



**Universidad Nacional Autónoma de México**

---

**Facultad de Ingeniería**

**División de Mecánica**

*“Generación de electrodos para el proceso de electroerosión  
mediante la técnica de proyección térmica.”*

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**INGENIERO MECANICO**

Presenta: José Manuel Cabuto Osuna



DIRECTOR DE TESIS: M.I. EDUARDO GARDUÑO

MÉXICO D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA, 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos:

Saludo con respeto y cariño, a continuación verán un trabajo que me llevó algún tiempo, pero que lo hice con sacrificio, dedicación y una gran ilusión.

He sido un hombre afortunado porque a lo largo de mi vida, en circunstancias alegres y otras complicadas o adversas, el destino me rodeo de personas buenas que me han apoyado, enseñado lo bueno de seguir adelante y nunca retroceder ni para agarrar impulso

Sin embargo nunca, lo hubiera podido terminar, ni siquiera pensar en empezar una licenciatura, sin el apoyo de todos ustedes:

- **Mis padres:** por darme su incansable esfuerzo, comprensión y apoyo en los momentos difíciles.

Quienes les debo algo más que mi vida, ya que estuvieron cuando más los necesitaba, quienes me enseñaron valores y disciplina, me apoyaron y guiaron cuando más lo necesité

Gracias por darme la vida y todo su amor

- **A mi hermano:** por haber nacido, pues tu llegada me cambió la vida, y es que desde pequeño estaba pendiente de mí y fue un buen compañero un amigo con su genio y sus ideas, pero siempre a mi lado
- **A mi familia:** que desde pequeños estuvieron pendiente y me ayudaron a salir adelante en momentos difíciles donde estábamos pasando por un bache difícil de superar
- **A los buenos profesores:** que trataron de enseñarme lo mejor que pudieron con lo que tenían a su alcance y sus experiencias.
- **A mis compañeros:** que siempre estaban para amenizar las clases aburridas, que me ayudaban a cambiar mis tristezas por alguna sonrisa.

A todos ustedes y a muchos más que no pude nombrar porque no acabaría nunca, pero que no los olvido y que siempre los llevaré en el corazón como lo que fueron, unas queridas y grandes personas que nos encontramos en este camino.

A mi Dios que fue en quien deposite toda mi esperanza y fe, y me dio fuerza cuando más la necesitaba en esos momentos difíciles de mi vida

Y a todas las personas que han estado conmigo siempre. Gracias a todos por coincidir en tiempo y espacio.

Gracias.

## *Índice:*

Capítulo 1-	Generalidades del proceso de proyección térmica-----	pág. 9
1.1-	Definición del proceso de proyección térmica -----	pág. 9
1.2-	Clasificación de los procesos de proyección térmica-----	pág. 10
1.3-	Materiales susceptibles para la proyección térmica-----	pág. 11
1.4-	Tratamientos previos al rociado térmico-----	pág. 11
1.5-	Las técnicas de preparación de superficie -----	pág. 12
1.6-	Equipo de granallado-----	pág. 13
Capítulo 2-	Proceso de proyección térmica por flama-----	pág. 17
2.1-	Definición del proceso de proyección por flama y Componentes del equipo de proyección por flama-----	pág. 17
2.2-	Las características beneficios y aplicaciones de los proceso de rociado térmico -----	pág.19
2.3-	Parámetros características y del proceso de rociado térmico por flama -----	pág. 21
2.4-	Propiedades del recubrimiento-----	pág. 22
2.5-	Aplicaciones de los recubrimientos.-----	pág. 25
Capítulo 3-	Equipos auxiliares y materiales de proyección-----	pág. 29
3.1-	Materiales de proyección térmica con polvos- -----	pág. 29
3.1.1	El cobre y sus propiedades-----	pág. 32
3.2-	Gases para proyección térmica-----	pág. 37
3.2.1-	Regulación de la llama oxiacetilénica-----	pág. 39
3.3-	Equipos auxiliares destinados a la proyección en forma convencional-----	pág.41
3.4-	Parámetros de equipos auxiliares contra equipos de proyección-----	pág.42

Capítulo 4- Banco de Pruebas de la elaboración de electrodos de acero recubiertos de cobre-----	pág. 43
4.1- Limpieza y preparación de las probetas-----	pág. 43
4.2- Procedimiento de Integración de equipos auxiliares y de sistema de proyección. -----	pág. 44
4.3- Procedimiento de Semiautomatización del sistema de proyección -- -----	pág. 47
4.4- Obtención de recubrimientos-----	pág. 49
Capítulo 5- Experimentación, análisis y discusión de resultados-----	pág. 50
5.1- Estudios de Metalografía de las piezas (Microscopia óptica y electrónica) -----	pág. 52
5.2- Análisis químico-----	pág. 61
5.3- Ensayos de adhesión y de desgaste-----	pág. 63
5.4- Estudios de conductividad -----	pág. 68
5.5- Tratamientos térmicos después de la proyección-----	pág. 73
5.6- Maquinado y rectificado-----	pág. 75
5.7- Proceso de electroerosión-----	pág. 78
5.8- Resultados-----	pág. 88
Capítulo 6- Trabajos a futuro-----	pág.89
Capítulo 7- Conclusión-----	pág. 90
Capítulo 8- Bibliografía-----	pág. 91
Anexo1- Compresores y Tornos Paralelos -----	pág. 92
Anexo2- Procedimiento previo para microscopia -----	pág. 96
Anexo3- Electricidad -----	pág. 99
Anexo4- Tratamientos Térmicos.-----	pág. 104
Anexo5- Electroerosión -----	pág. 107
Anexo6 ficha técnica del cobre (Metco 55) -----	pág. 112

## Introducción:

El presente trabajo se basa en un proyecto en el cual se busca generar un proceso para elaborar electrodos para el proceso de electroerosión mediante la técnica de proyección térmica. Esto de manera más clara a continuación se explicará

**TITULO:** “Generación de electrodos para el proceso de electroerosión mediante la técnica de proyección térmica por flama.”

**ANTECEDENTES:** Existen diversos procesos de proyección térmica cada uno con sus ventajas, costos y alcances en cuanto lo que se requiera en diversas aéreas de la ingeniería como también aéreas a fines, mejorando o produciendo. Cada uno nos ofrece un gran número de ventajas en cuanto a recubrir y mejorar sus diversas propiedades. Los procesos más conocidos son:

- 1-Por flama con polvo o alambre
- 2-cool spray
- 3-arco eléctrico
- 4-Plasma
- 5-hvof

Se han alcanzado diversos estudios en la primera etapa de un proyecto conjunto que se viene desarrollando entre el Grupo de Ingeniería de Superficies (GIS) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y el Área de Corrosión y Protección del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) de Madrid, España, destinado a mejorar el desempeño de piezas que previamente han sido recubiertas utilizando para ello diversas tecnologías para generar los recubrimientos.

Las técnicas de proyección (rociado) térmica se han empleado desde hace poco más de un siglo cuando en 1902 el ingeniero suizo M. U. Schoop lo usó para recubrir una superficie metálica. Con la designación de proyección térmica se incluyen una serie de procesos para generar capas metálicas, no metálicas y combinaciones diversas de ellas, sobre sustratos de muy diversos tipos.

Las dos formas industrialmente más empleadas, con las que se consiguen en general recubrimientos de mejor adherencia y porosidades más bajas, son los conocidos como alta velocidad (HVOF) y plasma. En este último caso es posible alcanzar temperaturas del orden de 10-12,000°C, por lo cual prácticamente se pueden rociar todo tipo de materiales metálicos y cerámicos así como sus combinaciones. Usualmente se obtienen capas densas, con bajos porcentajes de porosidad y de muy buena adherencia.

Entre un cátodo y un ánodo (boquilla) se forma un arco eléctrico que ioniza el gas plasmógeno usado (por ejemplo argón) y la energía producida por esta ionización genera el plasma que sale de la boquilla a alta velocidad como un flujo brillante. La velocidad conseguida es del orden de 400-500 [m/s], en tanto en el caso de proyección con flama y con arco es cercana a los 100 [m/s] para las partículas.

Las capas obtenidas por el proceso de alta velocidad se consiguen con una combustión, utilizando gases como propano e hidrógeno con oxígeno. La flama resultante sale de la boquilla a velocidad supersónica (del orden de 600 m/seg) con lo cual las cualidades de la capa conseguida son de una excelente adherencia y porosidad casi inexistente.

Finalmente, la proyección térmica con flama utiliza una combustión, usualmente a través de la reacción de oxígeno con acetileno y consigue fundir materiales metálicos y no metálicos de puntos de fusión menores a 2000°C, produciendo revestimientos porosos y con limitaciones de adherencia. Es, a cambio de ello, la pistola más barata. En esta opción se puede usar alambre o polvo como material de alimentación.

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:**

La mayoría de los electrodos están expuestos a condiciones de corrosión y desgaste, usualmente debido a la presencia de materiales extraños, o partículas metálicas en el lubricante. Esto puede también causar la rotura o resquebrajamiento del material (como en las superficies de los dientes de los engranes). También la falta de una adecuada lubricación puede dar como resultado la abrasión en el electrodo. Este deterioro del material originará cambios a veces significativos en sus propiedades físicas y químicas. Las cuales a la larga provocarán que nuestra pieza o sustrato no funcione adecuadamente y provoque averías y errores en otras piezas hasta en algunos casos arruinar la maquinaria

Por tal motivo es necesario un proceso de recubrimiento que mejore sus propiedades o que por lo menos las iguale, para un mejor desempeño del material en diferentes condiciones de trabajo, en las diversas áreas de la ingeniería

Además implica un elevado costo de comprarlos por pequeñas cantidades y gran pérdida de tiempo: el buscarlos que sean de la misma calidad, cotizar los diferentes precios de los distribuidores y tramites de pago.

Por lo tanto, se desea hacer un electrodo que las características sean muy parecidas al original pero que este sea de acero 1018 y recubierto de cobre puro electrolítico. Por lo cual, se espera que su costo sea mucho menor y de calidad similar

**OBJETIVO:** Generar un procedimiento para la producción de electrodos para el proceso de corte por electroerosión mediante técnica de proyección térmica por flama en aceros de bajo contenido de carbono, usando polvo de cobre como material de aporte.

Para satisfacer el objetivo se plantea un listado de actividades:

Estudio del tema

Adecuación del equipo de proyección y equipos auxiliares

Materiales adecuados para proyección

Banco de pruebas

## Experimentación, análisis y discusión de resultados

**JUSTIFICACIÓN:** La proyección térmica a nivel mundial ha tenido un gran crecimiento de manera exponencial en los últimos años. Esto se debe a la gran facilidad de manejo y grandes ventajas económicas que posee este proceso.

La aplicación de un recubrimiento que mejore significativamente las propiedades de los aceros, tales como resistencia a la corrosión, conductividad y desgaste esto traerá como consecuencia mejorar la eficiencia estructural y mecánica de los mismos ampliando el tipo de aplicación que estos puedan tener en cualquier ramo de la ingeniería

Así que las diferentes industrias al ver sobretodo el beneficio económico como el funcional en las diversas áreas ha decidido emplearlo y mejorar su productividad

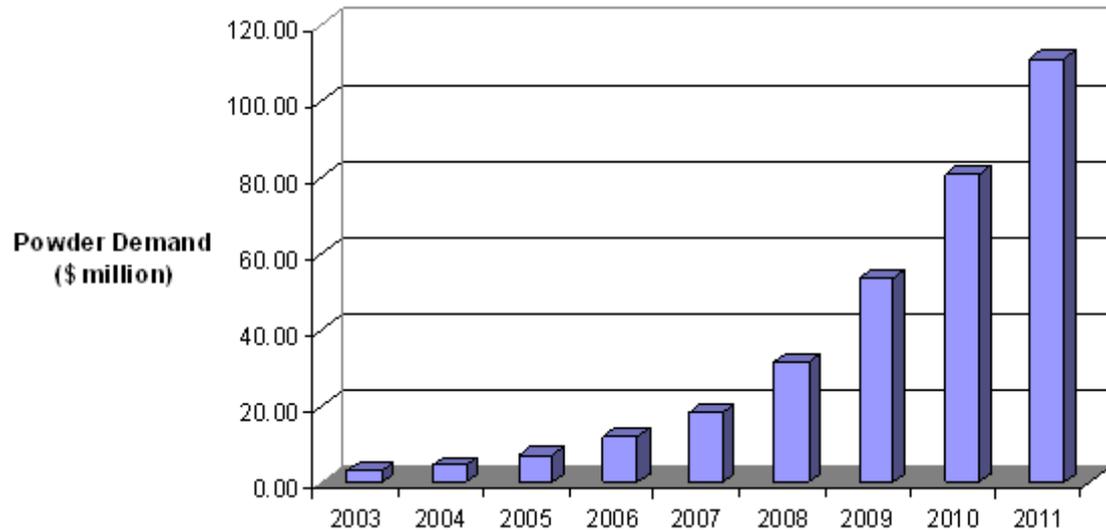
Los recubrimientos tienen enormes aplicaciones en las diferentes áreas de la ingeniería y con el paso del tiempo han logrado un mejoramiento de las diferentes técnicas perfeccionando su desempeño y calidad.

Sin embargo se necesita seguir con la investigación y avances continuos en equipos de control de procesos (robots, automatización y control, sensores, control de movimiento, etc.), el formado de proyección de óxidos cerámicos superconductores de alta temperatura crítica, el diseño asistido por computadora (CAD), técnicas de prototipos rápidos como la estérolitografía, síntesis de deposición de diamante, deposición de películas delgadas por el proceso de low pressure plasma spraying, etc.

En la siguiente grafica A se muestra en que industrias se utiliza más y las enormes ganancias que se años obtenido en años pasados pudiendo ser hasta de 2 billones de dólares.



Gráfica A: muestra los diferentes sectores de la industria que se ha utilizado



*Grafica B. Se muestra el crecimiento exponencial de recubrimientos mediante proyección térmica en los últimos años, la cual ha tenido una enorme solicitud en millones de dólares de las diferentes industrias y sectores en los últimos años. Si esto sigue así como se espera*

**HIPÓTESIS DE TRABAJO:** Es factible lograr recubrimientos compuestos con la técnica de proyección térmica por flama variando parámetros de distancia, flujo, mezcla de los gases, avance de rociado y rpm sobre superficies de piezas a revolución

#### **Requerimientos previos:**

Para realizar este proyecto ha sido necesario tener unos conocimientos de ciencia de materiales, metalurgia física, metalografía, materiales compuestos cerámicos-metálicos y teoría de la difracción de rayos X. Además durante los seis meses en el laboratorio se aprendieron a utilizar las máquinas para los ensayos: rugosímetro, análisis de imágenes metalográficas, microdurómetro. También se desarrollaron las habilidades manuales necesarias por ejemplo para realizar el pulido de las muestras metalográficas, manejo de compresores y tornos paralelos.

## Capítulo 1- Generalidades del proceso de proyección térmica

### Objetivos:

**Dar una introducción al tema de proyección térmica y explicar los diferentes tipos y características que existen de ella, así como el procedimiento previo a la proyección térmica**

### 1.1- Definición del proceso de proyección térmica

La proyección térmica es un proceso que consiste en la aplicación de un producto químico en estado líquido o una formulación compuesta, sobre un sustrato o pieza, directamente o por transferencia a una o varias superficies para obtener ciertas cualidades, propiedades específicas y funcionales.

Los recubrimientos se emplean principalmente para la elevación de superficies de partículas y de fibras, pero también se puede utilizar en piezas de geometría determinadas.

La tecnología moderna demanda requerimientos a los materiales estructurales, generalmente metálicos, que éstos no pueden ofrecer.

Los recubrimientos debido a la gran cantidad de aplicaciones que surgen cada día en todo tipo de entornos industriales pueden “proteger” a los materiales estructurales de unas condiciones de trabajo desfavorables. Como de desgaste: abrasivo, erosivo, mala lubricación, ataque químico y otros como: altas temperaturas, biocompatibilidad, etc.

Las tecnologías de recubrimiento de superficies, según estadísticas están en un crecimiento espectacular durante los últimos años y se espera que siga con esa tendencia

Se han desarrollado diferentes clases de pistolas para autorizar metal fundido sobre metales base, preparados. Los diseños dependen de la forma como es introducido el metal a la pistola, la clase de materiales que se atomizan, y la temperatura requerida. Con las temperaturas de fusión que se dispone actualmente, aleación o material cerámicos, combinaciones de ellos e incluso algunos polímeros, en forma de polvo o alambre puede ser proyectado <sup>[1]</sup>

Destacan entre ellas los sistemas de proyección (rociado) térmico por flama. El cual aporta energía cinética y térmica al material por medio de una corriente de gas o aire comprimido, para poder ser impulsado a alta velocidad, con una temperatura determinada, contra una superficie, (sustrato o pieza), que previamente debe ser preparada de una manera apropiada, quedando así recubierto por el material impregnado. Las técnicas de rociado térmico utilizan sistemas de combustión por combustible, plasma o un arco eléctrico. Los recubrimientos pueden aplicarse bajo condiciones atmosféricas normales o en atmósferas especiales. Estas técnicas pueden aplicarse, además, en forma manual o automática

---

<sup>1</sup> “Fundamentos de Manufactura Moderna materiales procesos y sistemas” Mikell P. Groover 1997 compañía editorial Pearson Educación pág. 839

La pregunta que resulta obvia es ¿Qué se gana al utilizar proyección térmica?

La respuesta es: si contamos con el equipo para la proyección térmica se puede recubrir substratos o piezas y además de mejorar las propiedades también podríamos recuperar piezas que tal vez fallaron o se deterioraron y se evita comprar una nueva refacción o pieza. Esto llevará a grandes beneficios además de tener un ahorro económico y de tiempo, que redituaría en eficacia y durabilidad de las piezas o en nuestro caso los electrodos.

## **1.2- Clasificación de los procesos de proyección térmica**

Es conveniente pensar en estas técnicas ante requerimientos de resistencia al desgaste, la corrosión, a las altas temperaturas o bien para recuperar piezas que presentan algún grado de deterioro, entre otras posibilidades. Las aplicaciones de piezas rociadas térmicamente son numerosas en industrias, tales como la automotriz, la aeronáutica, la del papel, la industria química o la electrónica.

En todos los procesos que tienen como objetivo generar un revestimiento, resulta fundamental un proceso previo, apropiado de preparación de la superficie, en particular, en el caso del rociado térmico es necesario contar con una superficie con un nivel de rugosidad apropiado que pueda colaborar a “anclar” al revestimiento. En cuanto al propio proceso de proyección, dos factores son de mayor importancia para el éxito del proceso. Por un lado, la energía cinética de las partículas y, asociado a ello, la velocidad a la que viajan dichas partículas y, por el otro lado, la energía térmica proporcionada por el medio usado para la combustión. Considerando lo antes expuesto, citamos como ejemplo el desarrollo de la pistola de plasma que ha permitido mayores temperaturas para fundir las partículas, posibilitando el uso de revestimientos que emplean materiales cerámicos que poseen mayores puntos de fusión, aunado a sus otras propiedades, estos materiales resultan muy atractivos por los beneficios pueden proporcionar. Otro avance relevante ha sido el diseño de una pistola que puede impulsar las partículas fundidas a mayores velocidades, lo que se denomina técnica de alta velocidad y que permite incrementar la energía cinética de las partículas generando mayor adherencia y menor porosidad en los recubrimientos. Sin embargo, en estos dos últimos casos, un inconveniente es el elevado costo de los equipos.

En función del material rociado, del sistema de rociado térmico elegido y de los parámetros del proceso, se obtendrá una superficie con características específicas de porosidad, dureza, rugosidad, resistencia al desgaste o a la corrosión.

El proceso o técnicas de Rociado Térmico pueden ser de dos tipos: Procesos de Combustión o Procesos Eléctricos, los cuales a su vez tienen otras subdivisiones que se mencionan a continuación.

- **Procesos de Combustión**  
Rociado por Flama. Pude ser con aporte de polvo, alambre, barra,  
Rociado por HVOF  
Rociado por Detonación.

- **Procesos Eléctricos**  
Proyección al Arco Eléctrico. Con aire, con gas o en cámara  
Proyección de Plasma. En aire o cámara

Cada uno de estos procesos encierra más subcategorías y cada una tiene sus rangos característicos de temperatura, entalpía y velocidad de aplicación. Esto los hace tener diferentes tipos de adhesión, porosidad y dureza

Todas estas técnicas de rociado térmicas dependen principalmente de la combustión de los gases o plasma, de la fuente de energía térmica y de la energía cinética de las partículas, así como del impulso de las partículas hacia la pieza o sustrato. A su vez las propiedades de los recubrimientos son importantes en la selección de la técnica de rociado térmico a aplicar.

Estas técnicas de rociado térmico están basadas según su utilidad en la industria<sup>2</sup>.

### 1.3- Materiales susceptibles para la proyección térmica

Materiales susceptibles (pieza o sustrato) para la proyección térmica por lo general son metálicos donde por su costo muchas veces no es rentable el sustituirla por lo que se prefiere repararla.

Por lo general piezas que son de materiales económicos como plásticos o aleaciones cuando fallan se cambian por un sustituto. Sin embargo también pueden ser recubiertas estas piezas aunque sean de un material de bajo punto de fusión, algunas veces se hace esto para mejorar las características del sustrato o pieza, pero esto dependerá del equipo a utilizar, el proceso, los parámetros, etc.

Los materiales usados para recubrimientos metálicos por rociado son principalmente los polvos, barras y alambres. Son usados principalmente para los procesos de rociado por flama (FS- alambre o polvo) y rociados por arco (AS)

También existen otros materiales para recubrimiento mediante rociado térmico como son cintas y recubrimientos mediante selladores (epóxicos o resinas de silicona).

Se han realizado pruebas con fundiciones nodulares para generación de herramientas de corte con buenos resultados

### 1.4- Tratamientos previos al rociado térmico.

Las superficies sometidas a recubrimiento mediante el rociado térmico, deben ser preparadas adecuadamente debido a que la unión entre el metal atomizado y el metal asociado es enteramente mecánica, es importante que la superficie de este último esté convenientemente preparada antes del atomizado<sup>[3]</sup>. A continuación se citan los métodos usuales de preparación más comunes:

<sup>2</sup> <http://www.flamesprayinc.com/process.htm>

<sup>3</sup> "Procesos de Manufactura" versión SI Mex. 1998 compañía editorial Continental Sa. de C.V. Mex pág. 790

-Formado de la pieza (si es necesario), para ser posteriormente cubierta, y luego rectificada hasta obtener la medida deseada.

-Mascarilla, previa a la preparación de superficies rugosas, para proteger aquellas partes que no se les requiera dar rugosidad. Es comúnmente hecha con telas, caucho o plástico. Sólo el silicón, o teflón se pueden usar como mascarilla para superficies rugosas o para ciertos procesos de recubrimientos por rociado térmico. Es importante cuidar que la temperatura de la superficie a tratar se mantenga constante sí el rociado térmico es lento.

-Rugosidad, preparación de superficies que serán recubiertas. Es recomendable obtenerla mediante samblastiado o granallado.

-Mascarilla, previa al rociado térmico, para proteger aquellas partes que no se deseen recubrir. Se hace con metales o cintas de fibra de vidrio, que se cortan a las dimensiones deseadas. También existen líquidos compuestos disponibles en el mercado, que previenen la adhesión de partículas calientes durante el rociado térmico y se pueden disolver con agua después del proceso. Los barrenos y las ranuras en la pieza rociada térmicamente, se pueden proteger con teflón o insertos metálicos

-Desengrasado (usando solventes orgánicos comunes, acetona, o algunas veces, vapor como desengrasante -especialmente para piezas grandes). Es muy importante la limpieza de la pieza o sustrato antes de proyectar ya que mejora la calidad del recubrimiento

## 1.5- Las técnicas de preparación de superficie

Las más comunes incluyen las siguientes:

-La macro-rugosidad, solo es recomendable hacerla cuando no se pueda o no de deba realizar el granallado. La técnica consiste de cortar hilos en V o cortar ranuras en espiral, esto traerá una buena adherencia del recubrimiento en superficies grandes. En este caso la macro-rugosidad es seguida de continuo granallado de acabado áspero.

- Preparación de superficie rugosa por agentes químicos, no es muy recomendable por la toxicidad que pueda tener el agente o el gasto que este involucre. Solo se deberá usar al menos que no quede ninguna otra forma de garantizar esa rugosidad y que además se pueda retirar completamente antes de aplicar el recubrimiento. Por lo general se usan rociadores para recubrir las piezas o sustratos. Laszlo<sup>[4]</sup> para cobre y aleaciones del mismo, ha recomendado un agente que ha funcionado bien el cual se compone de una parte por volumen del 20% de ácido sulfúrico y tres partes por volumen del 10% de ácido nítrico, para antes del rociado. El tiempo de preparación es de 10 horas.

Los aceros inoxidable pueden prepararse usando un agente de dos partes por volumen de ácido nítrico al 40% y tres partes por volumen de ácido clorhídrico al 20%. El tiempo del proceso debe de ser de 10 min.

<sup>4</sup> Laszlo (1961) Uno de los primeros ingenieros en trabajar en procesos de preparación de piezas antes de proyectarlas

También existe la limpieza electrolítica la cual no es muy usual.

Para el caso de metales y unos plásticos es recomendable el samblastiado o granallado

## 1.6- Equipo de granallado

- El granallado, es la técnica más común para preparar una superficie rugosa que consiste en: Proyectar un abrasivo para dar limpieza y rugosidad a la superficie antes del recubrimiento por medio de la técnica de rociado térmico (Fig. 1.1).

