medición se realizó en la sección transversal de las probetas antes cortadas, empastillas y con metalografía con acabado espejo para garantizar la correcta medición.



Fig. 32 Microdurómetro de la marca HMV-G del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM

Todas las mediciones de dureza se realizaron en la escala Vickers. Se utilizó el indentador de diamante en forma de pirámide cuadrangular con una carga de 980.7 [mN] y un tiempo de carga de 10 [s].

Para calcular los coeficientes de desgaste se requirió el dato de dureza en la escala Rockwell B por lo que se utilizó un polinomio que se presenta a continuación para hacer la conversión de escalas, de Vickers a Rockwell B, según la Norma ASTM E140.

i

$$(HV)^{-1} = +1.69552E^{-2} - 1.29200E^{-4}(HRB) \quad \text{Ec.4.}$$

### 2.3. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS).

La espectroscopía de impedancia electroquímica EIS es una técnica que ha sido de gran ayuda para evaluar el comportamiento de los recubrimientos a proceso corrosivos, debido a su capacidad de medir la resistencia al transporte de carga a través de los distintos recubrimientos.

Se utilizó un potencióstato de la marca ACM Instruments modelo Gill AC mismo que se puede observar en la Fig. 33, así como sulfato de sodio como agente corrosivo (electrolito de trabajo) el cual fue preparado con una concentración de 0.1 [M].



Fig. 33 Potencióstato marca ACM Instruments que se utilizó para hacer las mediciones.

#### 2.3.1 Contraelectrodo y Electrodo de referencia utilizados en el ensayo.

Se utilizaron cuatro celdas de corrosión debidamente construidas para albergar las probetas. El electrodo de referencia utilizado fue uno de Sulfato de Mercurio, así como el contraelectrodo de grafito, mismos que se observan en la Fig. 34.



Fig. 34 Electrodo de referencia y contraelectrodo de Grafito.

### 2.3.2 Parámetros y armado de celdas para ensayo de corrosión.

Los parámetros que se fijaron para poder comenzar cada prueba fue ajustar la señal sinusoidal con una amplitud de 10 [mV] a una frecuencia de barrido 100 [kHz] a 100 [mHz]. Las celdas fueron montadas con las probetas, el electrolito y los electrodos (como se muestra en la Fig.35) con un área de trabajo de 1.39 [cm<sup>2</sup>] tratando de que no se formaran burbujas en la superficie de prueba de las probetas, ya que estas interferirían con la resistencia del sistema. Finalmente se revisó que el circuito estuviera debidamente conectado para empezar la medición.



Fig. 35 celdas de corrosión montadas para la prueba IES.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

### 3.1 Rugosidad.

#### 3.1.1 Rugosidad de las probetas a proyectar.

La rugosidad del sustrato es un parámetro importante para el proceso de proyección que puede muchas veces influir en la adherencia que hay entre el sustrato y el recubrimiento, así que se tomaron algunos parámetros como la presión de aire y tiempo para el granallado de trabajos anteriores en los cuales ya se comparo la rugosidad y el tiempo de granallado.[19]

Se granallaron las probetas a proyectar durante 2 [min] manteniendo fija la distancia, tamaño de granalla y presión de aire con la intención de obtener una rugosidad en un intervalo de 8 a 10 [ $\mu\text{m}$ ][19]. Los resultados de rugosidad se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5 Valores de rugosidad de cada probeta granallada

No. Probeta	R <sub>a</sub> [ $\mu\text{m}$ ]
1	10.9
2	7.1
3	8.6
4	8.5
5	8.8
6	8.7
7	9
8	11.8
9	8.4
10	10.5

Así, las probetas que salían de intervalo fueron descartadas, para después empezar el proceso de proyección con las que si cumplían con los valores de rugosidad.

#### 3.1.2 Rugosidad del disco de desgaste.

La medición se realizó en la zona de prueba del disco de desgaste a 0.051 [m] de distancia del centro del disco, donde se apoyaron las probetas colocadas en el disco de sujeción. Los resultados de rugosidad se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Valores de rugosidad de la superficie del disco de desgaste

Medición	R <sub>a</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]
1	2.7	2.367
2	2.2	
3	2.2	

### 3.2 Dureza y Microdureza

#### 3.2.1 Dureza del disco de desgaste

Los resultados de dureza del disco de desgaste se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Valores de dureza del disco de desgaste en escala Rockwell C

Medición	Dureza HRC	Promedio Dureza HRC
1	13	14.12
2	14.6	
3	14	
4	14	
5	15	

#### 3.2.2 Microdureza de los Recubrimientos.

Se realizaron varias mediciones de dureza en el recubrimiento con sus distintos porcentajes de SiC, así como en el sustrato de acero de bajo carbono AISI 1018, en las condiciones que se describen en el capítulo anterior. El valor promedio de la dureza del sustrato fue de 231.92 HV. Como no existe un sistema de conversión estándar de las escalas Vickers a Rockwell B, nos limitamos a aproximaciones numéricas. Estas mediciones presentan valores que reflejan la calidad de la proyección, así como las propiedades del recubrimiento híbrido que se están estudiando. A continuación en las Tablas 8, 9 y 10 se presentan los resultados de dureza en los recubrimientos; así mismo se observa la sección transversal de la zona de los recubrimientos dónde se efectuó la medición (Fig. 36 a la Fig. 38).

#### Microdureza del recubrimiento 12C.

Tabla 8 Valores de dureza del 12C en escala Vickers.

Medición	Dureza HV	Promedio Dureza HV
1	249.567	295.7
2	259.277	
3	312.458	
6	340.352	
5	316.849	

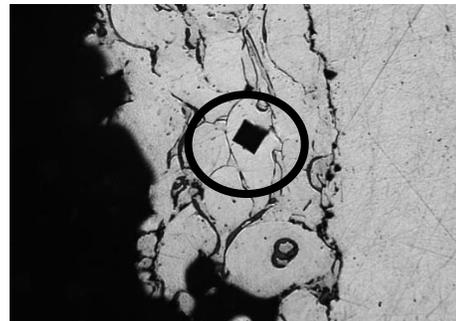


Fig. 36 Imagen de la huella del indentedor en el recubrimiento 12C.

#### Microdureza del recubrimiento 12C-SiC5%.

Tabla 9 Valores de dureza del 12C-SiC5% en escala Vickers

Medición	Dureza HV	Promedio Dureza HV
1	308.141	511.157
2	651.857	
3	458.908	
4	443.709	
5	693.153	



Fig. 37 Imagen de la huella del indentedor en el recubrimiento 12C-SiC5%

### Microdureza del recubrimiento 12C-SiC10%.

Tabla 10 Valores de dureza del 12C-SiC10% en escala Vickers

Medición	HV	Promedio HV
1	638.86	584.601
2	651.807	
3	422.106	
4	491.517	
5	651.657	
6	651.657	

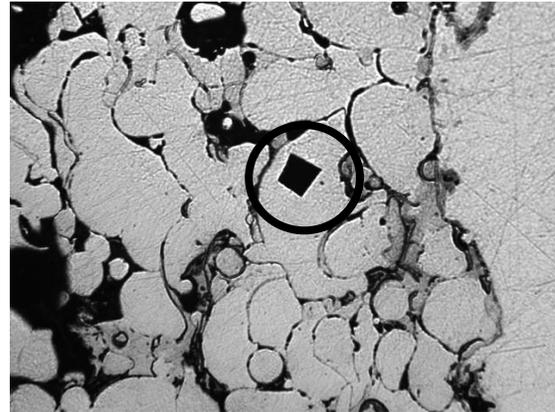


Fig. 38 Imagen de la impronta del indentador en el recubrimiento 12C-SiC10%.

Como se muestra en el gráfico de la Fig. 39 la diferencia de dureza entre los recubrimientos generados respecto al acero desnudo utilizado es bastante apreciable, resultados que se esperaban al agregar las partículas de SiC cuya dureza puede llegar a valores del orden de 2600[HV]. Así el recubrimiento con 10% de SiC resultó ser el más duro.

Esto no define enteramente el comportamiento al desgaste, ya que como se puede ver en las imágenes anteriores donde se muestra la huella del indentador, la cantidad de porosidades es significativa, esto perjudica la unión entre splats y por lo tanto también a la dureza. Al no haber una buena unión entre éstos y como la medición se realizó en una zona muy pequeña, sólo se podría estar valorando la reacción de un splat al indentador. Aun así este ensayo proporciona un indicio de la dureza del recubrimiento, al promediar varias mediciones sobre este en diferentes zonas.

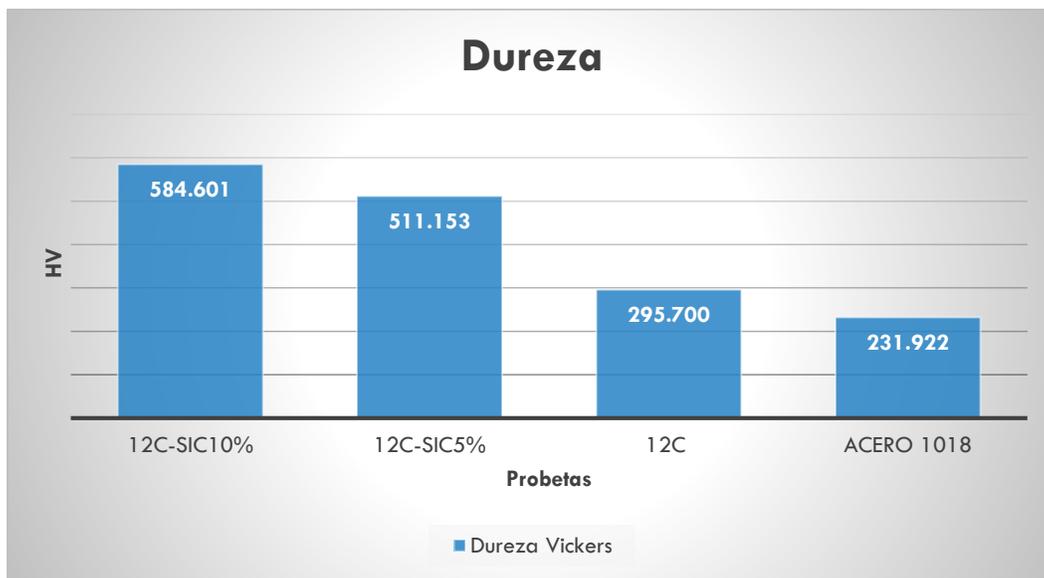


Fig. 39 Comparativo de dureza de los recubrimientos y el acero al desnudo.

### 3.3 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

Las siguientes imágenes y análisis de composición fueron obtenidos en el equipo de microscopía electrónica de barrido de la marca JEOL modelo 5900 LV del laboratorio de microscopía de la Facultad de Ingeniería, que se muestra en la Fig. 40.

Con este tipo de análisis se pudo obtener una perspectiva de la estructura de los recubrimientos al ser proyectados, porosidades en el recubrimiento, la unión que hubo entre el recubrimiento y el sustrato, el estado en que se depositaron las partículas del recubrimiento. También se pudo observar la geometría de los splats, así como la existencia de óxidos que se pudieron haber generado al proyectar, de mismo modo se encontraron rastros partículas de SiC y finalmente se pudo hacer un análisis de composición puntual del recubrimiento.

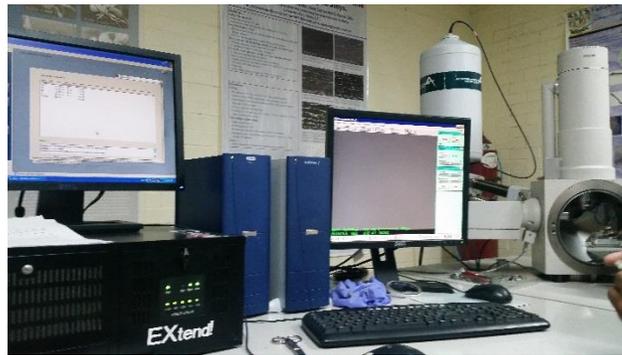


Fig. 40 Equipo de microscopia eléctrica de barrido

En las siguientes figuras de la 41 a la 48 se observan imágenes de la sección transversal de los recubrimientos 12C-SiC5% y 12C-SiC10%, así como la morfología y la estructura de los splats que constituyeron a los recubrimientos.

