



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Evaluación de un electrodo para  
electroerosión proyectado  
térmicamente con una aleación  
Cu-Al**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

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

Víctor Manuel Luna Monroy

**DIRECTOR DE TESIS**

M.C. Raúl Gilberto Valdez Navarro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

## AGRADECIMIENTOS

*Gracias a Dios por permitirme vivir, ser quien soy, darme salud para cumplir mis metas y nunca abandonarme en este camino.*

*A mis abuelos que fueron y son el pilar más fuerte del que me pude sostener.*

*A mi madre, y todas mis tías que son mis segundas mamás y como tal nunca dejaron de ver por mí durante la realización de esta meta, que estuvieron tomando mi mano para darme fuerza y son parte importante de mi vida y de este logro.*

*A mis tíos, que fueron un gran ejemplo para mí, mostrándome el camino y enseñándome que si se puede enfrentar cualquier adversidad.*

*A mis dos hermanas, a mis primos y primas que siempre esperaron pacientemente, apoyando y presionando para que yo pudiera llegar hasta este punto.*

*A mi novia, que siempre me apoyó dándome su cariño, comprensión y siempre estuvo a mi lado haciéndome feliz.*

*A todos mis amigos, que siempre me motivaron a seguir adelante, me ayudaron durante todo mi periodo de aprendizaje y siempre tuvieron un consejo para mí.*

*A mi director de Tesis M.C. Raúl Gilberto Valdez Navarro por su tiempo, por su apoyo y por permitirme trabajar en la realización de esta tesis.*

*Al Dr. Miguel Ángel Hernández Gallegos, Dra. Alba Covelo Villar, Dr. Arturo Barba Pingarrón y M. C. Jesús Rafael González Parra, por su apoyo en el Instituto de Ingeniería, por permitirme usar el equipo de laboratorio así como su ayuda y asesoría oportuna.*

*Al Dr. Gabriel Ángel Lara Rodríguez por su apoyo en el Instituto de Investigaciones en Materiales por su apoyo y por permitirme utilizar el equipo de laboratorio.*

*Al M. C. Jorge Luis Romero Hernández, M.I. Efraín Ramos Trejo y al Ing. Israel Garduño García en la Facultad de Ingeniería por su apoyo y su ayuda para el manejo y uso del equipo de laboratorio.*

# ÍNDICE

OBJETIVO.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
INTRODUCCIÓN. ....	2
1. CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....	3
1.1. PROYECCIÓN TÉRMICA.....	3
1.1.1. Aspectos básicos de la proyección térmica .....	3
1.1.2. Estructura de un Recubrimiento por Proyección Térmica (RPT). ....	4
1.1.3. Diferentes procesos de proyección térmica. ....	6
1.1.3.1. Proceso de proyección térmica con polvo. ....	6
1.1.3.2. Proceso de arco spray.....	7
1.1.3.3. Proceso de plasma spray .....	8
1.1.3.4. Proceso con flama de alta velocidad HVOF .....	9
1.1.3.5. Proceso de proyección térmica con alambre.....	10
1.1.4. La Proyección Térmica vs otros procesos de recubrimiento.....	11
1.1.5. Ventajas de la proyección térmica .....	13
1.2. ELECTROEROSIÓN.....	14
1.2.1. Aspectos generales del proceso de Electroerosión. ....	14
1.2.2. Clasificación del proceso de Electroerosión .....	15
1.2.3. Descripción del proceso de Electroerosión por penetración .....	16

2. CAPÍTULO 2. EXPERIMENTACIÓN .....	18
2.1. PROYECCIÓN TÉRMICA.....	18
2.1.1. Manufactura de electrodos. ....	18
2.1.2. Preparación de electrodo a recubrir .....	19
2.1.2.1. Limpieza .....	19
2.1.2.2. Rugosidad. ....	19
2.1.3. Generación de recubrimiento.....	23
2.1.3.1. Parámetros del proceso.....	24
2.1.3.1.1 Distancia de proyección. ....	24
2.1.3.1.2 Ángulo de proyección.....	25
2.1.3.1.3 Consumo de alambre. ....	26
2.1.3.1.4 Consumo de gases. ....	26
2.1.3.1.5 Temperatura de precalentamiento. ....	29
2.2. MAQUINADO DE RECUBRIMIENTO.....	30
2.3. MAQUINADO DE BASE PARA ELECTRODOS.....	33
2.4. MANUFACTURA DE ELECTRODOS DE COBRE ELECTROLÍTICO.....	34
2.5. PRUEBA DE ADHERENCIA.....	35
2.6. PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD.....	37
2.7. PRUEBA DE ELECTROEROSIÓN.....	39
2.8. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM).....	42

3. CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	43
3.1. RESULTADOS RUGOSIDAD.....	43
3.2. RESULTADOS PRUEBAS DE ADHERENCIA.....	44
3.3. RESULTADOS PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD.....	47
3.3.1. Cálculos .....	48
3.4. RESULTADOS PRUEBAS DE ELECTROEROSIÓN.....	51
3.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	61
4. CONCLUSIONES.....	70
5. ANEXO 1 PARÁMETROS PARA EL EQUIPO DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR CONSUMO DE ALAMBRE .....	70
6. ANEXO 2 PARÁMETROS PARA EL EQUIPO DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR CONSUMO DE ALAMBRE PLASMA POWDERS & SYSTEMS .....	73
7. BIBLIOGRAFÍA .....	74

## OBJETIVO

1. Depositar, por la vía de la proyección térmica, un recubrimiento Cobre-Aluminio sobre electrodos de acero de bajo carbono para el proceso de electroerosión por penetración.
2. Evaluar el desempeño del electrodo obtenido, analizando su conductividad eléctrica, desgaste por electroerosión, tiempo de maquinado y acabado superficial.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de electroerosión por penetración se ocupan electrodos comúnmente elaborados con materiales como grafito, cobre electrolítico y cobre al tungsteno. En estudios anteriores [1], se analiza la factibilidad de emplear en algunas aplicaciones electrodos elaborados con aceros de bajo carbono recubiertos mediante el proceso de proyección térmica por combustión con polvo de cobre electrolítico obteniendo algunas mejoras en cuanto a costos, buena durabilidad y propiedades eléctricas competitivas respecto al electrodo de cobre sólido.

Al proponer un electrodo proyectado térmicamente mediante otro proceso y otro material (proyección térmica por combustión de alambre utilizando alambre de aleación cobre-aluminio), se pretende ampliar el conocimiento que ayude a comprender las propiedades, ventajas, desventajas y áreas de oportunidad de dicho material para el proceso de electroerosión por penetración.

## INTRODUCCIÓN.

Históricamente, la proyección térmica se practicaba únicamente en el servicio especializado. Los avances en los procesos de proyección térmica y en los materiales, unidos a los avances en el control de procesos, la instrumentación y la automatización, han llevado a la proyección térmica a aplicaciones de producción de gran volumen. Los procesos de proyección térmica son comunes en la fabricación de motores de aeronaves, automóviles, electrónica de comunicaciones, productos agrícolas, equipos de procesamiento de alimentos y otros productos de alto volumen. Las aplicaciones avanzadas siguen surgiendo a medida que se desarrollan avances en las técnicas de proceso, materiales y controles [2].

La finalidad del presente trabajo es evaluar un electrodo maquinado en acero de bajo carbono recubierto con una aleación Cu-Al mediante proyección térmica por llama con alimentación de alambre para su aplicación en el proceso de electroerosión por penetración.

En el proceso de generación del recubrimiento por proyección térmica los parámetros a controlar fueron: presión y consumo de gases, rugosidad superficial del material a recubrir, velocidad de salida del alambre, distancia y ángulo de proyección.

Una vez recubiertos, los electrodos se sometieron a pruebas de adherencia, resistencia eléctrica y finalmente al proceso de electroerosión por penetración para verificar su desgaste y el acabado superficial resultante.

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

## 1.1. PROYECCIÓN TÉRMICA

### 1.1.1. Aspectos básicos de la proyección térmica [2], [3].

Se denomina como proyección térmica a un grupo de procesos de recubrimiento, utilizados para aplicar recubrimientos metálicos y no metálicos. Estos procesos se agrupan en tres categorías principales: Proyección por flama, proyección por arco eléctrico y proyección por arco plasma. Estas fuentes de energía son utilizadas para calentar el material de revestimiento (en forma de polvo, alambre, o en forma de varilla) a un estado fundido o semifundido. Las partículas calentadas resultantes son aceleradas y propulsadas por cualquier proceso con gases o atomización hacia una superficie preparada.

Dependiendo del proceso las velocidades de las partículas van desde 150 a 1000[m/s] aunque pueden ser más altas para aplicaciones especiales. Las temperaturas de proyección se encuentran en el intervalo de 3000 a 8000[°C]. Sin embargo, los recubrimientos puede tener una porosidad hasta de 20% debido al aire atrapado y a las partículas de óxido causadas por las altas temperaturas comprendidas. La resistencia de la unión depende del proceso específico y las técnicas empleadas, (de ahí la importancia de la preparación de la superficie antes del rociado), Por lo general la resistencia de la unión va de 7 a 80[MPa]. Dependiendo del proceso específico utilizado.

La proyección térmica es una técnica utilizada para modificar las propiedades superficiales de una pieza o componente, mediante la recuperación de la superficie dañada o desgastada, también se puede ocupar para dar mantenimiento o mejorar las propiedades mecánicas, eléctricas o térmicas del sustrato.

### 1.1.2. Estructura de un Recubrimiento por Proyección Térmica (RPT) [2].

En el proceso de formación de la película durante la proyección térmica, partículas fundidas chocan con el sustrato formando una estructura laminar. En la Fig. 1.1. Se muestra la deposición del material por proyección termica.

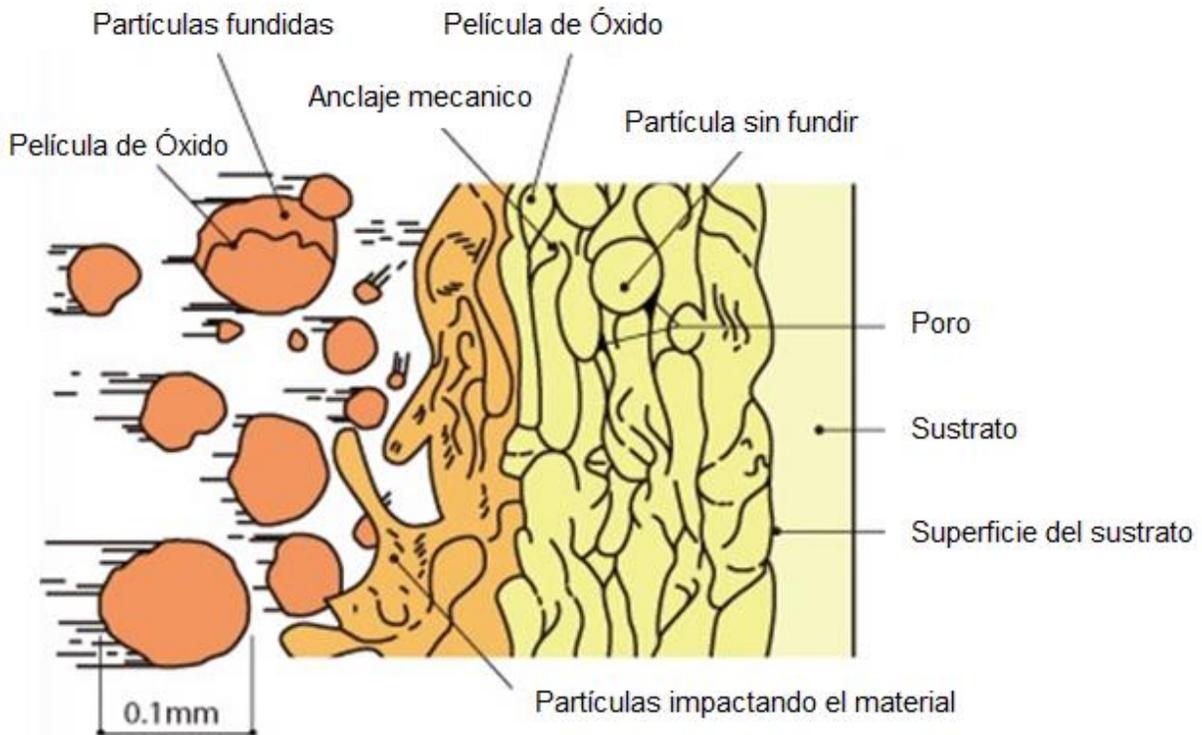


Fig. 1.1. Deposición del material por proyección térmica [4].

Las partículas fundidas que chocan con el sustrato y al mismo tiempo se aplanan y solidifican con geometrías irregulares son llamadas Splats.

"Splat" es el término dado al impacto simple de gotas / partículas, muchas Splats superpuestas al solidificarse y adherirse unas a otras forman una capa de recubrimiento continua.

Splats se crean cuando las partículas fundidas aceleradas impactan en una superficie preparada, dichas splats se someten a muy altas velocidades de enfriamiento. De este modo, el splat es el bloque de construcción básico estructural de recubrimientos de proyección térmica.

Las gotitas fundidas que llegan son generalmente esféricas, y en el impacto con la superficie del sustrato se extienden y llenan los espacios. Se muestra en la Fig.1.2. La estructura típica de Splats.

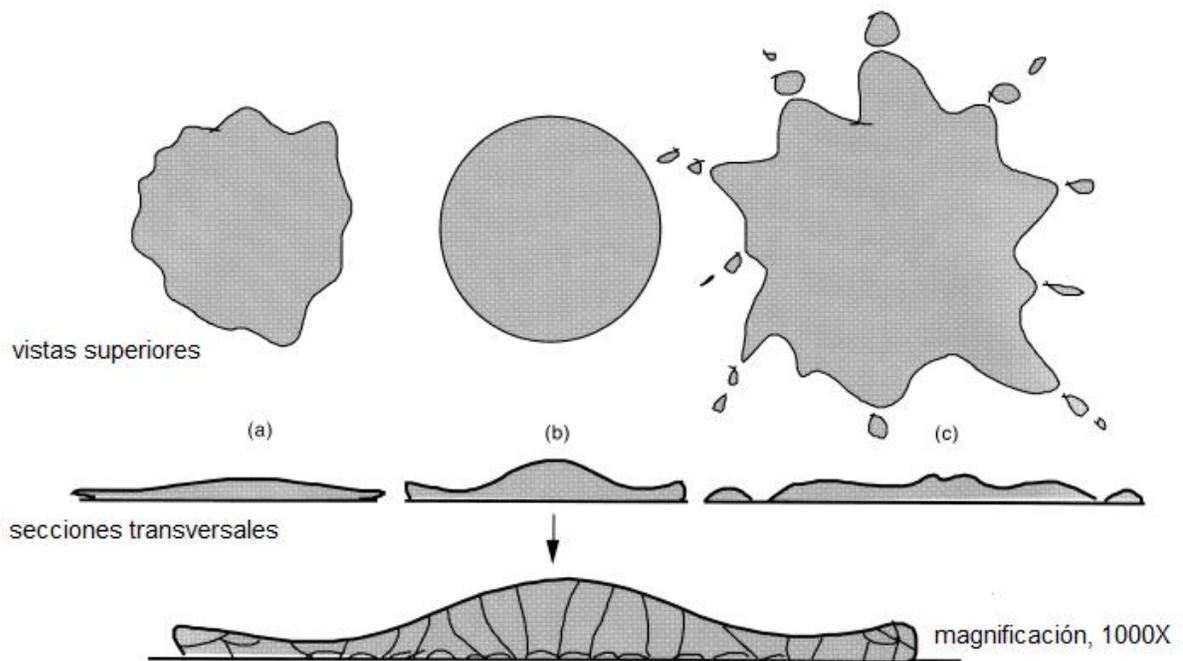


Fig. 1.2. Estructura típica de "Splat" por proyección térmica., (a) La partícula se ablanda por el calor o empieza a solidificarse, (b) Impactos de partículas correctamente derretidas para formar splats en una estructura laminar clásica bien adherida, (C) Impactos y salpicaduras de partículas sobrecalentadas, creando escombros y polvo [2].

### 1.1.3. Diferentes procesos de proyección térmica.

#### 1.1.3.1. Proceso de proyección térmica con polvo [2], [5].

En la proyección térmica por flama, la energía química de la combustión del gas combustible en oxígeno se utiliza para generar una flama caliente. La entrada de gas es axial, y el polvo se puede introducir axialmente o perpendicularmente al soplete. Las partículas se funden en la flama y se aceleran en la dirección de la pieza de trabajo.

El esquema del equipo que se utiliza para la proyección térmica con polvo se muestra en la Fig. 1.3.

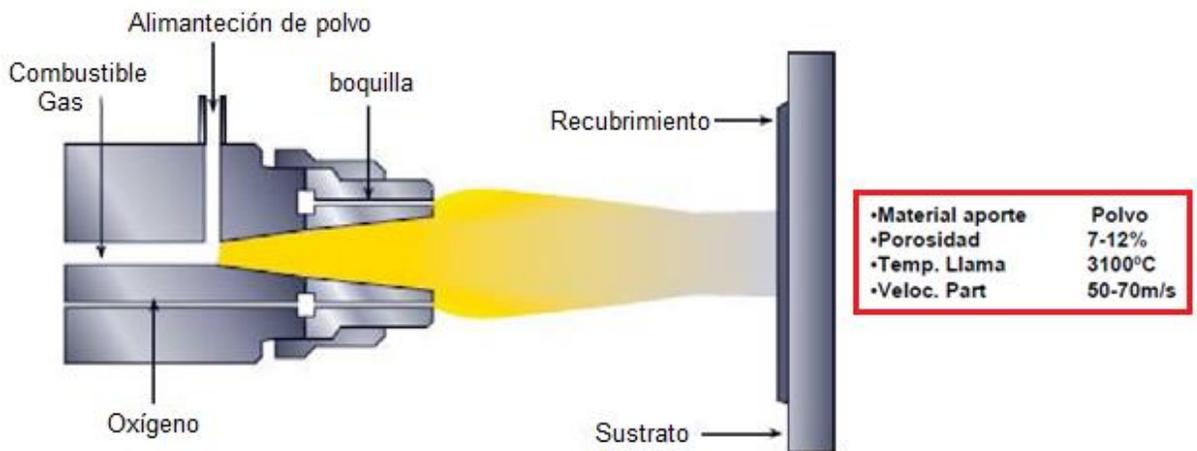


Fig. 1.3. Esquema proyección térmica con flama usando polvo [6].

La velocidad de las partículas es relativamente baja  $<100$  [m/s], la resistencia de la unión de los depósitos y la fuerza de cohesión es generalmente menor que los procesos de mayor velocidad aunque la porosidad puede ser mayor.

Las tasas de proyección son por lo general de 0.5 a 9[kg/h]. Las temperaturas de la superficie del sustrato pueden estar bastante altas debido a la incidencia de la flama.