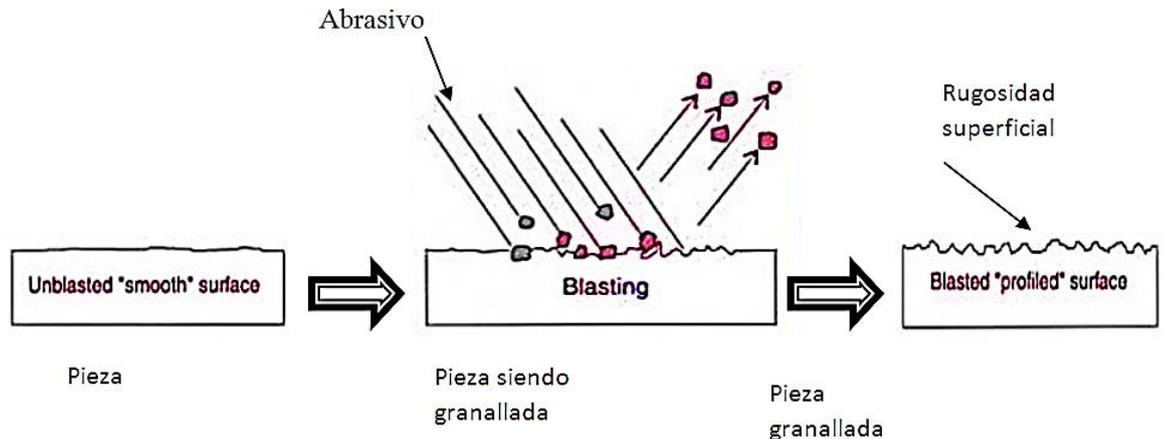


Fig. 1.1. Proceso de granallado con un abrasivo hacia la pieza de trabajo dando como resultado una rugosidad mayor.

Los tipos de abrasivos comúnmente usados son:

- Granos de acero o hierro fundido,
- Esferas metálicas,
- Arenas cerámicas como sílice, alúmina o carburo de silicio. Como se muestre en la siguiente figura 1.2



Fig. 1.2 Óxido de aluminio (alúmina), presentación general de 25kg.

Por lo general la arena sílica fina generalmente se usa para acabados finos y la alúmina para acabado burdo. Pero el tamaño del abrasivo depende del espesor de la pieza a granallar, como también del tipo de rugosidad para el área a granallar.

El abrasivo debe ser cambiado con frecuencia dependiendo de la presión, fuerza de impacto y de la dureza de las piezas a granallar por lo general el abrasivo el tamaño del grano va decreciendo. En la tabla 1 se muestran algunas propiedades de diferentes tipos de abrasivos para el granallado.

Abrasivo	Forma	Dureza MOHS (Rockwell Rc)	Densidad (Lbs/ft <sup>3</sup> )	Típica presión de trabajo. (Psi)	Numero de usos Recomendables	Tamaño (Malla)
Óxido de aluminio	angular	8-9 (40-66)	125	20-90	3-5	12-325
Arena de acero	angular	8-9 (40-66)	230	20-90	50-100	10-325
Garnet	angular	8	130	30-80	3-5	16-325

Tabla 1.- Relación de diferente tipos de metálicos para granallar

El granallado de acabado áspero puede crear micro fisuras y esfuerzos en la superficie, en consecuencia la pieza sufre deformación después del tratamiento; debido a lo anterior se recomienda en muchas ocasiones el uso de abrasivo fino y baja presión.

Para realizar el proceso de granallado se utiliza un equipo en forma de pistola en donde el abrasivo es alimentado a la boquilla por gravedad o por succión (Fig.1.3).

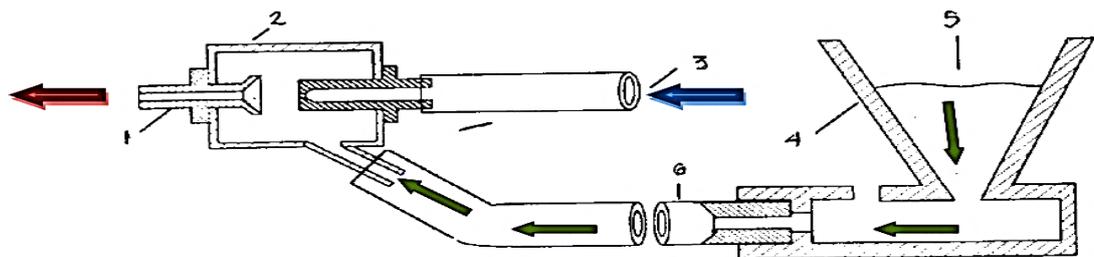


Fig. 1.3 El sistema de succión de granalla cuenta con las siguientes partes principales: 1- boquilla de la pistola; 2- cámara de descompresión; 3-entrada de aire comprimido (flecha azul); 4-contenedor de abrasivo; 5-abrasivo (flecha verde); 6, manguera. 7-Abrasivo mezclado con aire a alta velocidad saliendo por la boquilla (flecha Roja)

El aire que proviene del compresor (3) se introduce en la cámara (2), donde se descomprime. Al pasar el aire por la cámara, genera una presión de vacío, que succiona el abrasivo (5) del contenedor (4) y lo transporta a través de la manguera (6) hasta la salida de la boquilla (1). Al salir por la boquilla ésta se impacta al substrato o pieza.

Existen en la industria diferentes equipos de granallado, pero los más utilizados son los portátiles, las cabinas y tipo cuartos como se observa en las siguientes figuras.



Fig.1.9 electrodo de acero 1018 granallado



Fig. 1.4. Granallador Portátil.



Fig. 1.5 Granallador tipo cuarto.

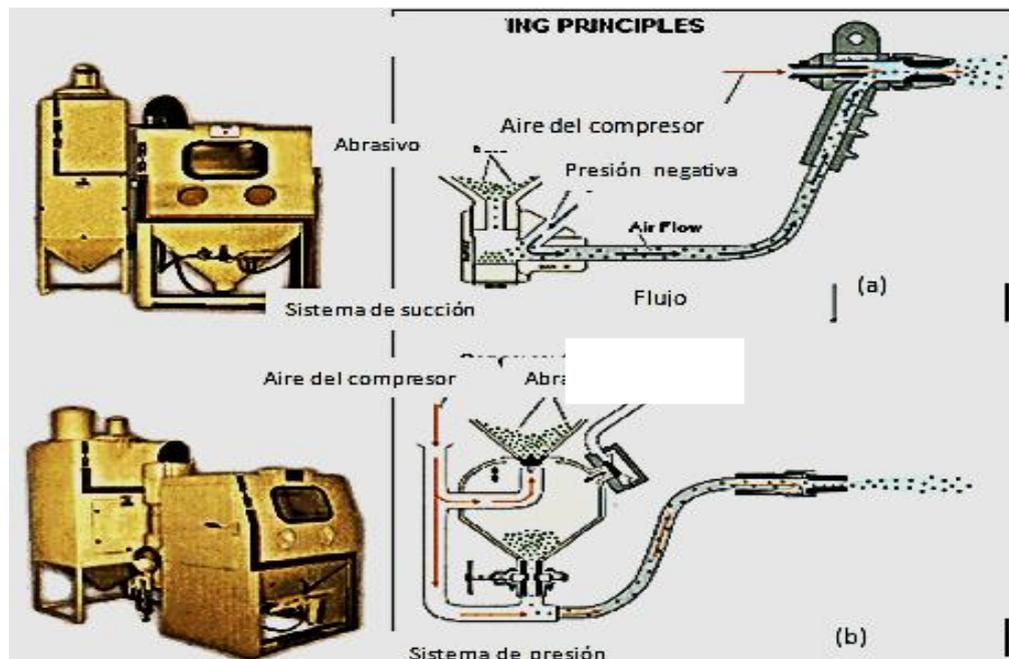


Fig. 1.6 Principio de operaciones del sistema de granallado por succión y presión (tipo cabina).



Fig.1.7 Pistola para granallar mediante un sistema de succión utilizada para este trabajo.

Para granallar se utilizó Pistola para granallar mediante un sistema de succión la cual deja una macro rugosidad adecuada, es portátil y además ya se contaba con ella (fig. 1.7). También existen otras no muy comunes como son: Granalladora de mesa giratoria o de plato, Granalladora de cinta rotativa, Granalladora de mesa giratoria y satélites, Granalladora de gancho por batch, Granalladora de gancho continua, Granalladora de perfiles y estructuras, Granalladora de exterior de tubos, Granalladora de chapas y flejes, Granalladora de pisos, Granalladora de cilindros de gas. Estos son equipos donde el abrasivo es impulsado por una o varias turbinas, permitiendo efectuar el proceso o trabajo, sobre todo tipo de piezas - partes metálicas - en forma automática a través de componentes mecánicos, eléctricos o electrónicos

Actualmente, los sistemas de granallado están automatizados para producción en serie.

Los parámetros que intervienen en el granallado básicamente son: presión, tamaño de la alúmina o arena según el caso, tiempo y ángulo de granallado depositado en la superficie rugosa del sustrato.

La rugosidad de la superficie ( $R_a$ ) máxima de una pieza se obtuvo después de un corto tiempo de granallado con alta presión. Sin embargo se pudiera pensar que entre más tiempo de granallado la pieza obtendrá más rugosidad superficial, pero no es así.

Se recomienda al granallar evitar ángulos entre la pistola y la pieza o sustrato y hacerlo de manera perpendicular a la superficie aunque se puede hacer en ángulos menores a  $90^\circ$  respecto a la perpendicular de superficie de la pieza.

El abrasivo de alúmina puede tener diferente morfología (granos irregulares) y las condiciones de aplicación no siempre son las mismas. La distancia entre la boquilla de la pistola y la pieza de trabajo así como la presión del aire si influyen en la rugosidad de la superficie. Por lo que se deberá ir variando la distancia

El proceso de granallado debe ser en un intervalo de tiempo corto (no más de unos minutos) y tratar que se realice en una sola pasada. Si el tiempo es muy largo, se presentará oxidación, micro fisuras y hasta calentamientos que puede afectar la adherencia y calidad del recubrimiento.

La rugosidad " $R_a$ " del sustrato alúmina usando un alimentador de 2000 g/min. Con una distancia de 150 mm, un ángulo de  $90^\circ$ , alúmina del número 12 y tiempo en unidades arbitrarias, se obtuvieron dos graficas (a) tiempo vs rugosidad y (b) presión vs rugosidad

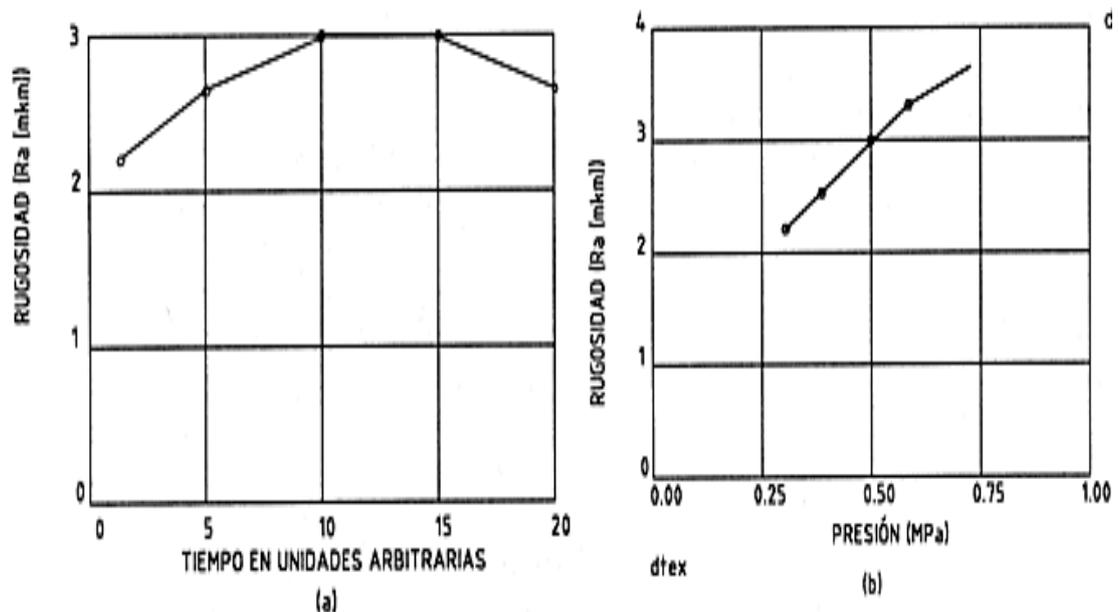


Fig 1.8 Grafica (a) a la izquierda y grafica (b) a la derecha

Es recomendable que el granallado se haga en un área abierta o en cabinas o cuartos donde los operarios estén bien equipados contra el polvo y el ruido

Sin embargo, para piezas de gran volumen se suele utilizar boquillas dobles. Estas boquillas tienen dos Salidas donde la primera boquilla expulsa el abrasivo y la segunda sirve como recuperador. Así se puede absorber nuevamente el abrasivo y reutilizarlo

## Capítulo 2- Proceso de proyección térmica por flama (FS)

**Objetivo:** definir el proceso de proyección térmica por flama, sus componentes y parámetros en el proceso, explicar el proceso de granallado útil para nuestro propósito y como sus ventajas

### 2.1- Definición del Proceso de proyección térmica por flama (FS)

Es la forma más antigua de rociado térmico (1909 Max Ulrich Schoop obtiene la patente de los recubrimientos utilizando el proceso de combustión (gas, oxígeno) de alambre, 1956 Metco lanza al mercado las pistolas Tipo P para el rociado térmico por flama de polvos, hacen su debut los recubrimientos cerámicos refractarios, aleaciones auto fundentes y carburos de tungsteno). La energía química de combustión del gas por ejemplo (acetileno con el oxígeno) se usa para el calentamiento y la fusión del material. El material es alimentado continuamente hacia la pistola donde es fundido en una llama de combustible gaseoso y propulsado hacia el sustrato en una corriente de gas atomizado. El aire es generalmente utilizado como gas atomizante. <sup>[5]</sup> Un esquema del rociado térmico por flama de polvos se muestra en la figura 2.1

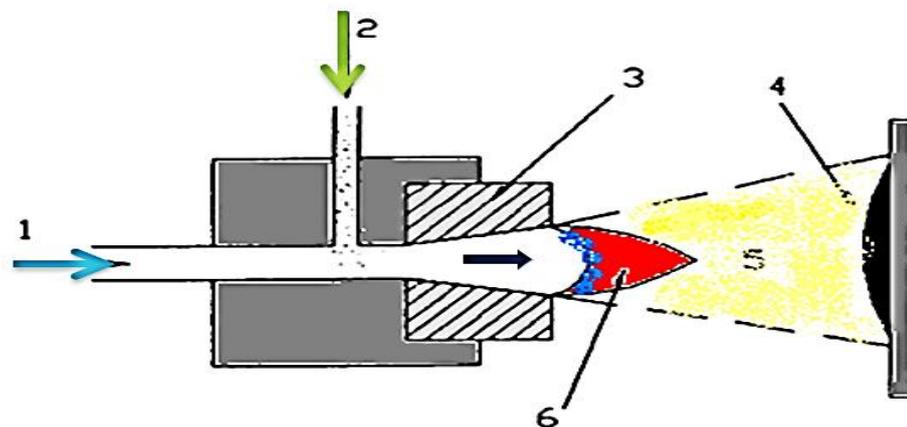


Fig. 2.1 Esquema de rociado térmico por flama (FS). 1, Flujo de los gases (combustible, oxígeno y a veces aire comprimido) penetran axialmente; 2, Inyección de polvos o alambre pueden ser introducidos axialmente o perpendicularmente hacia el soplete; 3, boquilla del soplete; 4, recubrimiento; 5 proyección de partículas fundidas en dirección de la pieza de trabajo; 6 combustión de la flama.

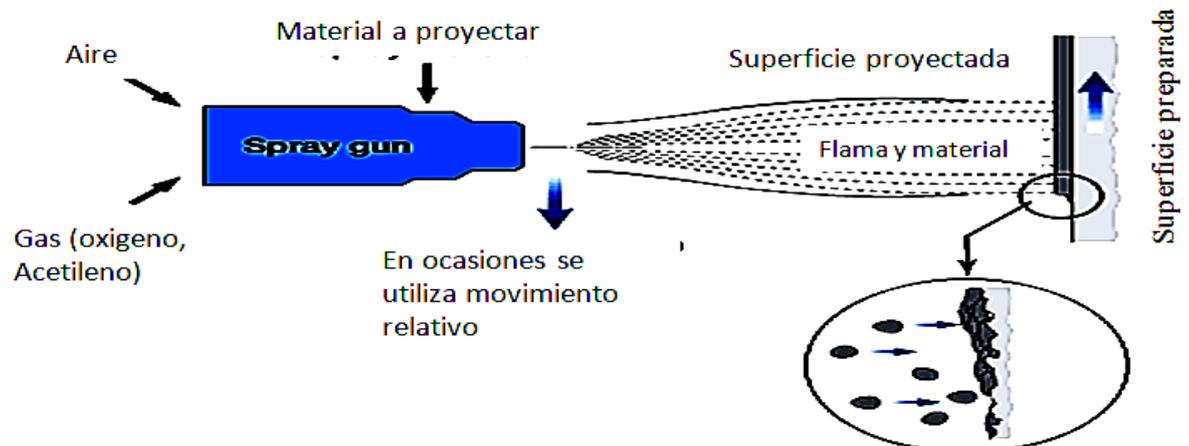


Fig. 2.2 Esquema de rociado térmico por flama (FS)

<sup>5</sup> "Procesos de Manufactura" versión SI Mex 1998 compañía editorial Continental Sa. de C.V. Mex pág. 791

La instalación de un sistema de rociado por flama de polvos y de alambre es relativamente económico y móvil, para su instalación solo se requiere una antorcha de rociado por flama y una fuente de oxígeno y gas combustible (Fig. 2.3a, Fig. 2.3b) debido a sus bajas velocidades de proyección de partículas comparado con otros procesos de rociado térmico, este tipo de recubrimientos generalmente es de menor calidad, tienen alta porosidad y bajas fuerzas cohesivas y adhesivas.

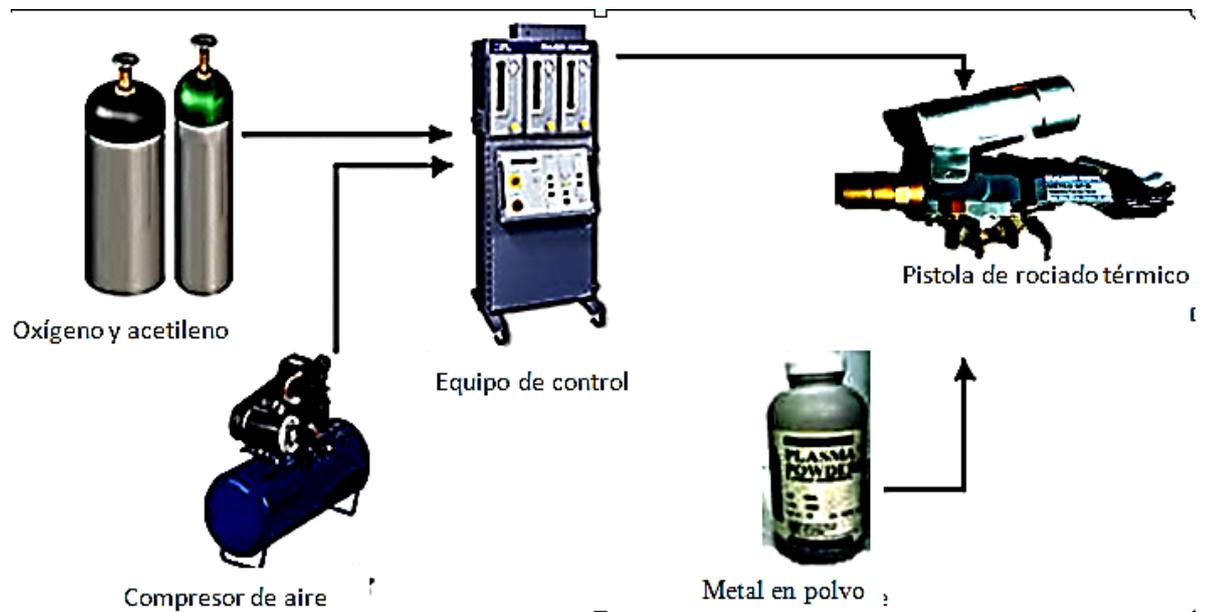


Fig. 2.3a Diagrama de instalación del rociado térmico por flama de polvos. (Ilustraciones de Sulzer Metco).

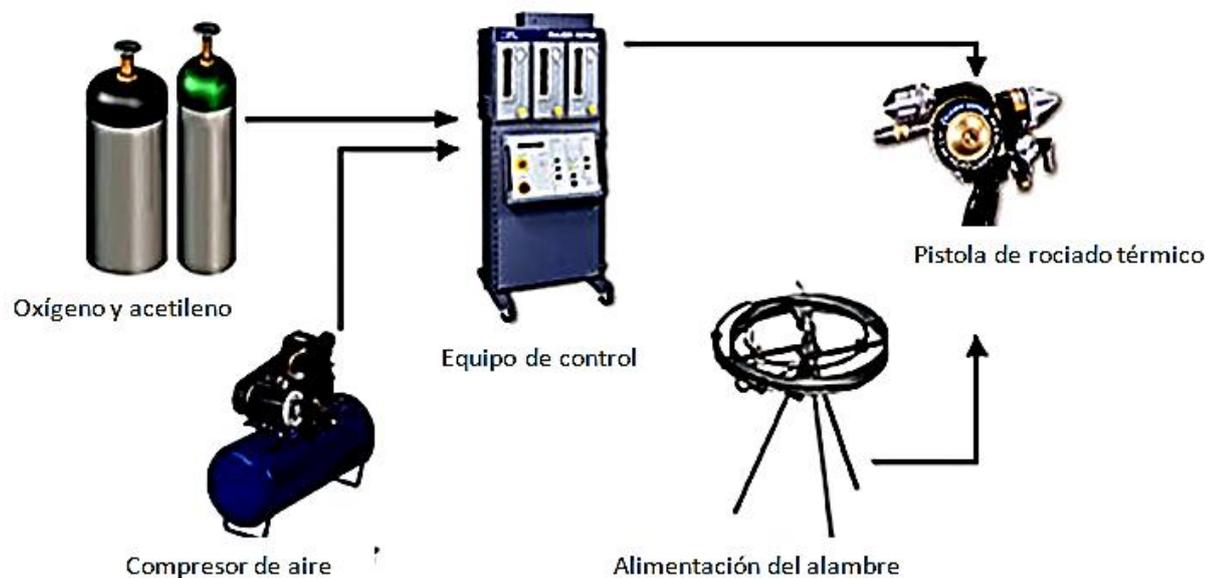


Fig. 3.3b Diagrama de instalación del rociado térmico por flama de alambre. (Ilustraciones de Sulzer Metco).

El rociado térmico por flama a través de la combustión de polvos ha sido usado por décadas por varias industrias con economía y confiabilidad de las superficies obtenidas con este proceso.

Las características y beneficios que nos ofrece el proceso de rociado térmico por combustión de polvos o por alambre son: económico y larga vida útil, fácil operación,

versatilidad y confiabilidad, relativamente bajo ruido de operación, gran variedad de materiales para recubrimientos, alta producción de recubrimientos, el proceso puede ser automatizado y portátil.

Aplicaciones comunes del proceso de rociado térmico por combustión de polvos son las siguientes: reconstrucción y salvamento de piezas, resistencia a la abrasión, resistencia al desgaste, resistencia al impacto, resistencia al ataque químico, control de la corrosión a temperatura ambiente, control de la corrosión a altas temperaturas.

## 2.2- Las características beneficios y aplicaciones del proceso de rociado térmico

*Las características, beneficios y aplicaciones del proceso de rociado térmico se muestran en la siguiente Tabla 2.1.*

Proceso	Características y Beneficios	Aplicaciones
Proyección térmica por flama y aporte de polvos	Económico y larga vida útil. Fácil operación. Versatilidad y confiabilidad. Relativamente bajo ruido de operación. Gran variedad de materiales para recubrimientos. Alta producción de recubrimientos. El proceso puede ser automatizado. Portabilidad.	Reconstrucción y salvamento de piezas. Resistencia a la abrasión. Resistencia al desgaste. Resistencia al impacto. Resistencia al ataque químico. Control de la corrosión a temperatura ambiente y a altas temperaturas.
Proyección térmica por flama y aporte alambre.	Excelente economía. Versatilidad y confiabilidad. Fácil operación. Diversas piezas recubiertas con mínimos accesorios. Alta producción de recubrimientos. El proceso puede ser automatizado. Portabilidad.	Control de la corrosión a temperatura ambiente y a altas temperaturas. Reconstrucción y salvamento de piezas.
Proyección térmica por arco eléctrico y aporte de alambre	Requiere mínimas instalaciones. Muchas piezas pueden ser recubiertas. No requiere suministro de gas combustible. La alimentación del alambre es automática. Versatilidad y confiabilidad. Fácil operación. Diversas piezas pueden ser recubiertas. Recubrimientos con excelente adherencia y buena densidad. Alta producción de recubrimientos. Los recubrimientos obtenidos son fáciles de maquinar. El proceso puede ser automatizado. Portabilidad.	Control de la corrosión a temperatura ambiente. Control de la corrosión a altas temperaturas. Reconstrucción y salvamento de piezas. Recubrimientos con conductividad eléctrica. Recubrimientos antideslizantes.