### Recubrimiento 12C-SiC5%.

En las Fig. 41 y Fig. 42 se puede observar que aparecen partículas oscuras embebidas entre cada splat que conforma el recubrimiento, mismas que se corrobora su composición por Espectroscopia de Energía Dispersiva, cuyos análisis se muestran más adelante, corroborando la existencia de SiC. La cantidad de partículas de SiC que se aprecian se reduce a una cuantas concordando con el porcentaje que en este recubrimiento se incorporó. Aunque no se puede suponer que las partículas se hayan dispersado de uniformemente en todo el recubrimiento.

Se aprecian algunas porosidades de menor tamaño, en general se puede observar que el contacto entre splats es uniforme de modo que el porcentaje de SiC no afecta significativamente en ese contacto. La forma que presentan algunas partículas de 12C tiende a ser semiredonda, esto quiere decir que algunas llegaron al sustrato y otras se incorporaron parcialmente fundidas o sin fundir.

El contacto del recubrimiento y el sustrato parece ser uniforme, no se observa alguna separación o espacio entre ellos, esto no asegura del todo una buena adherencia.

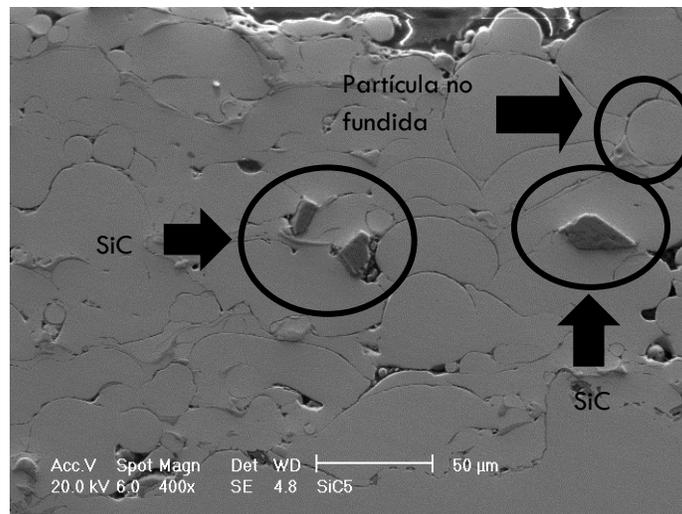


Fig. 41 Imagen a 400x con electrones secundarios mostrando la morfología de la sección transversal del recubrimiento.

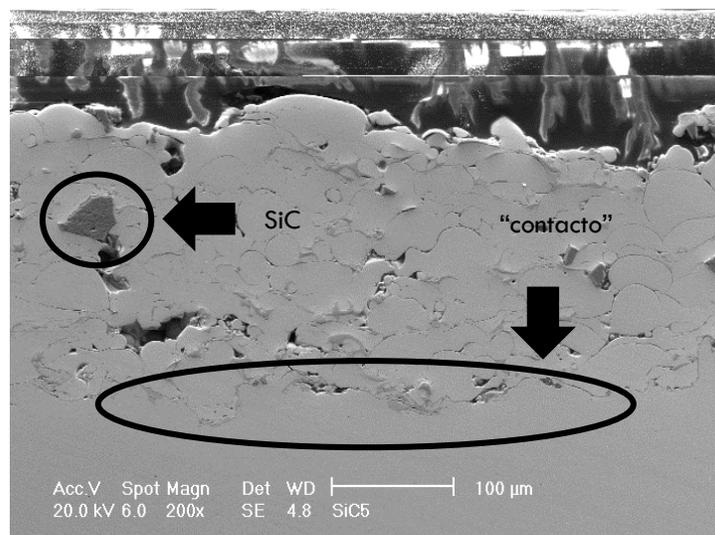


Fig. 42 Imagen a 200x con electrones secundarios mostrando algunas partículas de SiC, se nota un “contacto” entre el recubrimiento y el sustrato.

Al observar las Fig. 43 y 44 se puede notar que aparecen algunas zonas que van desde un color claro que se puede tratar del material base 12C, hasta las zonas más oscuras, que se tratan de partículas de SiC. Estas imágenes se obtuvieron mediante retrodispersados en el SEM.

Además de las zonas que ya se describieron, existen otras que aparecen entre los splats las cuales se podrían tratar de fases generadas por el cambio brusco de temperatura o bien podría tratarse de óxidos que podrían ser provocados por un exceso en la temperatura o por el exceso de oxígeno en la mezcla de gases de combustión, así como humedad del ambiente. Aunque los óxidos tomarían una forma más parecida a cúmulos de pequeños puntos que se localizarían en la intercara recubrimiento-sustrato o entre los splats.

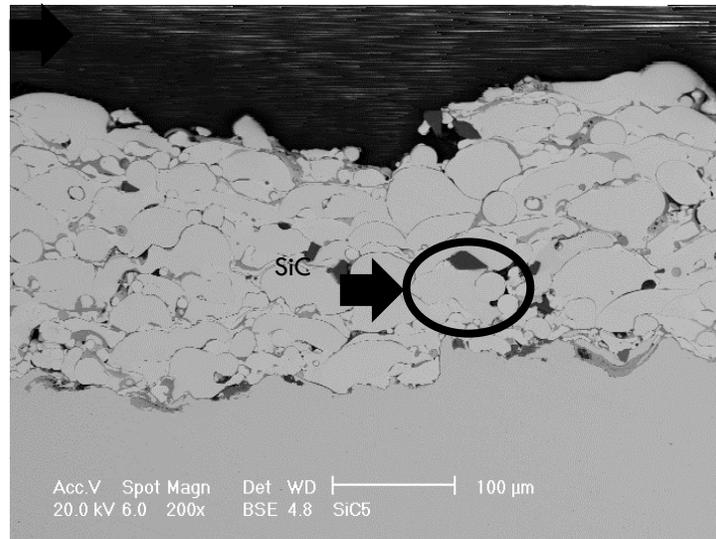


Fig. 43 Imagen a 200x con electrones retrodispersado mostrando las distintas zonas que se encuentran en el recubrimiento.

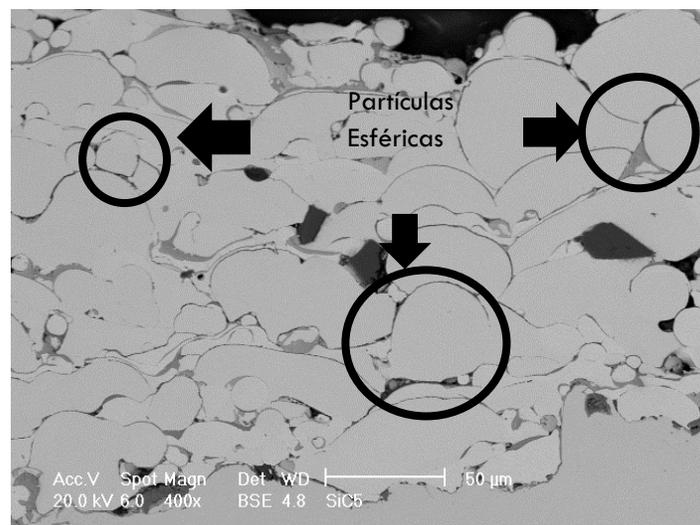


Fig. 44 Imagen a 400x con BSE muestra la forma que tienen los splats.

### Recubrimiento 12C-SiC10%

En el recubrimiento 12C-SiC10% que muestran las Fig. 45 y Fig. 46 aparecen partículas de SiC, aunque en mayor cantidad comparado con el sistema 12C-SiC5%,

Se puede observar el incremento de tamaño y cantidad de porosidades en el recubrimiento. Este factor pudiera mantener una relación directa que el incremento en el porcentaje de SiC es la principal causa, no la única pero la más importante. Aunque algunas partículas se ven incrustadas en el recubrimiento 12C, otras intervienen claramente en la unión entre splats, generando espacios entre éstos.

La unión entre el sustrato y el recubrimiento también se ve afectada por esos poros en algunas zonas, esto se puede deber a que algunas partículas del recubrimiento no llegan fundidas o parcialmente fundidas al sustrato y no se anclan de correctamente.

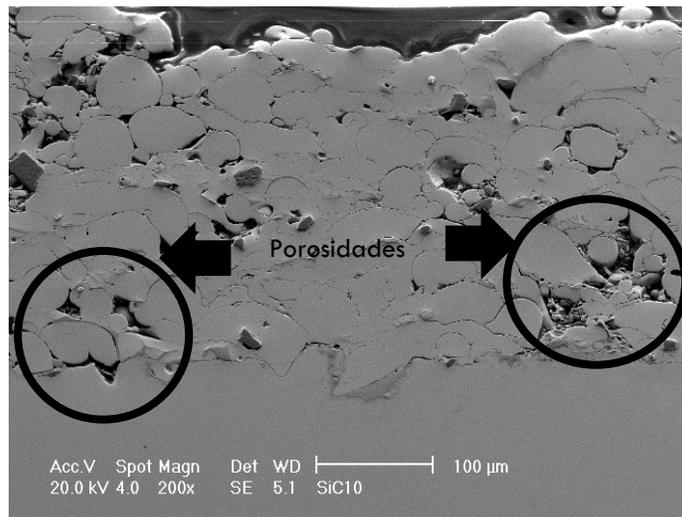


Fig. 45 Imagen a 200x con SE muestra un mayor porcentaje de zonas oscuras que podemos suponer que son porosidades.

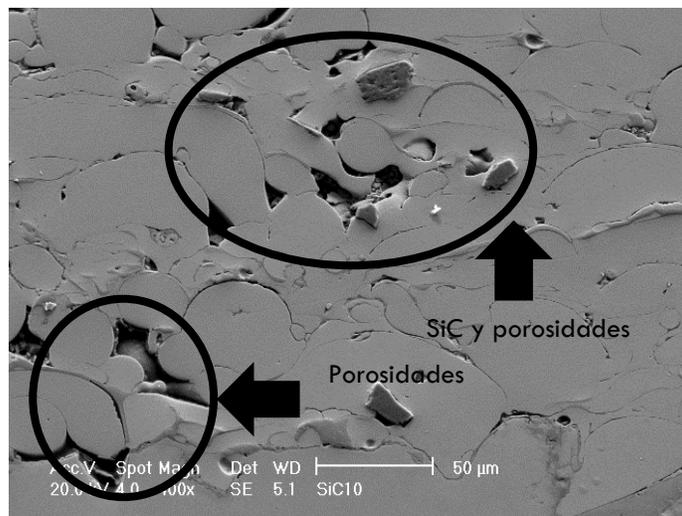


Fig. 46 Imagen a 400x con SE muestra un mayor porcentaje de partículas oscuras en un área más pequeña.

En las Fig. 47 y Fig. 48 se observa la alta concentración de zonas oscuras que se pueden tratar de partículas de SiC y porosidades. Además de otras zonas, también se pueden distinguir los splats que en su mayoría tienden a ser redondos, esto se puede atribuir a la temperatura de proyección o bien a una amplia distancia entre el sustrato y la pistola. Las partículas de SiC están rodeadas de espacios que intervienen en la unión o en la cohesión entre splats, esto podría afectar de alguna manera en la resistencia al desgaste del recubrimiento, ya que al no haber una correcta adherencia el material se podría desprender con mayor facilidad. Estas imágenes fueron generadas mediante electrones retrodispersados en el SEM.