### 1.1.3.2. Proceso de arco spray [7].

En esta técnica se produce una descarga eléctrica de alta intensidad entre dos electrodos, en la atmosfera formada por la corriente de gases (Ar, N<sub>2</sub>, incluso H<sub>2</sub> o He) a presión atmosférica. El arco eléctrico se inicia primero mediante una descarga en alta frecuencia para mantenerla después en corriente continua. La pistola del arco tiene una configuración similar a la de la antorcha de proyección, aunque en este caso la cámara de descarga lleva alojados los electrodos de ánodo y cátodo (este último terminado en forma de punta), situados muy próximos entre sí, siendo el cátodo de tungsteno y el ánodo de cobre. La descarga eléctrica entre los electrodos suele hacerse en un gas inerte para evitar la oxidación. La velocidad de las partículas oscila entre 100 y 300[m/s]. También es posible utilizar descargas en corriente alterna, a través de una bobina de inducción dispuesta alrededor del tubo de salida de los gases.

El esquema del equipo que se utiliza para la proyección térmica con arco se muestra en la Fig. 1.4

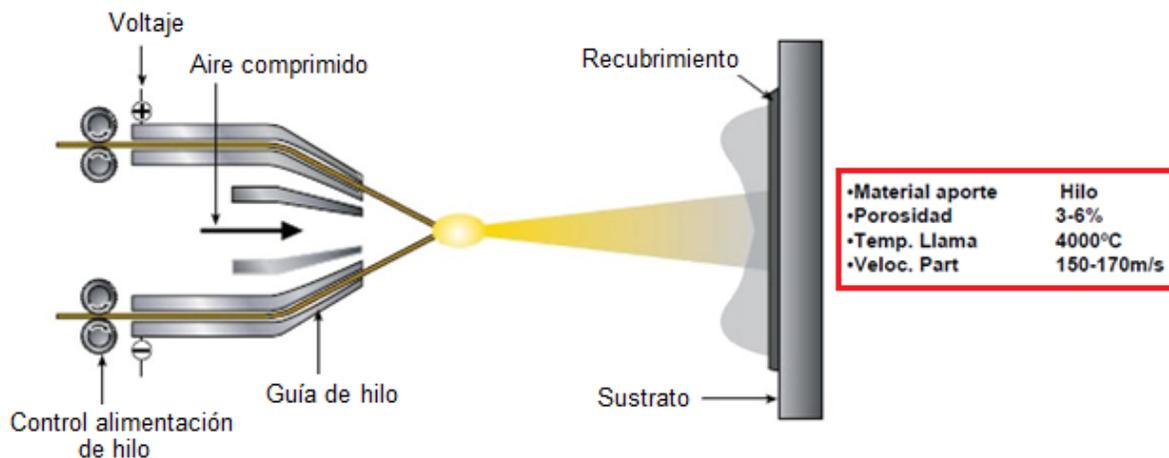


Fig. 1.4. Esquema proyección térmica con arco [6].

### 1.1.3.3. Proceso de plasma spray [8].

Para la proyección térmica con plasma se funde el polvo de recubrimiento dentro o fuera de la pistola de inyección en un rayo de plasma y se proyecta sobre la superficie de la pieza a tratar. El plasma es producido con un arco voltaico, que está concentrado a través de argón, helio, nitrógeno, hidrógeno o en una mezcla de estos gases. Los gases son disociados e ionizados en este proceso, alcanzando enormes velocidades de salida, y durante su recombinación ceden su energía térmica a las partículas del material de recubrimiento.

El arco voltaico no es transmisor, es decir que se mantiene dentro de la pistola, entre un electrodo (cátodo) dispuesto concéntricamente y la boquilla de inyección, refrigerada por agua, que representa el ánodo. Este sistema se aplica bajo atmósfera normal, en una corriente de gas protector, o sea, bajo atmósfera inerte (por ejemplo argón), bajo vacío o bajo agua. Con un accesorio especial en la boquilla puede producirse un plasma de alta velocidad.

El esquema del equipo que se utiliza para la proyección térmica por plasma se muestra en la Fig. 1.5

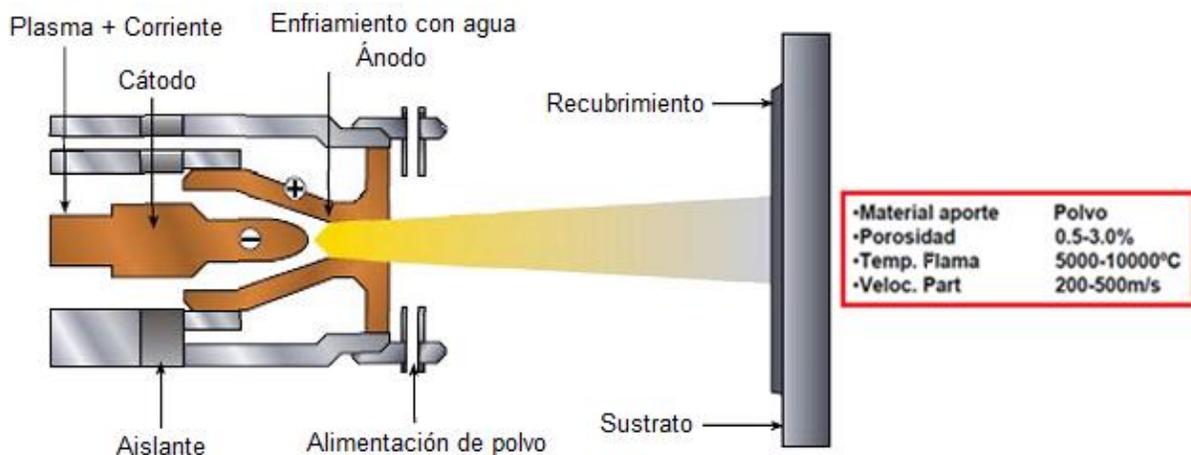


Fig. 1.5. Esquema de proyección térmica con plasma [6].

#### 1.1.3.4. Proceso con flama de alta velocidad HVOF [8].

Para la proyección térmica con flama de alta velocidad (HVOF por sus siglas en ingles), se produce una combustión continua de gas a grandes presiones en el interior de una cámara de combustión, en cuyo centro es aportado el material de recubrimiento en forma de polvo.

La alta presión de gas combustible y oxígeno, que se produce dentro de la cámara de combustión y de la tobera de expansión situada detrás, produce la necesaria gran velocidad de salida en el chorro de gas. De esta forma se aceleran las partículas a grandes velocidades, produciendo una metalización muy densa con unas propiedades de adherencia excelentes.

Debido a la aportación a una temperatura específica, el material de recubrimiento no sufre grandes alteraciones metalúrgicas; por ejemplo es mínima la formación de carburos estructurales. Con este método se producen capas extremadamente finas y con gran precisión de tolerancia. Como gases combustibles pueden usarse propano, propileno, etileno, e hidrógeno. El esquema del equipo que se utiliza para la proyección térmica de alta velocidad se muestra en la Fig. 1.6.

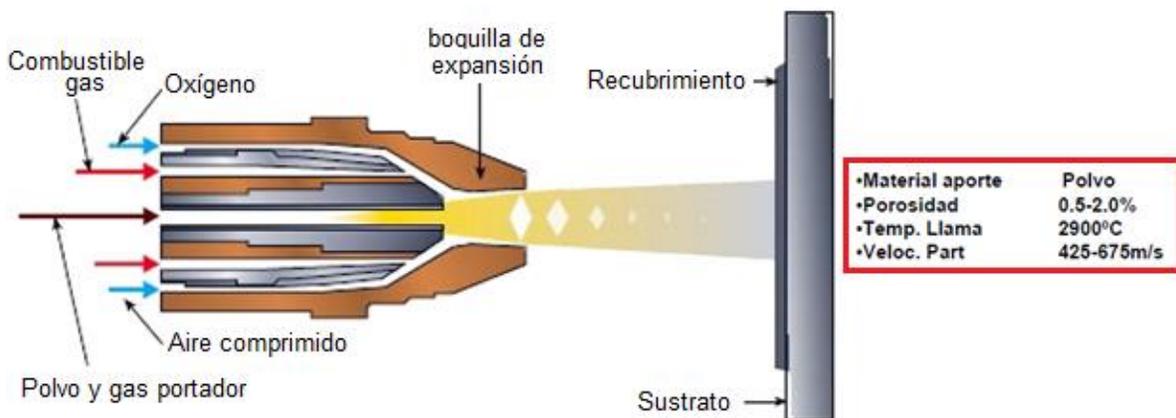


Fig. 1.6. Esquema proyección térmica con flama a gran velocidad [6].

### 1.1.3.5. Proceso de proyección térmica con alambre [2].

En la proyección térmica de flama con alambre, la función primaria de la flama es fundir la materia prima. Una corriente de aire a continuación, atomiza el material fundido y la impulsa hacia la pieza. Las tasas de proyección para materiales tales como acero inoxidable están en el intervalo de 0.5-9 [kg/h]. Una vez más, materiales de punto de fusión más bajos, tales como las aleaciones de zinc y estaño rocían a tasas mucho más altas. Las temperaturas del sustrato a menudo varían desde 95 hasta 205[°C] a causa de la entrada de energía en exceso requerida para la fusión de la flama. En la mayoría de los procesos de proyección térmica, a menos de 10% de la energía de entrada se utiliza realmente para fundir el material de carga de alimentación.

El esquema del equipo que se utiliza para la proyección térmica con alimentación de alambres o varillas se muestra en la Fig. 1.7.

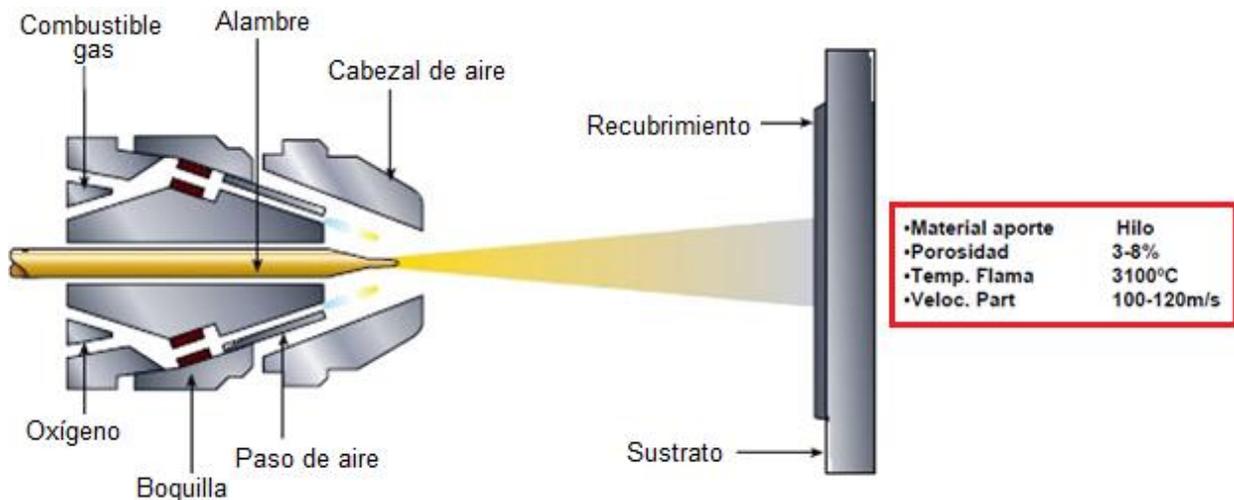


Fig. 1.7. Esquema proyección térmica con flama usando alimentación de alambre [6].

### **1.1.4. La Proyección Térmica vs otros procesos de recubrimiento [2].**

La Tabla 1.1 resume las características de cuatro métodos de recubrimiento:

Electrodeposición y Electrodeposición sin corriente eléctrica (EP / ELSP, por sus siglas en ingles).

Deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en ingles).

Deposición física de vapor (PVD, por sus siglas en ingles).

Proyección térmica (TS, por sus siglas en ingles).

Tanto los costos iniciales del equipo como los costos operativos de los recubrimientos por electrodeposición son relativamente bajos. Sin embargo, los subproductos son considerados altamente tóxicos, con lo que el almacenamiento, reclamación y eliminación son de importantes preocupaciones económicas. El equipo de proyección térmica, y por lo tanto su costo, varía ampliamente dependiendo de los dispositivos, desde combustión simple a los sistemas de pulverización de plasma de baja presión controlados por computadora.

Los costos operativos dependen en gran medida del costo de los consumibles Tales como materiales en polvo, alambre o varilla, así como cantidades y tipos de gases utilizados. Los costos de equipo para deposición química de vapor CVD, son moderados, con el entendimiento de que la neutralización de los gases de salida es una parte integral de cualquier sistema. Los costos de operación para deposición química de vapor CVD están dominados por los costos del gas precursor y la frecuente necesidad para limpiar los sistemas. El costo del equipo para recubrimiento por deposición física de vapor PVD es alto, debido a la necesidad de mantener altos vacíos en cámaras de volumen suficiente para que el proceso sea rentable. Los costos operativos están asociados con el grado de limpieza de la superficie necesario para la adhesión del recubrimiento.

Los procesos de Electrodeposición y Electrodeposición sin corriente eléctrica están limitados a metales, mientras que los procesos de recubrimiento por proyección térmica, deposición química de vapor y deposición física de vapor pueden aplicar una variedad de metales, cerámicas, cementos y polímeros.

Tabla 1.1 Comparación de algunos procesos de obtención de recubrimientos [2].

<b>Características del equipo</b>	<b>Recubrimiento electrolítico</b>	<b>Proyección térmica</b>	<b>Deposición química de vapor</b>	<b>Deposición física en fase vapor</b>
<b>Costo del equipo</b>	Bajo	Bajo a moderado	Moderado	De moderado a alto
<b>Costo de operación</b>	Bajo	Bajo a moderado	De bajo a moderado	De moderado a alto
<b>Entorno del proceso</b>	Solución acuosa	Atmosférico a cámara de bajo vacío	Atmosférico a cámara de medio vacío	Alto vacío
<b>Geometría del recubrimiento</b>	Omnidireccional	línea de visión	Omnidireccional	línea de visión
<b>Espesor del recubrimiento</b>	De moderado a grueso 10 $\mu$ m-mm	Grueso: 50 $\mu$ m-cm	Delgado a grueso 0.1 $\mu$ m-mm	De muy delgado a moderado
<b>Temperatura del sustrato</b>	Bajo	De bajo a moderado	Moderado a alto	Bajo
<b>Adherencia</b>	unión mecánica moderada a muy buen enlace químico	Buena adherencia mecánica	De muy buena adherencia química a excelente unión por difusión	De moderada unión mecánica a buen enlace químico
<b>Acabado superficial</b>	Moderadamente grueso a brillante	De grueso a suave	De suave a brillante	De suave a muy brillante
<b>Materiales para recubrimiento</b>	Metales	Polvo/alambre, polímeros, metales/cerámicos	Metales, cerámicos, polímeros	Metales, cerámicos, polímero

### **1.1.5. Ventajas de la proyección térmica [2].**

Una ventaja importante de los procesos de proyección térmica es la extremadamente amplia variedad de materiales que pueden ser utilizados para producir recubrimientos, prácticamente cualquier material que se funde sin descomposición puede ser utilizado.

Una segunda ventaja importante es la capacidad de la mayoría de los procesos de proyección térmica para aplicar recubrimientos a sustratos sin aportación de calor significativa. Por lo tanto, los materiales con puntos de fusión muy elevados, tales como tungsteno, se pueden aplicar a las piezas de mecanizado fino, completamente tratados térmicamente sin cambiar las propiedades de la pieza y sin distorsión térmica excesiva de la pieza.

Una tercera ventaja es la capacidad, en la mayoría de los casos, a quitar y recubrir los revestimientos gastados o dañados sin cambiar propiedades de partes o dimensiones.

## 1.2. ELECTROEROSIÓN.

### 1.2.1. Aspectos generales del proceso de Electroerosión [9].

La electroerosión es un procedimiento que basándose en el empleo directo de una corriente eléctrica consigue la fiel reproducción de la forma de un electrodo útil de manera automática, en una pieza determinada, si bien en forma complementaria, o sea que una forma positiva genera una negativa y viceversa.

Para llevar a cabo su cometido de reproducción de formas, la electroerosión requiere utilizar corrientes pulsantes unidireccionales de elevada energía.

Se puede afirmar que con la electroerosión nació un nuevo y revolucionario sistema de mecanizado de los metales, que a diferencia de los hasta entonces conocidos, para este no cuentan ni la dureza ni la tenacidad de los metales a mecanizar. En la Fig.1.8, se muestra la imagen de una máquina de electroerosión.



Fig. 1.8. Máquina Electroerosionadora.

Hoy en día constituye un medio imprescindible para la fabricación de todo tipo de moldes, estampas, troqueles y matrices, amén de un amplio campo de aplicaciones en la elaboración de piezas de difícil, o de imposible realización por otros procedimientos, permitiendo ejecución del trabajo, de forma racional, económica y precisa.

Aparte de las ventajas mencionadas de poder mecanizar cualquier metal sin importar su dureza o tenacidad, existe otro factor quizás todavía más importante, que es el de la reproducción automática de las formas. Esto es debido a que, para llevar a cabo el trabajo, la electroerosión, a diferencia de los otros procedimientos, no necesita de movimientos relativos entre herramienta y pieza, como sucede concretamente en el mecanizado por arranque de viruta.

En este caso el único movimiento necesario es el de penetración o avance del electrodo útil hacia la pieza a lo largo de uno o varios ejes.

Sin embargo el sistema también tiene sus condicionantes, y uno de ellos es que para llevar a cabo el mecanizado electroerosivo los materiales tienen que ser necesariamente conductores de electricidad.

### **1.2.2. Clasificación del proceso de Electroerosión [10].**

La expansión del mecanizado por electroerosión en los últimos 45 años ha dado origen a los tres tipos principales que se enumeran a continuación.

- Electroerosión por penetración.
- Electroerosión por hilo.
- Rectificado por electroerosión.

### 1.2.3. Descripción del proceso de Electroerosión por penetración [10].

Este es el tipo convencional que emplearon las primeras máquinas electroerosionadoras. En pocas palabras, el electrodo se une al cabezal de la máquina que está conectado a un polo por lo general el polo positivo de una fuente de alimentación pulsada. La pieza de trabajo se conecta al polo negativo y se ubica de manera que haya una separación entre esta y el electrodo. Posteriormente, la separación se inunda con fluido dieléctrico. Cuando se conecta la fuente de alimentación, la separación es atravesada por miles de impulsos de corriente continua por segundo formando chispas y dando comienzo al proceso de erosión. A medida que la erosión continúa, el electrodo avanza sobre la pieza mientras mantiene una dimensión constante de la separación.

En la Fig.1.9. Se muestra el diagrama básico de electroerosión por penetración.

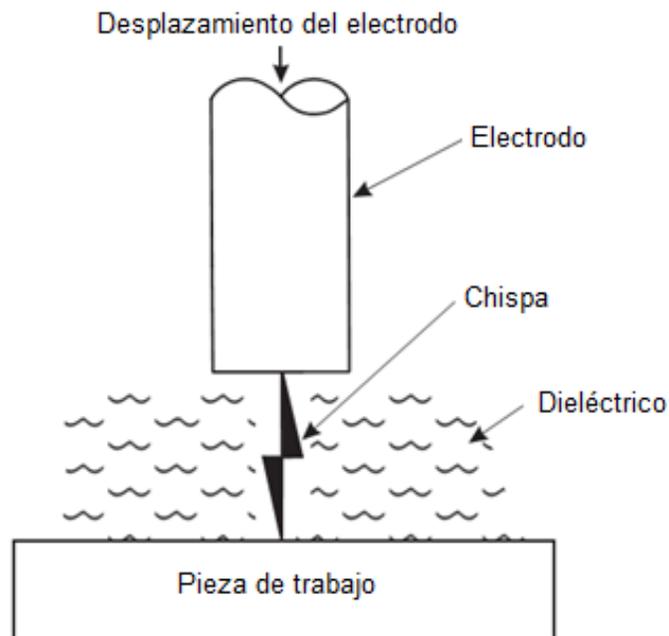


Fig. 1.9. Diagrama básico de electroerosión por penetración [10].