<p>Proyección térmica de alta velocidad (oxígeno-combustible) (HVOF)</p>	<p>Recubrimientos con excelente unión.                  Recubrimientos con baja oxidación.                  Denso con baja porosidad.                  Recubrimientos con espesores muy grandes.                  Mejoramiento en la microdureza.                  Excelente maquinabilidad de las superficies.                  El proceso puede ser automatizado.                  Excelentes fuerzas de adherencia.                  Superior adhesión.</p>	<p>Reconstrucción y salvamento de piezas.                  Resistencia a la abrasión.                  Resistencia a la erosión.                  Resistencia al desgaste.                  Resistencia a los efectos de cavitación.                  Resistencia al ataque químico.                  Control de oxidación.                  Control de azufre.                  Control de la corrosión a temperatura ambiente.                  Control de la corrosión a altas temperaturas.</p>
<p>Rociado térmico por plasma.</p>	<p>Alto grado de flexibilidad.                  Versatilidad.                  Gran variedad de materiales para recubrimientos.                  Alta producción de recubrimientos.                  El proceso puede ser automatizado.</p>	<p>Reconstrucción y salvamento de piezas.                  Resistencia a la abrasión.                  Resistencia a la erosión.                  Resistencia al desgaste.                  Resistencia a los efectos de cavitación.                  Resistencia al impacto.                  Resistencia al ataque químico.                  Control de oxidación.                  Control de azufre.                  Control de la corrosión a temperatura ambiente.                  Control de la corrosión a altas temperaturas.                  Instalaciones térmicas y eléctricas.                  Margen de control.</p>
<p>Rociado térmico por baja presión de plasma (LPPS)</p>	<p>Excelente unión metalúrgica.                  Recubrimientos muy delgados y densos, incluyendo películas delgadas.                  Recubrimientos libres de oxidación.                  Recubrimientos y piezas libres de contaminación.                  Las propiedades de los recubrimientos obtenidos son únicas.                  Bajo ruido de operación.                  Gran variedad de materiales para recubrimientos.                  Alta producción de recubrimientos.                  Operación en ambientes controlados.                  Proceso automatizado y continuo.</p>	<p>Resistencia a la corrosión.                  Resistencia a la oxidación.                  En recubrimientos de alta pureza y biomédicos.                  Recubrimientos de alta calidad.                  Recubrimientos sobre fibra reforzada.                  Resistencia al ataque químico.                  Aplicación en películas delgadas.</p>

Se sabe que los recubrimientos fundidos son HVOF y los recubrimientos no fundidos son Recubrimientos por cámara, incluye los procesos: VPS, LPPS, LVPS (Combinación de VPS-LPPS)



Imagen Fig. 2.4 de las diferentes pistolas que existen en el mercado para los diferentes procesos que existen de proyección térmica

### 2.3- Parámetros características y del proceso de rociado térmico por flama

-La relación del oxígeno y combustible (acetileno) puede variar en una relación 1: 1 a 6:1, resultando una temperatura de flama entre 3000 K - 3350 K y una velocidad de proyección de partículas de 80 - 100 m/s. En capítulos más adelante se explicará cómo regular la flama

La razón de flujo del gas combustible y el oxígeno la presión dependen del tipo de boquilla y pistola



Fig. 2.5 Foto de aplicación de acero inoxidable sobre una superficie de acero 1018

#### ***Inyección de Polvos o alambre:***

Es importante tener en cuenta las características del material a proyectar además la compatibilidad con la pieza, por lo tanto es necesario conocer de nuestro material a proyectar: composición química, tamaño de las partículas (polvos), propiedades físicas (especialmente: densidad, punto de fusión, calor latente de fusión), forma de las partículas: es deseada de forma esférica, para facilitar el manejo.

En modelos de pistolas anteriores para proyectar polvos la manera de alimentarse era colocando un compartimiento en la parte superior y la gravedad ayudaba a fluir el

polvo. En la actualidad se pueden alimentar por plasma atmosférico (APS), aire comprimido, etc.

La velocidad de alimentación de los polvos se encuentra en el rango de 50 - 100 g/min. Se debe revisar la ficha técnica del material a proyectar ya que ahí se mencionan diferentes parámetros y aditamentos como: tipo de válvula interna más indicada, etc.

La distancia de rociado térmico generalmente varía pero por lo general se encuentra en un rango de: 100 – 250 mm de la boquilla a la superficie del material

Ángulo de rociado térmico: Usualmente a  $90^\circ$ , algunas veces diferentes de lo normal debido a la forma del sustrato. Por lo tanto si se tiene una cavidad dentro de la pieza a recubrir no se recomienda que esta tenga un ángulo recto ya que podría no adherirse a nuestro material a proyectar como se muestra en la siguiente figura 2.4.

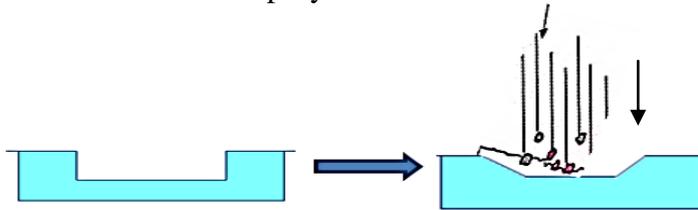


Figura 2.6 muestra al lado izquierdo una pieza antes de proyectar vista de manera horizontal y al lado derecho se muestra como se amplió el ángulo de la cavidad y luego se proyectó sobre ella

Temperatura para la combustión de los gases (esta varía dependiendo del material de aporte por que las temperaturas de fusión varían y su condición física en cuanto si es polvo o alambre)

También al proyectar las condiciones atmosféricas alrededor del recubrimiento pueden modificar parámetros y condiciones

Si la pieza es de una geometría cilíndrica lo más recomendable es utilizar un mecanismo de revolución (torno horizontal, fresadora, etc.) el cual nos permita girar nuestra pieza y proyectar de manera uniforme. Pero nos aumentaran las variables a utilizar

## **2.4-Propiedades del recubrimiento:**

La adherencia puede alcanzar una resistencia de 60 MPa para un rociado térmico de NiAl, o aproximado a 70MPa para un rociado térmico de aleaciones autofundentes. Los valores típicos se encuentran en el rango de 15 - 30 MPa para recubrimientos cerámicos. La porosidad se encuentra en el rango de 10%-20% (podría no tener porosidad para un recubrimiento con aleaciones autofundentes) y espesores típicos están en el rango de 100-2500  $\mu\text{m}$ .

En la siguiente figura se muestra el equipo utilizado en el proceso de proyección por flama de polvos y los valores de temperatura utilizados para los diferentes procesos de proyección en la fig. 2.8:



Fig. 2.7 Equipo de rociado térmico por flama (pistola 5P-II con fluxómetro)

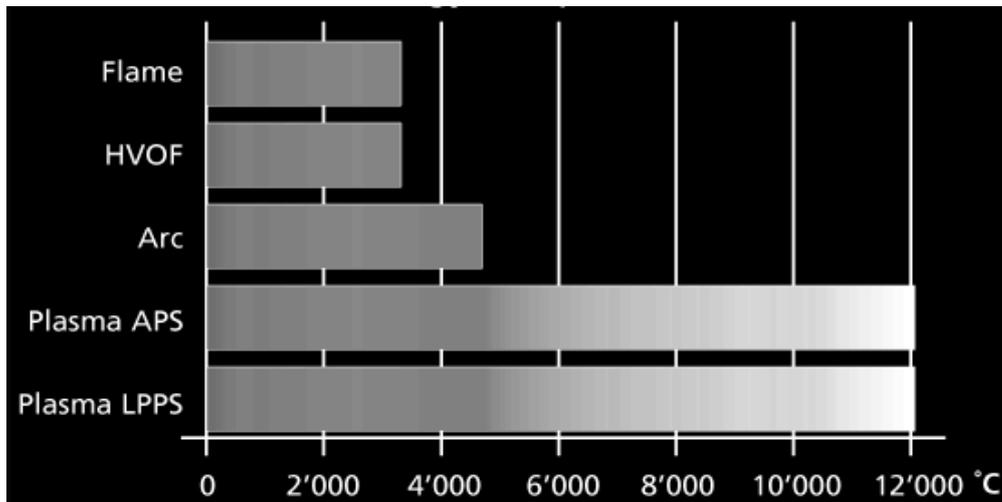


Fig. 2.8. Comparación de los Procesos de Rociado Térmico con respecto a la energía térmica (Temperatura)

En la próxima tabla 2.2 se muestra una relación de la comparación de los principales variables de los procesos de rociado.

Tabla 2.2 propiedades de los recubrimientos (comparación de los principales procesos del rociado térmico)

Tipo de recubrimiento.	Rociado térmico por combustión de alambre	Rociado térmico por combustión de polvos	Rociado térmico por (HVOF)	Rociado térmico de alambre por arco eléctrico	Rociado térmico por plasma	Rociado térmico por cámara
<b>Temperatura de los gases 10<sup>3</sup> °C (10<sup>3</sup> °F)</b>						
En todos los recubrimientos	3 (5.4)	3 (5.4)	2 - 3 (3.6 - 5.4)	N/A	12 - 16 (21.6 - 28.8)	10 - 80 (18 - 144)
<b>Fuerza de adherencia MPa (10<sup>3</sup> psi)</b>						
Metales ferrosos	14 - 28 (2 - 4)	14 - 21 (2 - 3)	48 - 62 (7 - 9)	28 - 41 (4 - 6)	22 - 34 (3 - 5)	100 - 400 (14 - 57)
Metales no ferrosos	7 - 34 (1 - 5)	7 - 34 (1 - 5)	48 - 62 (7 - 9)	14 - 28 (2 - 7)	14 - 28 (2 - 7)	400 - 750 (57 - 107)
Aleaciones autofundentes	---	83+ (12+)	62 (9)**	---	---	---
Cerámicos	---	14 - 32 (2 - 5)	---	---	21 - 41 (3 - 6)	25 - 55 (4 - 8)
Carburos	---	34 - 48 (5 - 7)	83+ (12+)	---	55 - 69 (8 - 10)	500 - 100 (9 - 14)
<b>% de la Densidad teórica</b>						
Metales ferrosos	85 - 90	85 - 90	95 - 98+	85 - 95	90 - 95	97 - 99+
Metales no ferrosos	85 - 90	85 - 90	95 - 98+	85 - 95	90 - 95	97 - 99+
Aleaciones autofundentes	---	100*	98+**	---	---	---
Cerámicos	---	90 - 95	---	---	90 - 95+	95 - 98
Carburos	---	85 - 90	95 - 98+	---	90 - 95+	95 - 98+
<b>Dureza</b>						
Metales ferrosos	84R <sub>b</sub> -35R <sub>c</sub>	80R <sub>b</sub> -35R <sub>c</sub>	90R <sub>b</sub> -45R <sub>c</sub>	85R <sub>b</sub> -40R <sub>c</sub>	80R <sub>b</sub> -40R <sub>c</sub>	30R <sub>c</sub> -50+R <sub>c</sub>
Metales no ferrosos	95R <sub>h</sub> -40R <sub>c</sub>	30R <sub>h</sub> -20R <sub>c</sub>	100R <sub>h</sub> -55R <sub>c</sub>	40R <sub>h</sub> -35R <sub>c</sub>	40R <sub>h</sub> -50R <sub>c</sub>	45R <sub>c</sub> -55R <sub>c</sub>
Aleaciones autofundentes	---	30 - 60R <sub>c</sub>	50 - 60R <sub>c</sub>	---	---	---
Cerámicos	---	40 - 65R <sub>c</sub>	---	---	45 - 65R <sub>c</sub>	50 - 70+R <sub>c</sub>
Carburos	---	45 - 55R <sub>c</sub>	55 - 72R <sub>c</sub>	---	50 - 65R <sub>c</sub>	50 - 70+R <sub>c</sub>
<b>Permeabilidad</b>						
Metales ferrosos	Alta	Media	Despreciable	Media	Media	Ninguna
Metales no ferrosos	Alta	Media	Despreciable	Media	Media	Ninguna
Aleaciones autofundentes	---	Ninguna	Despreciable*	---	---	---
Cerámicos	---	Media	---	---	Baja-Media	Despreciable
Carburos	---	Media	Despreciable	---	Baja-Media	Despreciable
<b>Limitaciones de espesor del recubrimiento mm (in.)</b>						
Metales ferrosos	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.6 - 2.5 (0.025 - 0.1)	0.5 - 2.5 (0.02 - 0.1)	0.4 - 2.5 (0.015 - 0.1)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.5+)
Metales no ferrosos	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.6 - 2.5 (0.025 - 0.1)	0.5 - 2.5 (0.02 - 0.1)	0.4 - 2.5 (0.015 - 0.1)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.5+)
Aleaciones autofundentes	---	0.4 - 2.5 (0.02 - 0.2)	0.4 - 3.8 (0.015-0.15)	---	---	0.1 - 15+ (0.004 - 0.6+)
Cerámicos	---	0.4 - 0.8 (0.015 - 0.1)	---	---	(0.4 - 5.0 (0.015 - 0.2)	0.05 - 10+ (0.002-0.25+)
Carburos	---	0.4 - 0.8 (0.015 - 0.1)	0.4 - 5.0+ (0.015-0.2+)	---	(0.4 - 5.0 (0.015 - 0.2)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.4+)

## 2.5 Aplicaciones de los recubrimientos.

Entre los muchos beneficios de los Procesos de Proyección Térmica podemos nombrar los siguientes:

- El costo de reparación es menor que el costo de un reemplazo.
- La recuperación y puesta en servicio de partes desgastadas.
- El aumento de la duración en servicio de la pieza recuperada, la que excede al de la pieza original.
- En la alfarería usada generalmente para artesanías donde se requiere recubrir de un material alguna pieza que por otra técnica sería imposible. Como se muestra en la figura 2.10
- En la medicina suele usarse en prótesis de aleaciones de titanio Ti6Al4V y acero 316L las cuales se recubren con hidroxiapatita u otro compuesto orgánico que ayude a evitar el rechazo por parte del organismo por ser bio-compatibles con el cuerpo humano



Fig. 2.9 Prótesis de titanio para cadera. A la derecha se muestra que se granalló y proyectó

- La recuperación de piezas nuevas mal mecanizadas.



Imágenes 2.10 de piezas hechas por alfareros que se pueden recubrir de cobre

Cabe mencionar que para cualquier trabajo que deseemos hacer es importante verificar en tablas las características de la pieza como las del material a proyectar, para así estar conscientes si es viable o no recubrir, además de recubrir de la mejor manera y sin problemas

Se suele definir en ciencia de materiales al desgaste como: la erosión del material o el proceso en que la interacción de las superficies o de las caras de limitación de un sólido con sus resultados del entorno de trabajo en la pérdida dimensional del sólido, con o sin la pérdida de material. El estudio de los procesos del desgaste es parte de la disciplina de tribología

Hay cinco procesos principales del desgaste:

- I. Desgaste adhesivo
- II. Desgaste abrasivo
- III. Fatiga superficial
- IV. Desgaste por erosión
- V. Desgaste por calor y oxidación

A continuación se mencionan solo algunos de los muchos problemas y soluciones técnicas para mejorar o proteger las piezas a trabajar ya sea en la fabricación de piezas originales con recubrimientos incorporados o para la protección de equipos industriales.<sup>[6]</sup>

- Resistencia al desgaste adhesivo se presenta principalmente en Rodamientos, en anillos de pistón, mangas prensa hidráulica, etc. la solución será usar un revestimiento de Óxido de cromo, Babbit, acero al carbono, etc.



Imagen 2.11- pistones, balero y anillos

- Resistencia al desgaste abrasivo se puede medir según las normas ISO 9352 o ASTM D 1044. Se presenta por lo general en sellos de la bomba, tornillos del mezclador concreto, piezas de la industria petrolera, molinos, filtros, mezcladores y transportadores sinfín para cemento y concreto, ventiladores de extracción, etc. Una solución será recubrir con El carburo de tungsteno, Alúmina / Titanio, de acero
- Fatiga superficial encontrada en los seguidores de leva, las aspas del ventilador (motores a reacción), anillos de desgaste (turbinas en tierra), camisas de cilindro, anillos de pistón para motores de combustión interna, válvulas de automóvil, etc. El recurso es usar carburo de tungsteno, cobre / níquel, carburo de cromo, etc.

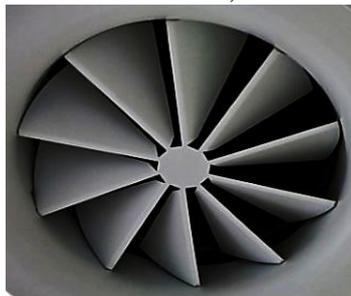
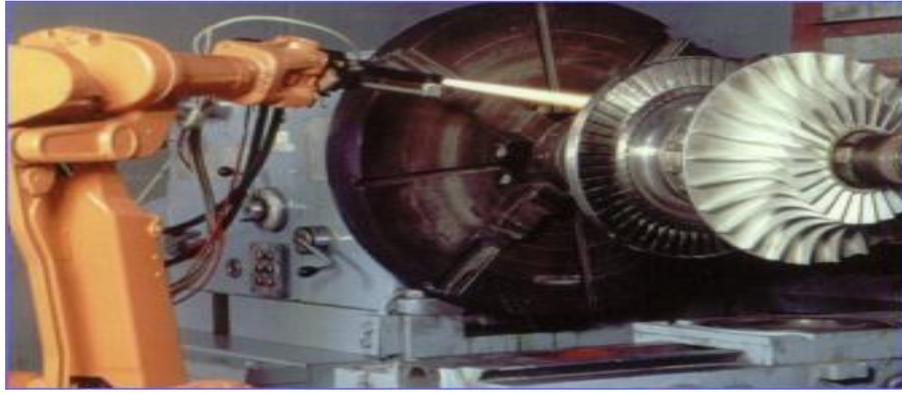


Imagen 2.12- Ventilador industrial

- La erosión hallada en bombas de lodo, extractores de aire, colectores de polvo, turbias, cojinetes, válvulas hidroeléctricas, colectores de polvo, asientos, rodets de turbinas, etc. Se puede contrarrestar aplicando carburo de tungsteno, etc.

<sup>6</sup> [www.flamespraying.com/process.htm](http://www.flamespraying.com/process.htm).



2.13. figura es de un recubrimiento en una turbina dañada por el efecto de cavitacion.

- Resistencia al calor como en latas Quemador / cestos (turbinas de gas), bobinas de inducción para hornos de alta temperatura, instalaciones de tratamientos térmicos y montajes para soldaduras. válvula de escape, etc. Se puede solucionar si se recubre con materiales como Zirconia parcialmente estabilizada



fig.2.14. Proyección en el interior de una turbina

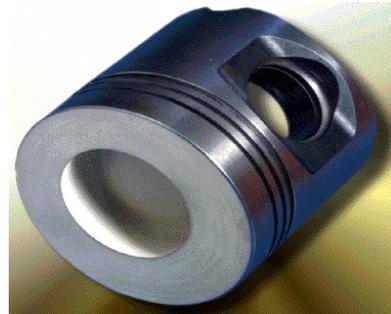


Fig.2.15. Cabeza de pistón

Resistencia a la oxidación encontrada comúnmente en silenciadores de escape, accesorios de tratamiento térmico, cabezas de pistón y vástagos de válvula de escape, boquillas y cámaras de reacción de cohetes. Se debe aplicar una caspa de Aluminio, níquel / cromo. A veces se recomienda utilizar un proceso de recubrimiento por plasma APS para garantizar que la porosidad sea mínima



fig.2.16. Escape

- Resistencia a la corrosión hallada generalmente en partes de bombas hidráulicas, tanques de almacenamiento, equipos de manipulación de alimentos, puentes, barcos, etc. Es necesario aplicar un material resistente como el Acero inoxidable (316), Aluminio, etc. También se recomienda utilizar un proceso de recubrimiento por plasma APS para garantizar que la porosidad sea mínima

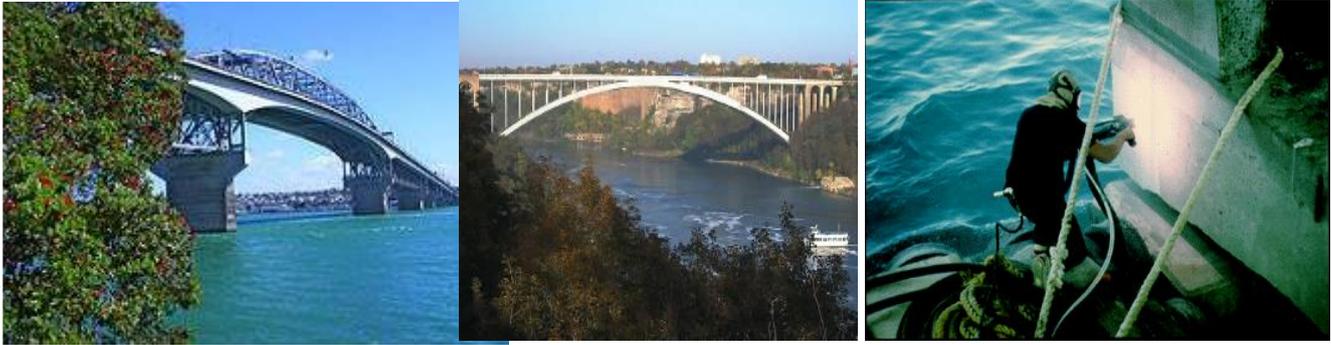


Fig2.17. proyección en puentes

- ✓ Conductividad Eléctrica necesaria en electrodos, contactos eléctricos, la conexión a tierra. Se recubren de un material conductor como Cobre, aluminio, plata, oro



fig.2.18. Conexión a tierra

- Resistencia Eléctrica. Cuando se desea un aislamiento de los tubos de calefacción, puntas de soldadura. Se proyecta Alúmina, materiales cerámicos o polímeros

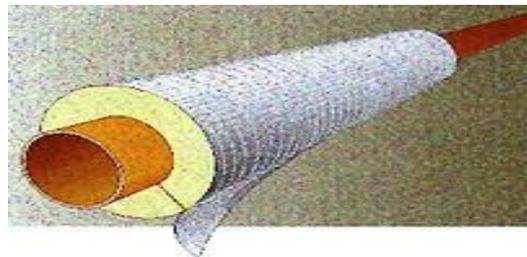


fig.2.19. Aislamiento de los tubos de calefacción

- Restauración dimensional. Ocurre en muchas piezas de máquinas como rodillos de impresión, punzones, horquillas de cambio de transmisiones de automóvil tornillos de extrusión, rodillos quebradores, guías de hilos, los cojinetes tamaño inferior, etc. para solucionar esto se recubre con acero al carbono, acero inoxidable, etc.

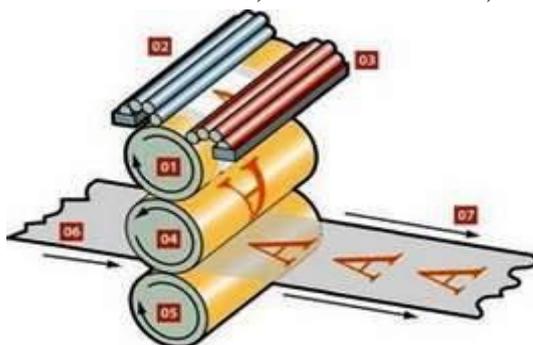


fig.2.20. Rodillos de impresión.



fig.2.21- Rodillos gigantes quebradores

## Capítulo 3-Equipos auxiliares y materiales de proyección

Objetivo: Conocer el equipo auxiliar a utilizar e incorporarlo al proceso de proyección, clasificar el material adecuado para obtener mejores resultados en el proceso de proyección por flama

### 3.1- Materiales de proyección térmica con polvos

En cuanto a materiales en polvo para proyección térmica. Existen una gran variedad dependiendo para que vaya a ser utilizado o para mejorar alguna propiedad de nuestra pieza.

Los metales pulverizados desarrollados para este proceso, han sido diseñados para proporcionar propiedades des usuales en las superficies donde se aplican, tales como hacer que se comporten como una barra térmica, que aumente su resistencia a la oxidación o a la corrosión y que tenga extrema habilidad para soportar el desgaste.<sup>[7]</sup>

Es esencial saber la adherencia entre los materiales a utilizar y puntos de fusión

Es muy importante revisar si cumple su material con las especificaciones de la ficha técnica del mismo, porque a veces suele variar características de un producto dependiendo el distribuidor. Por lo general muchas empresas suelen contar con los servicios de laboratorios donde pueden verificar estos datos.

En una ficha técnica debe tener por lómenos algunos de los siguientes parámetros para caracterizarlos: tamaño de grano, composición química de fases, forma, porosidad interna (correlacionada con densidad aparente) y grado de fluidez.

El **tamaño de grano** de los polvos se determina mediante alguno de los siguientes métodos:

- análisis mecánico por tamizado (descrito, en ASTM norma B214-86)
- rayos X.
- dispositivo para dispersión de rayos láser.

Tabla 3.1. Muestra Equivalencias entre tamaños de mallas números de ASTM normas: B214-86 y DIN 32529.

Número de malla (ASTM)	Tamaño de grano (tamaño de tamiz) ( $\mu\text{m}$ )	Número de designación DIN	Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )
100	150	0	-22.4+5.6
120	125	1	-45+22.4
140	106	2	-90+45
200	74	3	-45+5.6
230	63	4	-63+16
325	44	5	-106+32
400	37	6	-125+45

<sup>7</sup> "Procesos de Manufactura" versión SI Mex 1998 compañía editorial Continental Sa de C.V. Mex pág. 791

**La composición química de los polvos y el análisis de las fases** se puede determinar con el uso de variadas técnicas analíticas. La más común es la llamada emisión de plasma por espectroscopia (ICPES), o la técnica de espectroscopia por fluorescencia de R-X, difracción de rayos X

**LA distribución de elementos.** Las partículas aglomeradas o polvos recubiertos contienen diferentes fases (elementos) y pueden ser de importancia si están distribuidas de forma homogénea o no en la partícula (polvos aglomerados) o si el recubrimiento cubre la superficie correctamente y en su totalidad. Para obtener esta información es necesario la obtención de un estudio metalográfico de la sección transversal de las partículas de polvo. La distribución en 2D de los elementos se puede obtener mediante la dispersión de rayos X (espectroscopia) (WDS). Estas técnicas de análisis son opcionales para muchos microscopios electrónicos de barrido (SEM).

**Morfología de los granos.** La observación de la forma de los granos permite reconocer la técnica de fabricación. Para obtener información completa sobre la composición del polvo, es necesario observar los granos externos así como los internos. Lo anterior se puede hacer con especímenes preparados por encapsulado del polvo en resina y sucesivamente rectificado y pulido. Los especímenes son observados con un microscopio óptico.

*Tabla 3.2. Muestra algunos términos que indican las diversas morfologías que se pueden obtener como resultado de la producción de polvos por diversas técnicas.*

Técnicas	Morfología externa	Morfología interna
Atomización	Poroso	Poroso
Sol-gel	Poroso	Poroso
Aglomeración	Aglomerado	Aglomerado
Coadsorción	Aglomerado y compactado	Aglomerado y compactado
Sinterización	Sinterizado	Sinterizado
Trituración	Fragmentado	Fragmentado
Calcinación	Fragmentado	Fragmentado
Infiltración	Infiltrado	Infiltrado
Crecimiento	Crecido	Crecido
Recubrimiento	Recubierto	Recubierto
Porosidad	Poroso	Poroso

Los polvos también varían en su obtención por lo que también variarían en su calidad y pureza a continuación se mencionara solo algunos de tema general.

Por ejemplo: para obtener Los metales y aleaciones usualmente se preparan mediante alguno de los métodos de atomización y en otras ocasiones por sinterizado. Los óxidos

y los cerámicos son manufacturados por fusión o sinterizado, seguido por presión, pero también por métodos de calcinación.

La composición de polvos se puede hacer por medio de una técnica conocida como la técnica de revestido.