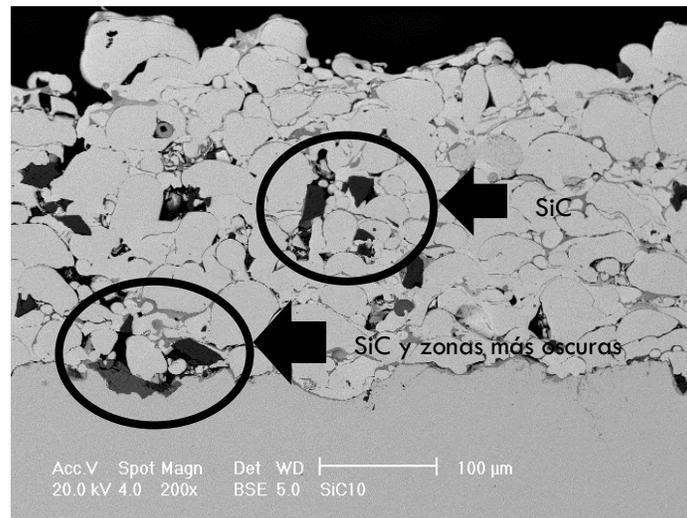


Fig. 47 Imagen a 200x con electrones retrodispersados muestra parte del sustrato y la dimensión del recubrimiento.

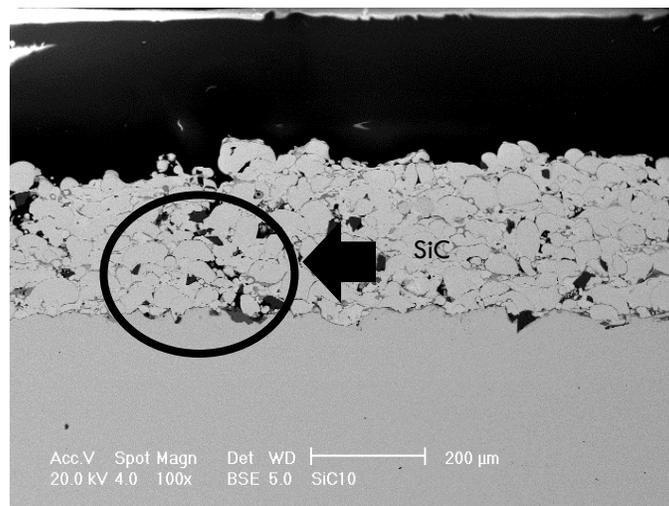


Fig. 48 Imagen a 100x con BSE muestra un mayor porcentaje de SiC en la misma área.

Con los resultados anteriores se puede concluir que el recubrimiento que tuvo mejores resultados al ser proyectado fue el 12C-SiC5%. Esto debido a que presenta menor cantidad de porosidades, una geometría menos esférica en sus splats, además de un contacto más uniforme entre el recubrimiento y el sustrato, y entre splats.

### 3.4. Análisis de composición química.

#### Recubrimiento 12C-SiC5%.

A continuación se muestra en la Fig. 49 la presencia de partículas que se puede suponer son de SiC con un tamaño de promedio menor a 10 [µm].

Se observa en la Fig. 50 el análisis de Espectroscopia de Energía Dispersiva puntual que se realizó a la partícula que se supuso era de SiC que corrobora la presencia de elementos como el carbono y el silicio que conforman al SiC, así se puede afirmar que se proyectaron correctamente los componentes del recubrimiento.

En la Tabla 11 se muestra la composición detectada en el espectro de la Fig. 50. Entre los elementos detectados se encuentran el níquel que es componente principal del 12C, aunque este análisis es puntual y sólo toma una parte pequeña para el análisis, también se podría encontrar rastros de oxígeno, que se atribuirían al exceso de oxígeno en la mezcla de gases o bien a la elevada temperatura, aunque en este caso no fue así.

Tabla 11 Elementos que fueron detectados en el espectro de la Fig. 50.

Elemento	Composición%
C	41.38
Si	58.34
Ni	0.27
Total	100.00

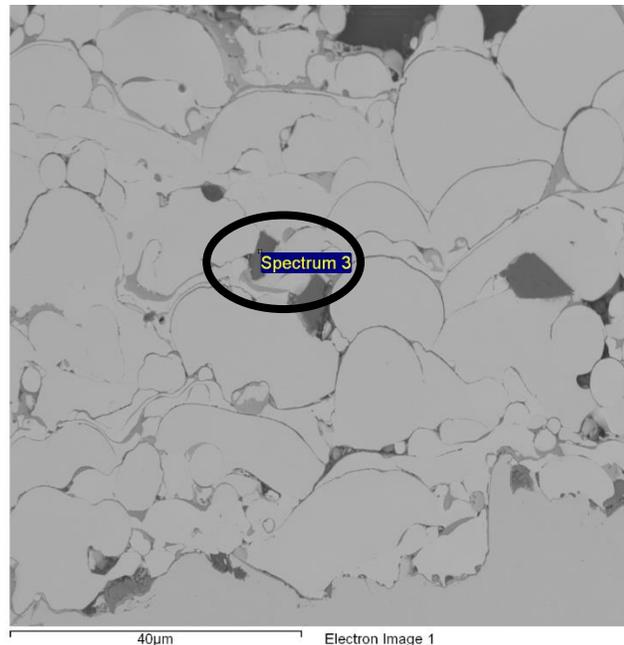


Fig. 49 Imagen del punto sobre el cual se obtuvo el espectro de la probeta de 12C-SiC5%.

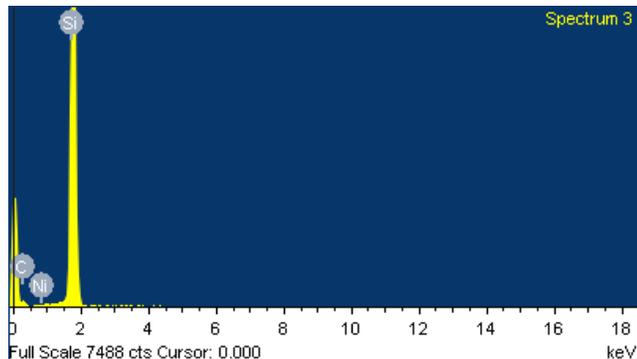


Fig. 50 Espectro de la Fig. 49.

En la Fig. 51 se muestra un mapeo de la zona transversal del recubrimiento 12C-SiC5%, en el cual se pueden distinguir la distribución de los elementos que están contenidos en el sustrato y el recubrimiento. Los elementos que se observan son: Carbono, Silicio, Hierro, Cromo y Níquel. Estos constituyen en gran parte al material 12C y al SiC. El Silicio aparece en la Fig. 51c con un color amarillo intenso en las mismas zonas puntuales donde en la Fig. 51a se observan partículas oscuras que se suponía se encontraban partículas de SiC. De esta manera se puede asegurar que se trata de partículas de SiC y que no se degradaron al ser depositadas junto con el 12C, ya que aparecen concentraciones bien localizadas en puntos y no distribuidas en toda la zona en concentraciones menores.

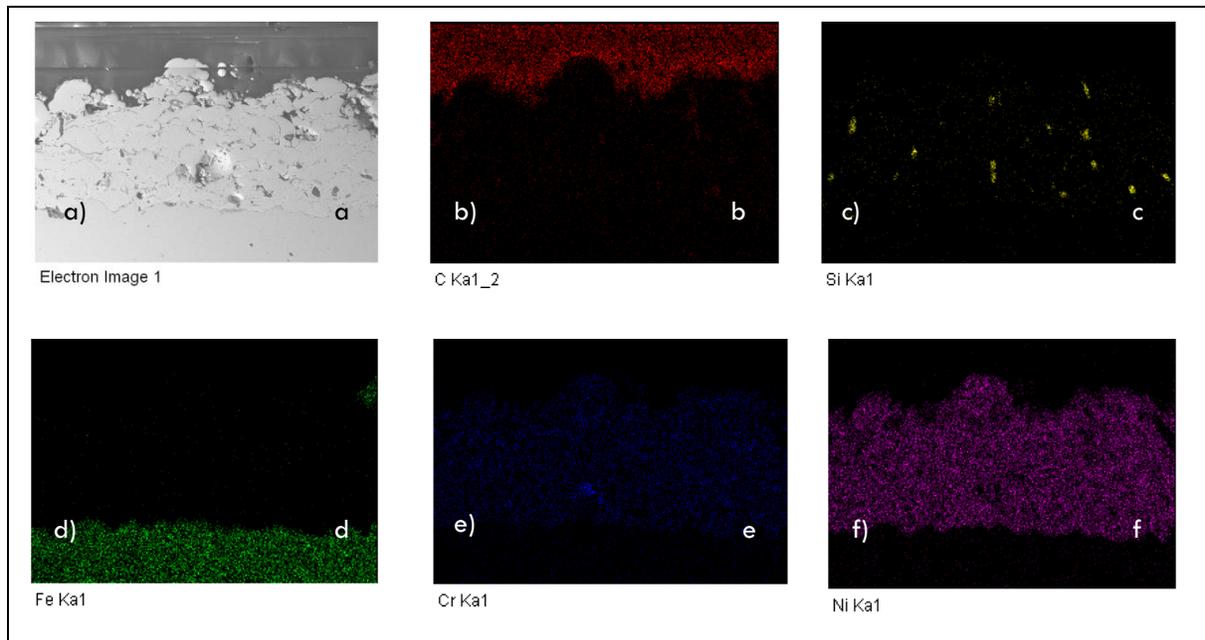


Fig. 51 a) Imagen de la Zona del mapeo químico, b) Carbono, c) Silicio, d) Hierro, e) Cromo, f) Níquel.

## Recubrimiento 12C-SiC10%

En la Fig. 52 se puede observar la presencia de partículas de SiC en el 12C-SiC10% confirmada por el espectro que se tomó sobre la zona que se muestra en la Fig. 53, que detectó elementos que conforman al SiC. Destaca también la presencia de una cantidad mayor de partículas de SiC, concordando con el porcentaje que se duplicó en este recubrimiento. La forma de los splats tiene una forma un tanto circular, esto se atribuye a la distancia de proyección, que influye en la solidificación de las partículas de polvo 12C.

La Tabla 13 muestra el porcentaje de la composición en el que se encuentran los elementos que fueron detectados por el análisis de composición, elementos principales de los que están compuestos los materiales que se utilizaron en la proyección.

Tabla 13 Elementos que fueron detectados en el espectro de la Fig. 53.

Elemento	Composición%
C	40.21
Si	59.58
Ni	0.21
Total	100.00

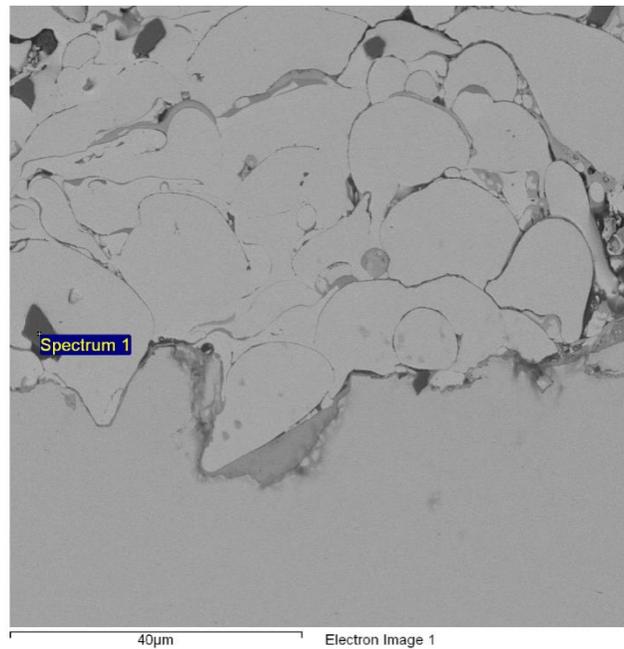


Fig. 52 Imagen del punto sobre el cual se obtuvo el espectro de la probeta 12C-SiC10%.