La pieza terminada puede exhibir varias capas distintas. La capa superficial presenta pequeños glóbulos de metal extraído de la pieza, así como partículas del electrodo adheridas que se eliminan fácilmente. La segunda capa se denomina “capa blanca” o “capa refundida”, donde la electroerosión ha alterado la estructura metalúrgica de la pieza. La tercera capa es la zona afectada por el calor o “capa recocida”, la cual ha sido calentada pero no fundida. La distribución, extensión y profundidad de estas capas tienen una influencia muy importante en la calidad del acabado superficial y se ven afectadas por:

- Los ciclos de activación y desactivación del proceso.
- El ciclo de trabajo, que es la relación entre el ciclo de activación y el tiempo de ciclo total.
- La distancia de separación, hueco o “gap” entre la pieza de trabajo y el electrodo.

El electrodo, por lo general de grafito o cobre electrolítico, se fabrica con la imagen inversa o negativa de la pieza que se desea obtener, por lo cual genera cavidades en la pieza y en algunos casos relieves.

Entre las características principales de la electroerosión por penetración se puede mencionar:

- El fluido dieléctrico es aceite mineral, aunque algunas máquinas pueden usar agua u otros líquidos especiales.
- Pueden obtenerse tanto formas pasantes como formas ciegas de geometrías complicadas.
- Capacidad de extracción en aceros: hasta 2000 [mm<sup>3</sup>/min].
- Rugosidad mínima en aceros: hasta menos de 0,4 [μm]. Rugosidad promedio.
- Aplicaciones: fabricación de moldes y troqueles de embutición.

## CAPÍTULO 2. EXPERIMENTACIÓN

### 2.1. PROYECCIÓN TÉRMICA

#### 2.1.1. Manufactura de electrodos.

Para la manufactura de electrodos se utilizó una barra de acero de bajo carbono de  $\frac{3}{4}$  de pulgada de diámetro cortándose en piezas de 5[cm] de longitud, se refrentaron las piezas en ambas caras, en uno de los extremos se realizó un barreno con broca de centros a una profundidad de 2[cm] y diámetro de  $\frac{5}{16}$  [in] para finalmente elaborar una cuerda estándar en dicho barreno de  $\frac{3}{8}$  [in]. La Fig. 2.1. Muestra el proceso de maquinado de la pieza de acero.

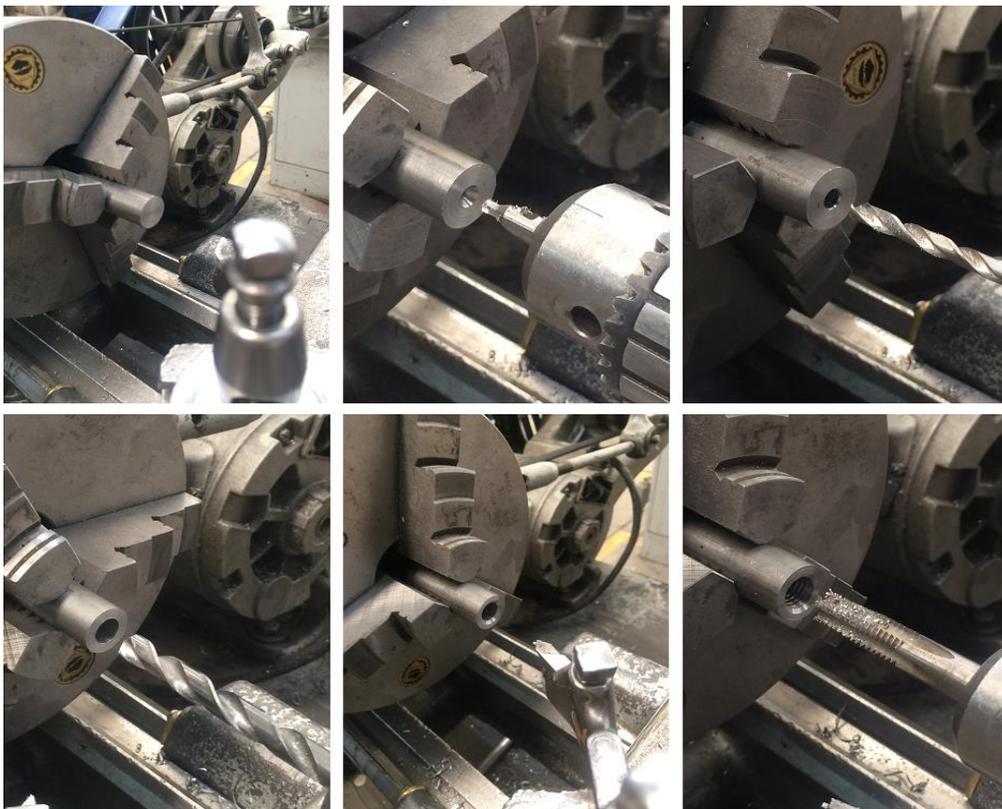


Fig. 2.1. Maquinado de electrodo en acero de bajo carbono.

## **2.1.2. Preparación de electrodo a recubrir**

### **2.1.2.1. Limpieza**

Se utilizó un proceso de limpieza química por medio alcohol, para retirar residuos de grasa y pequeñas partículas adheridas a los electrodos recién maquinados, se cubrió el electrodo con papel Cromwell-Phoenix (VCI) el cual es un inhibidor de la corrosión brindando protección del material hasta el momento de la generación de rugosidad en la superficie mediante el proceso de granallado.

### **2.1.2.2. Rugosidad.**

El granallado se basa en impactar repetidamente partículas duras sobre una superficie a la cual se necesita preparar para:

- Limpieza general.
- Terminaciones decorativas.
- Remover residuos de arenas de fundición.
- Preparación de superficies para recubrimientos.
- Despintado.
- Restauración, etc.

En los electrodos de acero bajo carbono, el objetivo del granallado fue la generación de mayor área de contacto y la obtención de una rugosidad adecuada para el proceso de proyección térmica.

Se muestra el diagrama representativo del granallado para la generación de rugosidad. Fig. 2.2

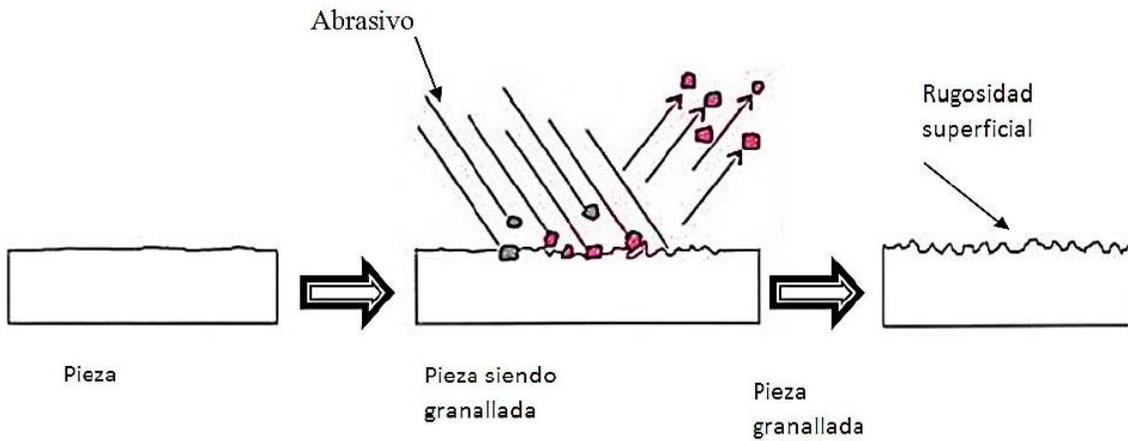


Fig. 2.2. Diagrama de granallado sobre la pieza de trabajo. [1]

Se consideró utilizar una cámara de granallado ubicada en el laboratorio de proyección térmica de la Facultad de Ingeniería, la cual proporciona seguridad al evitar que partículas de granalla sean enviadas a alta velocidad a los exteriores evitando dañar personas y equipos, así mismo proporciona recirculación de las partículas haciendo más eficiente el proceso. La cámara de granallado se muestra en la figura 2.3.



Fig. 2.3. Cámara de granallado.

Para generar rugosidad y preparación de los electrodos se utilizó granalla de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) malla 12 la cual se muestra en la Fig. 2.4.



Fig. 2.4. Granalla oxido de Aluminio [12].

Se utilizó una pistola para granallado con funcionamiento basado en sistema de succión conectado al sistema de alimentación de aire del laboratorio de proyección térmica de la Facultad de Ingeniería. Se muestra la imagen de la pistola utilizada en el proceso de granallado en la Fig. 2.5.



Fig. 2.5. Pistola de granallado [13].

Los parámetros utilizados para el proceso de granallado fueron los siguientes:

- Presión de aire a la salida del compresor: 7 [Bar]
- Distancia de granallado (boquilla a pieza): 10 a 12 [cm]
- Diámetro interno de boquilla: 6 [mm]
- Angulo de granallado: 90° respecto a la perpendicular de la superficie
- Tiempo de granallado: 5 [min]
- Tamaño de granalla: malla 12

El equipo utilizado para medir la rugosidad fue el rugosímetro Surfest 402 de la marca Mitutoyo, ubicado en el Laboratorio de Mediciones Mecánicas de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) de la Facultad de Ingeniería, UNAM., En el cual se analizó y obtuvo la rugosidad promedio en una longitud de 8 mm sobre la superficie de cada probeta granallada. Se muestra el equipo utilizado en la Fig. 2.6.



Fig. 2.6. Rugosímetro Surfest 402.

### 2.1.3. Generación de recubrimiento

La generación de recubrimiento se realizó mediante el proceso de proyección térmica con alimentación de alambre, donde los electrodos maquinados en acero de bajo carbono, limpios y preparados con la rugosidad necesaria fueron precalentados a 150 [°C] y proyectados con la aleación de Cu-Al.

Se realizó el proceso de proyección térmica en tres partes, en cada parte se generó recubrimiento de 2[mm] de espesor aproximadamente, dejando enfriar el electrodo recubierto durante 3 minutos antes de aplicar una segunda capa de recubrimiento hasta que se obtuvo aproximadamente 5 a 7[mm] de espesor total dejando enfriar finalmente el electrodo a temperatura ambiente. En la Fig. 2.7. Se muestra el electrodo de acero bajo carbono después del proceso de proyección térmica con alimentación de alambre.



Fig. 2.7. Probeta acero de bajo carbono después de generar recubrimiento

### 2.1.3.1. Parámetros del proceso.

#### 2.1.3.1.1 Distancia de proyección.

La distancia de proyección se consideró como el espacio medido entre la boquilla de la pistola y los electrodos previamente preparados con la limpieza y rugosidad necesaria (sustrato).

La distancia que se utilizó fue de 20 [cm] aproximadamente.

Al no ser automatizado dicho proceso, se realizó la proyección térmica tratando de mantener la distancia en un rango cercano a los 20 [cm] con la finalidad de evitar exceso de óxidos y porosidades en el recubrimiento por sobrecalentamiento del sustrato o solidificación del material proyectado antes de impactar el sustrato. Se muestra la distancia óptima encontrada mediante experimentación para el proceso de proyección térmica en la Fig. 2.8.

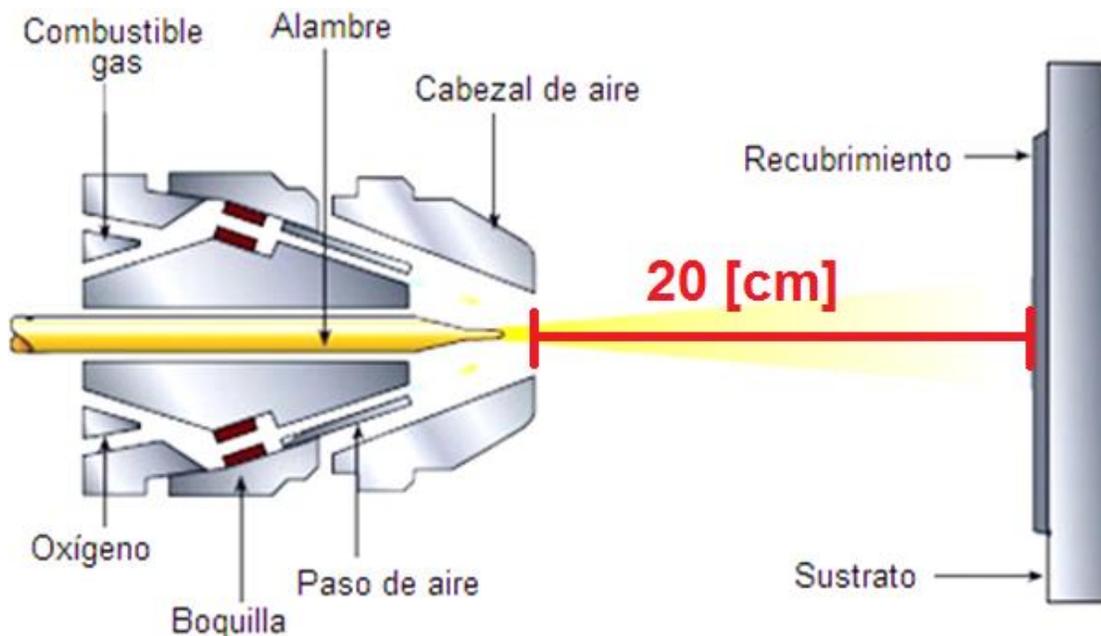


Fig. 2.8. Distancia de proyección. [6]

### 2.1.3.1.2 Ángulo de proyección.

En el proceso de proyección térmica uno de los parámetros importantes es el ángulo de proyección debido a que de este depende evitar la generación excesiva de porosidades y una buena adherencia del sustrato.

El ángulo utilizado para el proceso de proyección térmica es  $90^\circ$  considerando la llama perpendicular al sustrato, en casos específicos se modifica el ángulo de proyección dependiendo la forma del sustrato. Se muestra la ilustración que representa la forma y ángulo utilizado para realizar la proyección térmica Fig. 2.9.

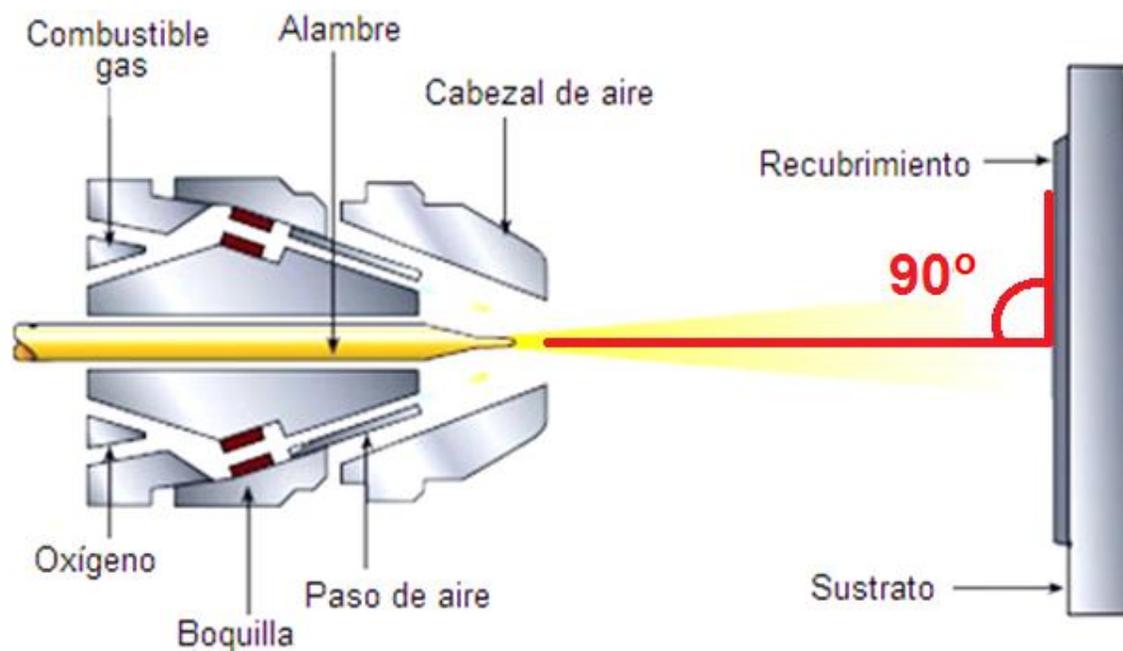


Fig. 2.9. Ángulo de proyección. [6]

### 2.1.3.1.3 Consumo de alambre.

En el proceso de proyección térmica se ajustó la velocidad de la turbina en la pistola para regular el consumo de alambre, el objetivo de ajustar la velocidad es lograr fundir completamente el material (alambre aleación cobre-aluminio) para lograr un adecuado recubrimiento sobre el sustrato, si la velocidad de alimentación de alambre es lenta se puede generar un recubrimiento no uniforme, si la velocidad de alimentación de alambre es rápida se proyecta material semifundido sobre el sustrato.

La velocidad de consumo de alambre para nuestro proceso encontrado mediante experimentación se estableció en 70 [cm/min].

### 2.1.3.1.4 Consumo de gases.

El consumo de gases durante el proceso de proyección se basó en experimentación a partir de valores recomendados para Bronce Aluminizado y Latón en las tablas de valores para la pistola de proyección térmica por consumo de alambre. (ANEXO 1 y 2). Se muestran los valores considerados para empezar las pruebas de proyección térmica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros considerados para consumo de gases.

PARÁMETROS	ANEXO1	ANEXO2
Presión de encendido Oxígeno (kg/cm <sup>2</sup> )	2.11	2.07
Presión de encendido Acetileno (kg/cm <sup>2</sup> )	1.05	1.03
Lectura de Flujómetro de gases Oxígeno (SCFH)	44	44
Lectura de Flujómetro de gases Acetileno (SCFH)	40	40

Nota: [SCFH] (Standard Cubic Feet per Hour)

Los valores de presión para oxígeno recomendados generaban pequeñas explosiones en la boquilla de la pistola, por lo que lo se redujo a 1.3 [kg/cm<sup>2</sup>] en el encendido.

Durante la proyección térmica con la pistola Spray-Jet 96 la presión en los reguladores desciende conforme se realiza el recubrimiento, por lo que se ajustaron los valores de presión en los tanques y se mantuvieron constantes con los que se obtuvieron mejores resultados, El valor de presión utilizado para el tanque de oxígeno fue de 1.2 [kg/cm<sup>2</sup>] aproximadamente.

Se muestra tanque y presión en el regulador Fig. 2.10.



Fig. 2.10. Presión adecuada para el tanque de oxígeno.

El valor de presión para el tanque de acetileno que se ocupó fue de 0.98 [kg/cm<sup>2</sup>] aproximadamente. Se muestra tanque y presión en el regulador en la Fig. 2.11.