Probablemente el método de fabricación de polvos más versátil es el *rociado en seco* que contiene pequeñas partículas de cierto material, que se mantienen unidas en un aglomerado esférico con unión o enlace orgánico. Los polvos preparados de esta forma pueden mejorar su densificación, mediante el sinterizado. Algunas veces, para modificar la composición del polvo, las partículas preparadas en alguno de los métodos anteriormente mencionados son mezcladas.

*Algunos de los polvos más usados actualmente son:*

-Los metales (molibdeno) y aleaciones (aleaciones autofundentes. Ni ,16 wt. % Cr , 3.5 wt. % Si, 4.5 wt. % Fe, 1 wt. % C).

-Óxidos cerámicos ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

-Mezclas cerámicas- metálicas (grafito revestido de Ni o WC aglomerado con 12 wt. % Co).

-Carburos (Cr<sub>2</sub>C<sub>6</sub>).

-Otros polvos por ejemplo, aleaciones aluminio-silicio aglomerado con 47 wt. % poliamida.

Para los fines de este trabajo solo se mencionarán algunas tablas donde se muestran que polvos son fabricados por dichos procesos:

*Tabla 3.3. Polvos típicos producidos a partir del método de atomización.*

<i>Polvo</i>	<b>Composición Química(wt. %).</b>	<b>Medio de enfriamiento</b>	<b>Tamaño de grano (µm)</b>	<b>Nombre comercial</b>
<b>Metales</b>	Al	Gas	-48+5	Amdry 3033
	Ni	Gas		Valco 2120
	Cu	Gas		Metco 55
<b>Aleaciones</b>	Bal. Ni 20 Cr	agua		Amperit 250
	Bal.Ni 15 Cr, 4.5 Si, 4Fe	Gas inerte		CSM N60

*Tabla 3.4. Producción de polvos típicos usando la fusión (sinterizado) y triturado.*

<b>Polvos</b>	<b>Composición química (wt.%)</b>	<b>Método de producción</b>	<b>Tamaño de grano (µm)</b>	<b>Nombre comercial</b>
<i>óxidos</i> óxido de cromo	99.5	fusión y triturado		Amperit 704
	Bal. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 5Si O <sub>2</sub> , 3TiO <sub>2</sub>	Sinterizado y triturado	-120+45	Metco 136 CP
Óxido de aluminio con óxido de titanio	Bal. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 3 TiO <sub>2</sub>	Fusión y triturado	-45+22	Amdry 6204

Cementados Carburo de tungsteno con cobalto	Bal. WC, 12Co Bal. WC, 10Co	Fusión y triturado sinterizado y triturado	-74+45	Valco 5101 Al-1071
<i>Carburos</i> Carburos de cromo	Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	Fusión y triturado	-106+30	Amdry 304

Tabla 3.5. Polvos comúnmente producidos usando el método de aglomerado y densificación.

Polvo	Densificado	Composición química (wt%)	Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )	Nombre comercial
Metálico Molibdeno	Sinterizado	Mo		Amperit 102
Cerámicos Cromo - Sílice		Bal. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 5SiO <sub>2</sub>	-63 +15	
Zirconia - itria	Plasma RF	Bal. Zr O <sub>2</sub> , 8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Amdry 6610
Cementados Carburo de tungsteno con cobalto		Bal. WC 12Co		Valco 5104

Tabla 3.6. Polvos típicos revestidos

Polvo	Composición Química (wt. %)	Tipo de recubrimiento	Tamaño de grano( $\mu\text{m}$ )	Nombre comercial
Níquel aluminio	Bal. Ni, 4.5 Al	Poroso	-88+45	Metco 450
Al 12Si con poliamida	Bal. AlSi, 47 poliamida	Poroso		Amdry
Ni-grafito	6 Enlace Bal. Ni, 40 Grafito	Denso		Amperit 2000

### 3.1.1 El cobre y sus propiedades

El cobre es de particular importancia ya que nos interesa elaborar electrodos de acero cubiertos de cobre. Por eso es importante poner atención a las siguientes propiedades del cobre.

El **cobre** (del latín *cūprum*, y éste del griego *kýpros*), cuyo símbolo es **Cu**, es el elemento químico de número atómico 29. Se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico es uno de los mejores conductores de electricidad. Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos<sup>[8]</sup>.

<sup>8</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Cobre>

El cobre forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, (bronces y latones). Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas.

Fue uno de los primeros metales en ser utilizado por el ser humano en la prehistoria.

El cobre es el tercer metal más utilizado en el mundo, por detrás del hierro y el aluminio. La producción mundial de cobre refinado se estimó en 15,8 Mt en el 2006, con un déficit de 10,7% frente a la demanda mundial proyectada de 17,7 Mt. Se cree que en un futuro no muy lejano se convierta en el oro de nuestros días.

Frecuentemente el cobre se usa como base interior para subsecuentes revestimientos de níquel (muy popular para protección del acero), provisto de buena adhesión del metal y mejor apariencia.<sup>[9]</sup>

### Propiedades físicas:

El cobre posee varias propiedades físicas que propician su uso industrial en múltiples aplicaciones.

Es de color rojizo y de brillo metálico, cuneta con muy buena conductividad eléctrica y térmica. Es un material abundante en la naturaleza; tiene un precio accesible y se recicla de forma indefinida; forma aleaciones para mejorar las prestaciones mecánicas y es resistente a la corrosión y oxidación.

La conductividad eléctrica del cobre puro fue adoptada por la Comisión Electrotécnica Internacional en 1913 como la referencia estándar para esta magnitud, estableciendo el International Annealed Copper Standard (Estándar Internacional del Cobre Recocido) o IACS. Pero también cabe mencionar que los cobres especiales de muy alta conductividad designados C-103 y C-110.

Existen varios tipos de cobre los cuales varían en cuanto a pureza, modo de extracción, composición, etc. Cabe mencionar que el cobre utilizado en esta tesis es un cobre electrolítico de 99.999 de pureza y también se mencionan los más utilizados en la industria mostrados en las siguientes tablas 3.7 a 3.10

Tabla 3.7. Propiedades físicas, Los siguientes valores son obtenidos a temperatura ambiente (20 c) y a presión atmosférica:

Material			Cu electrolítico	Cu de alta conductividad	Cu exento de oxígeno	Cu desoxidado con fosforo
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-Of	Cu-DLP
Magnitud	unidad	estado				
Densidad	g/cm <sup>3</sup>		8.9	8.9	8.9	8.9
Pto. fusión	°c		1083	1083	1083	1083
Coef. dilatación lineal	°c-1		0.000016	0.0000168	0.0000168	0.0000168
Calor específico	Cal/g°c		0.0921	0.0921	0.0921	0.0921
Conductividad térmica	Cal cm/cm2 s°c		0.94	0.94	0.94	0.80-0.93

<sup>9</sup> "Procesos de Manufactura" versión SI Mex 1998 compañía editorial Continental Sa de C.V. Mex pág. 795

<b>Conductividad eléctrica</b>	m/Ωm m <sup>2</sup>	recocido	58.0-58.9	58.0-58.9	58.0-58.9	49-57
<b>Resistividad eléctrica</b>	μΩ cm	recocido	1.70-1.724	1.70-1.7241	1.70-1.7241	1.76-2
<b>Coef. Térmico de la resistencia eléctrica</b>	°c-1	recocido	0.00393	0.00393	0.00393	0.00334
<b>Módulo de elasticidad</b>	Kg/mm <sup>2</sup>	Recocido	12000	12000	12000	12000
		forjado	12000-13500	12000-13500	12000-13500	12000-13500
<b>Módulo de rigidez</b>	Kg/mm <sup>2</sup>	Recocido	4500	4500	4500	4500
		forjado	4500-5000	4500-5000	4500-5000	4500-5000

### Propiedades Mecánicas:

Tanto el cobre como sus aleaciones tienen una buena maquinabilidad, es decir, son fáciles de mecanizar. El cobre posee muy buena ductilidad y maleabilidad lo que permite producir láminas e hilos muy delgados y finos. Es un metal blando, con un índice de dureza 3 en la escala de Mohs (50 en la escala de Vickers) y su resistencia a la tracción es de 210 MPa, con un límite elástico de 33,3 MPa. Admite procesos de fabricación de deformación como laminación o forja, y procesos de soldadura y sus aleaciones adquieren propiedades diferentes con tratamientos térmicos como temple y recocido. En general, sus propiedades mejoran con bajas temperaturas lo que permite utilizarlo en aplicaciones criogénicas

En cuanto a las propiedades mecánicas estas se ven afectadas a razón de la temperatura. Estas propiedades son mejores cuando se emplea a bajas temperaturas

Las tablas que a continuación se muestran los diferentes cobres más conocidos y la variación de sus propiedades a medida que va cambiando la temperatura.

*Las Propiedades mecánicas a altas temperaturas se muestran en la siguiente tabla 3.8*

Material			Cu electrolítico	Cu de alta conductividad	Cu exento de oxígeno	Cu desoxidado con fósforo
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-Of	Cu-DLP
Magnitud	unidad	estado	200°c	200°c	200°c	200°c
Resistencia a la tracción	Kg/mm <sup>2</sup>	Recocido	16	16	16	17
		Forja	17.5	17.5	16	
Limite elástico	Kg/mm <sup>2</sup>	Recocido	6	6	6.5	
		forja	14.5	14.5	13	
alargamiento	%	Recocido	57	57	57	60
		forja	34	34	45	

*Las Propiedades mecánicas a temperatura ambiente se muestran en la siguiente tabla 3.9.*

Material			Cu electrolítico	Cu de alta conductividad	Cu exento de oxígeno	Cu desoxidado con fósforo
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-Of	Cu-DLP
Magnitud	unidad	estado				
Resistencia a la tracción	Kg/mm <sup>2</sup>	Recocido (chapa)	22	22	22	22
		Recocido (alambre)	23-26	23-26	23-26	
		Forja (chapa)	27-38	27-38	27-38	
		Forja (Alambre)	38-45	38-45	38-45	

Limite elástico	Kg/mm <sup>2</sup>	Recosido (chapa)	5	5	5	5
		Forja(chapa)	18-34	18-34	18-34	18-34
alargamiento	%	Recosido (chapa)	48	48	48	48
		Recosido(alambre)	26-37	26-37	26-37	
		Forja(chapa)	6-25	6-25	6-25	6-25
Dureza Brinell		Recosido (chapa)	45	45	45	45
		Forjado (chapa)	75-105	75-105	75-105	75-105
Resistencia a la cizalladura	Kg/mm <sup>2</sup>	Recocido	16	16	16	16
		Forja (chapa)	18-20	18-20	18-20	18-20

Las Propiedades mecánicas a bajas temperaturas se muestran en la siguiente tabla 3.10.

Material			Cu electrolítico	Cu de alta conductividad	Cu exento de O <sub>2</sub>	Cu desoxidado con fósforo
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-Of	Cu-DLP
Magnitud	unidad	estado	-196°C	-196°C	-196°C	-196°C
Resistencia a la tracción	Kg/mm <sup>2</sup>	Recosido	36	36	36	35
		Forja	39	39	37-48	37
Limite elástico	Kg/mm <sup>2</sup>	Recosido	7	7	6-7.5	6-7.5
		forjado	26	26	19-22	18-20
alargamiento	%	Recosido	57	57	58-68	56-59
		forjado	45	45	43-62	49-62

### Características Químicas

En la mayoría de sus compuestos, el cobre presenta estados de oxidación bajos, siendo el más común el +2, aunque también hay algunos con estado de oxidación +1.

Expuesto al aire, el color rojo salmón inicial se torna rojo violeta por la formación de óxido cuproso (Cu<sub>2</sub>O) para ennegrecerse posteriormente por la formación de óxido cúprico (CuO). La coloración azul del Cu<sup>+2</sup> se debe a la formación del ión [Cu(OH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>]<sup>+2</sup>.

Expuesto largo tiempo al aire húmedo, forma una capa adherente e impermeable de carbonato básico (carbonato cúprico) de color verde y venenoso. También pueden formarse pátinas de cardenillo, una mezcla venenosa de acetatos de cobre de color verdoso o azulado que se forma cuando los óxidos de cobre reaccionan con ácido acético, que es el responsable del sabor del vinagre y se produce en procesos de fermentación acética.



Fig. 3.1 Pátinas cardenillo en el metro de Praga

Los halógenos atacan con facilidad al cobre, especialmente en presencia de humedad. En seco, el cloro y el bromo no producen efecto y el flúor sólo le ataca a temperaturas superiores a 500 °C. El cloruro cuproso y el cloruro cúprico, combinados con el oxígeno y en presencia de humedad producen ácido clorhídrico, ocasionando unas manchas de atacamita o paratacamita, de color verde pálido a azul verdoso, suaves y polvorientas que no se fijan sobre la superficie y producen más cloruros de cobre, iniciando de nuevo el ciclo de la erosión.

Los ácidos oxácidos atacan al cobre, por lo cual se utilizan estos ácidos como decapantes (ácido sulfúrico) y abrillantadores (ácido nítrico). El ácido sulfúrico reacciona con el cobre formando un sulfuro, CuS (covelina) o Cu<sub>2</sub>S (calcocita) de color negro y agua. También pueden formarse sales de sulfato cúprico (antlerita) con colores de verde a azul verdoso. Estas sales son muy comunes en los ánodos de los acumuladores de plomo que se emplean en los automóviles.

El ácido cítrico disuelve el óxido de cobre, por lo que se aplica para limpiar superficies de cobre, lustrando el metal y formando citrato de cobre. Si después de limpiar el cobre con ácido cítrico, se vuelve a utilizar el mismo paño para limpiar superficies de plomo, el plomo se bañará de una capa externa de citrato de cobre y citrato de plomo con un color rojizo y negro.

Solo como precaución sanitaria para los operadores cabe mencionar que la inhalación de polvo de cobre puede causar irritación en las vías respiratorias. La ingestión puede causar náuseas, vómitos y diarrea. Un exceso de cobre en la sangre puede dañar el hígado y los riñones, e incluso causar la muerte.



*Fig. 3.2. A la derecha se muestra Cubierta del Palacio de los Deportes de México D. F. construida en 1968 con cobre expuesto a la intemperie. Y ala izquierda Techumbre de cobre con pátina de cardenillo en el ayuntamiento de Minneapolis (Minnesota).*

### 3.2- Gases para proyección térmica

- **El oxígeno** es un elemento químico de símbolo **O**. En su forma molecular más frecuente,  $O_2$ , es un gas a temperatura ambiente, muy abundante y esencial en la respiración celular de los organismos aeróbicos. Es un gas incoloro, inodoro e insípido. Al  $O_3$ , denominada ozono cuya presencia en la atmósfera protege la Tierra de la incidencia de radiación ultravioleta procedente del Sol<sup>[10]</sup>.

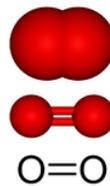
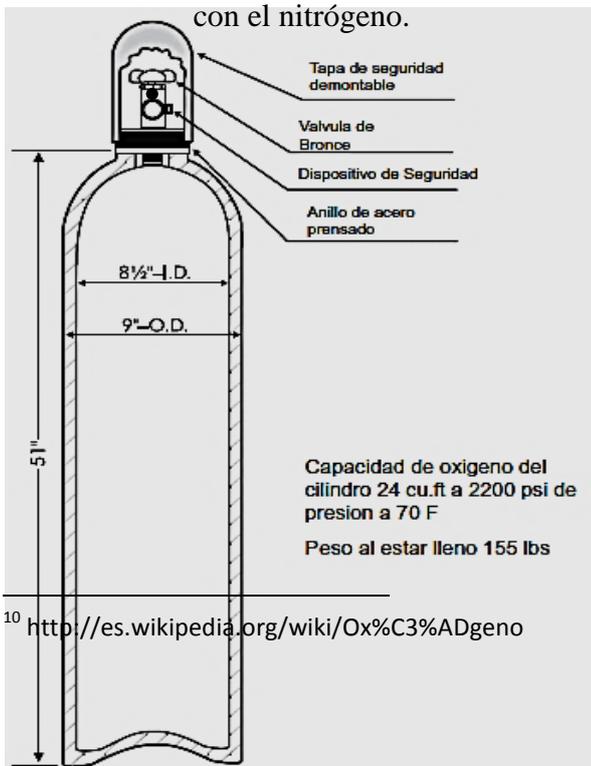
Se usan grandes cantidades de oxígeno en los sopletes para soldar a altas temperaturas, en los cuales, la mezcla de oxígeno y otro gas produce una llama con una temperatura muy superior a la que se obtiene quemando gases en aire.

El aire enriquecido con oxígeno se usa para fabricar acero en los hornos de hogar abierto. El oxígeno de gran pureza se utiliza en la industria de fabricación de metal. Es muy importante como líquido propulsor en los misiles teledirigidos y en los cohetes

El oxígeno (O y  $O_2$ ) Reacciona con la práctica totalidad de los metales (exceptuando los metales nobles) provocando la corrosión.

Serie química: No metales	Grupo= 16, período= 2, bloque= p,	Estructura cristalina= 
Numero atómico =8		cúbica
Densidad= 1,429 kg/m <sup>3</sup>	Masa atómica = 15,9994 u	Radio atómico (cálc.)= 60 (48) pm (Radio de Bohr)
Estado(s) de oxidación= -2, -1	Estado ordinario= gas	Configuración electrónica= $1s^2 2s^2 2p^4$
Punto de fusión= 50,35 K	Volumen molar= $17,36 \times 10^{-3}$ m <sup>3</sup> /mol	Conductividad térmica= 0,026 74 W/(K·m)
Punto de ebullición= 90,18 K	Electronegatividad (Pauling) = 3,44	Entalpía de fusión= 0,22259 kJ/mol
Entalpía de vaporización= 3,4099 kJ/mol	Calor específico=920 J/(K·kg)	

- **El oxígeno molecular (O<sub>2</sub>)**, es un compuesto químico diatómico. Es un gas en (condiciones normales de presión y temperatura) incoloro, inodoro e insípido. Existe una forma molecular formada por tres átomos de oxígeno, El oxígeno líquido y sólido tiene una ligera coloración azulada y en ambos estados es muy paramagnético. El oxígeno líquido se obtiene mediante la destilación fraccionada del aire líquido junto con el nitrógeno.



Estado de agregación	Gas
Apariencia	Incoloro
Masa molar	31,9988 g/mol
Punto de fusión	50,35 K (-222,8 °C)
Punto de ebullición	90,18 K (-182,97 °C)
<i>Valores en el SI y en condiciones normales (0 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario.</i>	

Fig. 3.3 tanque común de O<sub>2</sub>.

<sup>10</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Ox%C3%ADgeno>

- El **acetileno** o **etino** es el alquino más sencillo. Es un gas, altamente inflamable, un poco más ligero que el aire e incoloro. Produce una llama de hasta 3.000° C, la mayor temperatura por combustión hasta ahora conocida.<sup>[11]</sup>

Se obtiene el acetileno por *quenching* (el enfriamiento rápido) de una llama de gas natural o de fracciones volátiles del petróleo con aceites de elevado punto de ebullición. El gas es utilizado directamente en planta como producto de partida en síntesis; un proceso alternativo de síntesis, más apto para el laboratorio, es la reacción de agua con carburo cálcico (CaC<sub>2</sub>). Se forma hidróxido cálcico y acetileno. El gas formado en esta reacción a menudo tiene un olor característico a ajo debido a trazas de fosfina que se forman del fosfuro cálcico presente como impureza.

El acetileno es un compuesto exotérmico. Esto significa que la descomposición en sus elementos libera calor. Por esto su generación suele necesitar elevadas temperaturas en alguna de sus etapas o el aporte de energía química de alguna otra manera.

El acetileno es un gas explosivo si su contenido en aire está comprendido entre 2 y 82%. También explota si se comprime solo, sin disolver en otra sustancia, por lo que para almacenar se disuelve en acetona.

Fórmula enlace C-C	H-C≡C-H triple	Fórmula estructural C <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	Densidad=0.907 kg/m <sup>3</sup> ; 0,000907 g/cm <sup>3</sup>
Punto de ebullición = 216 K (-57,15 °C)		Masa molar=26 g/mol	Punto de fusión =192 K (-81,15 °C)
Solubilidad en agua=1.66 g/100 ml a 20° C	Valores en el SI y en condiciones normales (0 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario. Exenciones y referencias		

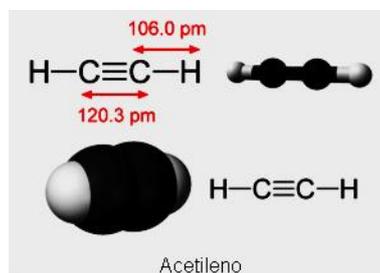


fig.s 3.4. Muestra ala izquierda la molécula de acetileno y ala derecha su forma comercial

- El **gas licuado a presión (GLP)** no es muy recomendable usarlo porque la temperaturas que alcanzan son menores al acetileno y por lo tanto dura más en obtener la temperatura adecuada y se tiene que incrementar el flujo del mismo, haciendo un mayor gasto de gas. Sin embargo muchas personas lo utilizan por económico y una seguridad relativa

El **GLP** es la mezcla de gases condensables (propano C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y butano C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>). presentes en el gas natural o disueltos en el petróleo. Los componentes del GLP, en condiciones normales son gases, son fáciles de condensar, de ahí su nombre. En la práctica,

Su uso como carburante está definido a nivel europeo por la Norma UNE EN 589. En España, el Real Decreto de 1700/2003 de 15 de diciembre, por el que se fijan las especificaciones del autogas, establece que el contenido mínimo de propano ha de ser un 20% y el contenido máximo de butano de un 80%.

<sup>11</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Acetileno>

### 3.2.1- Regulación de la llama oxiacetilénica

Al encender una llama con acetileno se alcanza una temperatura de llama de 800°C, si se mezcla acetileno y aire comprimido la temperatura aumentará a 1300 °c la cual es una buena temperatura para fundir el cobre el cual su punto de fusión es de 1080 °c, Sin embargo es mejor utilizar una mezcla acetileno-oxígeno y aire para alcanzar hasta temperaturas alrededor de los 2000 °c o mucho más dependiendo del equipo. El flujo de esta mezcla también se regulará para alcanzar una temperatura ideal para la proyección térmica

La llama se caracteriza por tener dos zonas, la primera llamada cono o dardo de color blanco deslumbrante donde se produce la combustión del oxígeno y acetileno. Y la segunda llamada penacho que es donde se produce la combustión con el oxígeno del aire de los productos no quemados.

La zona de mayor temperatura es aquella que esta inmediatamente delante del dardo llega a temperaturas de 3200°C. No se recomienda proyectar a tan corta distancia por varias razones: se reflejará el calor de la llama en la boquilla de la pistola calentándola y posiblemente fundir alguna parte de la pistola o que el material a proyectar se llegue a fundir dentro de la boquilla provocando un obstáculo y posiblemente la perdida de esta parte u otros accidentes.

La llama es fácilmente regulable ya que pueden obtenerse llamas estables con diferentes proporciones de oxígeno y acetileno. En función de la proporción de acetileno y oxígeno se disponen de los siguientes tipos de llama:

- Llama de acetileno puro: Se produce cuando se quema este en el aire. Presenta una llama que va del amarillo al rojo naranja en su parte final y que produce partículas de hollín en el aire. No tiene utilidad y no es aconsejable por que contamina.
- Llama reductora: Se genera cuando hay un exceso de acetileno. Partiendo de la llama de acetileno puro, al aumentarse el porcentaje de oxígeno se hace visible una zona brillante, dardo, seguida de un penacho acetilénico de color verde pálido, que desaparece al igualarse las proporciones.

Una forma de comparar la proporción de acetileno con respecto al oxígeno, es comparando la longitud del dardo con el penacho acetilénico medido desde la boquilla. Si este es el doble de grande, habrá por tanto el doble de acetileno.

- Llama neutra: Misma proporción de acetileno que de oxígeno. No hay penacho acetilénico.
- Llama oxidante: Hay un exceso de oxígeno que tiende a estrechar la llama a la salida de la boquilla. No debe utilizarse en el soldar de aceros.

Para poder fundir adecuadamente nuestro material de aporte (polvo o alambre necesario para recubrir la pieza) es necesario que la flama alcance la temperatura necesaria para lo cual se necesita encontrar la cantidad adecuada de oxígeno y acetileno produciendo la combustión del oxígeno-acetileno. La relación del oxígeno y combustible puede variar de 1: 1 a 6:1, resultando una temperatura de flama entre 3000 K - 3350 K y una velocidad de 80 - 100 m/s. Después hay que regularla para tener una llama oxidante como se muestra en la *Fig. 3.6* en la numero 4

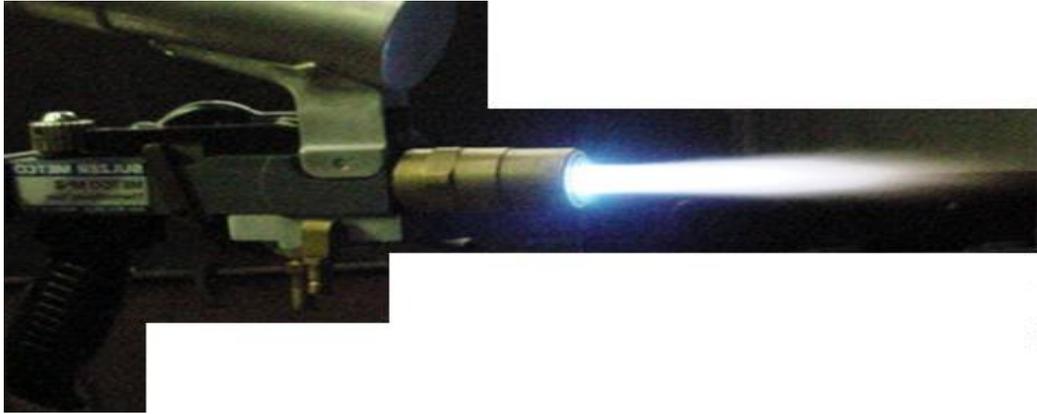


Fig. 3.5. Imagen de la flama de la pistola de proyección térmica.



Fig. 3.6. Esquemas de la regularización de la flama.