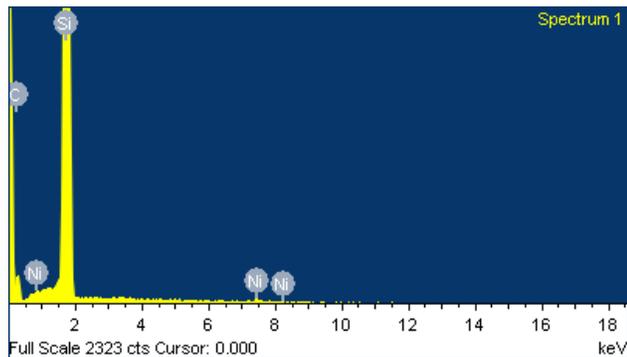


Fig. 53 Espectro de la Fig. 52.

En la Fig. 54 se muestra el apilamiento de splats y la forma que tienen, en este caso se realizó el análisis de composición sobre uno de ellos, encontrándose elementos como: el níquel, el cromo, el hierro, el carbono y el silicio, componentes principales del 12C, además de algunos óxidos, todos estos detectados en el espectro que muestra la Fig. 55.

En la Tabla 14 se observa de igual forma los porcentajes de composición elemental en el punto señalado por la Fig. 54.

Tabla 14 Elementos que fueron detectados en el espectro de la Fig. 55.

Elemento	Composición%
C	21.59
Si	7.48
Cr	9.29
Fe	1.88
Ni	59.76
Total	100.00

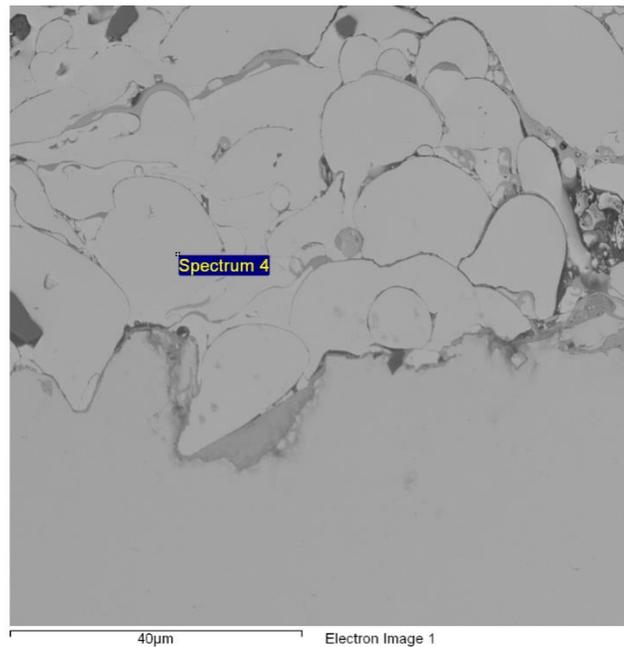


Fig. 54 Imagen de otro punto sobre la probeta de 12C-SiC10% en el cual se obtuvo el espectro.

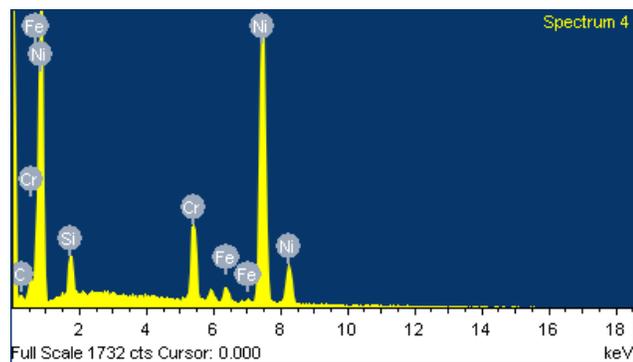


Fig. 55 Espectro del punto indicado en la Fig. 54.

Se encontró una estructura típica del proceso de proyección térmica en los splats, así como elementos que constituyen a las partículas de SiC, así como los elementos principales del 12C-SiC 10%.

En la Fig. 56 se muestra un mapeo químico de la zona transversal del recubrimiento 12C-SiC10%. En ella se puede distinguir una concentración definida en puntos del Silicio en la Fig. 56c de igual forma que en la Fig. 51. También se destaca una cantidad más alta de partículas de SiC comparada con la que muestra el recubrimiento 12C-SiC5%. De esta manera es notable el incremento de partículas de SiC en el recubrimiento 12C-SiC10%, concordando con el porcentaje que se depositó en cada uno.

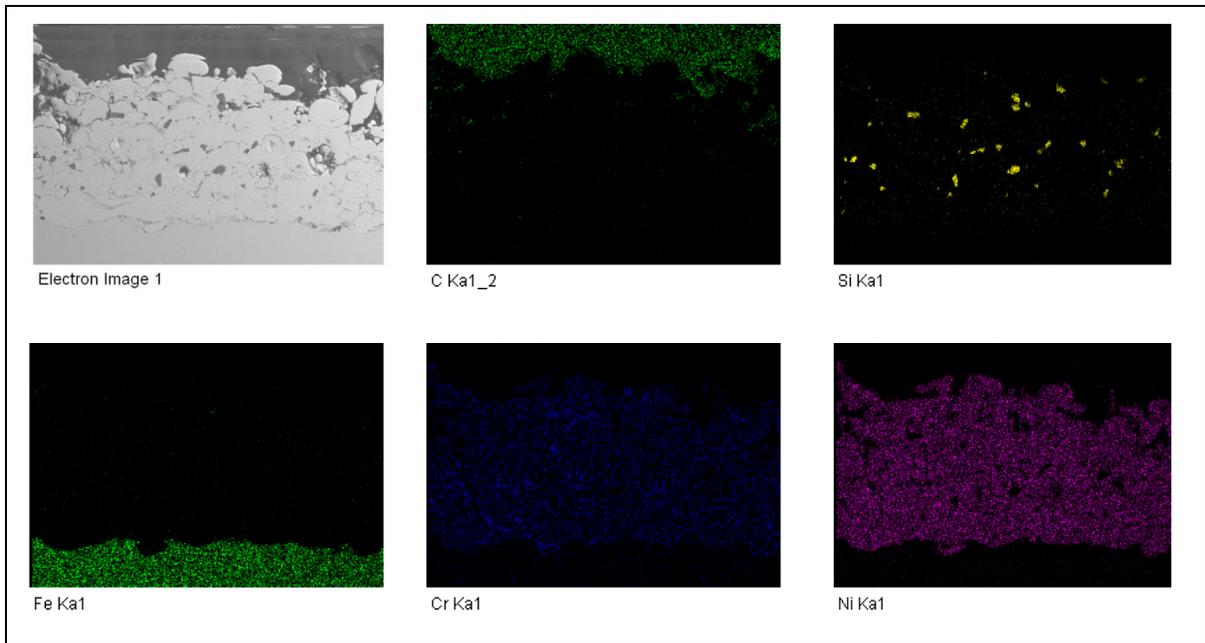


Fig. 56 a) Imagen de la Zona del mapeo químico, b) Carbono, c) Silicio, d) Hierro, e) Cromo, f) Níquel.

### 3.5. DESGASTE (Pin on Disk)

Habiendo sometido a los distintos recubrimientos al ensayo pin-on disk para describir su comportamiento a desgaste, se limpió y se pesó cada probeta, esto para saber la cantidad de masa perdida en la prueba y obtener un coeficiente de desgaste que ayudará a este análisis. Además se tomaron evidencias graficas de cada probeta para hacer un análisis más detallado del mecanismo de desgaste que se presentó en cada recubrimiento.

Basándose en las propiedades del polvo 12C que hacen de este material una alternativa contra el desgaste, se puede tener una perspectiva del cambio de su comportamiento cuando se aplica por medio del proceso de proyección térmica con un material cerámico como el SiC, siendo el SiC un material generalmente usado en aplicaciones dónde el desgaste es uno de los principales fenómenos que intervienen. De esta manera se puede esperar un cambio del desempeño de estos recubrimientos al desgaste. No obstante es muy difícil asegurar que solo con la inclusión de estas partículas se promueva un incremento de su resistencia al desgaste, ya que los parámetros que intervienen en un sistema sometido a desgaste es multifactorial.

Para empezar el análisis de desgaste, se muestra la Fig. 57 en la cual se observa el Acero 1018 donde se llega a identificar el mecanismo de desgaste que interviene. Se pueden apreciar las marcas de desgaste provocadas en el ensayo. Estas marcas forman claramente pistas o surcos, además se aprecia la remoción de partículas y una descamación general en la superficie, de este modo se puede asegurar que el comportamiento a desgaste que se aprecia es de carácter abrasivo, mostrado a menudo en el contacto entre dos metales, dónde el más duro penetra al otro provocando en el más blando un transporte de material y por tanto una deformación plástica.

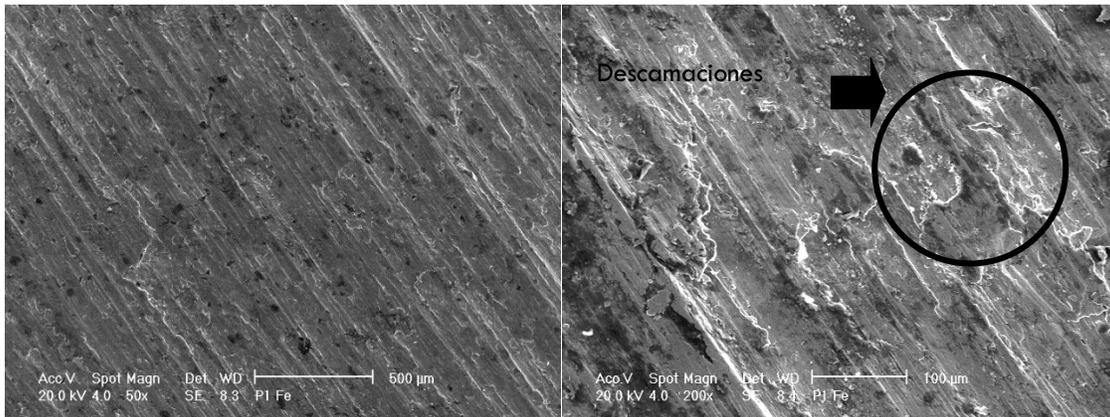


Fig. 57 Marcas de desgaste en el acero 1018 sin recubrimiento: 50x y 200x.

En la Fig. 58 se puede observar con más detalle el desgaste que sufrió la probeta de acero 1018. Se aprecia una remoción y transporte de material, así como una descamación muy pronunciada. Además se pueden notar algunas partículas aisladas, producto del desprendimiento de material. Lo anterior corrobora un desgaste acentuado, mismo que se cuantificará más adelante mediante el cálculo del coeficiente de desgaste.

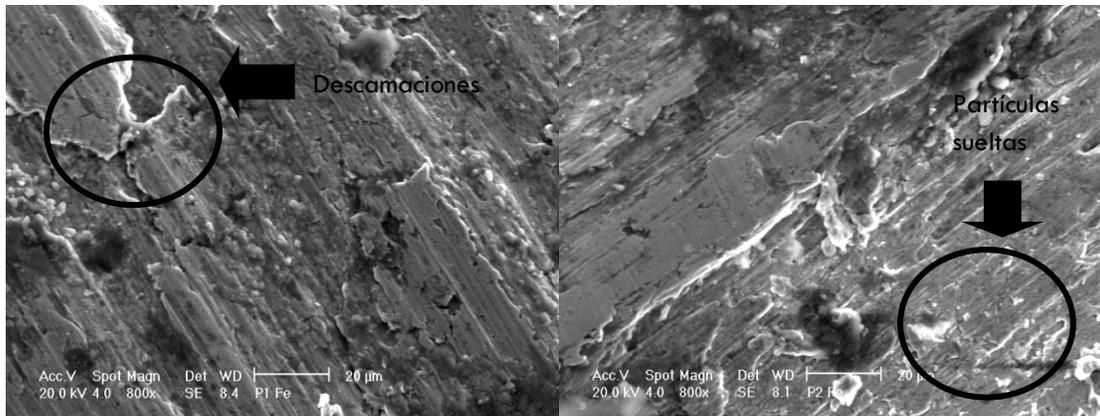


Fig. 58 Detalle de desgaste en el Acero 1018 sin recubrimiento: 800x.