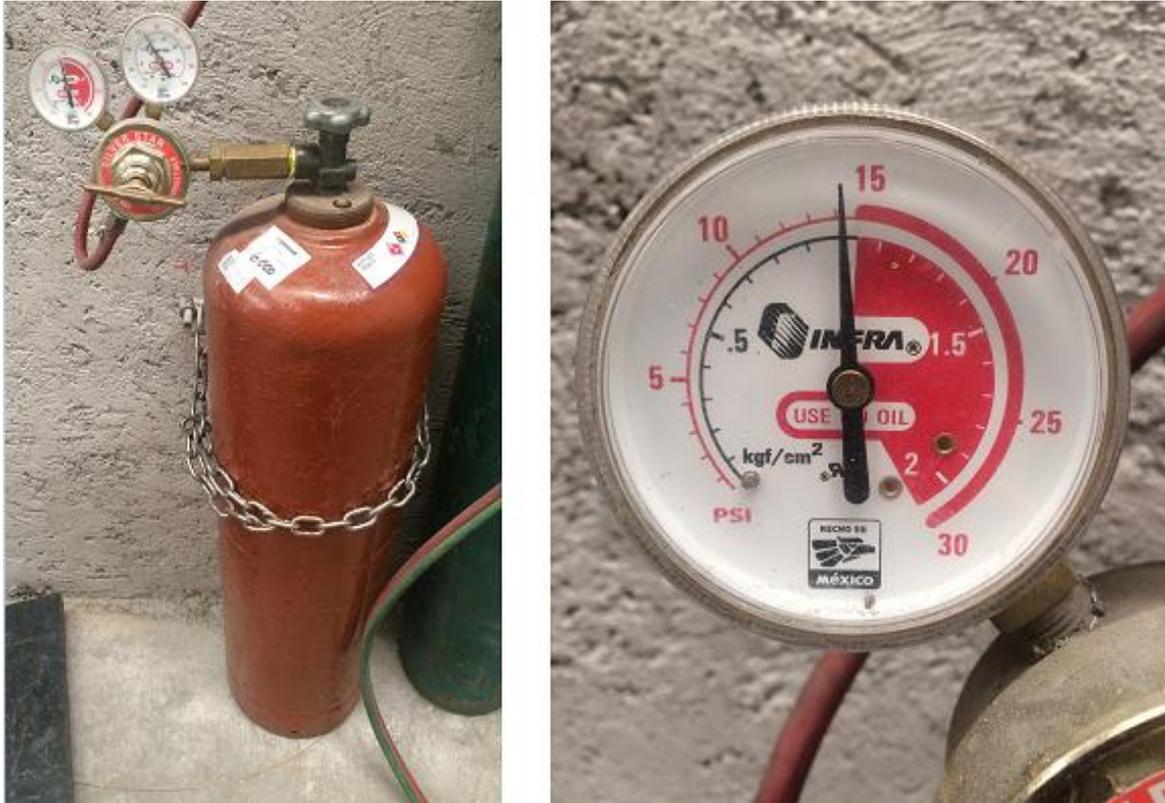


Fig. 2.11. Presión para el tanque de acetileno.

Al variar la relación de presión de los tanques se necesitó encontrar nuevos valores para el flujómetro, empezando con los valores anteriormente obtenidos en el área de proyección térmica para acero inoxidable ya que en tablas de proveedor (Anexo1 y Anexo2) los parámetros en flujómetro para acero inoxidable y bronce aluminizado son los mismos.

Los valores utilizados en el flujómetro para oxígeno y acetileno fueron de 58 [SCFH] en oxígeno y 25 [SCFH] en acetileno.

Nota: [SCFH] (Standard Cubic Feet per Hour)

Se muestra el flujómetro utilizado en la Fig. 2.12.



Fig. 2.12. Flujómetro Sulzer Metco.

#### 2.1.3.1.5 Temperatura de precalentamiento.

Las probetas anteriormente granalladas se precalentaron a la temperatura recomendada de 150°C con el objetivo de eliminar humedad en el sustrato mejorando la adherencia del recubrimiento y evitando un choque térmico entre el sustrato y el recubrimiento al momento de la proyección térmica, para verificar la temperatura de precalentamiento se utilizó un pirómetro digital de la marca Extech modelo 42510, se muestra en la Fig. 2.13.



Fig. 2.13. Pirómetro digital Extech [14].

## 2.2. MAQUINADO DE RECUBRIMIENTO

Después del proceso de proyección térmica, se obtuvo el electrodo con recubrimiento en su forma más burda, por medio del proceso de torneado se maquinaron los electrodos retirando el exceso de recubrimiento con la finalidad de conseguir una superficie plana en un extremo del electrodo y una superficie uniforme en la periferia cilíndrica del electrodo,

Se llevó a cabo el maquinado de los electrodos en un torno mecánico hasta conseguir la medida requerida, a la cual estandarizamos todos los electrodos recubiertos antes de ser sometidos a las pruebas de conductividad y pruebas de electroerosión.

El diámetro estandarizado al que se maquinaron los electrodos se fijó en 0.5 [in] de diámetro, este proceso solo se realizó en el extremo recubierto del electrodo manteniendo las dimensiones del electrodo íntegras en el extremo roscado.

Se muestra gráficamente el proceso de maquinado en torno, Fig. 2.14.

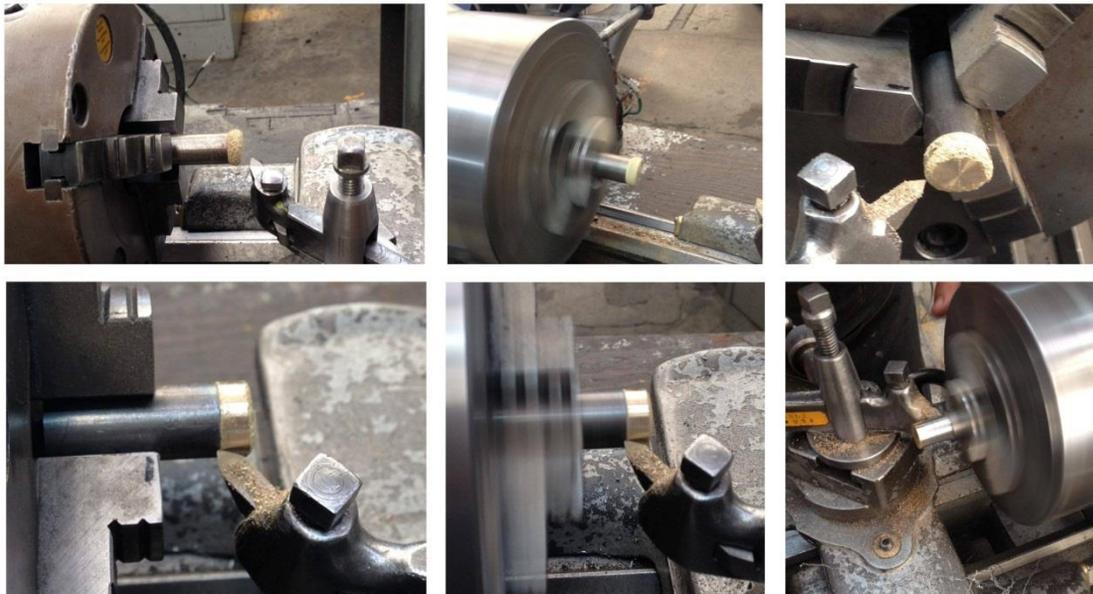


Fig. 2.14. Proceso de maquinado de electrodos en torno.

El siguiente proceso realizado fue lijar la parte lateral maquinada del cilindro (extremo del electrodo con recubrimiento), este proceso se llevó acabo con la pieza montada en el torno mecánico a bajas revoluciones, este proceso se llevó acabo con diferentes lijas, los diferentes tipos de lijas utilizadas son: lija malla 200, malla 400, malla 600, malla 800 y malla 1000, terminando el proceso en malla 1500.

Se muestra la pieza montada en torno durante el proceso de lijado sobre la parte cilíndrica en la Fig. 2.15.



Fig. 2.15. Lijado en la parte cilíndrica del electrodo (pieza montada en torno).

El siguiente proceso realizado sobre los electrodos fue pulir la superficie plana del recubrimiento, Este proceso se realizó en el laboratorio de materiales y superficies del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) ubicado en el Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, con una pulidora de disco velocidad variable marca Struers modelo DAP-V.

Los diferentes tipos de lijas utilizadas en la maquina pulidora fueron: lija malla 200, malla 400, malla 600, malla 800, malla 1000, malla 1500 y malla 2000, terminando el proceso con un pulido superficial con alúmina. Se muestra la maquina pulidora empleada para el pulido de la superficie plana de los electrodos recubiertos Fig. 2.16.

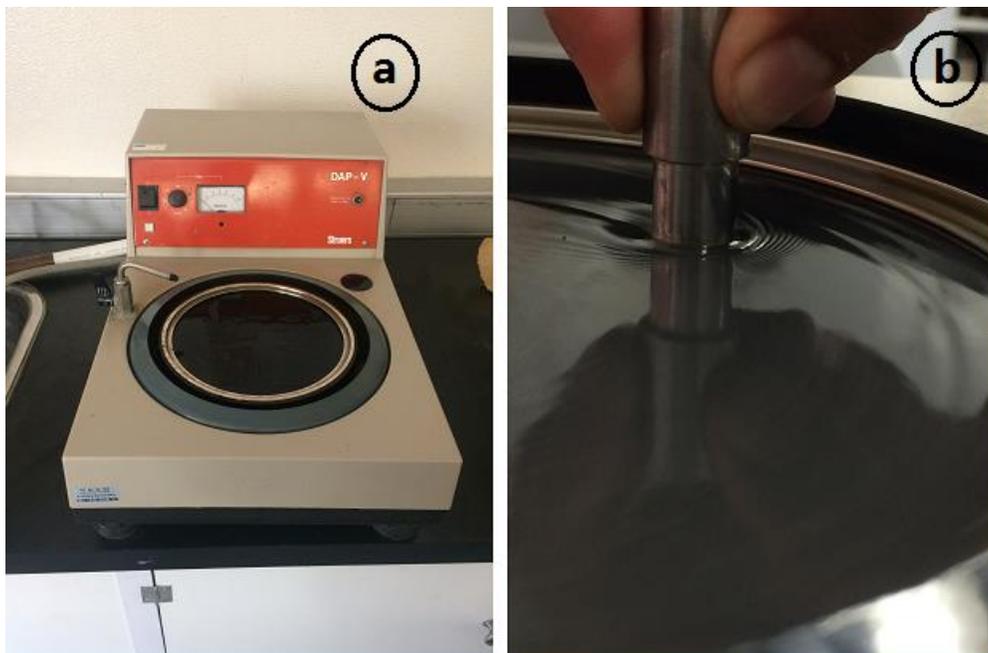


Fig. 2.16. a) Pulidora circular, b) Pulido de electrodos.

### 2.3. MAQUINADO DE BASE PARA ELECTRODOS

Se maquinó en torno mecánico una base para sujetar los electrodos, el material utilizado fue una barra de acero de una pulgada de diámetro cortándola en un tramo de 15 [cm], un extremo de la barra se sujeta del chuck universal y se perfora el otro extremo de la barra con una broca de centros para poder sujetar la pieza en el contrapunto y poder maquinaarla con las medidas necesarias, por último se le da un acabado con lija malla 1000 a la pieza.

En la Fig. 2.17. Se muestra la base para electrodos.



Fig. 2.17. Base para electrodos

## 2.4. MANUFACTURA DE ELECTRODOS DE COBRE ELECTROLÍTICO

Para la manufactura de estos electrodos se utilizó cobre electrolítico de  $\frac{3}{4}$  de pulgada de diámetro. Se refrentaron las piezas en ambas caras, en uno de los extremos se realizó un barreno de centros con profundidad de 2[cm] y diámetro de  $\frac{5}{16}$  [in] para finalmente elaborar una cuerda estándar en dicho barreno de  $\frac{3}{8}$  [in], el otro extremo de la pieza se maquinó reduciendo el diámetro del cilindro a  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro para estandarizar la huella al igual que los electrodos recubiertos mediante el proceso de proyección térmica.

La Fig. 2.18 muestra la pieza de cobre electrolítico maquinado en torno.

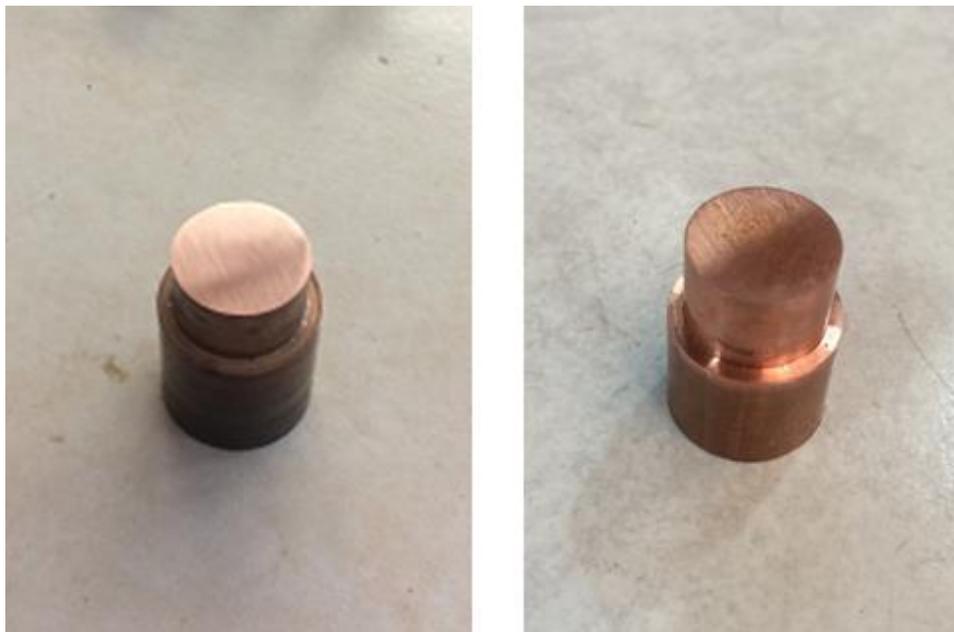


Fig. 2.18. Electrodos maquinados en cobre electrolítico.

## 2.5. PRUEBA DE ADHERENCIA

Para las pruebas de adherencia se realizaron 6 probetas cuadradas de acero de bajo carbono 1x1 [in] con un grosor de 0.25 [in]. Proyectada térmicamente con el recubrimiento de cobre/aluminio, se realizó la proyección térmica recubriendo el sustrato durante 60 segundos, se prepararon las probetas dándoles acabado superficial con papel lija malla 220, seguido de una limpieza con cepillo cerdas de alambre fino.

Se acondicionaron para las pruebas de adherencia 6 dollies de aluminio, los cuales fueron preparados y lijados de la misma manera que las probetas con papel lija malla 220. Se muestra dichos dollies en la Fig. 2.19.

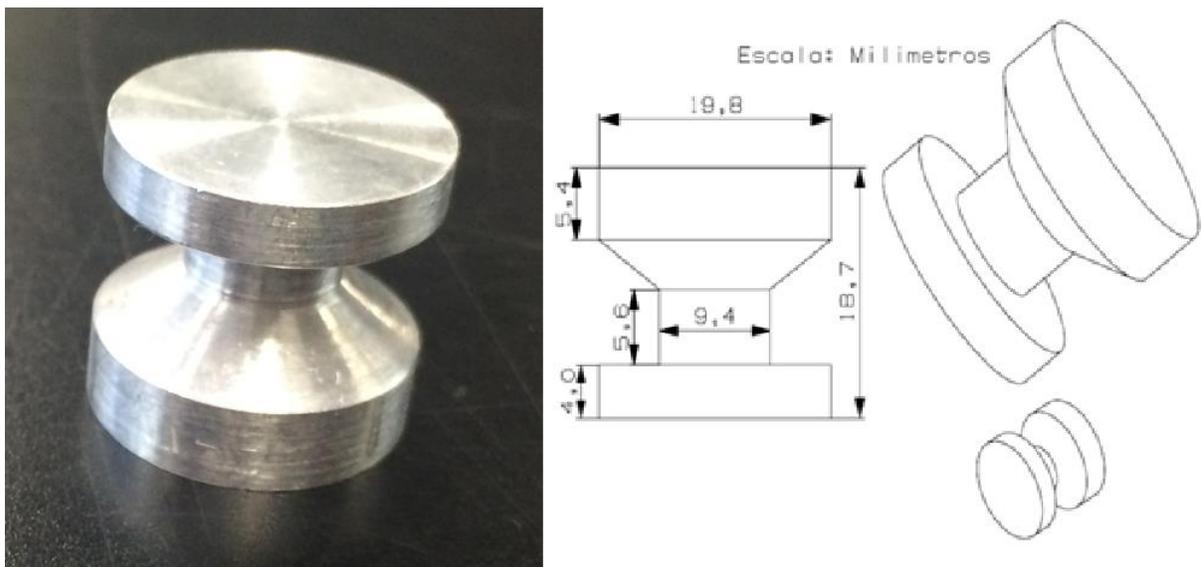


Fig. 2.19. Dollies utilizados en las pruebas de tracción junto con su plano [15].

Una vez listas las probetas y los dollies, se preparó y aplicó el adhesivo (adhesivo epoxi “Araldite” del equipo Pull-Off “ELCOMETER 106”) el cual consta de dos componentes que se mezclaron en partes iguales, (parte A: ESTÁNDAR

2K/Resina epoxy novolac Bisphenol; parte B: STANDARD 2K/Indurente Polyamide), Una vez aplicado el adhesivo se dejó secar durante 120 horas, para después realizar las pruebas.

Las pruebas de adherencia por tracción fueron realizadas con el equipo “ELCOMETER Pull-Off 106”. En este equipo cuando se desprende el revestimiento de la superficie, un indicador de la escala muestra el valor numérico de adherencia expresada en términos de fuerza por unidad de superficie requerida para separar el dolly.

La Fig. 2.20. Muestra el equipo utilizado para las pruebas de adherencia.



Fig. 2.20 Equipo “ELCOMETER Pull-Off 106”

## 2.6. PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD

Para la prueba de conductividad se utilizó una probeta proyectada térmicamente con la aleación cobre/aluminio a la cual se le dio un acabado superficial con papel lija malla 1500 y pulida con alúmina (óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Se realizó la soldadura de alambres delgados de cobre sobre la probeta con soldadura epóxica a base de plata, dejando fraguar durante 7 horas en una parrilla de calentamiento a una temperatura de  $70[^\circ\text{C}]$ , Lo anterior fue realizado en el Laboratorio de Micro Sistemas BioMEMS y Lab on a Chip de la División de Ingeniería Eléctrica de la UNAM.

Se muestra en la Fig. 2.21 la probeta utilizada para realizar las pruebas de resistencia eléctrica.