Fig. 3.7. Imágenes de los diferentes tipos de la flama

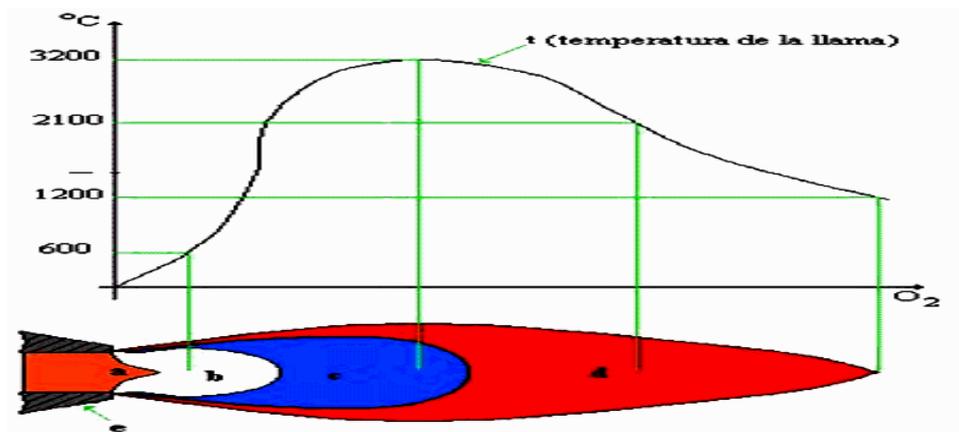


Fig. 3.8 Esquema de las diferentes temperaturas que alcanza la flama

### 3.3- Equipos auxiliares destinados a la proyección en forma convencional

Es muy importante tener en cuenta estos equipos para mejorar la calidad del trabajo, así como mejorar tiempos, costos y hasta evitar riesgos a la salud.

Dependiendo del material a proyectar y la superficie de la pieza será o no necesario el siguiente equipo:

A los equipos auxiliares me refiero al contar con googles o caretas para soldar de 10 sombras aproximadamente, un traje protector por lo menos, compresor, pirómetro (para medir la temperatura), cámara de granallado y en algunos casos hasta vibrador, una cámara aislada de ruido y partículas suspendidas donde el operador pueda trabajar con una serenidad y la confianza de no tener afectaciones a su salud. Si se va a proyectar sobre una superficie plana pensar en utilizar una prensa o algo que sujete nuestra pieza a recubrir y cuando se vaya a recubrir una pieza o electrodos en revolución lo mejor será contar con un torno paralelo, por que maneja un amplio rango de número de revoluciones x minuto, además de contar con un mecanismo para sujetar la pistola al carro de desplazamientos del torno (mecanismo de 4 barras o 3 eslabones) así se podrá ajustar fácilmente las distancias longitudinales y transversales de la pistola a la superficie de la pieza o sustrato. Sin embargo en el caso de no tener un torno se han elaborado mecanismos parecidos que semejan su función.

Los componentes, piezas y función del torno paralelo se explican de manera extensa en el anexo 1

**Compresores** se utilizan para producir aire comprimido y su finalidad es elevar la presión del aire al valor de trabajo deseado.

El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías.

Los compresores móviles se utilizan en el ramo de la construcción o en máquinas que se desplazan frecuentemente. En el momento de la planificación es necesario prever un tamaño superior de la red, con el fin de poder alimentar aparatos neumáticos nuevos que se adquieran en el futuro. Por ello, es necesario sobredimensionar la instalación, al objeto de que el compresor no resulte más tarde insuficiente, puesto que toda ampliación ulterior en el equipo generador supone gastos muy considerables.

Es muy importante que el aire sea puro. Si es puro el generador de aire comprimido tendrá una larga duración.

También debería tenerse en cuenta la aplicación correcta de los diversos tipos de compresores. De ellos se mencionan ampliamente en el anexo 1

### 3.4- Parámetros de equipos auxiliares contra equipos de proyección

Los parámetros varían según el material a proyectar y las características de la pieza o sustrato. Es necesario muchas veces el experimentar hasta encontrar la mejor condición de parámetros para obtener el mejor recubrimiento posible antes de recubrir la pieza deseada.

Para nuestro caso nos interesaba recubrir de cobre electrolítico un acero 1018. Se hicieron gran cantidad de pruebas para poder encontrar unos valores adecuados en los que se tuviera una muy buena adherencia, además que se fundiera adecuadamente todas las partículas de polvo proyectadas en la pieza, que tuviera una mejoría en sus propiedades mecánicas o físicas, que se pudiera maquinar y dejar un acabado superficial óptimo ya sea igual o muy parecido a una pieza o sustrato de cobre puro.

Los datos encontrados para tal fin son los siguientes de la tabla 3.14:

Tabla 3.14 Parámetros de equipos auxiliares contra equipos de proyección	
Se encontró una presión del compresor de 9 kg/cm <sup>2</sup> para granallar y de 1.5 kg/cm <sup>2</sup> para recubrir	
Se utilizó alúmina número 12, acetona y alcohol para limpieza	
Precalentar desde 150 °C el sustrato si no hay peligro de distorsión. Se debe tener conocimiento que a temperaturas superiores a 180 °C, pues pueden tener lugar oxidaciones indeseables, para el caso del acero el electrodo o pieza a recubrir se puede precalentar a 1000°c	
Avance 4mm x Rev. Y hasta de 2 mm x Rev.	
Velocidad Lineal = 1/330 [m/s] o 18.1818 [cm/min]	
Revoluciones óptimas de 75 a 115 rpm	
Presión de manómetros del tanques	Oxígeno=2.2bar o 32 psi Acetileno=0.4kg/cm <sup>2</sup> o 5.5 psi
Presión para el fluxómetro	Oxigeno= 75 psi Acetileno= 10psi
Distancia de la pistola a la pieza de 102 a 127mm, a menor distancia se refleja el calor en la boquilla de la pistola y a mayor distancia no se garantiza un buen recubrimiento	

Estos valores se llevan a obtener una temperatura poco más de 1080 °c la cual es necesaria para fundir cada grano de cobre y proyectarlos sobre nuestro sustrato o electrodo y así tener la seguridad de buenos recubrimiento de aproximadamente 1mm de espesor.

## Capítulo 4- Banco de Pruebas de la elaboración de electrodos de acero recubiertos de cobre

**Objetivo:** Realizar un banco en el que se pueda hacer gran variedad de pruebas variando parámetros y así poder conseguir un recubrimiento homogéneo realizando diferentes comparaciones a fin de ayudar en las teorías anteriormente mencionadas y así obtener la mejor calidad posible para nuestro electrodo

### 4.1- Limpieza y preparación de las probetas

Se utilizó acero 1018. Se eligió por ser un material utilizado ampliamente en la industria, por su costo, propiedad de maquinabilidad y fácilmente puede mejorar sus propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos. También el porta electrodo era de este mismo material lo cual lo hace viable para utilizar.

-Las barras de acero son de 1 in y de 6 metros de longitud aproximadamente. Así que procedió a cortar pequeños tramos de aproximadamente 16 cm con una cierra cinta, después se colocaron en el torno para refrentar (retirar una parte de material dejando un acabado uniforme) la superficie cortada y así garantizar que la nueva cara era completamente perpendicular a superficie exterior cilíndrica.

-Como se necesitaba recubrir tanto la nueva cara así como aproximadamente 4cm de la superficie exterior cilíndrica. Se procedió a granallar estas aéreas y a proteger mediante mascarillas de lámina de acero las superficies que no se requiera recubrir



Fig. 4.1. Probetas granalladas en un extremo

-Por último se procedió a la limpieza (usando solventes orgánicos comunes, acetona, alcohol  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) así podemos retirar cualquier rastro de polvo y grasa que pudiera haberse adherido a la pieza a recubrir, no se recomienda vapor por que puede producir efectos de corrosión no deseados



Fig. 4.2. Alcohol necesario para limpieza

Es muy importante la limpieza de la pieza o sustrato para mejorar la calidad del recubrimiento

Después de seguir estos pasos se puede decir que nuestras piezas o probetas están listas para ser recubiertas. Sin embargo es necesario tener un gran número de esta para hacerlo de manera programada y eficiente y evitar tiempos muertos de operación.



Fig. 4.3. Electrodo granallado y limpio

#### 4.2- Procedimiento de Integración de equipos auxiliares y de sistema de proyección.

Una vez teniendo la pieza proseguimos a integrar todos los elementos para poder proyectar sobre piezas a revolución

-Se coloca la pieza en las mordazas del cabezal del torno y se aseguramos, ajustamos las revoluciones las cuales estén entre 75 a 115 rpm y un avance del carro de 4mm a 2 mm x Rev.



Fig. 4.4. Electrodo granallado y limpio colocado en el torno

Se puede calcular la velocidad lineal del carro si se cuenta con un cronometro y un fluxómetro. Recorrió 0.5 [m] en 2:45 [min] por lo que

Velocidad lineal = 1/330 [m/s] o 18.1818 [cm/min]

-A la torreta del carro se sujeta el mecanismo de 4 barras (3 eslabones) el cual del otro lado se sujetara la pistola



Fig. 4.5. Mecanismo de 4 barras o tres eslabones



Fig. 4.6. Muestra al operario colocando el Mecanismo de 4 barras y dispositivo de proyección



Fig. 4.7. Mecanismo de 4 barras sujetado en un extremo al torno y del otro el dispositivo para proyección térmica

-Para hacer la combustión y poder fundir el cobre necesitamos un tanque de oxígeno ( $O_2$ ) de más de  $20 \text{ ft}^3$  y uno de acetileno ( $C_2-H_2$ ) de aproximadamente  $5 \text{ kg}$ . A cada tanque se le coloca un manómetro el cual nos indicará la presión de trabajo y la presión del interior del tanque

-A estos manómetros se les coloca una mangueras especiales las cuales son de color verde y rojo y son capaces de resistir grandes presiones. El verde es para el oxígeno y el rojo para el acetileno.

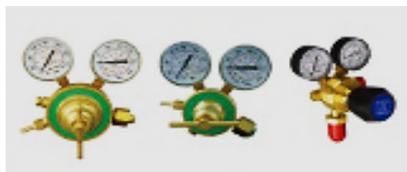


Fig. 4.8. Manómetros

La presión de los manómetros debe ajustarse. En el caso del cobre la presión del tanque de oxígeno= $2.2 \text{ bar}$  o  $32 \text{ psi}$  y del de acetileno= $0.4 \text{ kg/cm}^2$  o  $5.5 \text{ psi}$

-De ahí pasa por medio de las mangueras a un fluxómetro el cual tiene como función de ajuste de los gases al equipo de proyección. Este también se regula mediante unas perilla y se ve como unos pequeños balines que se encuentran en el interior suben o bajan estos se deberán colocar a una presión de oxígeno= $75 \text{ psi}$ , presión acetileno= $10 \text{ psi}$ . El fluxómetro tiene dos entradas a los lados y dos salidas en la parte inferior estas últimas se conectan mediante mangueras nuevamente a la pistola de proyección



Fig.

4.9. A la izquierda se aprecia de los balines indicadores en el fluxómetro y ala derecha pistola para proyección térmica con polvo conectada al fluxómetro

A veces son necesarios adaptadores para las conexiones, se utilizan para conectar el regulador o cualquier otro equipo cuyas roscas CGA hacen imposible hacer una conexión directa. Estos accesorios deben estar fabricados bajo estrictas normas de calidad y cumpliendo con las especificaciones de la Asociación de Gases Comprimidos. Además es necesario recubrir todas las roscas con cinta de teflón



Fig. 4.10. A la izquierda se observa la manguera que se utiliza y a la derecha los diferentes adaptadores

- La pistola de proyección Metco 5p II para polvos cuenta con un compartimiento de aluminio en la parte superior el cual debe ser llenado con polvo. En este caso polvo de cobre electrolítico Metco 55, se debe colocar la boquilla 5P7B-G o la P7G la cual se encuentra en el interior de la pistola, la válvula dosificadora en la parte superior es redonda con números en la superficie debe marcar el 12 a 14 (dependiendo que tanto cobre queramos que salga), la pistola cuenta en la parte de atrás con tres entradas para los gases (oxígeno, Acetileno y aire) los cuales son conectados mediante mangueras desde el fluxómetro

- La pistola cuenta con una válvula reguladora de gases (gatillo de aluminio) la cual se recomienda por precaución siempre mantenerla cerrada cuando no se esté utilizando.



Fig. 4.11. Pistola 5p II utilizada para proyectar polvo

-Se debe tener una distancia entre la pistola a la pieza de 102-127mm para poder lograr una buena proyección donde se logre fundir todo el material de aporte lanzado por la pistola (alambre o polvo)

### 4.3- Procedimiento de Semiautomatización del sistema de proyección

Una vez organizado todo lo anterior en el tema 4.2 y con las medidas necesarias de protección para el operario (uso de goggles, guantes, bata, etc.) Procedemos a lo siguiente:

1. Encender el torno para que este comience a girar la pieza
2. Encender la pistola. Lo cual se hace girando la válvula de gases hasta el primer tope como en la imagen 4.12 y de manera rápida se utiliza un chispero a una distancia aproximada de una a dos pulgadas a la boquilla de la pistola. Esto encenderá los gases produciendo una flama.



Fig. 4.12. Se observa a la izquierda la pistola con el gatillo hasta el primer tope y a la derecha un chispero común

3. Encendemos el compresor y con una presión de aire 1.5 a 2 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente y empezamos a alimentar la pistola
4. Seguimos girando la válvula de gases lentamente hasta regular nuestra flama (la cual debe ser azul cuando las puntas o dardos azules empiecen a crecer y luego decrecer por lo tanto nuestro flujo de gases es mayo). Se deberá de tener la precaución de no abrir de más la pistola porque de lo contrario se ahogara la combustión y se apagará nuestra flama



Fig. 4.13. Pistola con el gatillo pasando el primer tope

5. Se da un precalentamiento a nuestra pieza (siempre y cuando el material de la pieza no lo permitan). Como en el caso de proyectar cobre sobre acero se puede precalentar hasta 1000°C y así garantizar que se fundirá la mayoría del cobre y quedará mejor adherido

6. Se jala el gatillo en la parte inferior al máximo. En ese momento se atorará y saldrá de manera continua nuestro cobre a proyectar. Fig. 4.13
7. Mover la palanca del automático del carro del torno. Entonces el carro se empezará a mover de manera horizontal llevando con sigo la pistola, que a su vez está proyectando el cobre y al hacer contacto con la pieza para este caso de acero para el electrodo (que ya se encontraba girando). Aplicará una capa uniforme en toda la cara
8. Por último se jala otra vez el gatillo, esto desatorará el gatillo y el flujo de cobre se detendrá. Se recomienda un antes de apagar la pistola calentar un poco la pieza recubierta de cobre así se cerrarán algunos poros superficiales.
9. Para apagar el equipo es necesario girar la gatillo plateado (válvula de gases) en sentido contrario hasta llegar a como estaba en el inicio, cerrar las válvulas de los tanques y abrir otra vez la pistola esto lo que ara será purgar los gases que queden en el fluxómetro y las mangueras. Después se cierra la válvula de gases y los manómetros. Esto evitará tener presiones de gases en el sistema antes de abrir los tanques y tener accidentes.

Una vez realizado estos nueve pasos es necesario ir variando parámetros (distancia de rociado, avance, revoluciones, mezcla de gases, etc.) todo esto para obtener patrón de rociado



*Fig. 4.14. Se muestra como se hace en la industria y tal cual como se realizó*

10. Se recomienda proyectar más de lo necesario para que después en el momento del maquinado o rectificado no se termine el recubrimiento y deje al electrodo o la pieza expuesta. Se recomienda que el mínimo espesor proyectado sea de 1 mm y para acabado de 0.5 mm

#### 4.4- Obtención de recubrimientos

Gracias al que el proceso se realizó de manera semiautomática y controlada podemos garantizar que la capa del material proyectado (cobre) es del mismo espesor. Sin embargo esto podría cambiar bajo factores externos no deseados como: cambios en las presiones de los gases (oxígeno, acetileno, aire), que el material a proyectar (polvo de cobre) comience a terminarse en el recipiente de la pistola o fallas en el equipo ya sea en la pistola, en el torno o el fluxómetro

También es importante mantener la tasa de rociado en un valor determinado durante todo el recubrimiento. Así este será regular y evitaremos ondulaciones superficiales debidas a los cambios de cantidades de material proyectado

El espesor del recubrimiento va a aumentar o a disminuir directamente proporcional dependiendo si se aumentan o disminuyen los siguientes factores: la tasa de rociado, las revoluciones que sometamos a la pieza, el avance del carro en el cual va la pistola y la distancia de proyección

Se realizaron diferentes ensayos y se obtuvieron recubrimientos de una calidad aceptables y lo mejor de todo fue que no se presentó gran desperdicio de material puesto que al proyectar se alcanzaron eficiencias del 90% en la deposición de cobre sobre la pieza y al maquinar para remover la capa exterior que por lo general se oxida o se desea rectificar la superficie para que esta se completamente uniforme se le suele retirar un 20% de material lo que nos hace decir que al proyectar el cobre sobre la pieza y maquinarla se obtiene eficiencias alrededor del 80%. Lo cual es muy bueno si pensamos en que no queremos desperdiciar material. Sin embargo ese 30% lo podemos reciclar si lo juntamos y lo trituramos en molinos especiales, lo tratamos y garantizamos que cumple con las mismas características que el material original (Metco 55)



Fig. 4.15 polvo de cobre (Metco 55) con 4.5 kg

El tiempo de rociado es el tiempo que tarda la operación de rociado y se puede calcular

$$\text{Tiempo de rociado} = \frac{\text{Cantidad de material a rociar}}{(\text{Tasa de rociado}) (\% \text{ de tiempo efectivo de rociado})}$$

Para el caso de el electrodo de una cara cilíndrica de 2.50 [cm] y una cara circular de 1 [in] de diámetro dando una capa. el operador se tardará 7.8 [s] en la cara cilíndrica y en la cara circular 4.92[s]. Por lo tanto el tiempo total es de 13 [s] aproximadamente. Aunque falta tomar en cuenta el tiempo que se tarda el operador en precalentar el electrodo.

Los espesores del recubrimiento variaran dependiendo de la tasa de rociado que se le proporcione a la pistola

## **Capítulo 5- Experimentación, análisis y discusión de resultados**

**Objetivos:** Una vez obtenido el material de pruebas se puede hacer diversos estudios y análisis donde se podrá demostrar la viabilidad de la proyección térmica por flama de manera clara y concisa

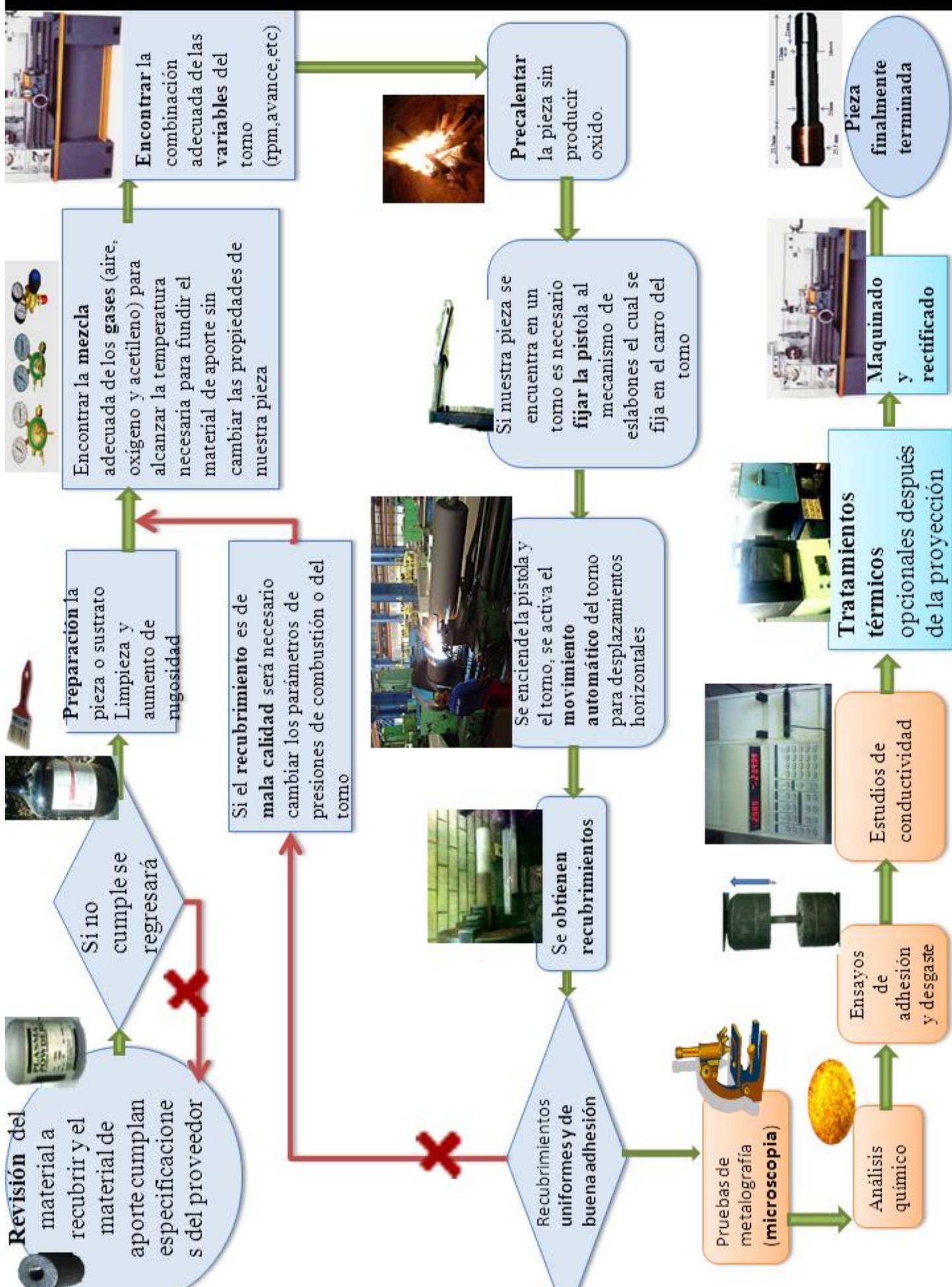
Los diferentes estudios se realizaron en los laboratorios de la facultad de ingeniería de la UNAM

Es importante verificar que las condiciones de trabajo no cambien durante todo el proceso

En el siguiente diagrama 5.1 se muestra de manera clara como se trabajó y como se planeó obtener el recubrimiento por proyección térmica que para este trabajo fue electrodo de acero 1018 recubierto de cobre electrolítico puro montado en un torno paralelo.

Este procedimiento se realiza varias veces y en cada una se variaron los parámetros y se eligió el que se obtuvo los mejores resultados.

Mapa esquemático de flujo de operaciones 5.1:



## 5.1- Estudios de Metalografía de las piezas (Microscopia óptica y electrónica)

Primero es necesario preparar de la superficie a analizar de las muestras.

Después de haber recubierto las barras de acero 1018 con cobre necesitamos cortarlas y hacer pequeñas muestras de unos centímetros de alto para poder ser manipularlas dentro del microscopio

La muestra debe seleccionarse de la zona de la pieza que necesita examinarse y en la orientación apropiada. Es decir, si el flujo de grano o la distorsión es importante, puede ser que una sección transversal de la parte no muestre granos alargados; únicamente una tajada paralela a la dirección de laminado revelaría adecuadamente los granos alargados debido al laminado. Algunas veces se requiere más de una muestra.

La manera de preparar las muestras se mencionan en el anexo 2

### Microscopia

Utilización de microscopios estéreos (que favorecen la profundidad de foco y permiten por tanto, visión tridimensional del área observada) con aumentos que pueden variar de 5x a 64X

El principal instrumento para la realización de un examen metalográfico lo constituye el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50x y 2000x.

El microscopio metalográfico, debido a la opacidad de los metales y aleaciones, opera con la luz reflejada por el metal. Por lo que para poder observar la muestra es necesario preparar una probeta y pulir a espejo la superficie.