A continuación en la Fig. 59 se pueden observar las imágenes de la superficie del recubrimiento 12C y las respectivas marcas de desgaste provocados en el ensayo. Se aprecia un desgaste menos uniforme y parte de la morfología de la superficie del recubrimiento que muestra partículas semiesféricas.

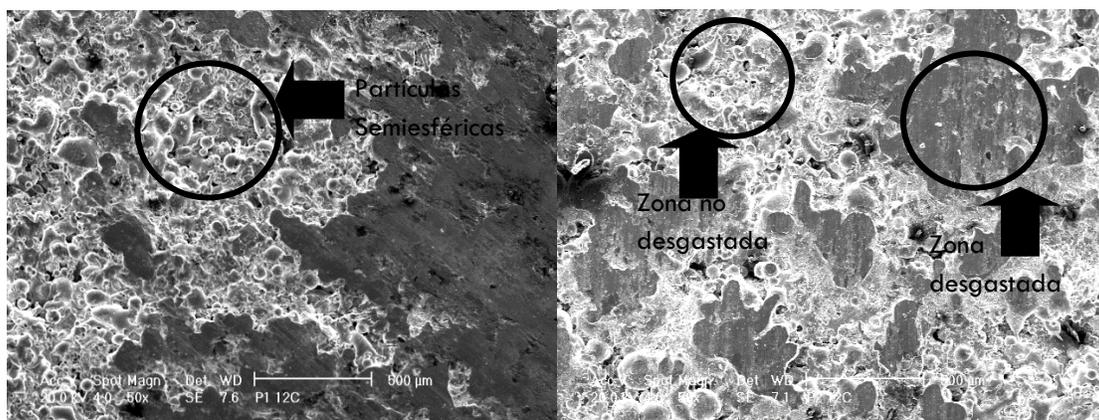


Fig. 59 Marcas de desgaste en el recubrimiento 12C: 50x.

El desgaste no uniforme de la superficie del recubrimiento puede ser atribuido a la diferencia de alturas producidas por el apilamiento de los splats que van construyendo el recubrimiento, dicho fenómeno es característico del tipo de proceso de proyección térmica que se utilizó, por lo tanto se generan picos de concentración de material que no permiten que haya un área de contacto uniforme entre las superficies en este caso del disco de desgaste y el recubrimiento. Aun así el mecanismo de desgaste que sigue destacando es el de abrasión, mostrando efectos de la deformación plástica.

El recubrimiento 12C-SiC5% que se puede observar en la Fig. 60 con un comportamiento parecido al anterior descrito, aunque con un desgaste heterogéneo y con evidencia de partículas, que se puede suponer que es material desprendido del recubrimiento o bien, del SiC agregado a este recubrimiento.

De igual manera presenta una diferencia de alturas en la superficie, aunque menos pronunciada, que provoca zonas con un desgaste mayor aparente.

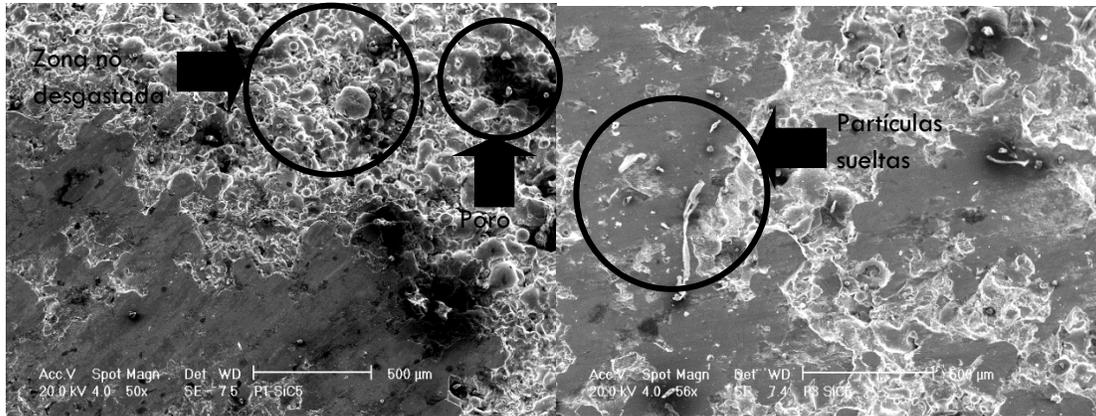


Fig. 60 Marcas de desgaste en el recubrimiento 12C-SiC 5%: 50x.

También se puede notar una aglomeración de partículas semiesféricas de 12C, esto podría contribuir con un aumento del desgaste en este recubrimiento, ya que la forma que poseen estas partículas minimiza el área de contacto entre ellas dando como consecuencia una disminución en la cohesión del recubrimiento. Inclusive se pueden distinguir algunos poros que podrían estar actuando como un factor para el incremento del desgaste, como ya se había mencionado anteriormente. De este modo la remoción de partículas que conforman el recubrimiento aumentará debió al contacto con otro material con movimiento relativo, en este caso, el disco de prueba.

Con la inclusión de un material como el SiC, que como ya se sabe, tiene propiedades que lo hacen resistente al desgaste, se podría suponer un decremento en el desgaste del recubrimiento obtenido. Aún así, en las imágenes, las partículas de SiC no contribuyen a disminuir el desgaste presentado, incluso lo incrementa; ello puede suponerse debido a un leve desgaste producido por la interacción de dos y hasta tres cuerpos.

En la Fig. 61 se observa una amplia vista del recubrimiento 12C-SiC 10%, dónde se puede apreciar su comportamiento al desgaste, destacando la aparición de partículas de SiC en mayor proporción.

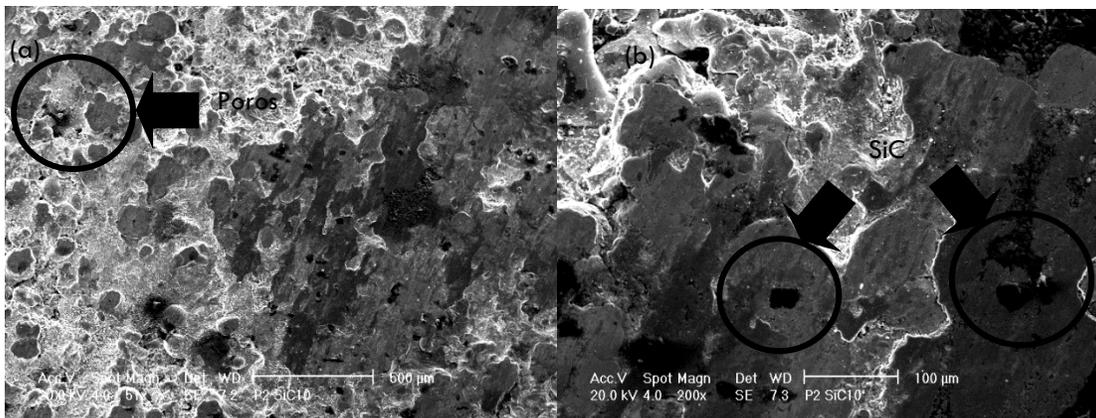


Fig. 61 Marcas de desgaste en el recubrimiento 12C-SiC 10%: (a) 50x y (b) 200x.

Como se puede observar en las zonas de desgaste se presenta remoción de material, marcas orientadas en el sentido del que fluyó el material, deformación plástica en general. Aunque a simple vista las marcas son suaves se aprecia que hubo una pérdida de material. Los rastros de partículas inmersas en los splats suponen presencia de SiC. En este caso el desgaste se aprecia más, aunque sigue siendo no uniforme en toda la superficie.

Para complementar las evidencias gráficas también se pueden analizar resultados cuantitativos del ensayo. En la Tabla 15 se puede observar la pérdida de masa que se presentó durante el ensayo de desgaste. Estos datos se relacionan directamente con un coeficiente de desgaste.

Tabla 15 pérdida de masa en el ensayo Pin-on-Disk.

Probeta	Masa Inicial Pi [g]	Masa Final Pf [g]	Pi-Pf [g]	Promedio Pi-Pf [g]
Acero 1018 1	8.9873	8.7927	0.19453	0.21355
Acero 1018 2	8.9501	8.7179	0.23217	
12C 1	9.1798	9.1782	0.0016	0.00185
12C 2	9.143	9.1409	0.0021	
12C-SiC5% 1	9.195	9.1912	0.0038	0.00365
12C-SiC5% 2	9.2285	9.225	0.0035	
12C-SiC10% 1	9.1886	9.174	0.0146	0.0166
12C-SiC10% 2	9.2936	9.275	0.0186	

En los resultados que se obtuvieron de los recubrimientos de 12C-SiC a partir del ensayo, se presentaron valores muy particulares, que hacen notorio en que tan favorable es el hecho de utilizar partículas de SiC con el polvo 12C para generar un recubrimiento que reaccione de manera eficiente contra el desgaste. El comportamiento al desgaste del sustrato sin recubrimiento demostró una pérdida de masa mayor a la de los demás recubrimientos. No obstante el comportamiento de los recubrimientos 12C-SiC mostró una pérdida de masa mayor a la esperada. Esto se podrá analizar mejor con el coeficiente de desgaste que se muestra a continuación en la Tabla 16.

La pérdida de masa es directamente proporcional al volumen de desgaste que se obtuvo a partir de la diferencia de masa y la densidad del recubrimiento. En la Tabla 16 se puede observar que el recubrimiento que tuvo menor pérdida de volumen fue el que no posee partículas de SiC, el recubrimiento con más porcentaje de SiC fue el que presentó más pérdida de volumen obteniendo un coeficiente de desgaste más alto.

Tabla 16 Volumen y Coeficiente de desgaste K.

Probeta	Volumen de desgaste [cm <sup>3</sup> ]	Coeficiente de desgaste K [cm <sup>2</sup> /Kg]
12C-SiC10%	0.00276	3.259E-06
12C-SiC5%	0.000607	7.041E-07
12C	0.000303	3.432E-07
Acero 1018	0.0271	2.677E-05

Estos resultados se pueden atribuir en parte al nivel de porosidad y a la forma que poseen las partículas de 12C depositadas en el sustrato, que demuestra cada recubrimiento y que se puede observar en las imágenes del SEM analizadas en el punto 3.3, así como en las imágenes anteriores que describen el mecanismo de desgaste, siendo el recubrimiento con 10% de SiC el que mostro más porosidades producidas en el proceso de proyección, además de la forma semicircular de las partículas que conforman el recubrimiento. De cualquier forma existen otras causas externas al material del que está constituido el recubrimiento, que intervienen con el comportamiento al desgaste de cada recubrimiento, aunque el parámetro responsable directamente de estos cambios de comportamiento al desgaste es el porcentaje de SiC, ya que fue el único que se ajustó en cada una de las probetas. Adicionalmente se puede identificar la relación

existente entre los parámetros de proyección empleados con la incorporación de partículas semifundidas y no fundidas de los recubrimientos que producen una disminución de la cohesión entre splats, misma que conlleva a una descamación más acentuada y, por ende, aun mayor desgaste. También es importante el mojamiento que hay de las partículas de SiC por el material base 12C.

El nivel de cohesión entre splats juega un papel importante en el proceso de desgaste. Al haber porosidades entre cada splat y si las partículas presentan una forma circular, se disminuye el área de contacto, por lo tanto también disminuye la fuerza con la que están unidas las capas que se depositan. Una evidencia de la presencia de este fenómeno se presenta en las imágenes captadas en el SEM mostradas en el punto 3.3.

Al presentarse partículas heterogéneas, ya sean producto de los splats sin un grado de fusión o partículas propias del SiC, se piensa que interfieren disminuyendo la cohesión del recubrimiento. De este modo, si en dichas partículas de SiC no existe un buen mojamiento por el recubrimiento, se generan poros o espacios entre la partícula y el material base 12C, como consecuencia en el transcurso del ensayo, los splats que conforman al recubrimiento, son retirados sin mayor oposición de manera parcial o total por acción de la fricción entre el plato de desgaste y la probeta, ocasionando pérdida de material, o incluso, contribuyen a acelerar el proceso de abrasión presentado.