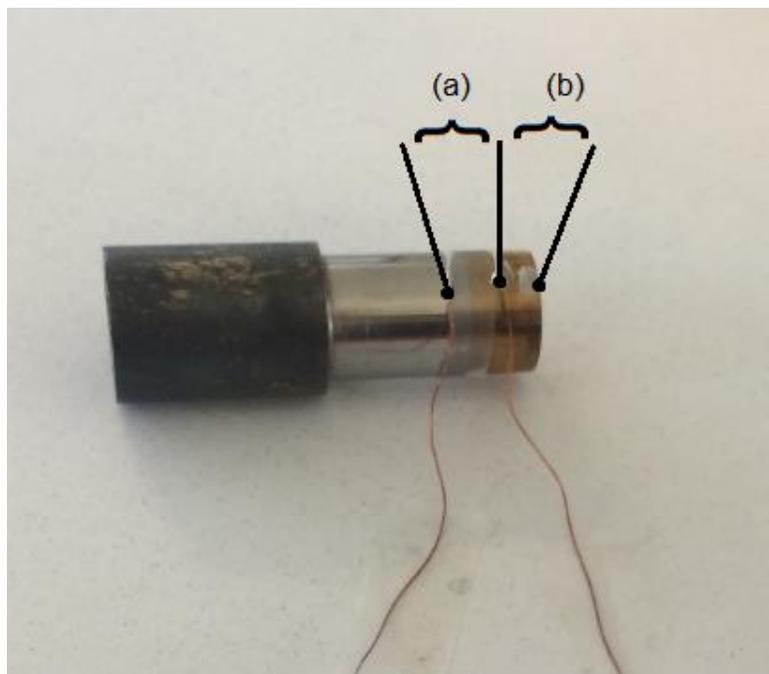


Fig. 2.21. Alambres de cobre soldados a probeta de acero proyectada, a) sección acero bajo carbono – aleación Cu-Al.  
b) sección aleación Cu-Al.

Para las mediciones de resistencia se ocupó el equipo: Multímetro Digital HP 3478A, ubicado en el Laboratorio de Laminación del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM – UNAM).

Con dicho equipo se realizaron las mediciones de resistencia de los alambres de cobre delgados antes de ser soldados, se midió la resistencia de los cables banana-caimán junto con los alambres de cobre delgado, se midió la resistencia de una barra de aleación cobre/aluminio antes de ser proyectada de 3.17 [mm] de grosor y 137 [mm] de largo. Y finalmente se midió la resistencia de la probeta entre los tres puntos señalados en la imagen 2.21. De la parte de acero hacia la parte proyectada térmicamente con la aleación cobre/aluminio y entre dos puntos de la aleación.

Se muestra el equipo con que se realizaron las mediciones de resistencia, Fig. 2.22.



Fig. 2.22. Multímetro digital HP3478A

## 2.7. PRUEBA DE ELECTROEROSIÓN

Para iniciar las pruebas de electroerosión se seleccionó primero el material de las piezas necesarias para realizar sobre ellas la electroerosión, para lo que se decidió emplear una barra cuadrada de acero de bajo carbono, la cual se sujetó en la base magnética de la máquina, y para los electrodos se ocupó la base para electrodos.

Se muestra la pieza utilizada para las pruebas de electroerosión en la Fig. 2.23.

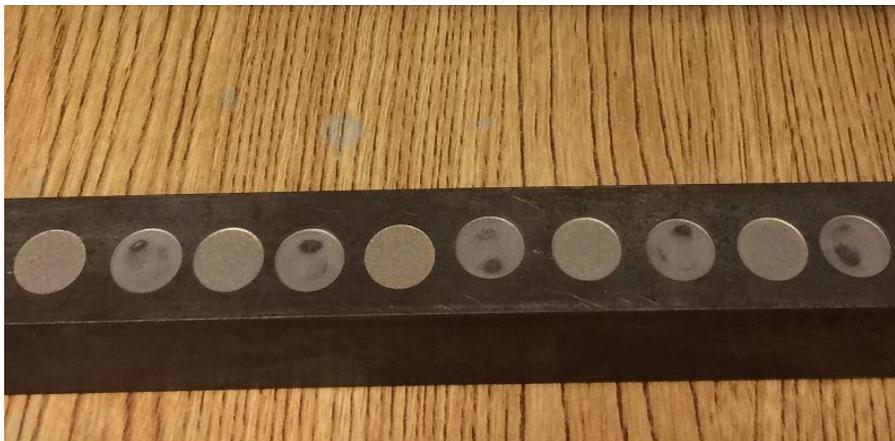


Fig. 2.23. Barra de acero utilizada para pruebas de electroerosión (huellas de trabajo).

Para las pruebas de electroerosión se ocuparon los electrodos recién maquinados y pulidos, se colocaron en la base para electrodos (pieza de acero con rosca maquinada para sujetar electrodos) de la máquina electroerosionadora EDM, la cual cuenta con 4 pernos calibradores de electrodos, ya colocados los electrodos se calibraron dichos pernos para conseguir que la superficie plana proyectada y maquinada quedara perpendicular a la barra de acero que se ocupó para las pruebas de electroerosión, esta calibración se realizó con el equipo (comparador de caratula marca Starret, fijado a una base magnética marca Mitutoyo).

Se muestra el equipo ocupado para la calibración de las probetas Fig. 2.24.

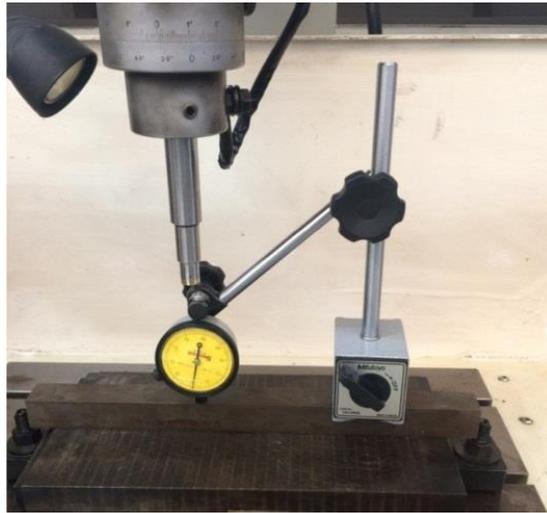


Fig. 2.24. Comparador de caratula y base magnética.

Se realizaron las pruebas considerando los valores de tablas para cobre electrolítico siendo este el material más parecido a la aleación ocupada en el recubrimiento (cobre-aluminio) con la finalidad de comparar los resultados obtenidos al finalizar las pruebas entre las probetas de cobre electrolítico y las probetas de acero bajo carbono proyectado térmicamente. La tabla 2.2 muestra los valores utilizados para la maquina electroerosionadora.

Tabla 2.2 Valores utilizados para la maquina Electroerosionadora.

Ton ( $\mu$ s)	TS (QT)	DT (%)	Rmax ( $\mu$ m)	Vv (%)
10	2	65	9	15
5	2	48	8	30
20	2	76	13	7

Nota: Ton = Tiempo de duración de la descarga [ $\mu$ s], TS = Transistores utilizados, DT% = Duración de la pausa,

Rmax = Rugosidad máxima en micrómetros, Vv = Desgaste del electrodo en porcentaje.

Para medir el desgaste del electrodo posterior a la electroerosión se recurrió a la medición de pérdida de masa, este proceso se realizó en el laboratorio de materiales y superficies del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) ubicado en Postgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM., Con una balanza marca Ohaus Explorer modelo E011403.

Se muestra el equipo utilizado en la Fig. 2.25.



Fig. 2.25. Balanza Ohaus Explorer.

## 2.8. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM).

Para el análisis del recubrimiento sobre el sustrato se utilizó el microscopio electrónico de barrido SEM, por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscopy) modelo XL20 de la marca Phillips el cual se encuentra ubicado en el Laboratorio de microscopia electrónica de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) de la Facultad de Ingeniería, UNAM. En el cual se realizó el análisis de las probetas antes del proceso de electroerosión se muestra en la Fig. 2.26.



Fig. 2.26. Microscopio electrónico de barrido

El segundo equipo que se utilizó fue el microscopio electrónico de barrido SEM, ubicado en el Laboratorio de Microscopia Electrónica del departamento de materiales Metálicos y Cerámicos del Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM en el cual se realizó el análisis de elementos presentes en las probetas, se muestra en la Fig. 2.27.



Fig. 2.27. Microscopio electrónico de barrido.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1. RESULTADOS RUGOSIDAD.

Los resultados de la prueba de rugosidad promedio para las probetas granalladas durante 5 min analizadas con el rugosímetro marca Mitutoyo, modelo Surfes 402 fueron:

Tabla 3.1. Resultados de Rugosidad.

Número de probeta	Rugosidad [ $\mu\text{m}$ ]
01	10.0
02	10.5
03	8.8
04	9.3
05	10.8
06	9.1
07	8.6
08	9.4
<b>Promedio:</b>	<b>9.562</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.794</b>

Se consideró el tiempo de 5 minutos de granallado en cada probeta, dado que la curva de rugosidad contra tiempo llega a un máximo, mostrando una disminución en la rugosidad al pasar el tiempo, como se muestra en trabajos previos [1], así como oxidación en el caso de nuestras probetas maquinadas en acero de bajo carbono.

## 3.2. RESULTADOS PRUEBAS DE ADHERENCIA

En las pruebas realizadas para adherencia, se encontraron 3 casos:

El primer caso el adhesivo se desprendió completamente del recubrimiento en donde se desprendieron muy pequeñas partículas del recubrimiento. Probetas 2, 5 y 6.

El segundo caso donde se desprendió parte del adhesivo quedando una parte en el recubrimiento y otra parte en el Dolly. Probetas 1 y 3.

El tercer caso donde se desprendió parte del recubrimiento mostrando que la fuerza de adherencia entre el recubrimiento con el sustrato es mayor que la fuerza de adherencia entre los splats del proceso de proyección térmica. Probeta 4.

Los resultados obtenidos de la prueba de adherencia se muestran en la Fig. 3.1.

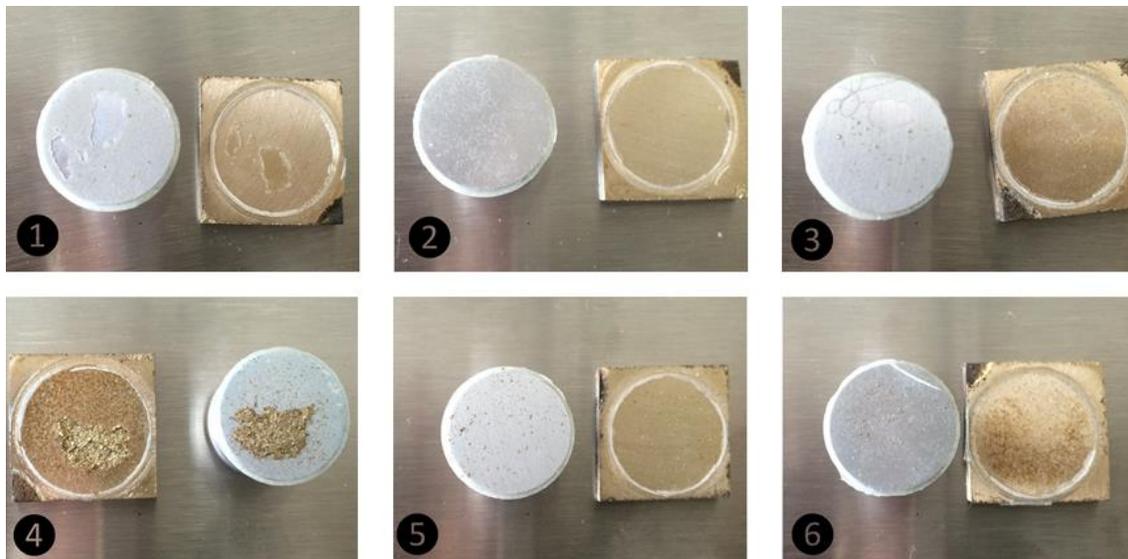


Fig. 3.1 Se muestran las imágenes después de las pruebas de adherencia enumeradas según el orden en que se realizaron los ensayos para adherencia por arranque.

Se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de adherencia, en una escala parecida a la del equipo “ELCOMETER Pull-Off 106” donde se trató de expresar un aproximado de lo obtenido mediante observación durante las pruebas. Ver Fig. 3.2.

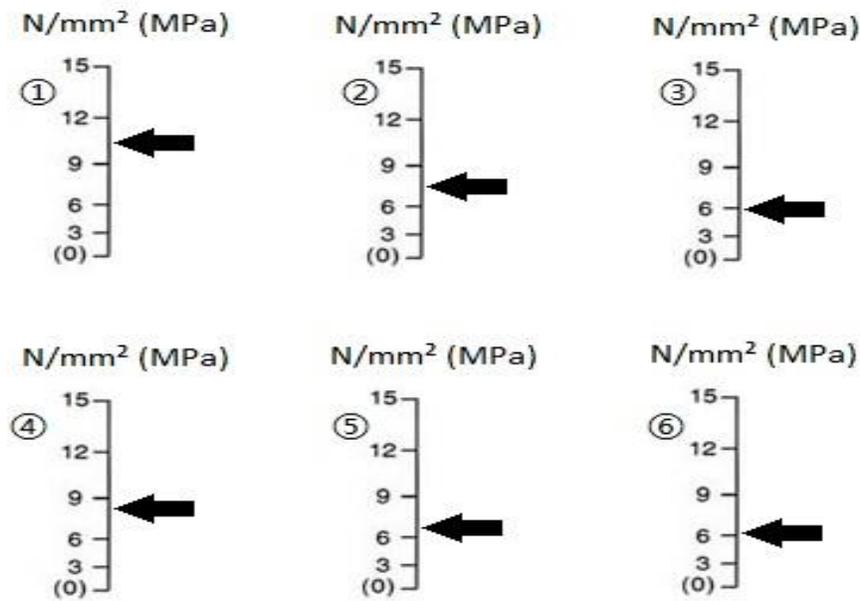


Fig. 3.2. Resultados obtenidos con el equipo “ELCOMETER Pull-Off 106”

Quedando de la siguiente manera:

Tabla 3.2. Resultados

Resultados de las pruebas de adherencia en [N/mm <sup>2</sup> (MPa)]	
Probeta 1	10.5
Probeta 2	7.5
Probeta 3	6
Probeta 4	8.5
Probeta 5	7
Probeta 6	6
<b>Promedio</b>	<b>7.583</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>1.715</b>

El promedio de esfuerzo en el que se desprendió el adhesivo para las 6 pruebas es de 7.583 [MPa].

El esfuerzo de adhesión del recubrimiento respecto del sustrato es mayor a 10.5 [MPa] siendo este el valor máximo alcanzado en dicha prueba sin desprendimiento, donde se observó solo un caso con desprendimiento en parte del recubrimiento mostrando que la fuerza de adherencia entre el recubrimiento con el sustrato es mayor que la fuerza de adherencia entre los splats del proceso de proyección térmica.

### 3.3. RESULTADOS PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD.

En las pruebas elaboradas para conocer las resistencias de la probeta proyectada térmicamente así como de la aleación (cobre-aluminio) antes de ser proyectada en su forma de barra delgada se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados de resistencia.

Material	Resistencia ( $\Omega$ )
<b>Cables banana-caimán</b>	0.239
<b>Alambres delgados de cobre + cables banana-caimán</b>	0.423
<b>Barra delgada aleación Cobre-Aluminio sin proyectar</b>	0.259
<b>Probeta proyectada térmicamente sección acero – aleación (Cobre-Aluminio)</b>	3.347
<b>Probeta proyectada térmicamente solamente sección aleación (Cobre-Aluminio)</b>	0.993

Con las resistencias medidas y la distancia entre los puntos de soldadura de una manera simple y aproximada pudimos calcular la resistividad para la probeta proyectada térmicamente y de la barra delgada de la aleación cobre-aluminio sin proyectar, ocupamos la ecuación  $R = \rho \frac{L}{A}$

Se muestra en la Fig. 3.3 la forma gráfica del cálculo realizado.

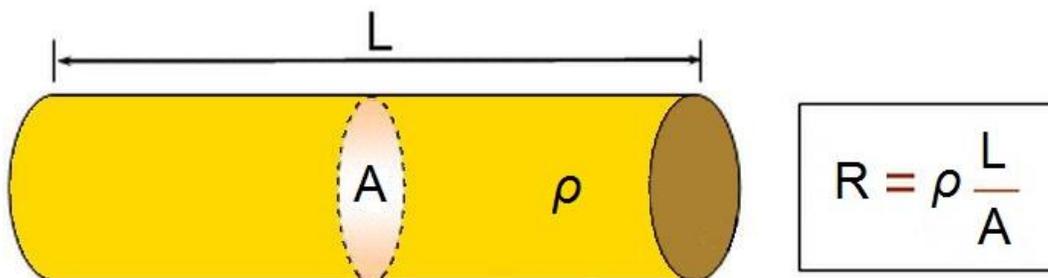


Fig. 3.3. Forma gráfica del método utilizado para el cálculo de resistividad. [16]

Dónde:

R = Resistencia en ( $\Omega$ ).

$\rho$  = Resistividad en ( $\Omega \cdot m$ ).

L = Longitud en (m).

A = Área en ( $m^2$ ).

Para todos los casos, se restó la resistencia medida de los cables utilizados para las mediciones como se muestra en los siguientes casos:

- Para las mediciones de la probeta proyectada térmicamente, la resistencia que se restó es de 0.4323 [ $\Omega$ ] correspondientes a los alambres delgados de cobre + cables banana-caimán.
- Para la medición de la barra de aleación Cobre-Aluminio sin proyectar, la resistencia que se restó es de 0.239 [ $\Omega$ ] correspondientes a los cables banana-caimán.

### 3.3.1. Cálculos

Probeta acero bajo carbono proyectada térmicamente sección acero-aleación.

Distancia entre puntos de soldadura 5.78 [mm] = 0.00578 [m]

Radio de la probeta 6.45 [mm] = 0.00645 [m]

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Donde } A = \pi \cdot r^2 \quad \text{Despejando } \rho$$

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{(3.347 - 0.423)[\Omega] \cdot (\pi \cdot 0.00645^2)[m^2]}{0.00578[m]} = 0.06611 [\Omega \cdot m]$$

Probeta acero bajo carbono proyectada térmicamente sección aleación.

Distancia entre puntos de soldadura 2.66 [mm] = 0.00266 [m]

Radio de la probeta 6.45 [mm] = 0.00645 [m]

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Donde } A = \pi \cdot r^2 \quad \text{Despejando } \rho$$

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{(0.993-0.423)[\Omega] \cdot (\pi \cdot 0.00645^2)[m^2]}{0.00266[m]} = 0.0280 [\Omega \cdot m]$$

Barra de aleación Cobre-Aluminio sin proyectar.

Distancia entre puntos de análisis 137 [mm] = 0.137 [m]

Radio de la barra 1.59 [mm] = 0.00159 [m]

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Donde } A = \pi \cdot r^2 \quad \text{Despejando } \rho$$

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{(0.259-0.239)[\Omega] \cdot (\pi \cdot 0.00159^2)[m^2]}{0.137[m]} = 1.1594 \times 10^{-6} [\Omega \cdot m]$$

Quedando la resistividad calculada como se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados resistividad.

Material	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
Barra delgada Cobre-Aluminio sin proyectar	$1.1594 \times 10^{-6}$
Probeta proyectada térmicamente sección acero – aleación (Cobre-Aluminio)	$66.11 \times 10^{-3}$
Probeta proyectada térmicamente sección aleación (Cobre-Aluminio)	$28 \times 10^{-3}$

Podemos observar que el material sin proyectar tiene una resistividad calculada mucho menor que la sección proyectada térmicamente, probablemente por el exceso de porosidades y óxidos generados durante el proceso de proyección térmica, por lo que la conductividad calculada será mucho mayor en la barra sin proyectar que en la probeta proyectada.