Existe una norma internacional ASTM E 112 que trata sobre las correctas técnicas de Metalografía



La siguientes Fig.5.6 son de los dos microscopios que se utilizaron: a la izquierda un microscopio óptico estéreo y a la derecha un microscopio electrónico de barrido

Se realizaron suficientes pruebas a diferentes muestras cilíndricas de un diámetro aproximado de 1 pulgada y altura variable entre 1 y 2 cm para poder manipular correctamente en los microscopios. De estas muestras se obtuvieron 5 resultados característicos repetitivos y por ser precalentados a diferentes temperaturas pensando en un futuro no solo recubrir piezas de acero sino también de otros materiales. Los casos son los siguientes:

**Caso 1.-** Para una pieza de acero 1018 precalentada a  $1000^{\circ}\text{C}$  recubierta de cobre y que posteriormente se sometió a un proceso térmico de recocido se pudo observar las imágenes obtenidas de la Fig.5.7. y Fig.5.8



Fig. 5.7. Se observa a simple vista una muestra precalentada a  $1000^{\circ}\text{C}$  posteriormente recocida y pulida y vista a simple



En la siguiente Fig.5.8. se observada en el microscopio óptico a 100 aumentos se muestra el cobre de color naranja y el hierro en una forma muy peculiar como ramificaciones de color gris y en un área de  $500\mu\text{m}$  alrededor de 8 poros lo que es poco en comparación con otras piezas, precalentamiento  $1000^{\circ}\text{C}$

**Caso 2.-** Las Fig. 5.9 a Fig5.13Fig. Se observa en la misma muestra anterior precalentada a  $1000^{\circ}\text{C}$  y recocida pero vista en un corte transversal



Fig.5.9 Muestra a simple vista

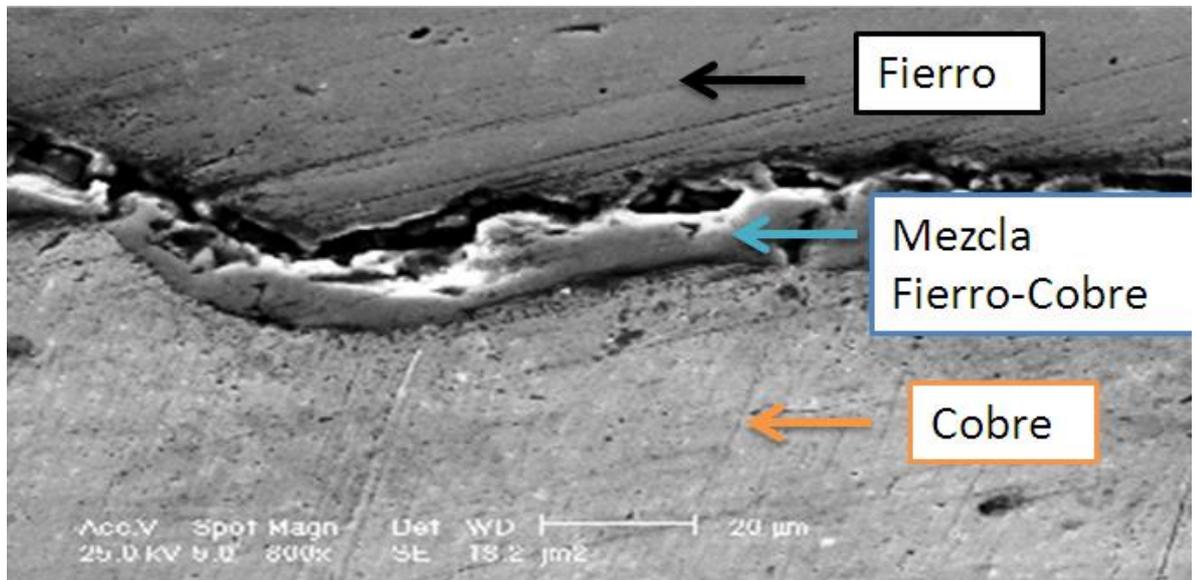


Fig.5.10. Del microscopio electrónico de barrido se observa el gris más oscuro referente al fierro, en medio una franja de la aleación fierro-cobre debida al precalentamiento, por último, el gris claro correspondiente al cobre a 400x. La franja de la mezcla fierro-cobre mide  $8.82\mu\text{m}$

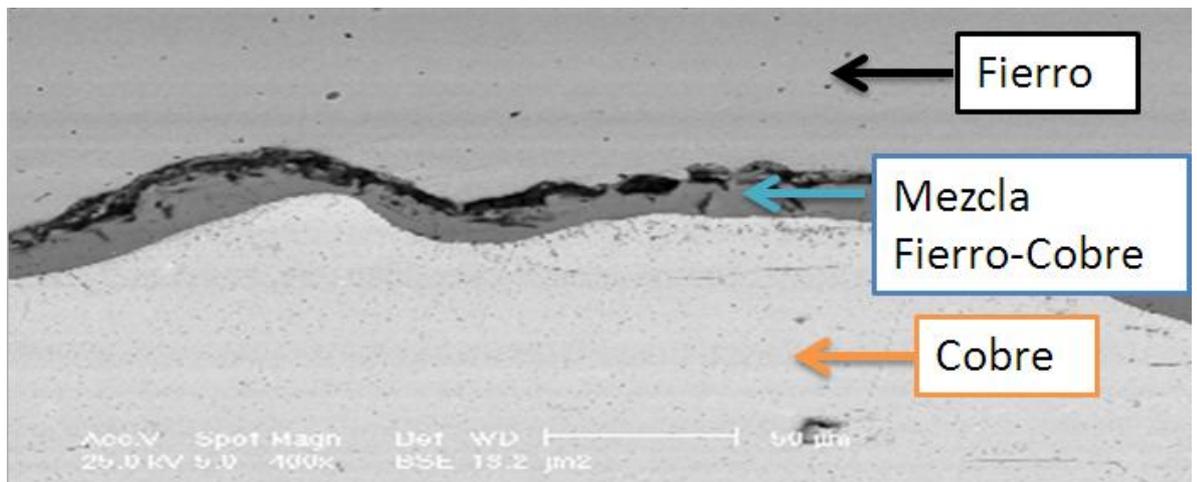


Fig. 5.11. Del microscopio electrónico a 400x se observa al igual que la anterior pero en otra probeta. Una franja de la mezcla fierro-cobre de un espesor de  $11.45\mu\text{m}$  por lo que el precalentamiento fue mayor que la anterior.

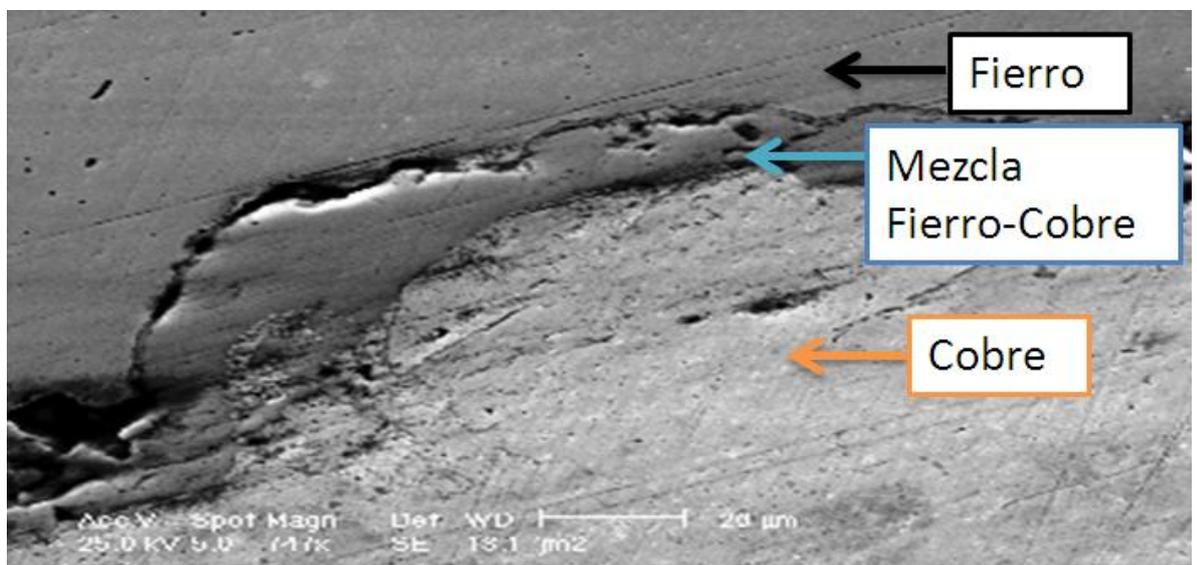


Fig. 5.12. A 800x se denota la mezcla fierro-cobre y unas pequeñas cavidades



Fig. 5.13. Además se ve a 100 aumentos cuatro poros en un área de  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  y además se alcanza a ver una microporosidad de baja dimensionalidad

**Caso 3.-** De la Fig. 5.14 a la Fig.5.19 Son de una muestra sin tratamiento térmico y sólo con un precalentamiento menor  $180^\circ\text{C}$



Fig. 5.14. Muestra a simple vista

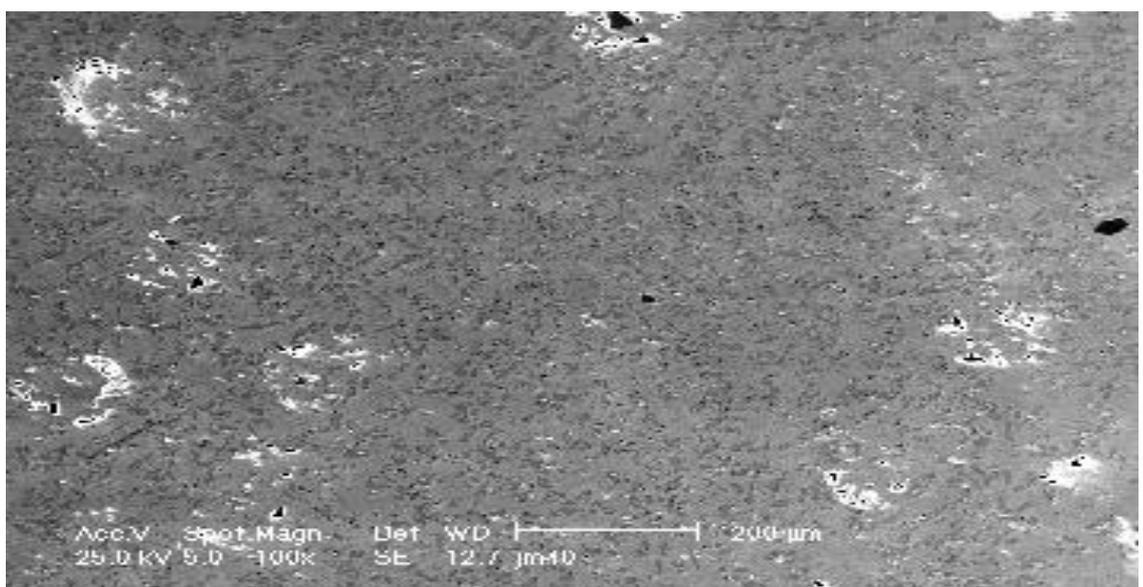
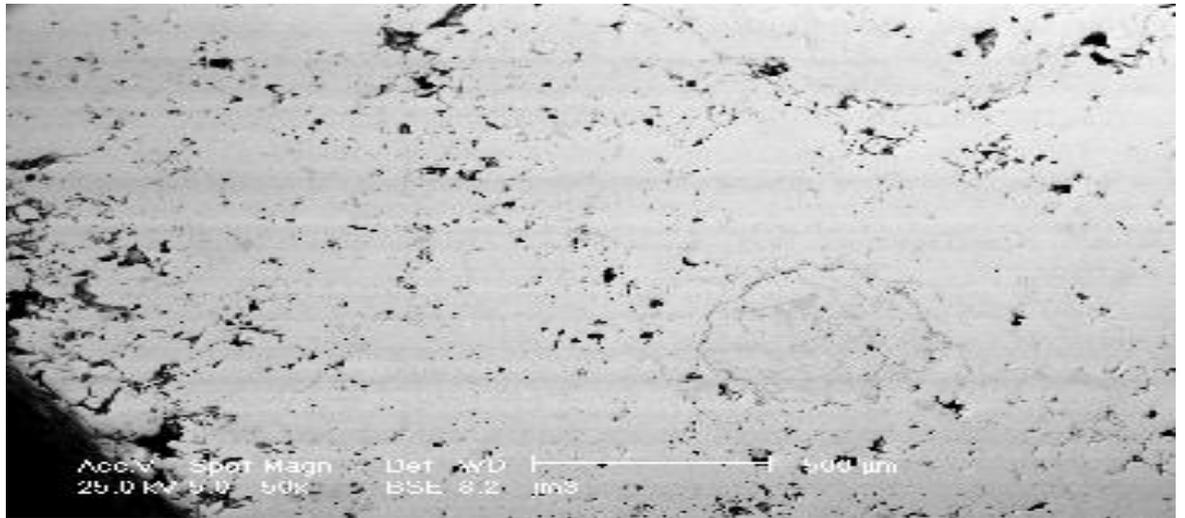
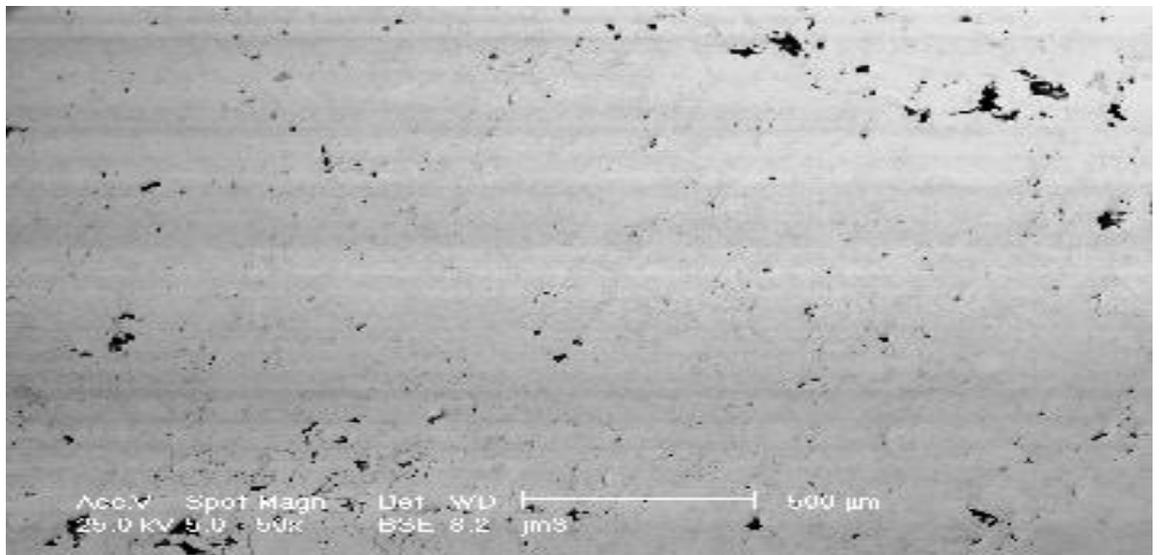


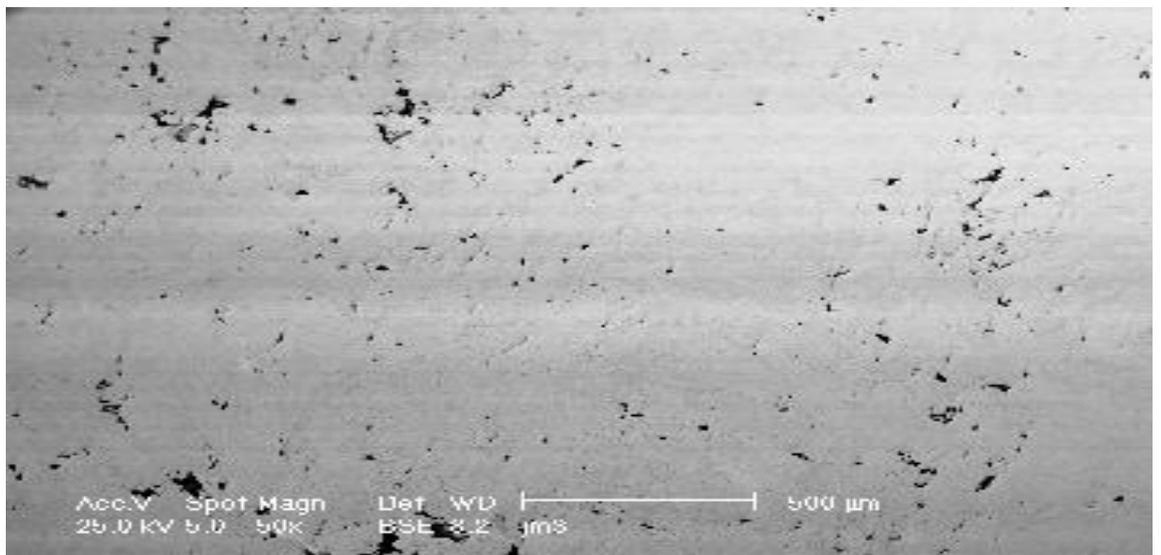
Fig. 5.15. Del microscopio electrónico de barrido a 50x; mayor porosidad superficial y de mayor tamaño que en la muestra que tuvo un tratamiento térmico previo al recubrimiento



*Fig. 5.16. Del microscopio electrónico de barrido a 100x se observa cierta uniformidad pero porosidad de gran tamaño en toda la superficie recubierta por el cobre*



*Fig. 5.17. Del microscopio electrónico de barrido a 100x en otra ubicación de la misma pieza*



*Fig. 5.18. Del microscopio electrónico de barrido a 100x Claro que hay partes de la muestra que tienen menos porosidad pero en promedio no deja de ser de gran tamaño el poro*

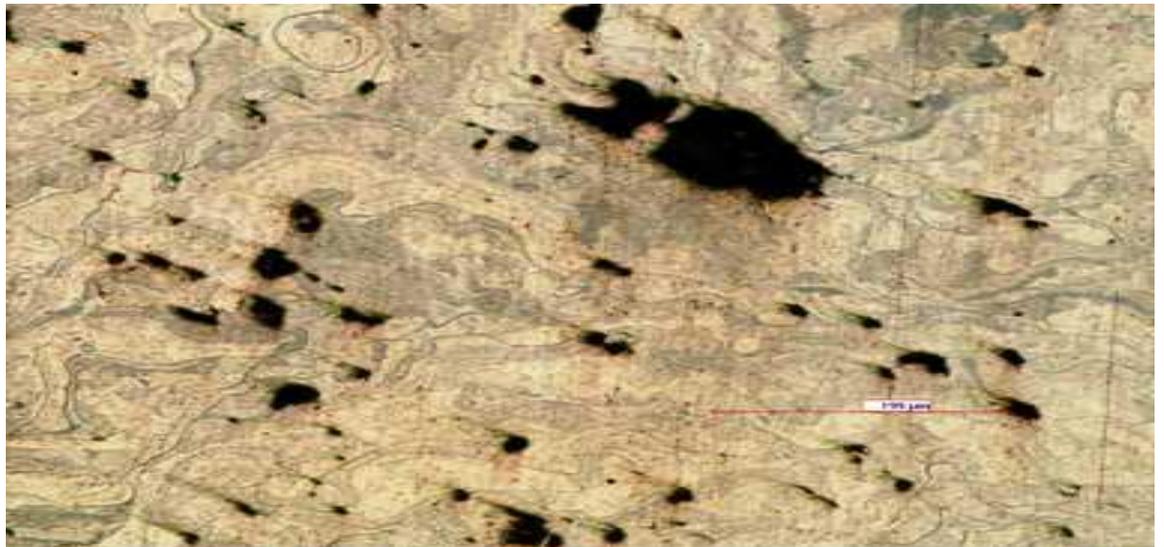


Fig. 5.19. Por ser de las primeras pruebas que se elaboraban se observa a 100 aumentos sobre el cobre proyectado se alcanza a ver que es más porosa se pudieron contar en un área de  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  24 poros y además más uniforme en todo el cobre no sólo en la superficie

**Caso 4.-** La misma muestra anterior vista en un corte transversal (solo con un precalentamiento menor  $180^{\circ}\text{C}$  y sin tratamiento térmico) se puede observar en las imágenes Fig.5.20 a la 5.24



Fig. 5.20

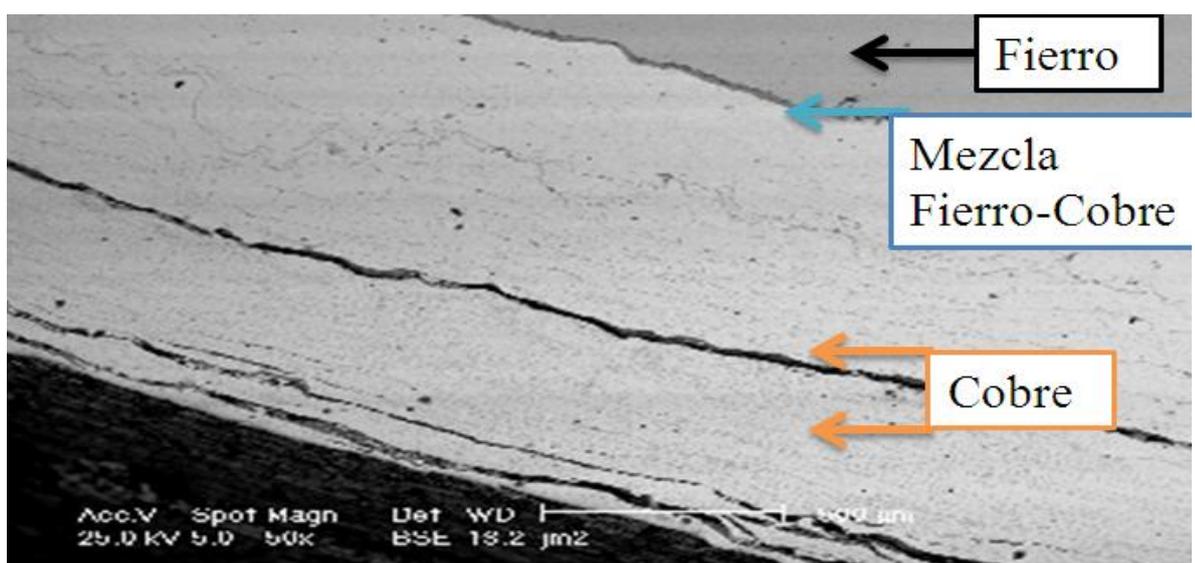


Fig. 5.21 Se puede observar en el microscopio electrónico de barrido a 50x se dieron dos capas de cobre de 425 y de  $638\mu\text{m}$  de la porosidad no es mucha pero más que el caso uno y dos y además de gran tamaño y la franja de la aleación fierro-cobre es menor

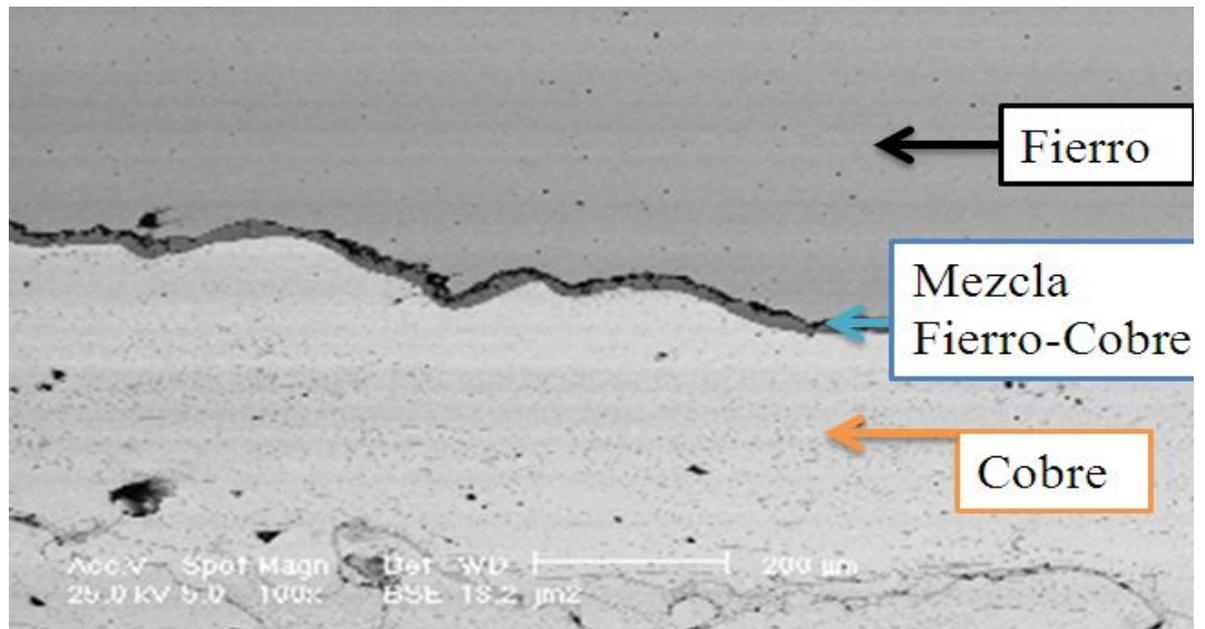


Fig. 5.22 Se puede observar a 100x que se dieron dos capas de cobre en la exterior se observa mayor porosidad que en la interna. Una franja de la mezcla de 18.32 $\mu\text{m}$  aprox. Por ser el precalentamiento menor que el caso 1 y 2

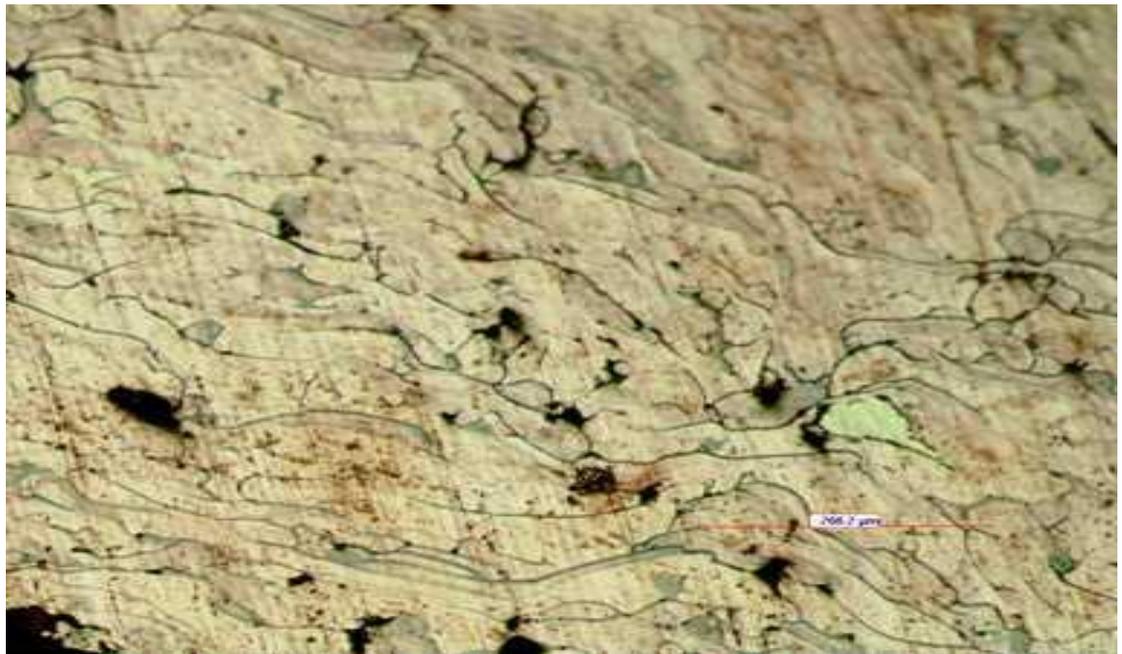


Fig. 5.23. Además de ser mucho más porosa que los casos anteriores se ven en el microscopio óptico unas manchas gris-verdosas las cuales son producidas por el agua. En el microscopio óptico en un área de 500 $\mu\text{m}$  x 500 $\mu\text{m}$  se cuantificaron en promedio 9 poros además se ve en la muestra los límites de grano material y los splats

**Caso 5.-** A veces cuando se está proyectando y se llega termina el material para recubrir (cobre) o se está retirando la pistola de la pieza se puede llegar a ver: splats, granos que no se fundieron bien, etc. Por lo que después de proyectar se recomienda también calentar la pieza ya sea con la flama de la pistola o en un horno eléctrico (preferentemente), después maquinar para remover esta capa superficial que probablemente tenga oxido o tal vez hollín rectificar y por último rectificar para tener una exactitud dimensional, las imágenes de a continuación son la muestra de defectos en el proceso de proyección térmica por flama los cuales muestran defectos como: mala temperatura de combustión, falta de precalentamiento, distancia de proyección inadecuada, etc. Fig.5.24 a la Fig. 5.29.