El gráfico de la Fig. 62 muestra como entre mayor es el porcentaje de partículas de SiC del recubrimiento, el coeficiente de desgaste también incrementa notablemente, ya que se obtiene un coeficiente de  $3.432E-07$  [ $\text{cm}^2/\text{kg}$ ] en el recubrimiento 12C y el 12C-SiC5% con valor de  $7.040E-07$  [ $\text{cm}^2/\text{kg}$ ], aumentando casi al doble en una diferencia de 5% en contenido de SiC. Por otro lado si se compara el valor del 12C con el 12C-SiC10% que posee un coeficiente de  $3.259E-06$  [ $\text{cm}^2/\text{kg}$ ] se incrementa alrededor de diez veces en una diferencia de 10% en contenido de partículas de SiC.

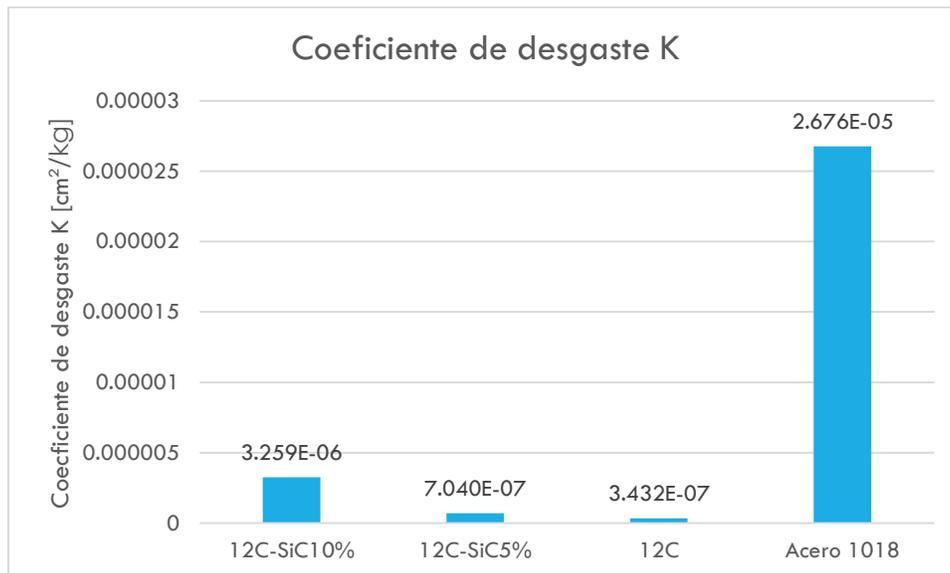


Fig. 62 Grafico de Coeficiente de desgaste K.

Si bien estos valores podrían variar debido a la inclusión de SiC, otros parámetros tendrían que tomarse en cuenta, ya que al considerarse las propiedades del SiC, las cuales le hacen un material apropiado para aplicaciones en las que intervienen aspectos como la resistencia al desgaste. De

cualquier manera el recubrimiento reacciona de manera particular al proceso de desgaste, aunque no se esperaba la disminución de la resistencia a desgaste, se puede decir que la inclusión de partículas de SiC es la principal causa pero no la única de esa disminución. La pérdida de material es mayor y por tanto el valor del coeficiente de desgaste, esto podría decir que trabajar con SiC no es del todo recomendable, pero atribuir esto solo a las partículas de SiC no sería muy conveniente, ya que estos resultados pueden variar por muchos parámetros, no solo por el tipo de material que se usa para conformar el recubrimiento.

Comparando el desgaste que sufren los recubrimientos utilizados para este ensayo no se tienen resultados bastante alentadores para su utilización, aunque al modificar algunas condiciones y parámetros tanto de proyección como de composición y tal vez implementando algún método para mejorar el mojado del SiC por el 12C, se podría concebir un mejor recubrimiento que promueva la resistencia al desgaste.

### 3.6. Espectroscopía de Impedancia electroquímica (EIS)

Las respuestas para los distintos recubrimientos analizados, fueron obtenidas por medio de los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Estas respuestas son plasmadas en dos tipos de diagramas, estos son los de Bode y Nyquist.

Con las siguientes figuras se pueden analizar los diagramas que describen el comportamiento que tienen los recubrimientos ante el agente corrosivo sulfato de sodio, durante 432 horas. En los diagramas se utilizaron dos valores de frecuencia para hacer el análisis, un valor de frecuencia alto que describe el comportamiento únicamente del recubrimiento y un valor de frecuencia bajo, el cual dirá cómo se comporta la interfaz del recubrimiento con el sustrato en conjunto. La Fig. 63 muestra el diagrama de Nyquist para las cuatro muestras que son: Acero 1018, 12C, 12C-SiC5% y 12C-SiC10%, todas a la hora 0, a mitad del ensayo a la hora 216 y al final del ensayo a la hora 432.

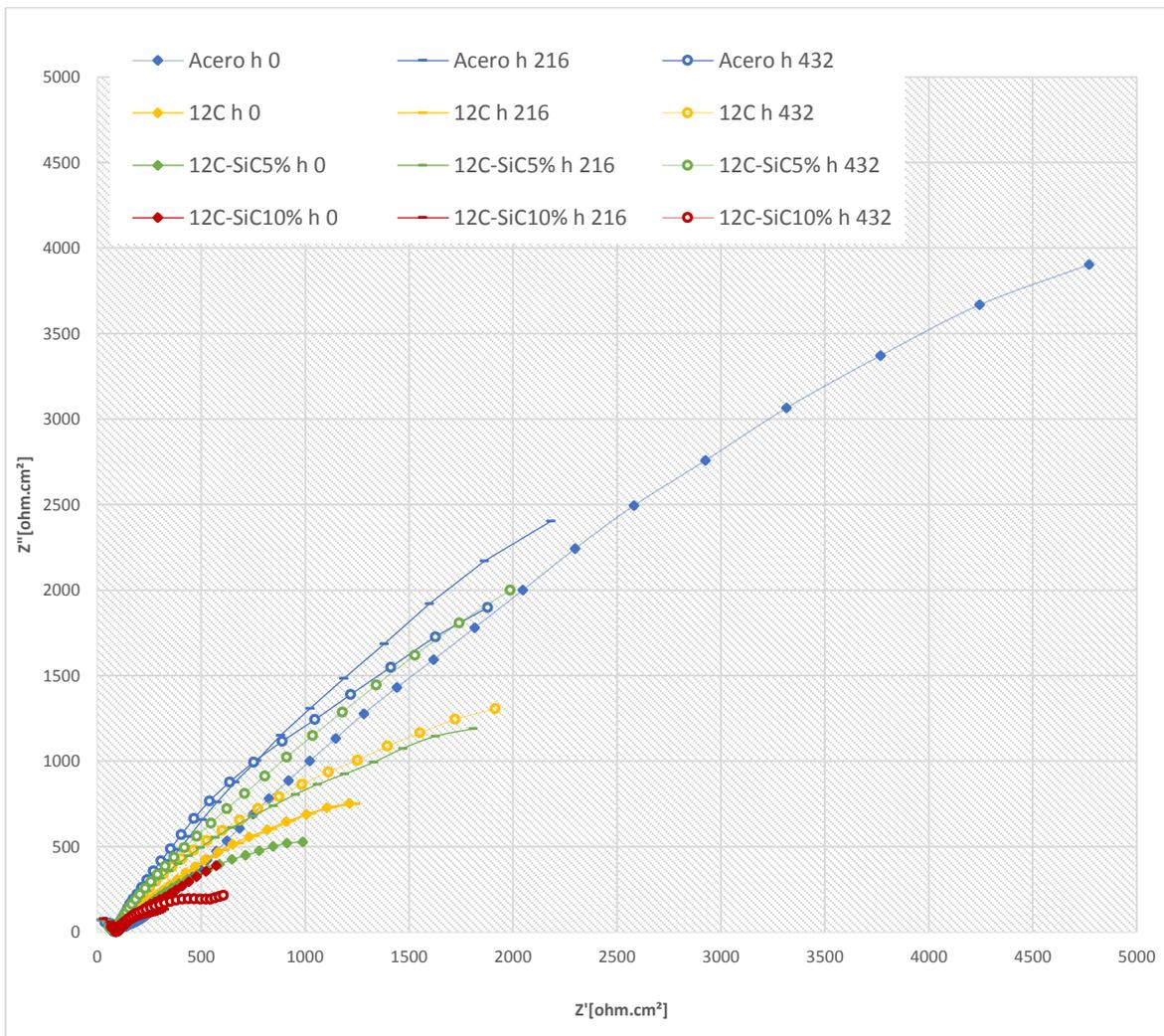


Fig. 63 Diagrama Nyquist hora 0, 216 y 432 del ensayo.

En este diagrama se puede observar el comportamiento que muestra cada recubrimiento además del sustrato a un medio corrosivo. Este comportamiento se puede apreciar claramente en la inclinación que posee cada curva. Es importante recordar que estas curvas siempre tienden a formar un semicírculo, si se extrapolan esos semicírculos hasta cortar el eje de las abscisas se

ubica un valor de impedancia que es equivalente a la resistencia a la polarización. Esta resistencia a la polarización puede ser representada como la resistencia que opone el sistema al paso de carga eléctrica, así entre menos carga atraviere, habrá menos procesos electroquímicos que afecten a nuestro sistema [17].

Con lo descrito en el párrafo anterior se puede tener un panorama del desempeño de los recubrimientos a un medio corrosivo. De esta manera se aprecia que los recubrimientos presentan valores que se encuentran por debajo de los que muestra el sustrato sin recubrimiento, aunque con una tendencia a incrementar a lo largo del ensayo. Destacando en su comportamiento se encuentra el recubrimiento 12C-SiC5% y el 12C, que además de poseer valores de impedancia mayores al final del ensayo, comparado con los demás, demuestra una tendencia a incrementar su desempeño a la corrosión en todo el ensayo.

A pesar de que el Acero 1018 que actúa como el sustrato, posee valores mayores de impedancia al inicio de la prueba, su tendencia a 216 horas del ensayo es a aumentar sus propiedades resistivas, esto se ve reflejado en sus valores de impedancia en esta hora. Aunque al final del ensayo en la hora 432, los valores de impedancia tienen una disminución que observamos al ver un semicírculo menos amplio que los anteriores.

Para analizar con más detalle en el diagrama Nyquist de la Fig. 64 se muestra que la tendencia de los recubrimientos 12C y 12C-SiC5% es a elevar sus propiedades resistivas, por otro lado el Acero 1018 parte de un valor de resistencia mayor a uno menor, como ya se mencionó en el párrafo anterior. Aunque no fue el único en el que se observó este comportamiento, ya que el recubrimiento 12C-SiC10% disminuyó su resistencia a valores cercanos a 600[ohm.cm<sup>2</sup>].

Las propiedades resistivas del 12C-SiC10% fueron las más bajas. A pesar de su mayor contenido de partículas de SiC los valores de resistencia en este caso fueron disminuyendo, al principio se pensó mejorarían el desempeño a corrosión de este recubrimiento como pasó con el 12C-SiC5%. De esta manera se puede atribuir este comportamiento al incremento de porosidades a causa de la presencia de una concentración mayor de SiC, que queda evidenciado en las imágenes obtenidas en el SEM, que pudo haber permitido el paso del electrolito al sustrato, o bien la presencia del SiC generó una aceleración en el proceso corrosivo de este recubrimiento, aumentado los efectos del posible par galvánico entre el recubrimiento y el sustrato. Así un efecto más evidente del proceso de corrosión se vio descrito en el recubrimiento.