La conductividad se calculó como el inverso de la resistividad, los resultados se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados Conductividad.

Material	Conductividad ( $1/\Omega \cdot m$ )
Barra delgada Cobre-Aluminio sin proyectar	$86.251 \times 10^4$
Probeta proyectada térmicamente sección acero – aleación (Cobre-Aluminio)	$0.151 \times 10^2$
Probeta proyectada térmicamente sección aleación (Cobre-Aluminio)	$0.357 \times 10^2$

### 3.4. RESULTADOS PRUEBAS DE ELECTROEROSIÓN

Inicialmente se realizó una ronda de 3 pruebas para cobre electrolítico y 3 pruebas para la probeta de acero recubierto mediante proyección térmica, con un valor de penetración de 1 [mm] sobre la barra de acero de pruebas.

Al finalizar cada prueba en la electroerosionadora se restauró el electrodo utilizado, tanto el de cobre electrolítico como el electrodo de acero recubierto, retirando la parte desgastada y puliendo nuevamente hasta obtener acabado espejo en la superficie, así mismo después de cada proceso se analizó el tiempo de maquinado, pérdida de masa de los electrodos y la rugosidad promedio final.

La rugosidad promedio final (Rugosidad obtenida al finalizar la electroerosión), se midió con el equipo rugosímetro modelo SJ-310 de la marca Mitutoyo ubicado en laboratorio de materiales y superficies del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) ubicado en Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM., Donde se realizaron 3 mediciones para cada huella, mostrando la rugosidad promedio para cada prueba.

Se repitió 2 veces más dicho proceso con electrodo de cobre electrolítico y electrodo recubierto, variando los parámetros de la maquina electroerosionadora, considerando para todas las pruebas los 3 primeros valores de tablas activando dos transistores y como variable el tiempo de duración de la descarga, la cual quedo como 5,10 y 20 [ $\mu$ s], dichos valores, se mostraron en la tabla 2.2.

Las primeras tres pruebas realizadas para el electrodo recubierto mediante proyección térmica se llevaron a cabo con los siguientes valores de tablas:

Tiempo de duración de la descarga:  $T_{on} = 10[\mu s]$

Duración de la pausa:  $DT = 65$

Transistores utilizados:  $TS = 2$

Penetración máxima:  $Z_{max} = 1[mm]$

Los resultados para las pruebas de electroerosión son los siguientes:

VALORES	PRUEBA 1	PRUEBA2	PRUEBA 3
Masa inicial [g]	51.6651	52.1671	51.1278
Masa final [g]	51.1578	51.6838	50.6029
Rugosidad [ $\mu m$ ] Promedio	4.671	4.241	4.577
Pérdida de masa [g]	0.5073	0.4833	0.5249
Tiempo de maquinado [min]	44.79	38.25	50.22

Rugosidad promedio final =  $4.496 [\mu m]$

Pérdida de masa promedio =  $0.5051 [g]$

Tiempo de maquinado promedio =  $44.42 [min]$

La primera ronda de trabajo para electrodo de cobre electrolítico se llevó acabo con los siguientes valores de tablas:

Ton = 10[ $\mu$ s]

DT = 65

TS = 2

Zmax = 1 [mm]

Los resultados para las pruebas de electroerosión son los siguientes:

VALORES	PRUEBA 1	PRUEBA2	PRUEBA 3
Masa inicial [g]	29.2540	28.9728	28.4428
Masa final [g]	29.0794	28.7905	28.2632
Rugosidad [ $\mu$ m] Medida	4.814	6.266	4.947
Diferencia de masa [g]	0.1746	0.1823	0.1796
Tiempo maquina [min]	40.06	40.96	40.51

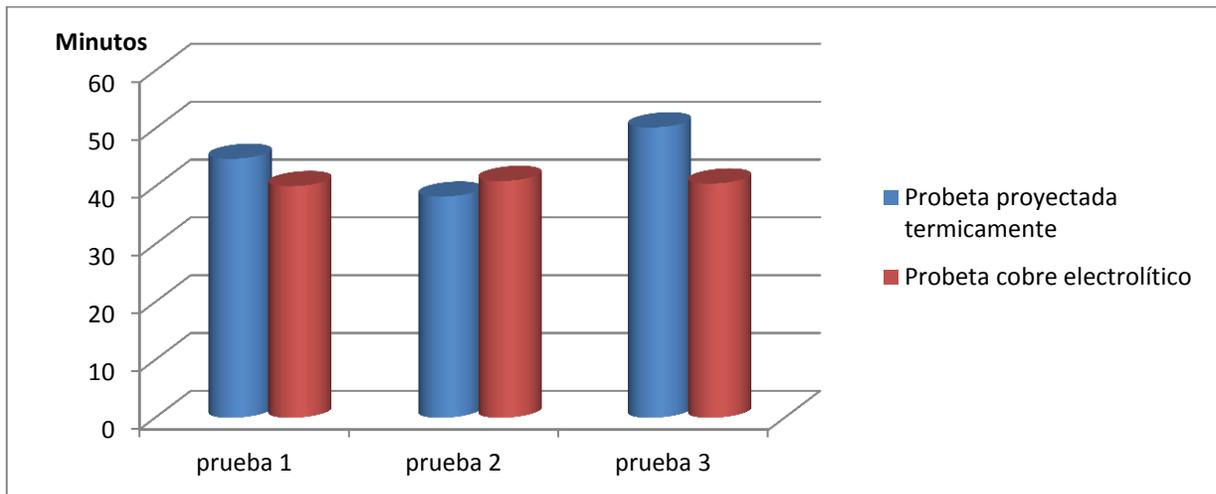
Rugosidad promedio final= 5.342 [ $\mu$ m]

Diferencia de masa promedio = 0.1788 [g]

Tiempo de maquinado promedio = 40.51 [min]

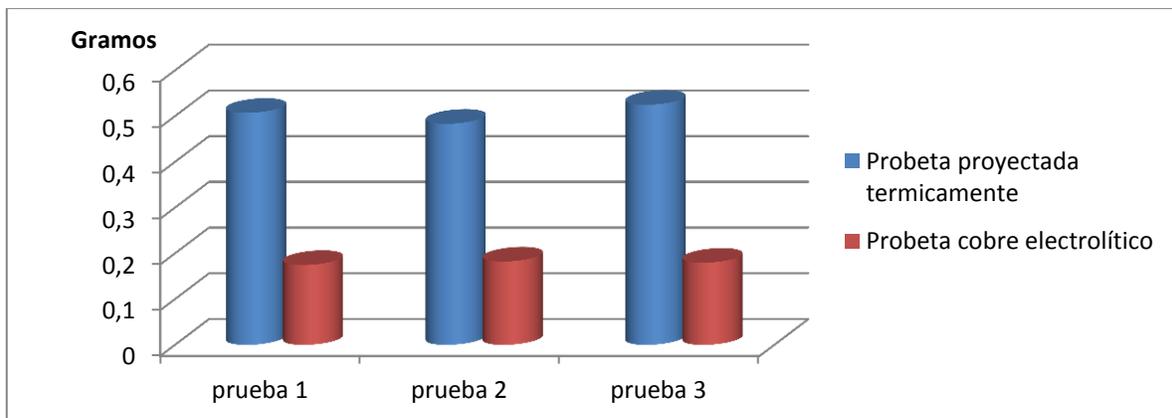
La Gráfica 3.1. Muestra una comparativa de la primera ronda de trabajo en cuanto al tiempo maquina requerido para electroerosión entre la probeta recubierta mediante proyección térmica y la probeta elaborada de cobre electrolítico, se observa que para los valores utilizados en la electroerosionadora, el tiempo maquina es relativamente parecido.

Gráfica 3.1. Comparativa Tiempo de electroerosión en minutos.



La Gráfica 3.2. Muestra una comparativa de la primera ronda de trabajo en cuanto a la pérdida de masa durante el proceso de electroerosión entre la probeta recubierta mediante proyección térmica y la probeta elaborada de cobre electrolítico, mostrando que la probeta proyectada térmicamente tiene un mayor desgaste durante el proceso de electroerosión.

Gráfica 3.2. Comparativa pérdida de masa después de electroerosión en gramos.



En la segunda ronda de trabajo para el electrodo recubierto mediante proyección térmica se consideraron los siguientes valores de tablas:

$T_{on} = 20 \text{ } [\mu\text{s}]$

$DT = 76$

$TS = 2$

$Z_{max} = 0.2 \text{ } [\text{mm}]$

Los resultados para las pruebas de electroerosión son los siguientes:

VALORES	PRUEBA 1	PRUEBA2	PRUEBA 3
Masa inicial [g]	52.5657	52.4245	52.2687
Masa final [g]	52.4528	52.2954	52.1528
Rugosidad [ $\mu\text{m}$ ] promedio medida	3.976	4.521	3.956
Pérdida de masa [g]	0.1129	0.1291	0.1159
Tiempo de maquinado [min]	9.17	8.72	8.51

Rugosidad promedio final = 4.151 [ $\mu\text{m}$ ]

Pérdida de masa promedio = 0.1193 [g]

Tiempo de maquinado promedio = 8.80 [min]

La segunda ronda de trabajo para electrodo de cobre electrolítico se llevó acabo con los siguientes valores de tablas:

Ton = 20[ $\mu$ s]

DT = 76

TS = 2

Zmax = 0.2 [mm]

Los resultados para las pruebas de electroerosión son los siguientes:

VALORES	PRUEBA 1	PRUEBA2	PRUEBA 3
Masa inicial [g]	54.7585	28.1865	28.1370
Masa final [g]	54.7388	28.1620	28.1166
Rugosidad [ $\mu$ m] Medida	4.200	4.334	4.098
Diferencia de masa [g]	0.0197	0.0245	0.0204
Tiempo maquina [min]	4.37	5.13	5.54

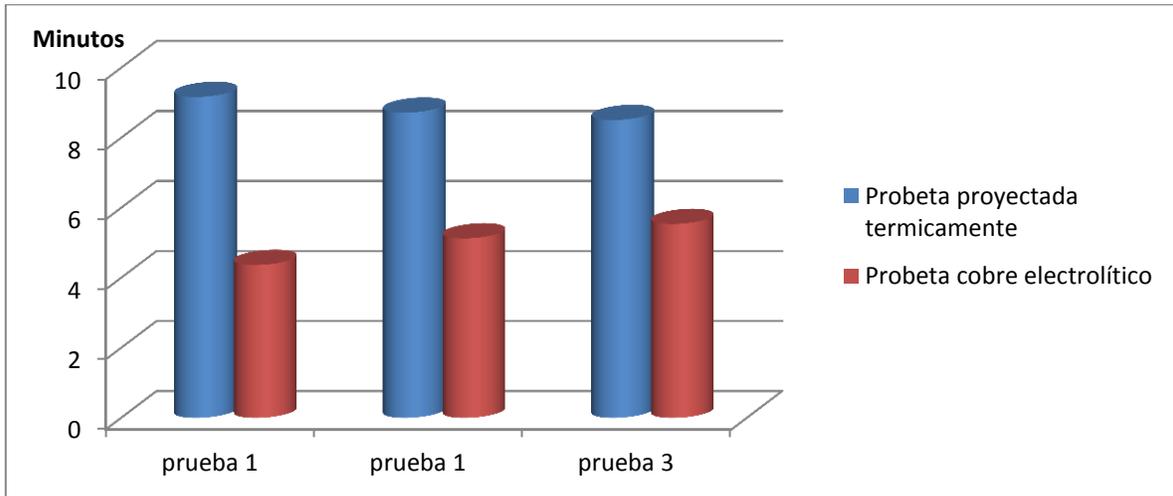
Rugosidad promedio final= 4.210 [ $\mu$ m]

Diferencia de masa promedio = 0.021 [g]

Tiempo de maquinado promedio = 5.01 [min]

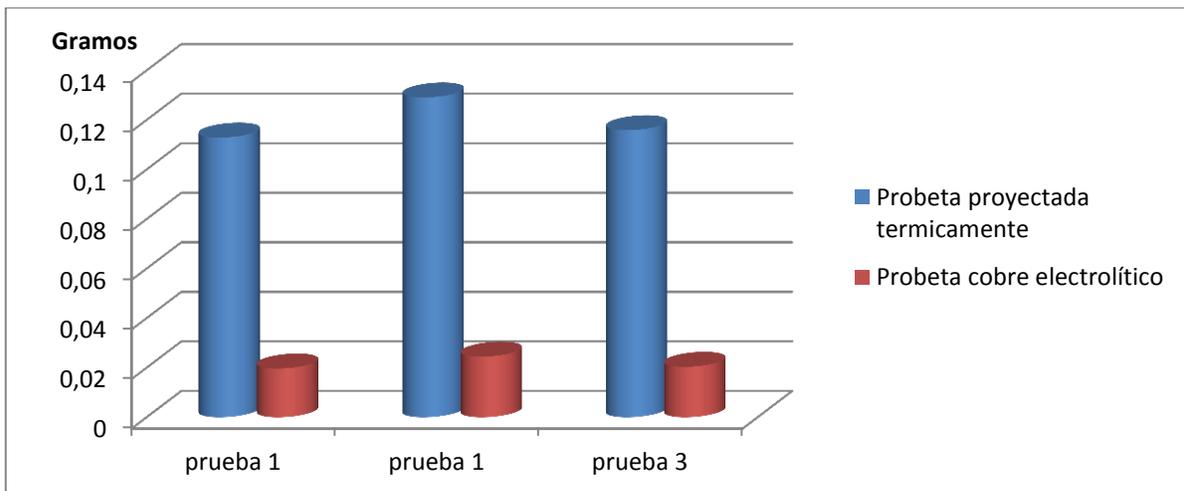
La Gráfica 3.3. Muestra una comparativa de la segunda ronda de trabajo en cuanto al tiempo maquina requerido para electroerosión entre la probeta recubierta mediante proyección térmica y la probeta elaborada de cobre electrolítico, se observa que para los valores utilizados en la electroerosionadora, el tiempo maquina es mayor para la probeta proyectada térmicamente.

Gráfica 3.3. Comparativa Tiempo de electroerosión en minutos.



La Gráfica 3.4. Muestra una comparativa de la segunda ronda de trabajo en cuanto a la pérdida de masa durante el proceso de electroerosión mostrando que la probeta proyectada térmicamente tiene un mayor desgaste durante el proceso de electroerosión.

Gráfica 3.4. Comparativa pérdida de masa después de electroerosión en gramos.



En la tercera ronda de trabajo se realizaron tres pruebas para el electrodo recubierto mediante proyección térmica. Se consideraron los siguientes valores de tablas:

$T_{on} = 5 \text{ } [\mu\text{s}]$

$DT = 48$

$TS = 2$

$Z_{max} = 0.2 \text{ } [\text{mm}]$

Los resultados para las pruebas de electroerosión son los siguientes:

VALORES	PRUEBA 1	PRUEBA2	PRUEBA 3
Masa inicial [g]	53.9047	53.5710	53.4645
Masa final [g]	53.7993	53.4953	53.3528
Rugosidad [ $\mu\text{m}$ ] Promedio	3.190	3.088	3.533
Pérdida de masa [g]	0.1054	0.0757	0.1117
Tiempo de maquinado [min]	5.16	3.87	5.05

Rugosidad promedio final =  $3.270 \text{ } [\mu\text{m}]$

Pérdida de masa promedio =  $0.0976 \text{ } [\text{g}]$

Tiempo de maquinado promedio =  $4.69 \text{ } [\text{min}]$

La tercera ronda de trabajo para electrodo de cobre electrolítico se llevó acabo con los siguientes valores de tablas:

Ton = 5 [μs]

DT = 48

TS = 2

Zmax = 0.2 [mm]

Los resultados para las pruebas de electroerosión son los siguientes:

VALORES	PRUEBA 1	PRUEBA2	PRUEBA 3
Masa inicial [g]	54.4221	54.3162	28.0134
Masa final [g]	54.3911	54.2545	27.9585
Rugosidad [μm] promedio medida	3.456	3.145	3.021
Diferencia de masa [g]	0.0310	0.0617	0.0549
Tiempo maquina [min]	12.46	13.03	12.51

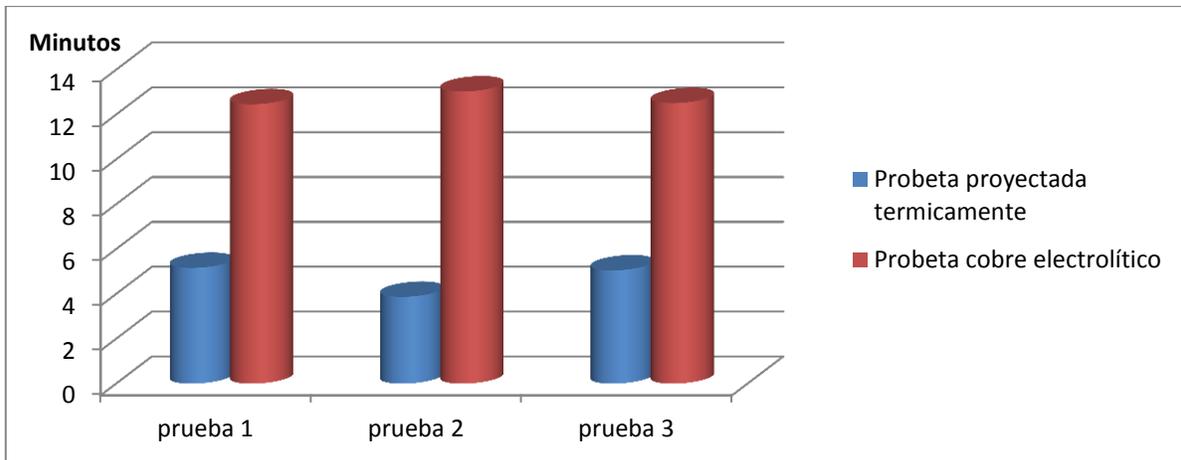
Rugosidad promedio final= 3.207 [μm]

Diferencia de masa promedio = 0.0492 [g]

Tiempo de maquinado promedio = 12.66 [min]

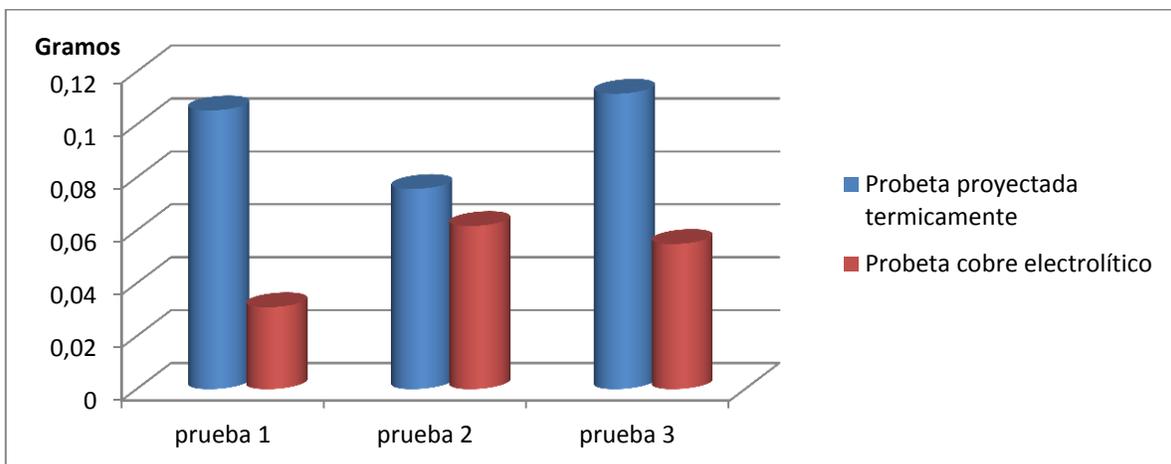
La Gráfica 3.5. Muestra una comparativa para la tercera ronda de trabajo en cuanto al tiempo maquina requerido para electroerosión entre la probeta recubierta mediante proyección térmica y la probeta elaborada de cobre electrolítico se observa que para los valores utilizados en la electroerosionadora, el tiempo maquina es menor para la probeta proyectada térmicamente.