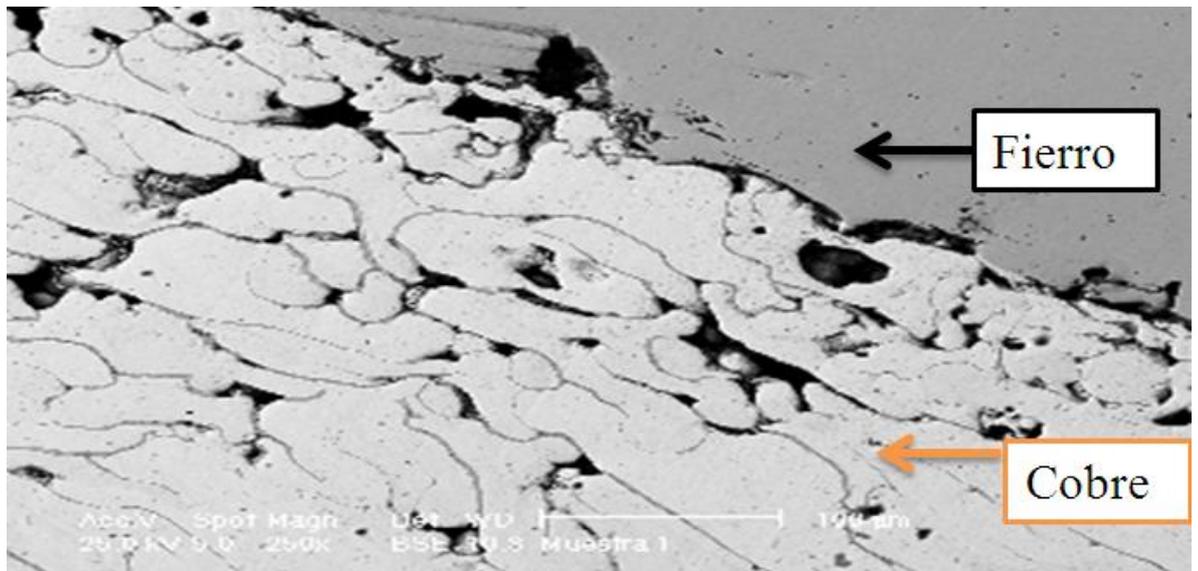


Fig. 5.24. En esta imagen se denota que hizo falta un precalentamiento en la pieza por lo que no se alcanzaron a fundir correctamente las partículas

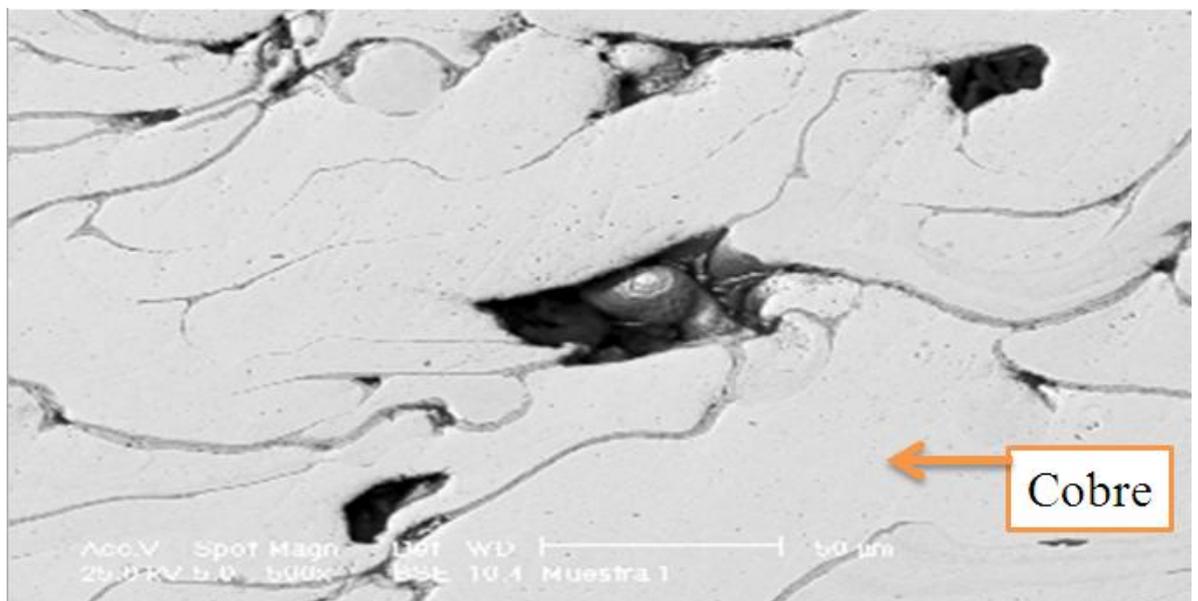


Fig. 5.25. Se observa un grano de cobre que no se fundió dentro de una pequeña cavidad. Tal vez faltó que se alcanzara mayor temperatura de flama

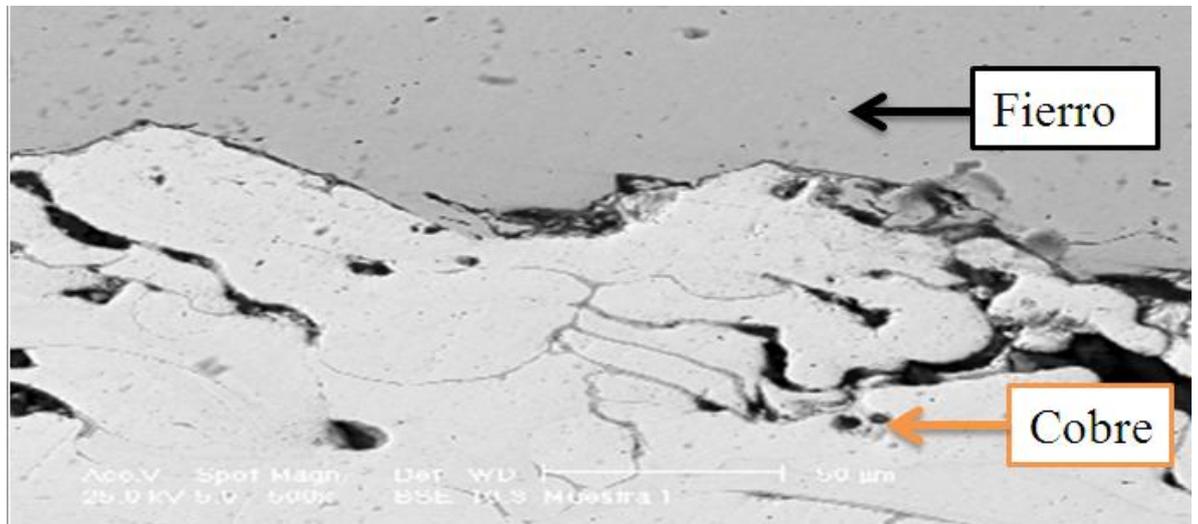


Fig. 5.26 se observa que el precalentamiento no se llegó a la temperatura necesaria para fundir el cobre y que quedaron grandes poros

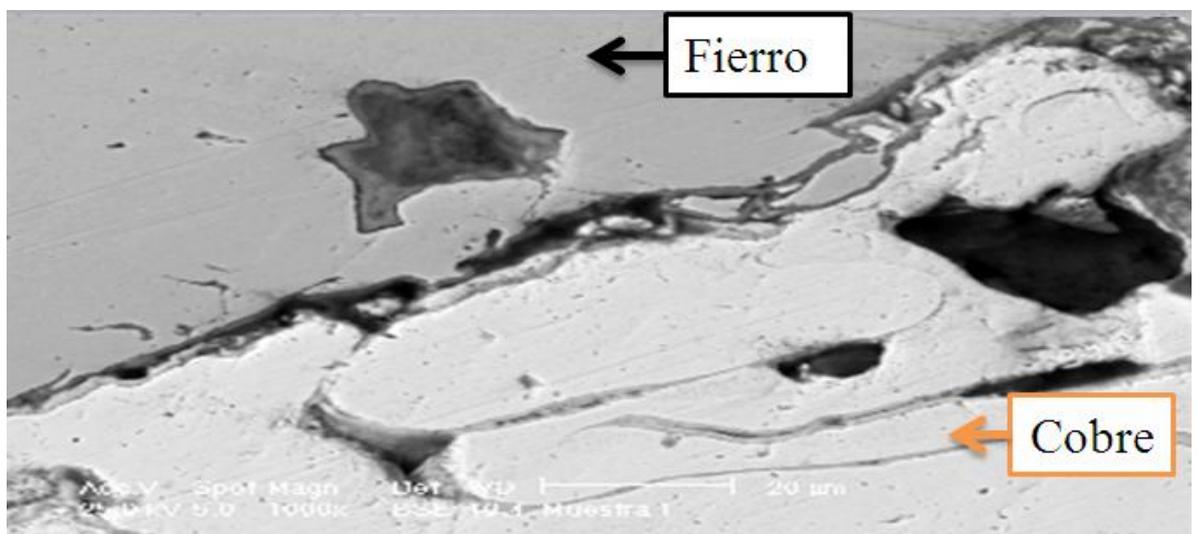


Fig.5.27. En un acercamiento a la anterior se observa que además el proceso de granallado fue con demasiada fuerza provocando unas micro fisuras en el fierro (de color gris más oscuro) y una mala unión fierro-cobre tal vez por oxido o suciedad.

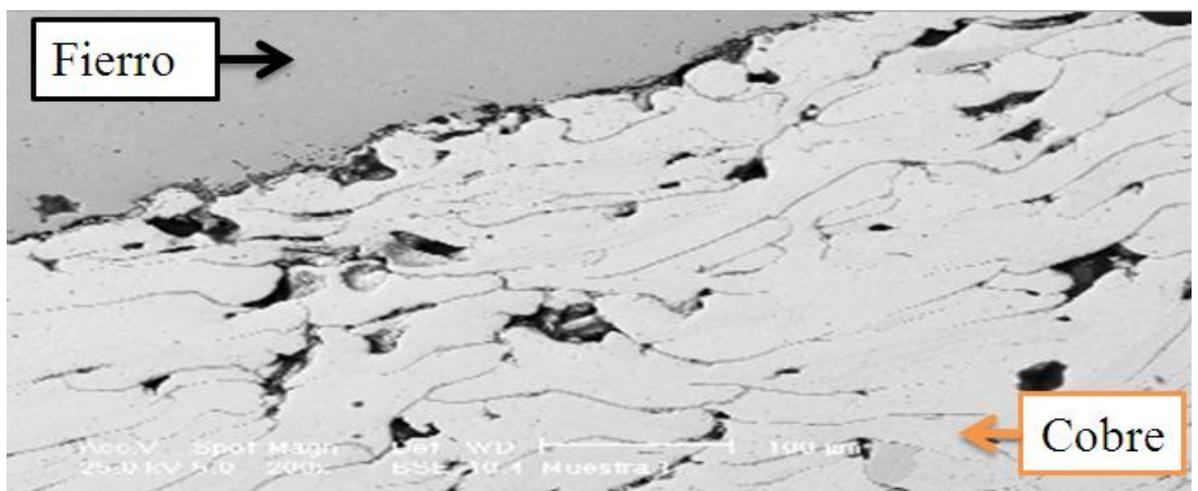
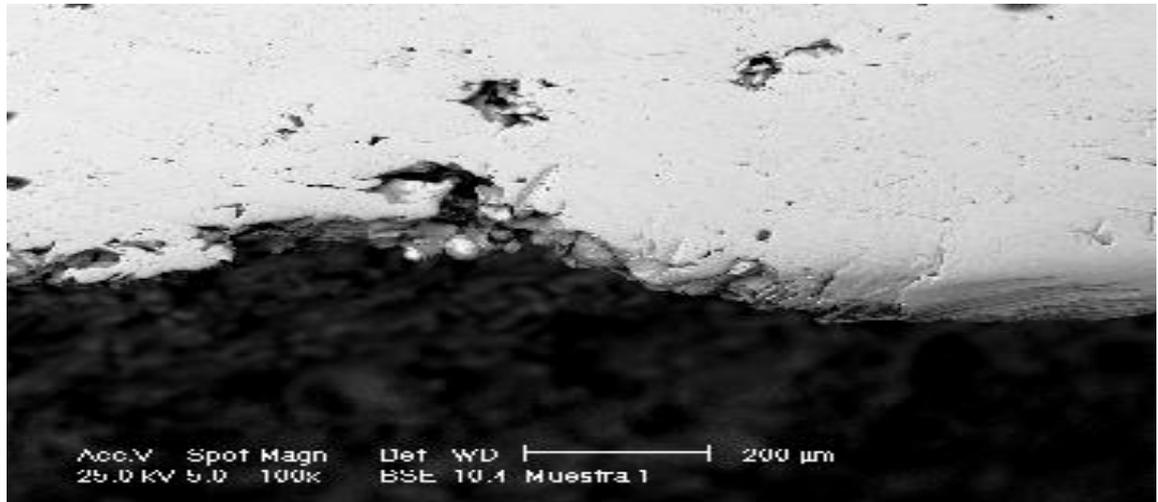


Fig. 5.28. Es un alejamiento de la anterior para mostrar la cantidad de poros en el cobre



*Fig. 5.29. Vista de la orilla del recubrimiento donde se nota irregularidades. Por lo que se recomienda maquinarse y rectificarse para dejar un acabado uniforme y lizo.*

Se puede decir que al recubrir acero con cobre y precalentar la pieza a 1000°C se forma una capa de una mezcla hierro-cobre entre ellas y se obtiene generalmente recubrimientos de muy buena calidad, durabilidad, adherencia y muy poca porosidad tal y como se observó en el caso 1 y 2. Pero sí en cambio el precalentamiento no llega a la temperatura adecuada por diversos factores como el tiempo de contacto de la flama con la pieza, la temperatura de combustión es inadecuada, etc. Pasaría como en el caso 3 y 4 donde la porosidad es mayor en cuanto a número y tamaño, no se alcanzan a fundir adecuadamente los granos, lo que provocará mala calidad, durabilidad y adherencia.

## 5.2- Análisis químico

### Ataque químico a la muestra acero recubierto de cobre

Una vez que nuestras piezas están cortadas y muy bien pulidas procedemos a hacer el ataque químico. El propósito de este es hacer visibles las características estructurales, la composición química promedio de varias partículas, la distribución de elementos dentro de las partículas de polvo y fases cristalinas presentes en los polvos del metal o aleación. El proceso debe hacerse lo mejor posible para apreciar claramente la microestructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química. Los reactivos que se utilizan consisten en ácidos orgánicos o inorgánicos y los alcalinos disueltos en alcohol, agua u otros solventes.

Hay una enormidad de ataques químicos, para diferentes tipos de metales y situaciones. Uno de los más usados es el NITAL, (ácido nítrico y alcohol), para la gran mayoría de los metales ferrosos

Para el caso del cobre se encontraron dos reactivos:

- 1- Reactivo de uso general para contrastar granos de cobre o sus aleaciones (no siempre produce contraste de grano). Úsese fresco, agregué el peróxido al final, use campana extractora y frótese en la muestra por 5-45 segundos

Se necesita:

- 25 ml de  $\text{NH}_4\text{OH}$
- 25 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada
- 25 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 3%

- 2- Excelente reactivo de propósito general, revela bien los límites de grano. Sumerja la muestra de 10 a 30 segundos

Se necesita:

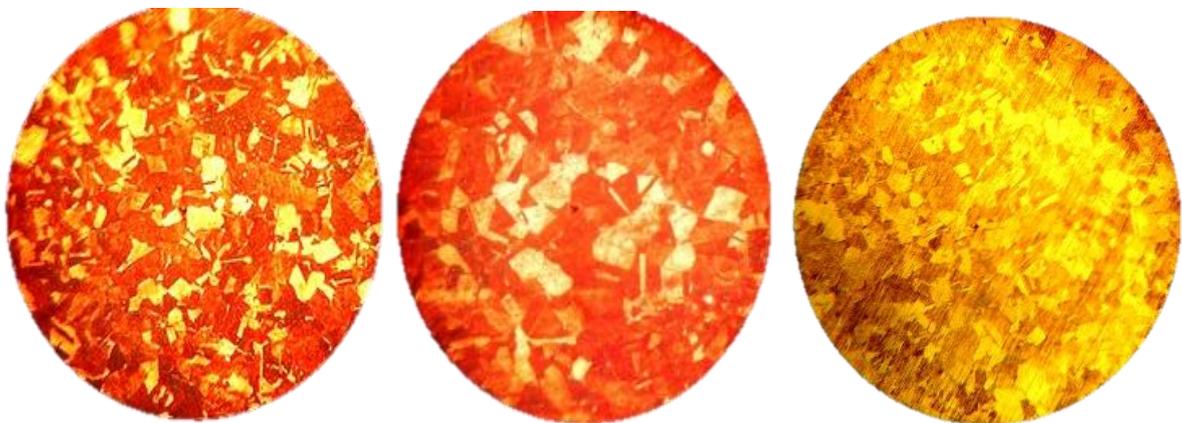
- 5gr de  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$
- 25 ml de  $\text{HCL}$
- 70 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada

Las muestras pueden ahora atacarse durante el tiempo necesario sumergiéndolas boca abajo en una solución contenida en una caja de Petri. Un método opcional consiste en aplicar el reactivo con un gotero para ojos. Si el tiempo de ataque es demasiado corto, la muestra quedará subatacada y los límites de grano y otras configuraciones se verán desvanecidos e indistintos cuando se observen en el microscopio. Si el tiempo de ataque es demasiado largo, la muestra se sobre atacará y quedará muy oscura, mostrando colores no usuales. El tiempo de ataque debe controlarse muy cuidadosamente.

La acción del ataque se detiene al colocar la muestra bajo una corriente de agua. Límpiase la muestra con alcohol y utilice una secadora de pelo para terminar de secala. Cuídese de no frotar la muestra pulida y atacada con alguna tela o con los dedos, porque esto altera la condición superficial del metal.

Las imágenes obtenidas con un ataque químico muestran como el cobre utilizado en comparación con otras imágenes de cobre son idénticas por lo que el material utilizado cumple con características estructurales, composición química promedio, etc.

*Fig. 5.30. Se atacó con cloruro férrico y se observó a 200x la de la izquierda y a 400 x las otras dos*



### 5.3- Ensayos de adhesión y de desgaste

Si las superficies antes de proyectarlas fueron preparadas adecuadamente. Como se citó en los capítulos pasados (Formado de la pieza si fuese necesario, mascarilla, granallado para aumentar la rugosidad, desengrasado y limpieza y un precalentamiento de la pieza) Si se hicieron todos los pasos anteriores de manera correcta, garantizaremos una buena adhesión y por lo tanto se desprenderá el recubrimiento como una cascarilla

Mediante pruebas realizadas en el laboratorio se ha comprobado que entre más rugosa sea la pieza, si la superficie no está contaminada y sobretodo se le da un precalentamiento previo a la proyección térmica. Nuestra adherencia se verá incrementada a tal punto que se podría crear en la capa recubierta una mezcla entre el material de la pieza y el material proyectado

Para realizar los ensayos de adhesión, se realizan igual que los de tracción los cuales siguen las normas como ASTM Be71-97 (2008), ASTM D2095-72 y otras como las ISO. Por otra parte la dificultad que se tiene para realizar estas es la obtención del adhesivo especial americano que maneja la norma. Por lo que se optó utilizar “Kola Loka” por ser económico, poca cantidad y tiene buena sujeción

El adhesivo “kola loka” contiene Poli-(butil-2- cianoacrilato) que Son nanopartículas diseñadas para sellar heridas (grietas), posteriormente se comercializa, se le conoce también como **supercementos** de fraguado rápido al contacto con el oxígeno del aire. Los dos tipos de cianoacrilatos poseen un éster de metilo o de etilo en el **monómero**. Es un adhesivo mono componente. Fragua en pocos segundos mediante **agua**, que puede provenir de la humedad ambiental. Sin embargo, un exceso de agua puede estropear la unión.<sup>[12]</sup>

Se puede utilizar el hipoclorito de sodio, para desprender la piel.

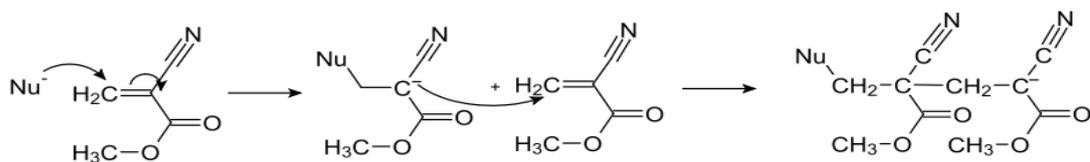


Fig.5.31. la reacción química del adhesivo

Cundo se recubren varias capas recubiertas experimentan contracciones que son fuentes de tenciones internas que influyen significativamente con la adherencia

En la proyección de superficies planas, con el incremento de espesor de la capa, la adherencia con la superficie disminuye y la tendencia al desprendimiento por acción de tenciones residuales se hace factible con espesores mayores de 1.5mm. Para mejorar la adherencia, la superficie debe ser rugosa y en ocasiones mayores debe prepararse por granallado superficial.

<sup>12</sup> [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/cyanacrylat\\_polymerisation.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/cyanacrylat_polymerisation.svg)

Los recubrimientos de bronce se adhieren menos a la base de acero que las propias de este material. El hierro fundido, al ser poroso tiene mejor adherencia. Según datos de investigaciones, la adherencia de recubrimientos de aceros con acero en metal base, en superficies rugosas, alcanza valores 50 - 60Mpa; si se filetean, los valores son de 100-120Mpa y si se maquinan rigurosamente, 230 - 250 Mpa. Para el cobre 7-34 Mpa como se muestra en la tabla 2.2 de este trabajo.

Para incrementar la adherencia se usan varios métodos, como dar un cobreado electrolítico previo, metalizar en un medio protector variando el aire por gases inertes reductores.

La proyección térmica tiende a disminuir el límite de fatiga de los elementos, a consecuencia de la rugosidad superficial, sin embargo, tiende a mejorar las propiedades antifricción, sobretodo en capas porosas. Sin duda es un método productivo y barato

Para los casos que a continuación se mencionan en este tema se utilizó en sólo dos casos adhesivo "kola loka". Cuando hay un precalentamiento no muy alto es posible utilizar el adhesivo. Pero para el caso 3 como se muestra donde el precalentamiento fue mayor y se originó un mejor recubrimiento por parte del cobre no es muy aconsejable utilizarlo

Las pruebas de tracción para probetas de acero de sección transversal cilíndrica se hicieron mediante la norma ASTM E8. En la máquina para pruebas mecánicas Instron. Con una velocidad constante de 0.5mm por minuto. Esto para que los valores obtenidos fueran lo más precisos.



*Fig.5.33. de la izquierda es de la maquina Instron y a la derecha es un zoom a la probeta sujeta a las mordazas. La flecha simula la fuerza ejercida en un extremo y el otro anclado*



*Fig.5.32. De dimensiones de las probetas utilizadas*

Haciendo estas pruebas se obtuvieron 3 casos característicos donde se varió la temperatura de precalentamiento:

- **Caso uno:**

Probeta partida a la mitad, sus extremos se recubrieron con cobre y la pieza de acero se calentó a 180°C después se unió con “kola loka”. esto se hizo para tener una idea de la adherencia del cobre cuando se proyecta sobre un material que no permita un precalentamiento previo como por ejemplo prototipo rápido.



Fig.5.33. de composición de la probeta uno

Después de unos minutos de hacer la prueba de adherencia la probeta se partió dejando cobre en uno de los lados y en el otro el fierro como muestra la imagen 5.35 por lo que fue hecha correctamente. Aguantando una fuerza máxima de 0.3624 kN. Recordemos 1kN=0.1Ton fuerza



Fig. 5.34. Probeta después del ensayo.

- **Caso dos:**

Probeta partida a la mitad, en sus extremos se recubrieron con cobre como se muestra en la Fig.5.34 pero a esta la pieza de acero se precalentó a 1000°C haciendo que el cobre se fundiera muy bien y se adhiriera mejor a la probeta, después se unió con adhesivo



Fig.5.35. Probeta del caso2

La unión del adhesivo falló por lo que al partirse la probeta la fractura ocurrió exactamente en la unión con el adhesivo como muestra la imagen 5.36



Fig. 5.36. Probeta después del ensayo

- **Caso tres:**

Para este caso la probeta partida a la mitad, de manera horizontal creando una cavidad la cual se rellenó de cobre y posteriormente se hizo lo mismo del lado contrario. Generando así una unión metálica entre el acero y el cobre. También cabe mencionar que las piezas se precalentaron a 1000 °C.

Esto arrojó dos resultados en los cuales se procedió de manera diferente dando como consecuencia el caso tres A y tres B que a continuación se mencionan.

- Caso tres A): si procedíamos como en la imagen 5.37 la carga máxima llegaba hasta aproximadamente 1kN.

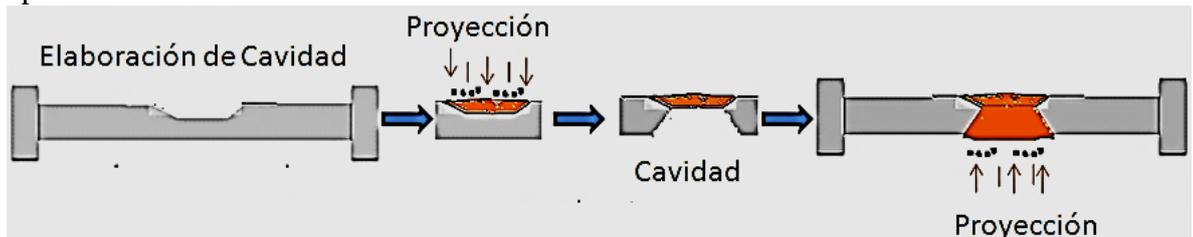


Fig. 5.37. Del proceso de elaboración de la probeta: se hace una cavidad con un ángulo de 135° respecto a la horizontal, se granalla, limpia y proyecta cobre, después se hace lo mismo pero por la cara opuesta. Esto nos garantiza que los dos extremos de acero 1018 quedan unidos por cobre en el medio

- Caso tres B): si procedíamos igual que el caso tres A) pero además dábamos una capa alrededor de nuestro recubrimiento como la imagen 5.40. la carga máxima llegaba hasta aproximadamente 2kN.