El diagrama de Nyquist con un mayor detalle a altas frecuencias demuestra que la tendencia del Acero 1018 fue a disminuir su resistencia a corrosión y no aumentarla como se mostraba anteriormente, sus valores al final del ensayo solo fueron alcanzados por el recubrimiento 12C-SiC5%. De esta manera se puede decir que los valores de resistencia de los demás recubrimientos quedaron por debajo del rendimiento del Acero 1018 y del 12C-SiC5%. Entonces para aumentar el desempeño a corrosión de estos recubrimientos hay que tomar en cuenta la importancia de una concentración de menos del 10% de partículas de SiC en el 12C. Ya que aunque el 12C ya tiene un comportamiento con tendencia a aumentar sus propiedades resistivas, el SiC le da las propiedades para alcanzar un valor de impedancia mayor comparado con el Acero 1018.

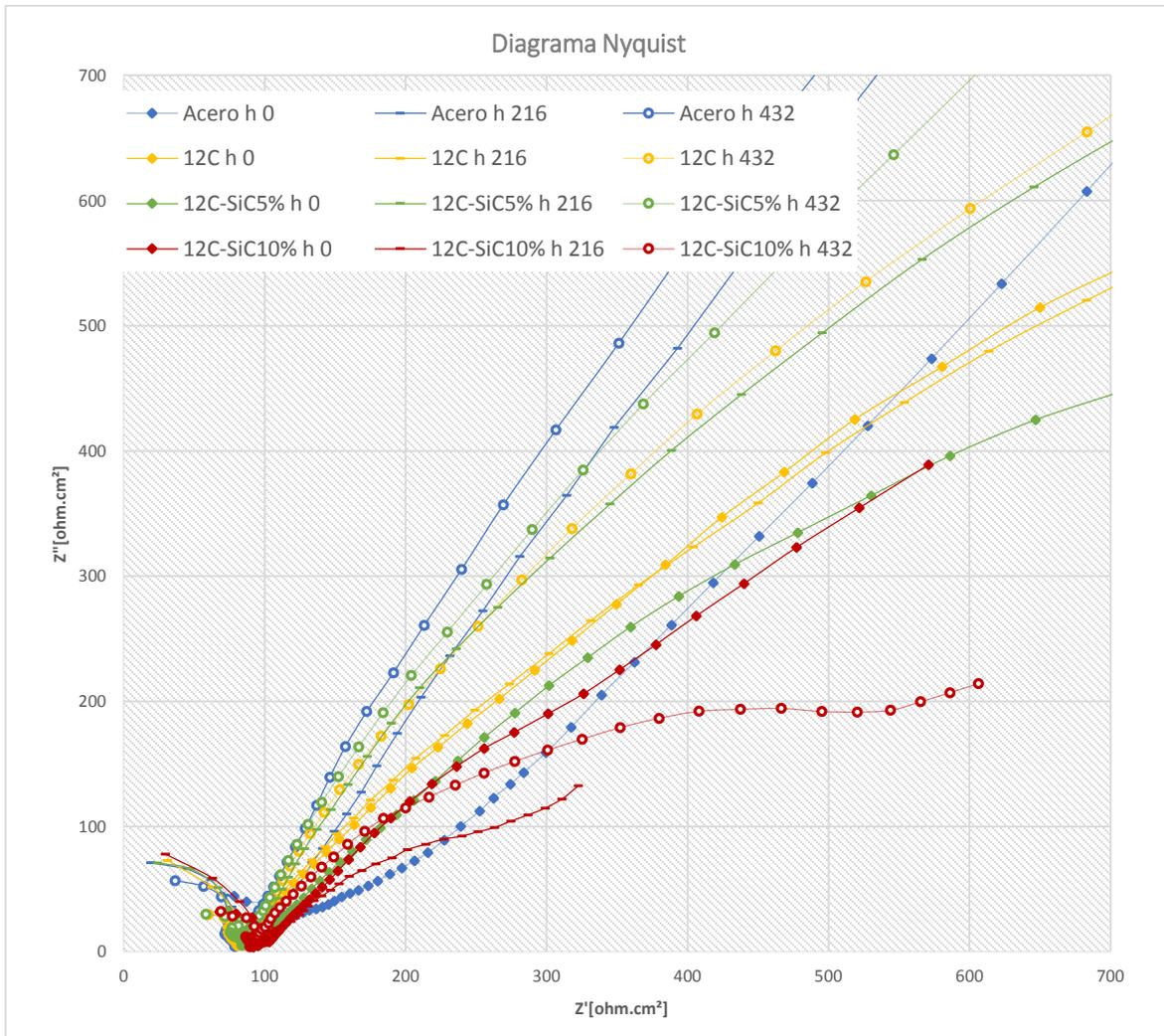


Fig. 64 Diagrama Nyquist hora 0, 216 y 432 del ensayo, detalle del recubrimiento 12C-SiC10%.

El deterioro de las propiedades resistivas del 12C-SiC10% está directamente relacionado con la incorporación de SiC o bien con el incremento de porosidades producidas por el exceso de partículas de éste, además de otros factores, dando paso a procesos corrosivos en el interior del propio recubrimiento causados por el electrolito afectando directamente al sustrato. Este suceso se puede corroborar con las imágenes generadas por el SEM que muestran un mayor porcentaje de porosidades que conducirían al electrolito al sustrato dando origen a un par galvánico.

Por último en el diagrama de Bode-Impedancia se puede observar en la Fig. 65 una diferencia más notable en los comportamientos a altas y bajas frecuencias, en los cuales destaca por un aumento en impedancia del recubrimiento 12C-SiC5%. Como ya se ha explicado con anterioridad la parte a bajas frecuencias se atribuye a un comportamiento del sistema global sustrato-intercara-recubrimiento.

Aunque se puede observar una tendencia de recuperación en la capacidad que poseen para resistir el proceso de corrosión de algunos recubrimientos como el 12C y 12C-SiC5% en el

diagrama de Bode-impedancia mostrado en la Fig. 65, también se nota que los valores de impedancia, al inicio de la prueba, disminuyen comparado con el sustrato, esto quiere decir que las secuencias descritas por los recubrimientos parten de un valor más bajo que el que describe el sustrato. En la secuencia del recubrimiento 12C-SiC10% se aprecia que hay un decremento de valores de impedancia a 216 horas y que después se recuperan al final del ensayo aunque sin presentar valores parecidos a los demás recubrimientos.

Este comportamiento puede ser atribuido en primera estancia al material base 12C que según parece posee una resistencia menor a la polarización que provoca una transferencia de carga más alta que la del Acero 1018. Aun así el 12C y el 12C-Si5% se mantienen estables en las siguientes horas del ensayo teniendo un acenso en sus propiedades resistivas, que puede tener origen debido al mejor contacto entre splats así inhibiendo en paso del electrolito y que actúan como una protección a los fenómenos de corrosión.

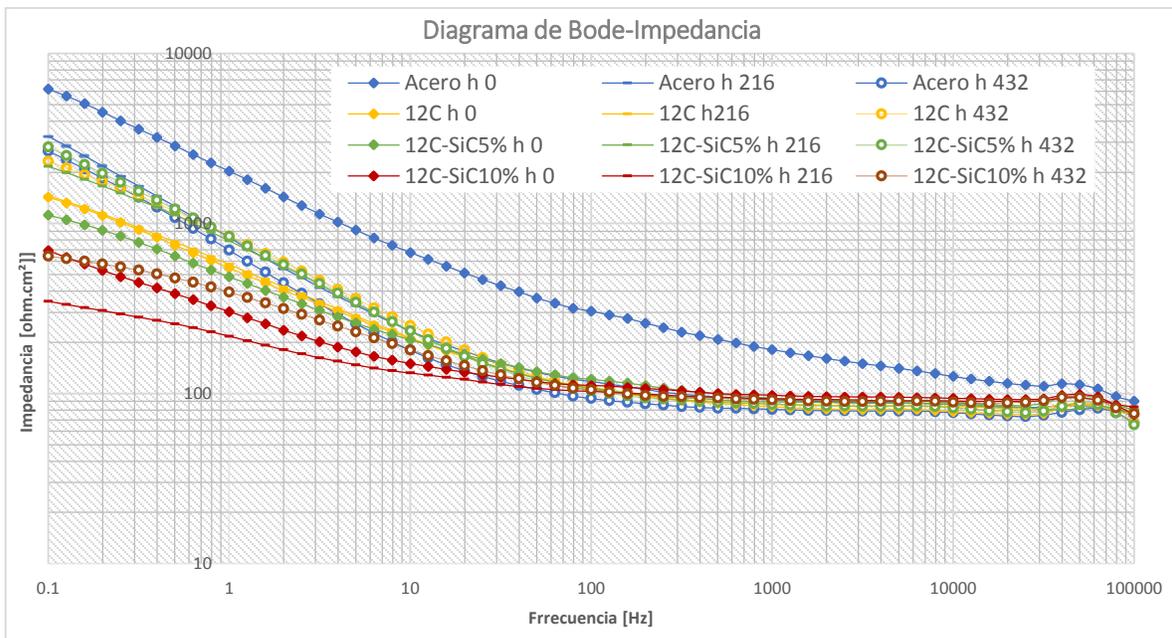


Fig. 65 Diagrama Bode-Impedancia hora 0, hora 216 y hora 432 del ensayo.

Por otro lado se observa a altas frecuencias que se forma una horizontal que siguen los recubrimientos y el sustrato, y que se muestra con más detalle en la Fig. 66. En esta constante de tiempo destaca el recubrimiento 12C-SiC%10 que reacciona con mayores valores de impedancia que los demás recubrimientos al ambiente corrosivo. Como se puede apreciar el comportamiento a altas frecuencias es distinto que el que se demuestra a bajas frecuencia. Ya que, aunque el 12C-SiC5% destaca por sus valores en bajas frecuencias, a altas frecuencias tiene una serie de valores de impedancia menores a los del recubrimiento 12C-SiC10%. De mismo modo el recubrimiento 12C se coloca por debajo de los anteriores. Cabe destacar que no se observa un aumento en la magnitud de la impedancia, a lo largo del ensayo, de los recubrimientos 12C-SiC5% y 12C-SiC10%, solo se distingue una disminución en la resistencia a la corrosión.

Este comportamiento a altas frecuencias del 12C-SiC10% se puede atribuir a que el recubrimiento no desarrollo su papel como protección, si no de modo contrario. El recubrimiento no detuvo el paso de carga eléctrica hacia el sustrato promoviendo un proceso de corrosión que afecto al

sistema global. Con esto se puede deducir que pudo haber existido un efecto parecido al que desarrolla un ánodo de sacrificio, teniendo un proceso de corrosión más importante el sustrato que el recubrimiento. Lo anterior dicho se puede notar en la magnitud de valores de impedancia que se presentaron a baja y alta frecuencia, donde en bajas frecuencias el sistema global del 12C-SiC10% está por debajo de los valores de impedancia de los demás recubrimientos. Y en altas frecuencias se pueden ver valores que destacan ante los demás recubrimientos.

Por otro lado el recubrimiento 12C-SiC5% presenta valores de impedancia menores que el 12C-SiC10%, debiéndose a un proceso de corrosión con un efecto más importante. Proceso que no afectó al sistema global en gran medida, limitándose en parte al recubrimiento y no al sustrato, como se pudo detectar en el 12C-10%.