Gráfica 3.5. Comparativa Tiempo de electroerosión en minutos.



La Gráfica 3.6. Muestra una comparativa para la tercera ronda de trabajo en cuanto a la pérdida de masa durante el proceso de electroerosión entre la probeta recubierta mediante proyección térmica y la probeta elaborada de cobre electrolítico mostrando que para todas las pruebas, existe una mayor pérdida de masa en la probeta proyectada térmicamente.

Gráfica 3.6. Comparativa pérdida de masa después de electroerosión en gramos.



### 3.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Se analizó la superficie de las probetas recubiertas con la aleación cobre-aluminio en el microscopio electrónico de barrido SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscopy), donde se observó la superficie de dichas probetas antes y después de ser sometidas al proceso de electroerosión.

La Fig. 3.4 muestra la superficie frontal del recubrimiento, en el cual al ser proyectado térmicamente se genera un exceso de porosidades las cuales llegan a medir hasta 250 micras en nuestros electrodos.

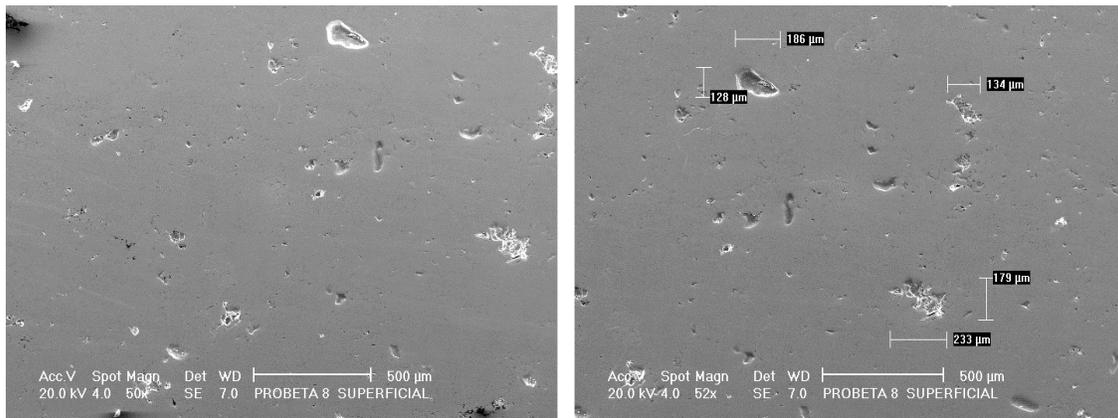


Fig. 3.4. Se destaca la presencia de porosidad en la superficie frontal del recubrimiento.

La Fig. 3.5 y 3.6 muestran la superficie lateral de los electrodos en la unión entre el recubrimiento y el sustrato antes de ser sometidos a las pruebas de electroerosión, comparando un electrodo precalentado a 150[°C] de uno proyectado térmicamente sin precalentar.

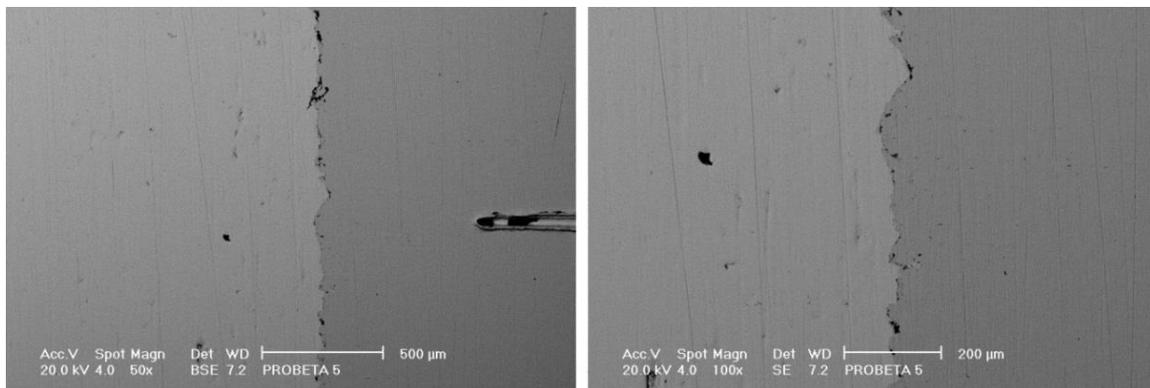
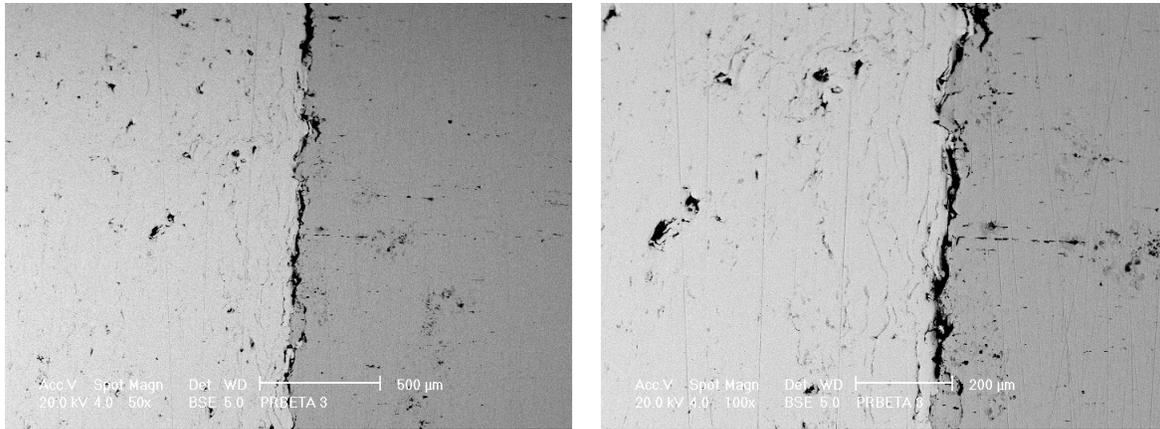


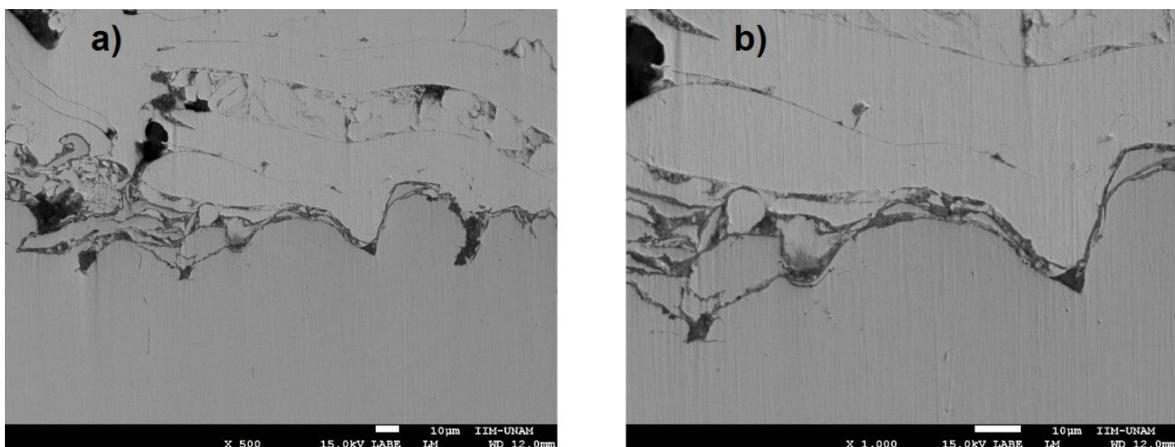
Fig. 3.5. Se observa la distribución de fases perfectamente delimitada dividiendo sustrato y recubrimiento en la probeta con precalentamiento a 150[°C]



**Fig. 3.6.** Se observa la distribución de fases perfectamente delimitada dividiendo sustrato y recubrimiento en la probeta sin precalentamiento.

De las imágenes anteriores se puede observar una mejor unión mecánica en los electrodos precalentados al tener una menor separación entre el recubrimiento y el sustrato, lo cual supone la eliminación de residuos de humedad con el precalentamiento, mejorando la calidad del recubrimiento y por ende una mayor y mejor adherencia.

Se analizaron las probetas después del proceso de electroerosión, en donde se seccionó la probeta para poder observar la superficie lateral, La Fig. 3.7 y Fig. 3.8 muestran la unión entre el sustrato y el recubrimiento.



**Fig. 3.7.** Microscopía electrónica de barrido a) Aumento 500X b) aumento 1000X.

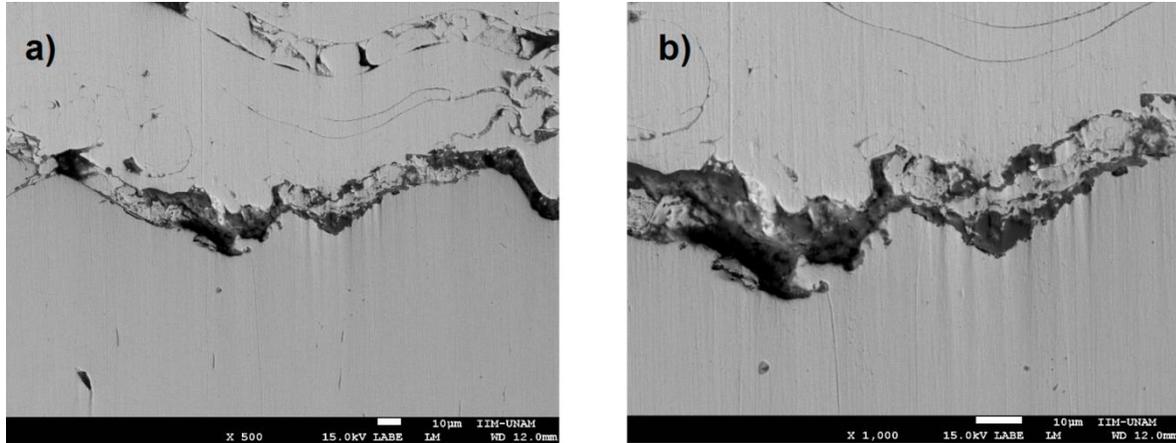


Fig. 3.8. Microscopía electrónica de barrido a) Aumento 500X b) aumento 1000X.

De las imágenes anteriores se puede observar la unión entre el recubrimiento y el sustrato, mostrando un cambio en la estructura al ser sometidos los electrodos al proceso de electroerosión donde las pequeñas porosidades generadas durante la proyección térmica se convierten en fuente de microdescargas, generando una franja donde hay una mezcla de materiales en la unión lo cual actúa en beneficio de las probetas recubiertas aportando una mayor adherencia entre el recubrimiento y el sustrato.

### 3.5.1. Análisis por EDS.

08/05/2017 12:40:46

Spectrum processing:

No peaks omitted

Processing option: All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

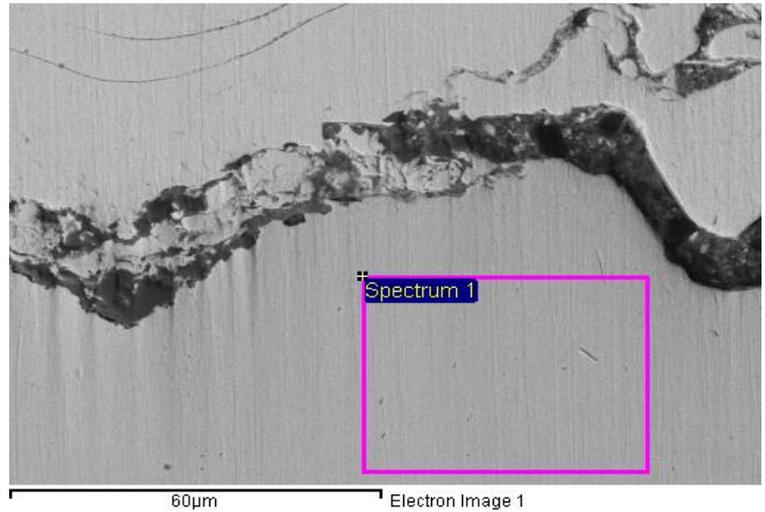
Standard:

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

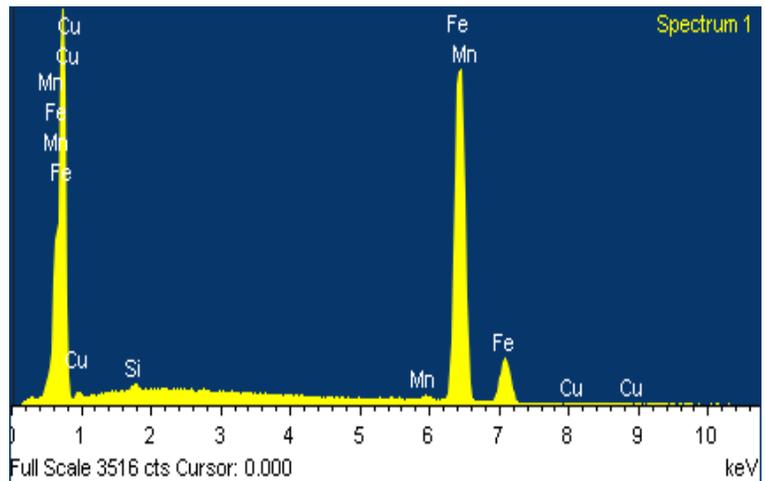
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	Weight%	Atomic%
Si K	0.35	0.70
Mn K	0.87	0.88
Fe K	96.04	96.01
Cu L	2.74	2.41
Totals	100.00	



Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.255, 5.840 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

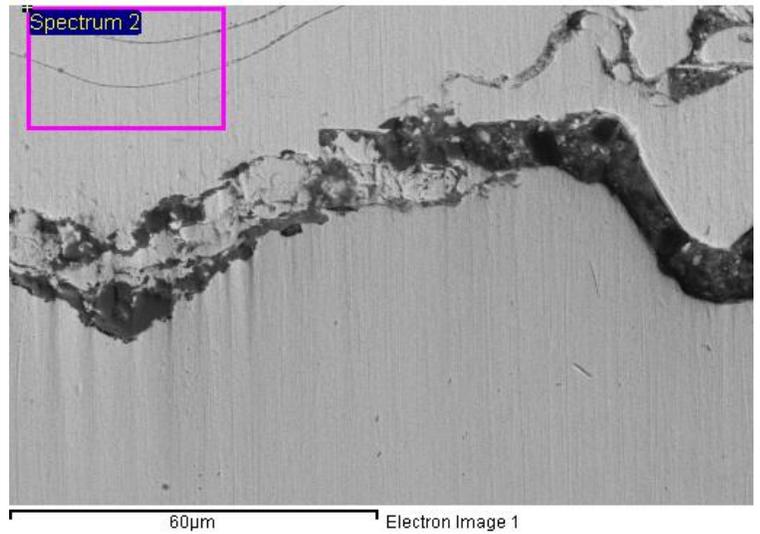
Standard :

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

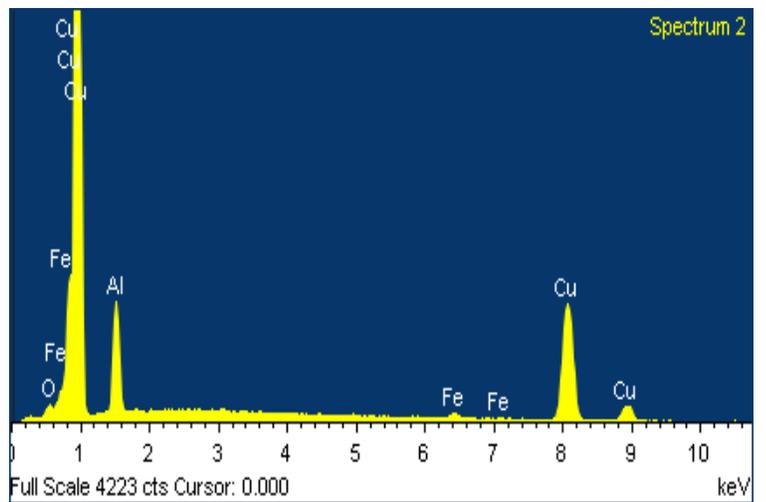
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	Weight%	Atomic%
O K	0.91	3.16
Al K	8.24	17.02
Fe K	1.44	1.44
Cu L	89.41	78.38
Totals	100.00	

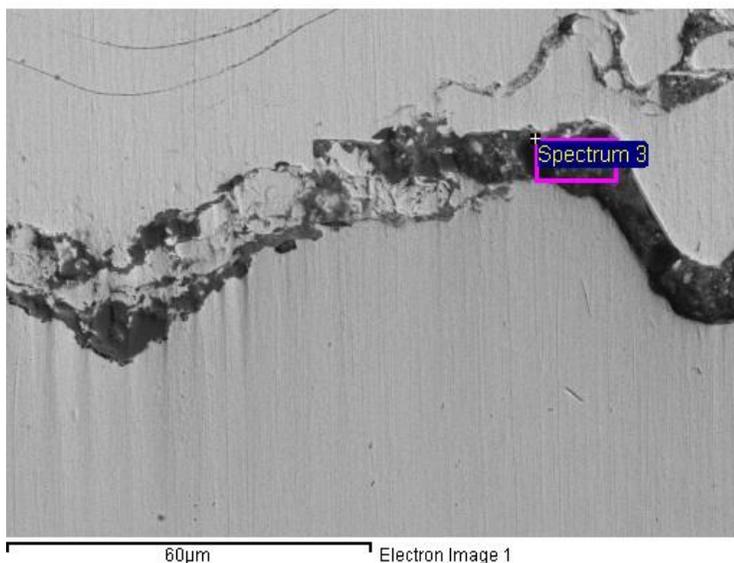


Spectrum processing :  
No peaks omitted

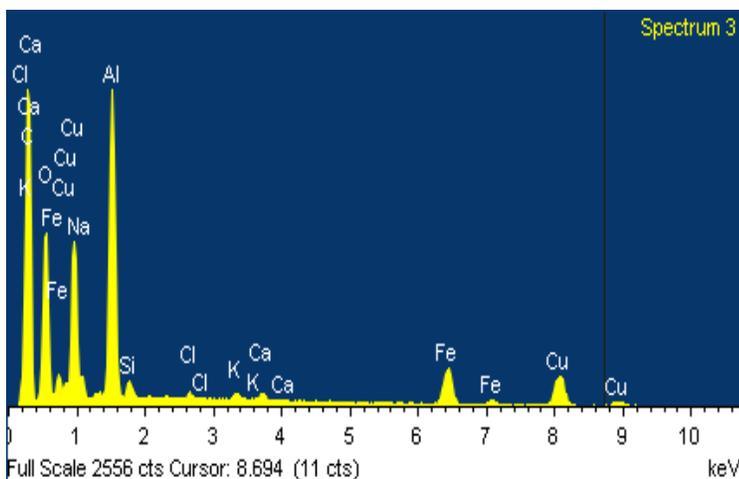
Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 6

Standard :

- C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
- O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
- Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
- Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
- Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
- Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM
- K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM
- Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
- Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
- Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	Weight%	Atomic%
CK	38.17	57.79
OK	22.49	25.56
NaK	1.07	0.85
AlK	10.47	7.05
SiK	0.66	0.43
ClK	0.30	0.15
KK	0.37	0.17
CaK	0.49	0.22
FeK	8.61	2.80
CuL	17.37	4.97
Totals	100.00	



Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

C CaCO<sub>3</sub> 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO<sub>2</sub> 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1-Jun-1999 12:00 AM

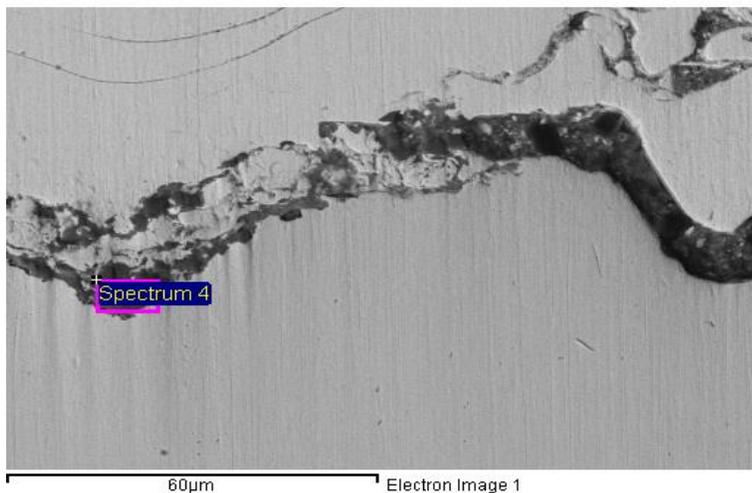
Si SiO<sub>2</sub> 1-Jun-1999 12:00 AM

P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM

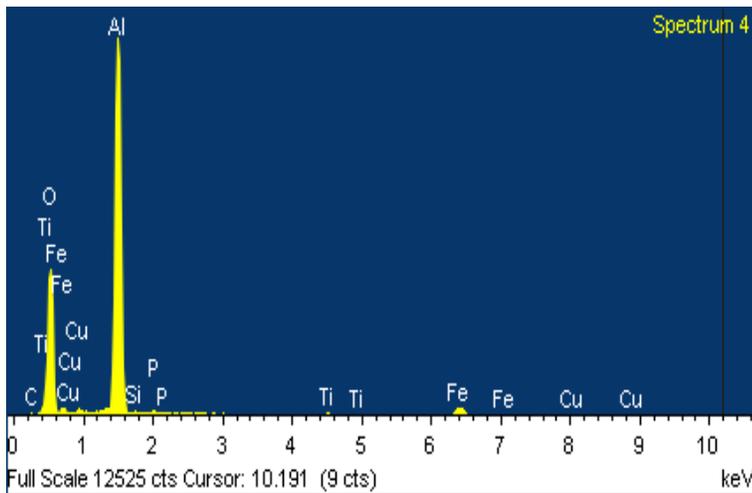
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	Weight%	Atomic%
CK	1.36	2.37
OK	46.10	60.42
AlK	42.87	33.31
SiK	0.40	0.30
PK	0.55	0.37
TiK	0.49	0.21
FeK	6.58	2.47
CuL	1.64	0.54
Totals	100.00	



Spectrum processing :

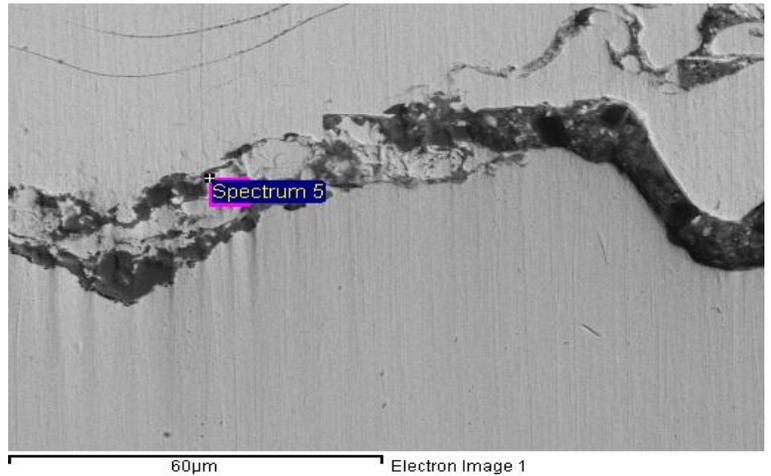
Peak possibly omitted : 3.320 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

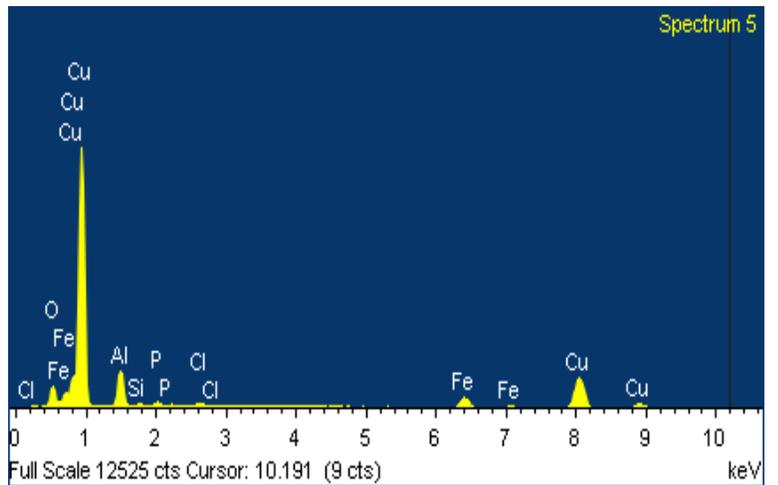
Number of iterations = 4

Standard :

- O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
- Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
- Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
- P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM
- Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM
- Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
- Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	Weight%	Atomic%
O K	6.29	19.03
Al K	7.36	13.21
Si K	0.32	0.56
P K	0.74	1.16
Cl K	0.31	0.42
Fe K	8.19	7.10
Cu L	76.79	58.52
Totals	100.00	



En el análisis por EDS se observan las secciones analizadas de la probeta recubierta mediante proyección térmica, mostrando como sustrato un acero de bajo carbono, el recubrimiento una aleación cobre-aluminio proyectada térmicamente y la unión mecánica.

Se observa la unión mecánica después del proceso de electroerosión en donde se muestran los elementos presentes siendo una sección fundida entre el sustrato y el recubrimiento la cual es generada por microarcos eléctricos durante la electroerosión, la sección fundida en la unión no afectan el proceso de electroerosión.

Así mismo se observa que la sección proyectada térmicamente (aleación cobre-aluminio) contiene 89.41% Cu y 8.24% Al y otros elementos siendo este un bronce aluminizado con óxidos y porosidades generados durante la proyección térmica.

## CONCLUSIONES

En el proceso de granallado, se obtuvo en las probetas analizadas una rugosidad promedio de 9.562 [ $\mu\text{m}$ ], y en las pruebas de adherencia se obtuvo el valor máximo al que se desprendió el adhesivo del recubrimiento de 10.5 [MPa], por lo que la adherencia entre el recubrimiento y el sustrato es mayor. Dichos resultados muestran la relación que existe entre la preparación de la superficie mediante granallado para la obtención de rugosidad y una buena adherencia entre el sustrato y el recubrimiento.

En cuanto a la resistividad calculada, en la aleación Cu-Al antes de ser proyectada térmicamente es mucho menor que en el material después de ser proyectado térmicamente probablemente por la generación de porosidades e inclusiones de óxidos durante el proceso, y considerando como un solo elemento el sustrato y recubrimiento, la resistividad es más del doble que únicamente el material proyectado, pero mostrando que es viable su uso para su uso como electrodos.

En el proceso de electroerosión se muestra que para los parámetros utilizados en la electroerosionadora ( $T_{on} = 5$  [ $\mu\text{s}$ ],  $DT = 48$ ,  $TS = 2$  y  $Z_{max} = 0.2$  [mm]) el tiempo máquina es menor para la probeta proyectada térmicamente en comparación con la probeta maquinada en cobre electrolítico, lo cual puede considerarse como una ventaja al utilizar el recubrimiento con un flujo de corriente bajo y dando pauta a próximas investigaciones haciendo viable la utilización de electrodos recubiertos mediante proyección térmica con alimentación de alambre para el proceso de electroerosión por penetración.

Los resultados observados mediante microscopía electrónica de barrido, mostraron pequeñas secciones porosas generadas entre el sustrato y el

recubrimiento después de la proyección térmica, en las cuales se generaron micro-arcos eléctricos durante el proceso de electroerosión fundiendo ambos materiales a escales microscópicas en dichas secciones, situación que hace imperativo una mayor investigación en el área con miras a la mejora del proceso.

Se propone para futuras investigaciones la evaluación y análisis de electrodos de mayor tamaño proyectados térmicamente con la aleación Cu-Al, así como su estudio en el proceso de electroerosión por penetración ampliando el conocimiento y consiguiendo parámetros propios de la aleación Cu-Al como lo son: acabado superficial de la huella, desgaste del electrodo en porcentaje, y tiempo de maquinado

# ANEXO 1 PARÁMETROS PARA EL EQUIPO DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR CONSUMO DE ALAMBRE [17].



PARAMETROS PARA LA PISTOLA DE METALIZADO SPRAY JET-96

Código de Alambre	Metal	Refacciones recomendadas			Presión de Encendido			Lectura de Flujómetro de Gases		Consumo por Hora			Alambre Requerido por Recubrimiento (Kg por cm <sup>2</sup> )	Velocidad de Depósito (cm <sup>2</sup> / hr)
		Tamaño de Boquilla y Alambre (mm)	Casquete de Aire	Engranes	Oxígeno (Kg/cm <sup>2</sup> )	Acetileno (Kg/cm <sup>2</sup> )	Aire (Kg/cm <sup>2</sup> )	Oxígeno	Acetileno	Alambre (Kg)	Oxígeno (m <sup>3</sup> )	Acetileno (m <sup>3</sup> )		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Aluminio	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	43	40	5.4	2.3	1.1	0.0028	1966
7 10053 (04T)	Babbit	3.17 (1/8")	EC	HIGH	2.41 2.07	1.03	4.83	28 29	28 29	41 18	1.4 1.2	1.1	0.0097	4179 1965
	Latón	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	10.9	2.4	1.1	0.0097	1147
	Molibdeno	3.17 (1/8")	EC	STD	2.41	1.03	4.83	50	35	3.4	2.7	0.85	0.011	328
7 10151 (10T)	Bronce Aluminizado	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	6.8	2.4	1.1	0.0097	705
CAC-05T	Cobre	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	10.9	2.4	1.1	0.0097	1147
SS#2 y SS#5	Acero Inoxidable	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	5.9	2.4	1.1	0.0099	656
	Monel	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	6.8	2.4	1.1	0.0097	696
	Níquel Puro	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	4.5	2.4	1.1	0.0097	492
	Acero al Carbón	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	46	43	5.9	2.5	0.91	0.0083	737
	Estañio Puro	3.17 (1/8")	EC	HIGH	2.07	1.03	4.83	42	29	43.1	2.3	0.71	0.0097	6309
P-8515 (02A)	Zinc 85 Aluminio 15	3.17 (1/8")	EC	HIGH	2.07	1.03	4.83	46	40 42	14.5 20.4	2.4	1.1	0.0097	1475 2130
Brondite (79B)	Níquel Aluminio (Brondite)	3.17 (1/8")	C	STD	2.07	1.03	4.83	44	39	2.3	2.4	1.4	0.0083	262

NOTAS:

Un cm<sup>2</sup> de recubrimiento equivale a:

- a) 100 cm<sup>2</sup> de superficie con 100 micrones de espesor (0.1 mm)
- b) 1000 cm<sup>2</sup> de superficie con 10 micrones de espesor (0.01mm)
- c) 40cm<sup>2</sup> de superficie con 250 micrones de espesor (0.25 00)

Para calcular la velocidad de recubrimiento en cm<sup>2</sup> / hr se deberán dividir los datos de la última columna por el espesor en cm que se desea.

## ANEXO 2 PARÁMETROS PARA EL EQUIPO DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR CONSUMO DE ALAMBRE PLASMA POWDERS & SYSTEMS [18].

**SPRAYING TABLE – METRIC SYSTEM - Acetylene Jetted Hardware**

METAL	Recommended Hardware (Note 1)			Lighting Pressure Settings (bar)			Flow meter reading			Consumption per hour (Note 4)			Kgs/wire Req. per CM <sup>3</sup> of coating	Deposited coating build-up speed (CM <sup>3</sup> /Hr) Notes 4 & 5
	Noz. Wire Size	Air cap size	Grains	Oxy note 2	Acet note 2	Air Notes 2 & 3	Oxy note 2	Acet note 2	Air Notes 2 & 3	Kg. Wire	Mi. Oxy	Mi. Acet		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Aluminum (note 7)	3/16	EA	Std	2.28	1.03	4.83	48	48	51	7.3	2.7	1.4	.0028	2622
	1/8	EC		2.07	1.03	4.83	43	40	52	5.4	2.3	1.1		1966
	11	J		1.72	1.03	4.14	33	33	48	2.5	1.7	.85		901
	15	M		1.72	1.03	4.14	24	24	45	0.9	1.2	.62		328
Aluminum Bronze	3/16	EA	Std	2.28	1.03	4.83	48	48	53	8.6	2.7	1.4	.0097	901
	1/8	EC		2.07	1.03	4.83	44	40	52	6.8	2.4	1.1		705
	11	J		2.07	1.03	4.18	38	28	46	3.4	1.7	.85		344
Babbitt	3/16	EA	Std	2.07	1.03	4.83	38	48	53	43.0	1.8	1.1	.0097	4425
	1/8	EC		2.07	1.03	4.48	29	29	53	18.0	1.2	.71		1885
	3/16	EA	High	2.41	1.03	4.83	43	55	53	84.0	2.4	1.7		8685
	1/8	EC		2.41	1.03	4.48	28	41	53	41.0	1.4	1.1		4179
<b>BONDRITE</b> ™	1/8	EC	Std	2.07	1.03	4.83	44	39	52	2.3	2.4	1.4	.0083	262
Copper	3/16	EA	Std	2.28	1.03	4.83	48	48	53	13.6	2.7	1.4	.0097	1393
	1/8	EC		2.07	1.03	4.83	44	40	52	10.9	2.4	1.1		1147
	11	J		1.72	1.03	4.14	33	30	46	4.5	1.7	.85		475
	15	M		1.72	1.03	4.14	24	24	43	2.7	1.2	.62		279
Stainless (1 thru 5)	3/16	EA	Std	2.28	1.03	4.83	48	45	53	7.3	2.8	1.3	.0089	819
	1/8	EC		2.07	1.03	4.83	44	40	50	5.9	2.4	1.1		656
	11	J		1.72	1.03	4.14	33	30	48	3.4	1.7	.85		410
Zinc	3/16	EA	Std	2.28	1.03	4.83	48	45	51	29.5	2.7	1.3	.0097	3032
	1/8	EC		2.07	1.03	4.83	45	40	53	14.5	2.4	1.1		1475
	1/8	EC		2.07	1.03	4.83	45	42	53	20.4	2.4	1.1		2130
	11	J	High	1.72	1.03	4.14	33	30	48	9.1	1.6	.85		902
	15	M	1.72	1.03	4.14	24	24	43	5.4	1.2	.62	574		

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Cabuto, J. (2011). Generación de electrodos para el proceso de electroerosión mediante la técnica de proyección térmica. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- [2]. Davis, J. R. & Associates. (2004). Handbook of Thermal Spray Technology. USA: ASM International.
- [3]. Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. México: Pearson Educación.
- [4]. Thermal Spraying, de OSAKA FUJI Corporation. Sitio web:  
[http://www.ofic.co.jp/en/r\\_and\\_d/thermalspraying/](http://www.ofic.co.jp/en/r_and_d/thermalspraying/)
- [5]. Pawlowski, L. (2008). The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Second Edition. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- [6]. Presentación sobre proyección térmica, de TMCOMAS. Sitio web:  
<http://es.slideshare.net/TMCOMAS/tmcomas-proyeccion-trmica-55464905>
- [7]. Albella, J. (2003). Láminas delgadas y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [8]. Thermal Spraying, de LINSPRAY®. Sitio web:  
[http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/LINSPRAY%20proyec%20ci%C3%B3n%20t%C3%A9rmica%20de%20superficies%2013049-0207316\\_60056.PDF](http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/LINSPRAY%20proyec%20ci%C3%B3n%20t%C3%A9rmica%20de%20superficies%2013049-0207316_60056.PDF)
- [9]. Camprubí, A. (2007). Electro-erosión: Fundamentos de su Física y su Técnica. Barcelona: Marcombo Ediciones Técnicas.

- [10]. Mecanizado por electroerosión, de demaquinasyherramientas.com  
Sitio web:  
<http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/mecanizado-por-electroerosion>.
- [11]. Groover, M. (1997). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas Primera Edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- [12]. Coridón marrón (Óxido de aluminio), de mpa Tecnología para limpieza y tratamiento de superficies. Sitio web:  
[http://www.mpa.es/sites/default/files/img/mpa\\_corindon\\_marron\\_01.jpg](http://www.mpa.es/sites/default/files/img/mpa_corindon_marron_01.jpg)
- [13]. Pistola para sandblast mod.GONI357, de INFER Goni. Sitio web:  
<http://www.infer.com.mx/producto/goni-goni357-pistola-para-sandblast/>
- [14]. Mini Termómetro infrarrojo de amplio espectro con puntero láser mod. 42510, deExtech Instruments Sitio web:  
<http://www.extech.com.es/instruments/360view.asp?catid=62&prodid=380>
- [15]. Castillo, J., & Tiznado, A. (2015). Caracterización del desgaste y resistencia a la corrosión de un recubrimiento de acero inoxidable proyectado térmicamente. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- [16]. Morán, I., & Ramírez, D. (2010). Caracterización del proceso de rociado térmico de acero inoxidable sobre aceros de bajo contenido de carbono. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- [17]. Resistividad eléctrica, de instalaciones eléctricas fundamentos y diseño. Sitio web: <https://instalacioneselectricas1.wordpress.com/>
- [18]. Plasma Powders & Systems Incorporated (2002). Manual for operation & maintenance of Spray Jet 98.