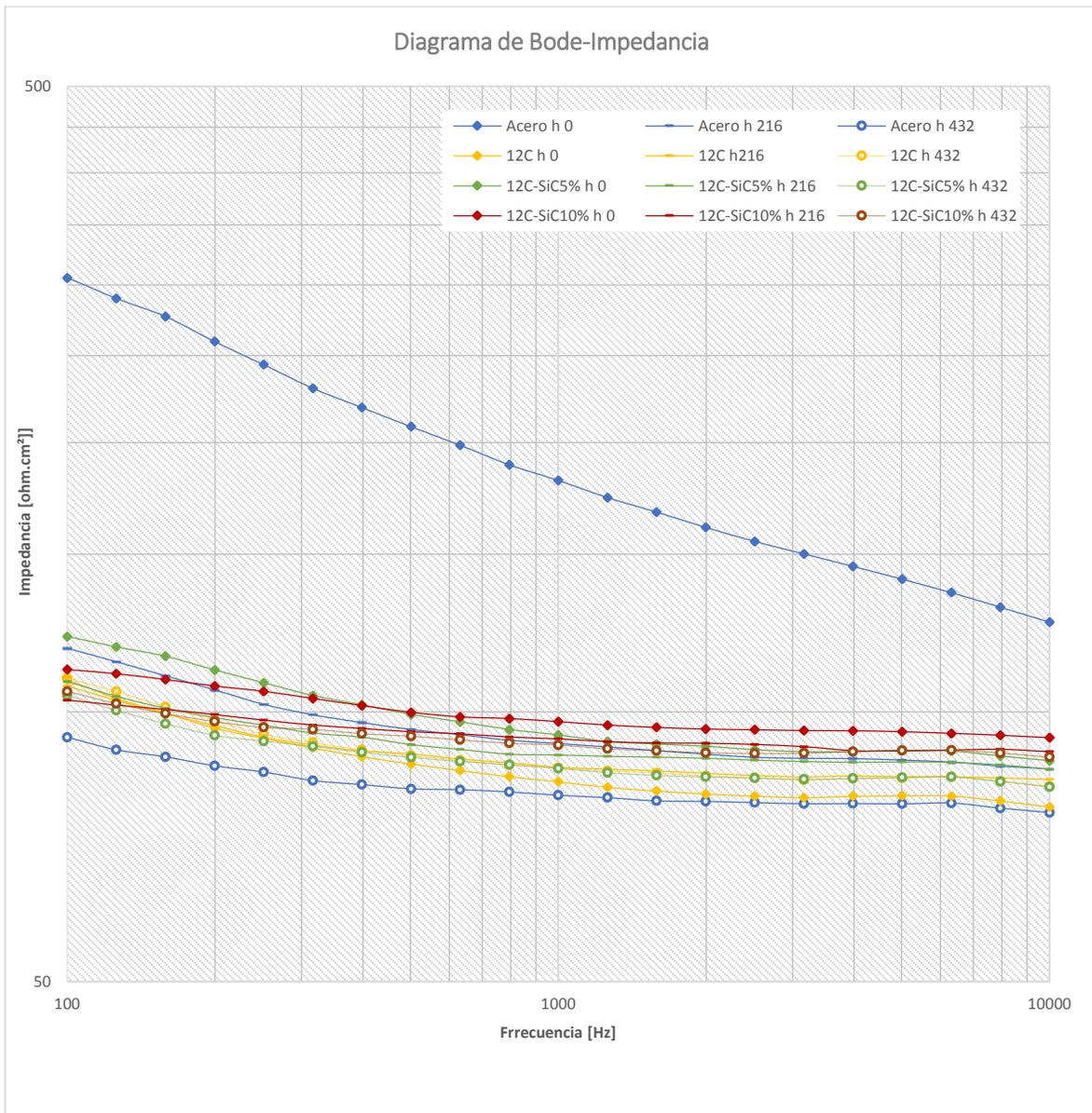


Fig. 66 Diagrama Bode-Impedancia hora 0, hora 216 y hora 432 del ensayo detalle a altas frecuencias.

Las diferencia entre comportamientos a altas frecuencias es estrecha pero denota un comportamiento estable para los recubrimientos base 12C, que funciona mejor en conjunto con el Acero 1018 y aumenta sus propiedades con la incorporación de un porcentaje de las partículas de SiC. No obstante se sacrifica un nivel resistivo para mantener una estabilidad. Estabilidad que contiene una tendencia a aumentar las propiedades de resistencia a la corrosión y que se pueden denotar mejor en un sistema global sustrato-intercara-recubrimiento.

A pesar del aumento de las propiedades que presentaron algunos recubrimientos como el 12C-SiC5%, no se puede asegurar que estos resultados sean alentadores, ya que, la resistencia a la corrosión que mostro el Acero 1018 a lo largo del ensayo fue mayor a la de los recubrimientos y solo fue alcanzada por ellos al final de la prueba.

## Conclusiones.

Al analizar los resultados del proceso de proyección térmica, así como el comportamiento a desgaste y corrosión del recubrimiento obtenido con la aplicación de la mezcla de (Ni-Cr-Fe-B-Si-C)-SiC, podemos obtener mucha información que nos lleva a generar varias conclusiones, esto relacionando los distintos parámetros que utilizamos en los ensayos con los resultados que obtuvimos.

- La dureza en los recubrimientos 12C (Ni-Cr-Fe-B-Si-C) proyectados con diferentes porcentajes de SiC presentó valores más elevados comparados con el recubrimiento sin SiC. Con la incorporación de un porcentaje cada vez mayor de SiC se vio un aumento en la dureza de los recubrimientos 12C, como se mostró en las mediciones de microdureza. Aunque como ya se había notado, esto no depende completamente de la cantidad de SiC. Aun así el porcentaje de partículas es un factor importante para el incremento de dureza del recubrimiento.
- En las imágenes del estudio de microscopia electrónica SEM se mostró la estructura de los recubrimientos. Con splats con formas esféricas, que demuestran una falta de temperatura o una distancia amplia al momento del proceso de proyección. También el incremento de porosidades en los recubrimientos. Siendo la incorporación de SiC uno de los factores más importantes de esta generación de porosidades. El análisis de composición EDX confirmó la existencia de partículas de SiC y de material 12C en los recubrimientos generados por medio del proceso. Confirmando que se proyectaron las partículas de SiC, así como el material base 12C.
- Para el estudio del mecanismo de desgaste que se presentó en los recubrimientos a lo largo del ensayo, se pudo observar que prevaleció un comportamiento de carácter abrasivo que es característico del contacto entre dos metales en un ambiente sin lubricación, en donde uno tiene una dureza mayor que el otro y que el más blando presenta una pérdida de material, traducido en generación de surcos y escamas así como transporte y remoción de material. Los recubrimientos presentaron un desgaste no homogéneo que se atribuye directamente a la superficie desnivelada que poseen. Esto debido a la diferencia de deposición que causa una aglomeración de material en algunas zonas, esto típico del proceso de proyección térmica usado.
- El ensayo tribológico confirma el incremento de la resistencia a desgaste de los recubrimientos con material base 12C, al disminuir el coeficiente de desgaste que presenta cada uno. Por otro lado aunque la aportación de SiC al 12C también presentó un incremento en las propiedades que favorecen su resistencia al desgaste de los recubrimientos, no alcanzan los valores del comportamiento que desempeña el 12C sin partículas de SiC. Esta diferencia en el desempeño al desgaste de los recubrimientos 12C-SiC y 12C es muy estrecha pero debe de tenerse en cuenta al medir la eficiencia de cada recubrimiento, además de la aplicación para la cual sean recurridos.
- Las pruebas electroquímicas mostraron que el recubrimiento 12C-SiC5% y 12C presentaron un incremento en sus propiedades de resistencia a la corrosión, comparado con los demás recubrimientos estudiados. Por otro lado el recubrimiento 12C-SiC10% fue el que consiguió un menor rango de valores de resistencia a corrosión. Este comportamiento demuestra la

importancia que tiene la concentración de partículas de SiC, que debe ajustarse al ser aplicada con un material como el 12C. Otro aspecto de gran importancia es la tendencia que tienen los recubrimientos generados, ya que describen un comportamiento que comienza desde valores por debajo de los que presenta el Acero 1018, y que aumentan con el paso del tiempo hasta llegar igualarlos al final del ensayo. Esto confirma que se sacrifica un grado de resistencia a la corrosión por un comportamiento que tiende a aumentar en menor medida las propiedades de resistencia a corrosión de los recubrimientos estudiados.

## TRABAJOS A FUTURO

- Este estudio arroja resultados alentadores en el uso de los materiales 12C y SiC proyectados simultáneamente. Se consigue un aumento en la dureza del recubrimiento, así como un desempeño al desgaste más elevado comparado con el que muestra el sustrato, y que podría ser ajustando algunos parámetros del proceso. Este podría ser la distancia de proyección que se conseguiría eliminar porosidades, asegurando una deposición de partículas que en su mayoría estén fundidas, así un apilamiento de splats con una forma más parecida a laminillas, que en consecuencia aumentaría el área de contacto entre sí, mejorando la cohesión del recubrimiento en general. Esto haría necesaria un aporte más elevado de energía para la deformación y remoción de material. De esta manera el rendimiento al desgaste podría ser beneficiado.
- Otro factor que podría beneficiar al desempeño al desgaste del recubrimiento sería el aumento del mojamamiento o mojabilidad del SiC por material base 12C. Con algunos métodos, como la utilización de películas como el Sol-Gel. Esto podría promover una mejor incorporación de las partículas de SiC a los splats, aumentando el contacto entre estos, mejorando la eficiencia del recubrimiento al desgaste.
- Además de mejorar el desempeño al desgaste del recubrimiento con el ajuste de estos parámetros, también se podría conseguir un beneficio en el comportamiento que tendría a un medio corrosivo. Aumentando la protección del recubrimiento contra los procesos corrosivos, bloqueando el paso del electrolito debido a una menor presencia de porosidades, disminuyendo la transferencia de carga a través del material provocado por una película de Sol-Gel incluida en las partículas de SiC.

## Bibliografía

- [1] ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering, C.M. Cotell, J.A. Sprague, and F.A. Smidt, Jr., editors, p 497-509
- [2] Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear, P. Fauchais and A. Vardelle SPCTS, UMR 7315, University of Limoges, France.
- [3] An Introduction to Thermal Spray, Sulzer Metco.
- [4] Handbook of Thermal Spray Technology, J.R. Davis, Davis & Associates, 2004 ASM International.
- [5] Composite materials handbook, Volume 4. Metal matrix composites, Department of defense handbook
- [6] An Introduction to Composite Materials D. Hull, T. W. Clyne
- [7] Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con nanofibras de carbono. Nuria Merino del Amo
- [8] An Introduction to Metal Matrix Composites T. W. Clyne, P. J. Withers
- [9] Fundamentos de ciencia de los materiales, <http://descom.jmc.utfsm.cl/proi/materiales/corrosion/Fundamentos%20de%20Corrosion.pdf>
- [10] Espectroscopia de Impedancia Electroquímica En Corrosión, Juan Mendoza Flores, Ruben Duran Romero, Joan Genescá Llongueras, Facultad de Química, UNAM.
- [11] Tesis Doctoral, "Obtención de capas de nitruro de titanio mediante tratamiento termoquímico en titanio y Ti6Al4V y caracterización de sus propiedades para aplicaciones biomédicas", Daniel Rodríguez Rius
- [12] Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, Kenneth Holmberg, Allan Matthews, 2009 Elsevier.
- [13] Recubrimientos de materiales compuestos metal-cerámico obtenidos por nuevas tecnologías de proyección térmica: Proyección fría (CGS) y su resistencia al desgaste, J. M. Miguel, S. Vizcaíno, S. Dosta, N. Cinca, C. Lorenzana y J. M. Guilemany, Revista de Metalurgia, 47 (5) Septiembre-Octubre.
- [14] Recubrimiento dual por proyección térmica por flama de polvos y alambre simultáneamente, Jorge Alejandro Romero López, UNAM, Fac. Ingeniería, México, Distrito Federal, 2013
- [15] Material Product Data Sheet, Nickel and Cobalt Based Self-Fluxing Alloy Powders, Oerlikon Metco.
- [16] Norma ASTM G 99. *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.*
- [17] Tesis "Caracterización mecánica y electroquímica de acero inox 316 tratado mediante implantación iónica", Rafael Medina García, CENISA, UNAM.
- [18] Comportamiento a desgaste de recubrimientos de material compuesto de matriz de aluminio fabricados por proyección térmica. M. Campo, M. D. Escalera, B. Torres, J. Rams y A. Ureña. Revista de metalurgia.
- [19] Tesis "Caracterización del desgaste y resistencia a la corrosión de un recubrimiento de acero inoxidable proyectado térmicamente", José Castillo Valdés Aarón Tiznado Urbina. Cd. Universitaria, Octubre 2015.