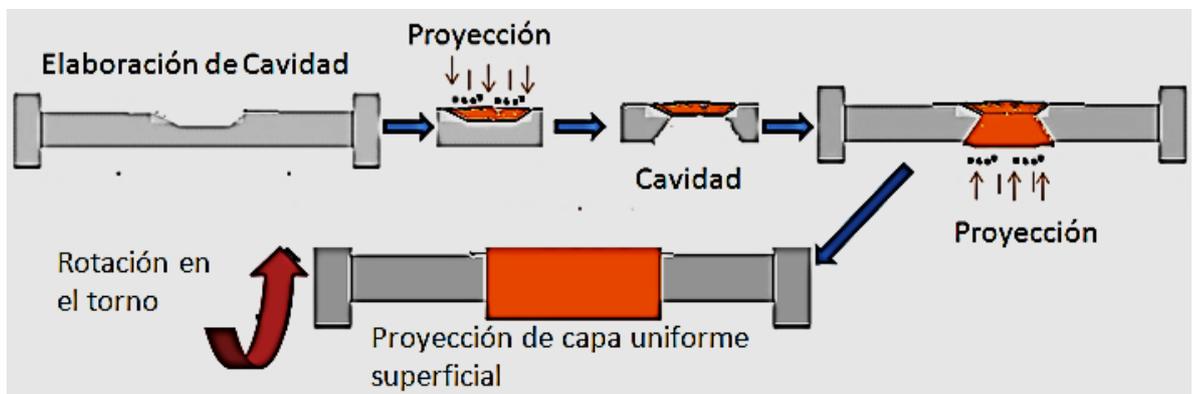


Fig. 5.38. Del proceso de elaboración de la probeta parecida a la anterior, pero en esta al final se recubre en un torno abarcando mayor área de contacto



Fig. 5.39. Probeta unida con cobre y después recubierta por encima otra vez con cobre después de hacer el ensayo de tracción o adhesión.

La sig. Tabla 5.1 Muestra resultados de los diferentes casos

Casos:	1	2	3 A	3B
Soportó una fuerza máxima	0.3624 kN	0.4913 kN	0.8913 kN	1.95 kN
Desplazamiento a la carga máxima	0.18 mm	0.64 mm	0.54 mm	0.57 mm
% de deformación a la carga máxima	0.36 %	1.28 %	15 %	28 %
Esfuerzo en el punto de ruptura	0.46 Mpa	1.35 Mpa	1.35 Mpa	9.94 Mpa
Esfuerzo Máximo	3.81 Mpa	5.171Mpa	15.25Mpa	29.18Mpa
Carga en el punto de Ruptura	0.4662 kN	0.1289 kN	0.3289 KN	0.6322 kN
Módulo de Young	8332 Mpa	3824 Mpa	2224 Mpa	238.4 Mpa
Deformación al 0.2% de fluencia	0.47%	1.386%	6.45%	12.37%

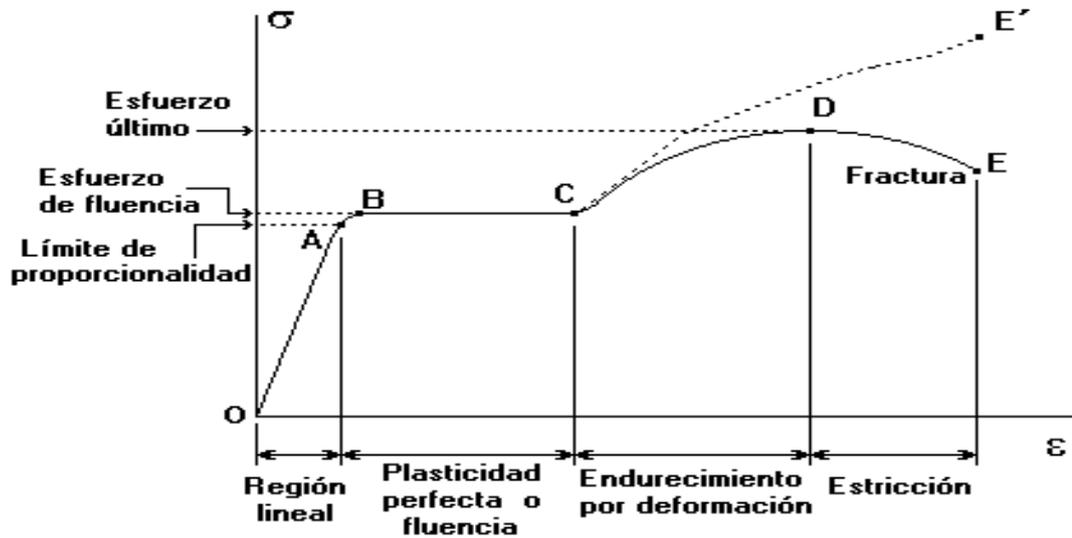


Fig. 5.39. Gráfica de esfuerzo vs deformación. Comúnmente observada en aceros.

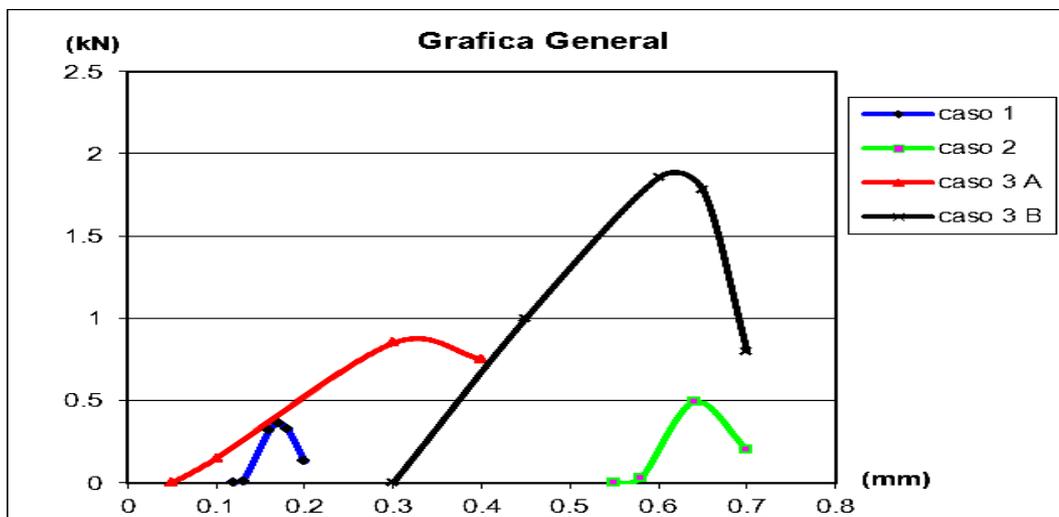


Fig. 5.40. En la gráfica general se ilustran los diferentes casos anteriores donde se ve un parecido a la fig. 5.39. Además se encuentran desplazadas del origen porque en el ensayo se deja una cierta tolerancia antes de empezar para provocar el acomodamiento adecuado de la probeta en la máquina de pruebas.

Por lo tanto podemos comprobar después de hacer varias pruebas que al aumentar el área de contacto de nuestro recubrimiento sobre la pieza y si la temperatura de precalentamiento es elevada como en el acero de aproximadamente  $1000^{\circ}\text{C}$  la adherencia de nuestro sustrato se verá incrementada y además si este no solo se aplica un área transversal sino además alrededor duplica su adherencia como en el caso 3B.

### Desgaste por electroerosión:

Lo constatamos en pruebas que se hicieron en la electroerosionadora donde se le colocó los electrodos de cobre y se erosionó piezas de acero y descubrimos que se desgastaba más cuando no se hacía un buen precalentamiento y sobre todo cuando las capas del mismo material proyectado (cobre) eran muy visible y no se hacía un tratamiento térmico. Entonces el desgaste será mucho mayor al valor que se tiene en la tabla 5.3 donde se midió el desgaste del electrodo  $V_v$  (%).

El desgaste ocurría de la siguiente manera: primero se removía el material (cobre) que se encontraba entre las capas por ser el más débil y se hacía más notorio el espacio

entre las capas y después de hacer cada prueba se tenía que pulir y por lo tanto se removía más material del electrodo

Cuando se realizaba un tratamiento térmico el deterioro o desgaste del electrodo era uniforme en toda la cara circular.



*Fig. 5.40. Muestran el desgaste de los electrodos después de varias pruebas hechas*

## 5.4- Estudios de conductividad

Primeramente se aconseja al lector leer el anexo 3 donde se dará una introducción de antecedentes relacionados con la electricidad para después ser un poco más sencillo explicar el funcionamiento de la electroerosionadora y aclarar efectos eventuales que pueden llegar a suceder

### Propiedades eléctricas de los materiales

La posibilidad de generar corrientes eléctricas en los materiales depende de la estructura e interacción de los átomos que los componen. Los átomos están constituidos por partículas cargadas. La conducción eléctrica de los materiales sólidos, cuando existe, se debe a los electrones más exteriores, ya que tanto los electrones interiores como los protones de los núcleos atómicos no pueden desplazarse con facilidad. Los materiales conductores por excelencia son metales, como el cobre, que usualmente tienen un único electrón en la última capa electrónica. Estos electrones pueden pasar con facilidad a átomos contiguos, constituyendo los electrones libres responsables del flujo de corriente eléctrica. En otros materiales sólidos los electrones se liberan con dificultad constituyendo semiconductores, cuando la liberación puede ser producida por excitación térmica, o aisladores, cuando no se logra esta liberación.

Estos Fenómenos termoelectricos (**calor de Thomson** y efecto Seebeck) se llegan a presentar en la electroerosión sin embargo, como se cuenta con un dieléctrico como refrigerante y además el electrodo sube y baja, esto evita estos problemas.

### Conductor eléctrico

Si la densidad de corriente es uniforme en una región del espacio entonces la relación se simplifica notablemente. Esto sucede con bastante aproximación en el interior de un tramo de conductor de sección constante, donde el vector “ $j$ ” es independiente de la posición por lo que la sección, la densidad de corriente y la intensidad guardan la relación:

$$I = \|j\| S_0 \quad \text{Siendo } S_0 \text{ la sección transversal del tramo de conductor.}$$

Los conductores son cuerpos capaces de conducir o transmitir la electricidad.

Para este trabajo el electrodo se consideró como la sección de un conductor

Los materiales más utilizados en la fabricación de conductores eléctricos son el cobre y el aluminio. Aunque ambos metales tienen una conductividad eléctrica excelente, el cobre constituye el elemento principal en la fabricación de conductores por sus notables ventajas mecánicas y eléctricas.

El uso de uno y otro material como conductor, dependerá de sus características eléctricas (capacidad para transportar la electricidad), mecánicas (resistencia al desgaste, maleabilidad), del uso específico que se le quiera dar y del costo.

Estas características llevan a preferir al cobre en la elaboración de conductores eléctricos. El tipo de cobre que se utiliza en la fabricación de conductores es el cobre electrolítico de alta pureza, 99,99%.

Dependiendo del uso que se le vaya a dar, este tipo de cobre se presenta en los siguientes grados de dureza: Temple: duro, semi duro y blando o recocido.

### **Tipos de cobre para conductores eléctricos**

#### ***Cobre de temple duro:***

- . Conductividad del 97% respecto a la del cobre puro.
  - . Resistividad de  $0,018 \text{ ((x mm}^2\text{)/m)}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura.
  - . Capacidad de ruptura a la carga, oscila entre  $37$  a  $45 \text{ kg/mm}^2$ .
- Por esta razón se utiliza en la fabricación de conductores desnudos, para líneas aéreas de transporte de energía eléctrica, donde se exige una buena resistencia mecánica.

#### ***Cobre recocido o de temple blando:***

- . Conductividad del 100%
- . Resistividad de  $0,01724 = 1/58 \text{ ((x mm}^2\text{)/m)}$  respecto del cobre puro, tomado este como patrón.
- . Carga de ruptura media de  $25 \text{ kg/mm}^2$ .

Como es dúctil y flexible se utiliza en la fabricación de conductores aislados.

El conductor está identificado en cuanto a su tamaño por un calibre, que puede ser milimétrico y expresarse en  $\text{mm}^2$  o americano y expresarse en AWG o MCM con una equivalencia en  $\text{mm}^2$ .

### **Capacidad de transporte de los conductores**

La corriente eléctrica origina calentamiento en los conductores (efecto Joule:  $I^2 \times R$ ).

El exceso de temperatura genera dos efectos negativos en los aislantes:

- . Disminución de la resistencia de aislación.
- . Disminución de la resistencia mecánica.

El servicio operativo de la energía eléctrica y su seguridad dependen directamente de la calidad e integridad de los aislantes de los conductores.

Las aislaciones deben ser calculadas en relación a la carga de energía eléctrica que transporten los conductores y a la sección o diámetro de los mismos.

### **Dimensionamiento por voltaje de pérdida**

Al circular una corriente eléctrica a través de los conductores de una instalación; se produce en ellos una caída de tensión que responde a la siguiente expresión:

$$V_p = I \times R_c (\Omega) \quad \text{donde:}$$

**V<sub>p</sub>**: Voltaje de Pérdida (V), **I** : Corriente de Carga (A) . **R<sub>c</sub>**: Resistencia de los Conductores ( )

La resistencia de un conductor eléctrico, responde a la siguiente expresión, que relaciona sus parámetros físicos y la naturaleza del material conductor

$$R_c = (2 \times \rho \times l) / A \quad (\Omega)$$

$\rho$ : Resistividad específica del conductor (Ohm mm<sup>2</sup> / m),  $\rho_{Cu}=0018$ (Ohm-mm<sup>2</sup>/m),  
 $l$ : Longitud del conductor (m),  $A$ : Sección de conductor (mm<sup>2</sup>)

La expresión para determinar la sección del conductor en función del Vp queda finalmente del siguiente modo:

$$A = (2 \times \rho \times l) / V_p \times I \quad (mm^2)$$

La exigencia con respecto al Vp, establece que la Pérdida de Tensión en la Línea no debe exceder a un 3% la «Tensión Nominal de Fase»; siempre y cuando la pérdida de voltaje en el punto más desfavorable de la instalación no exceda a un 5 % de la tensión nominal

Para nuestro caso podemos tomar nuestro electrodo como un conductor y resolver todas estas ecuaciones.

Sin embargo cuando se desea verificar de manera experimental los valores obtenidos teóricamente de las ecuaciones anteriores, se convierte en un verdadero problema porque nuestra facultad no cuenta con los instrumentos adecuados (galvanómetros, óhmetro, etc.) de alta precisión necesaria para hacer estas pruebas. Si pensáramos en hacer un circuito en serie donde nuestro electrodo fuera la resistencia, una fuente de poder eléctrica para variar el voltaje y mediante un amperímetro medir los cambios en la corriente y después con los resultados graficarlos y obtener la resistencia de nuestro electrodo. No es posible porque el electrodo es de cobre puro y nuestro amperímetro no registrará cambio alguno haciendo un corto en nuestro circuito

Si se contará con el equipo necesario en un futuro. Al variar la corriente y voltaje que pasa en nuestro conductor se podrá cuantificar y se esperaría graficar y hacer modelos donde se puedan comparar los diferentes electrodos(hechos y comprados).

### Electrodo de Nylamid XL

Primero se realizó una prueba donde el electrodo estaba hecho de Nylamid XL (verde) el cual tiene diversas propiedades como ser un mal conductor, es ligero resistente a la oxidación, estabilidad dimensional, maleabilidad, compatibilidad para usarse en contacto con alimentos, sin contaminar, contiene aceite integrado homogéneamente integrado al nylon para mejorar sus propiedades de resistencia: al desgaste, dieléctrica, mecánica, química, térmica, reducida absorción de humedad y buena rigidez.



Fig. 5.41 de la barra de nylamid a la izquierda, a la derecha el porta electrodo y el electrodo de Nylamid

Estos son plásticos de ingeniería de varias familias de polímeros, como nylon, polietileno y acetal, entre otros, fabricados por vaciado, moldeo por compresión y extrusión

Los usos más frecuentes que se le da son los siguientes: cojinetes, poleas, rodillos, engranes, guías de desgaste, ruedas, soportes, aislantes dieléctricos y aislantes térmicos.

Los beneficios son varios como:

- la buena relación costo-beneficio. El rendimiento de las piezas fabricadas con Nylamid, en combinación con el precio, es sin duda el principal motivo para su aplicación
- facilidad de maquinado. Por su suavidad la mayoría de estos productos se maquinan mucho más rápido que los metales, dando como resultado ahorros significativos
- ligereza por lo que hay menos esfuerzo de los motores y un ahorro
- menor consumo de lubricantes por su bajo coeficiente de fricción
- reduce el nivel de ruido por la absorción de impactos por ser plástico
- disponibilidad
- baja absorción de humedad

Se colocó el electrodo de Nylamid XL en el torno paralelo y se proyectó cobre recubriendo todo el plástico y parte de acero del porta electrodo, después se maquinó la superficie del cobre y se rectificó y ya dejándolo en las dimensiones deseadas se procedió a hacerle pruebas en la electroerosionadora los resultados son buenos comparados con las pruebas de electrodos electrolíticos.

Aunque teóricamente ya se sabía que el cobre es un excelente conductor al hacer esta prueba se puede garantizar ya que la carga pasó por el electrodo sin dificultades a pesar de que tiene nylamid su interior

Tabla 5.2. De propiedades del Nylamid XL(verde)

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valores
<b>III- Eléctricas</b>			
Resistencia dieléctrica, corto tiempo	D 149	Volts/mil	500
Resistividad volumétrica	D 257	Ohm-cm	$> 10^{13}$
Constante dieléctrica $10^6$ Hz	D 150	-	3.7
<b>IV- Químicas</b>			
Absorción de agua en 24 horas	D 570 (3)	% por peso	0.3
Absorción de agua hasta saturación	D 570 (3)	% por peso	7.0
Ácidos suaves 23 °C	-	-	S. Limitado
Ácidos fuertes 23 °C	-	-	S. Inaceptable
Alcalinos suaves 23 °C	-	-	S. Limitado
Alcalinos fuertes 23 °C	-	-	S Inaceptable
Hidrocarburos aromáticos 23 °C	-	-	S. Aceptable
Hidrocarburos Alifáticos 23 °C	-	-	S. Aceptable

### Electrodo de acero recubierto de cobre

Las pruebas subsiguientes se le hicieron al electrodo de cobre y a la probeta muestra (acero recubierto de cobre) no marcaron ningún cambio significativo ni cuantificable.

Sin embargo al medir el porta electrodo con su electrodo si se obtuvo algunas mediciones como con ayuda del multímetro se obtuvo una resistencia mínima de  $0.4\Omega$  y con el puente digital a una frecuencia de 10 KHz una resistencia de  $0.611\ \Omega$  al disminuir la frecuencia a 100 Hz la resistencia disminuyó a  $0.58\ \Omega$

Por lo tanto podemos concluir que para cargas tan grandes que maneja la electroerocionadora es un buen electrodo conductor ya que es muy pequeña la resistencia. Sin embargo si se quisiera manejar cargas mínimas el cual no es el caso, entonces si existiría la posibilidad de complicaciones.



Fig. 5.42. Equipo de puente digital SRS modelo SR715 LCR Meter

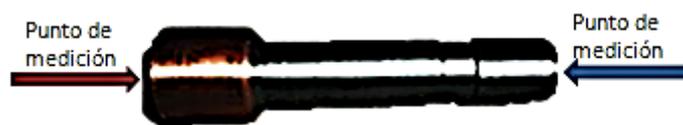


Fig.5.43. donde se colocaron los electrodos para medir la resistencia portaelectrodo y electrodo.

## 5.5- Tratamientos térmicos después de la proyección

Los primeros que lograron fabricar en sus fraguas y hornos estos tratamientos fueron los primeros metalurgistas, Herreros, orfebres y armeros descubrieron que combinando adecuadamente el calor, tiempo de calentamiento, el tiempo enfriamiento y su manera de enfriamiento. Se logra cambiar propiedades de los materiales

Se conoce como **tratamiento térmico** el proceso al que se someten los metales u otros tipos de materiales sólidos como polímeros con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono. También se aplican tratamientos térmicos diversos a los sólidos cerámicos.

Las características mecánicas de un material dependen tanto de su composición química como de la estructura cristalina que tenga. Los tratamientos térmicos modifican esa estructura cristalina sin alterar la composición química, dando a los materiales unas características mecánicas concretas, mediante un proceso de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada.

### Propiedades mecánicas básicas:

**Resistencia al desgaste:** Es la resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar cuando está en contacto de fricción con otro material.

**Tenacidad:** Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras (resistencia al impacto).

**Maquinabilidad:** Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.

**Dureza:** Es la resistencia que ofrece un acero para dejarse penetrar. Se mide en unidades BRINELL (HB) o unidades ROCKWEL C (HRC), mediante el test del mismo nombre.

La propiedad de tener diferentes estructuras de grano con la misma composición química se llama polimorfismo y es la que justifica los tratamientos térmicos. Técnicamente el poliformismo es la capacidad de algunos materiales de presentar distintas estructuras cristalinas, con una única composición química, el diamante y el grafito son polimorfismos del carbono. La  $\alpha$ -ferrita, la austenita y la  $\delta$ -ferrita son polimorfismos del hierro. Esta propiedad en un elemento químico puro se denomina alotropía.

Se producen cambios en un material o en una aleación cuando se calienta suficientemente y luego se enfría de forma brusca o controlada. Esto se debe a la microestructura del material. La cual revela un universo de granos, láminas, bandas y en ocasiones estructuras mucho más exóticas que configuran paisajes sorprendentes. Las manipulaciones que se llevan a cabo buscan modificar la microestructura, es decir la composición, la estructura cristalina, el tamaño de los granos o la forma y la distribución de las diferentes fases en este rango con el fin de cambiar las propiedades macroscópicas de la pieza metálica.

Existe una región fronteriza en la que ocurren fenómenos tan interesantes como la nucleación y el crecimiento de partículas. Ese fue precisamente el interés que nos indujo a estudiar el efecto en el cobre.

El cobre es prácticamente inmiscible a temperatura ambiente.

La velocidad de enfriamiento permite la obtención de regiones donde las capas de cobre se mezclan de forma homogénea.

El cobre y sus aleaciones permiten determinados tratamientos térmicos para fines muy determinados siendo los más usuales los de recocido, refinado y temple.

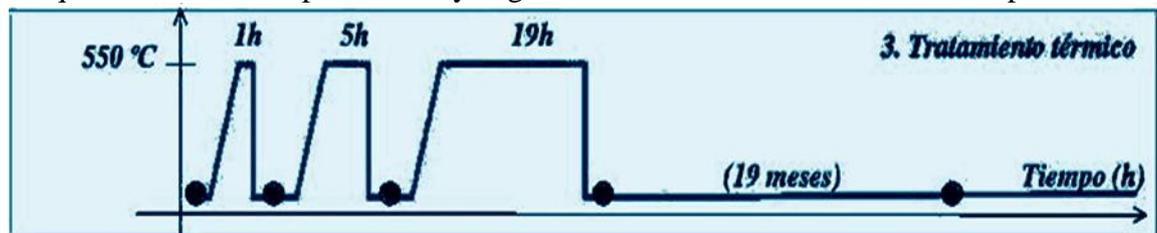
El cobre duro recocido se presenta muy bien para operaciones en frío como son: doblado, estampado y embutido. El recocido se produce calentando el cobre o el latón a una temperatura adecuada en un horno eléctrico de atmósfera controlada, y luego se deja enfriar al aire. Hay que procurar no superar la temperatura de recocido porque entonces se quema el cobre y se torna quebradizo y queda inutilizado.

El refinado es un proceso controlado de oxidación seguida de una reducción cuyo objeto es volatilizar o reducir a escorias todas las impurezas contenidas en el cobre con el fin de obtener cobre de gran pureza.

Los tratamientos térmicos que se realizan a los latones son principalmente recocidos de homogeneización, recristalización y estabilización. Los latones con más del 35% de Zn pueden templarse para hacerlos más blandos.

Los bronce habitualmente se someten a tratamientos de recocidos de homogeneización para las aleaciones de moldeo; y recocidos contra acritud y de recristalización para las aleaciones de forja. El temple de los bronce de dos elementos constituyentes es análogo al templado del acero: se calienta a unos 550-600 °C

Si se enfría rápidamente se consigue disminuir la dureza del material, al contrario de lo que sucede al templar acero y algunos bronce con más de dos componentes.



Gráfica 5.44. Muestra los diferentes tratamientos térmico que se le puede dar al cobre (recocido, temple y revenido en espacios de 1,5, y 19 horas respectivamente)

Los diferentes tratamientos térmicos se explican a detalle en el anexo 4.

Para nuestro caso (el electrodo de acero recubierto de cobre) solo se recocido a 550<sup>0</sup>c porque nos interesaba homogeneizar las diferentes capas y los demás no por que como es bien sabido para hacer todos estos procesos se necesita por lo menos un horno eléctrico y este a su vez gasta electricidad y como son bastantes horas el consumo es importante. Por lo que aumentaría el costo de nuestras piezas y esto lo aría no muy viable

Es importante tener especial cuidado en el enfriamiento ya que si se producen cambios muy grandes y bruscos de temperatura pueden suceder choques térmicos los cuales dañaran el recubrimiento y hasta la pieza recubierta.



Fig. 5.45. Exponen a la izquierda los electrodos después de un tratamiento térmico y a la derecha los hornos eléctricos

## 5.6- Maquinado y rectificado

El maquinado es el Procesos de remoción de material

Estos procesos se utilizan para conformar partes de materiales como metales, plásticos, cerámica y madera. El maquinado es un proceso que exige tiempo y desperdicia material. Sin embargo, es muy preciso y puede producir una tersura de superficie difícil de lograr con otros procesos de formación.

Los procesos para remoción de material se clasifican como tradicionales o con formación de virutas y no tradicionales o sin virutas.

El maquinado tradicional se lleva a cabo con el uso de una herramienta de corte, que remueve el material de la pieza de trabajo en forma de virutas, con lo cual se le da la configuración deseada

En todos los procesos tradicionales para remoción de material, los tres elementos básicos son la pieza de trabajo, la herramienta de corte, y la máquina herramienta. Las funciones básicas de la máquina herramienta son:

- 1) proveer los movimientos relativos entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo en forma de velocidades y avances;
- 2) mantener las posiciones relativas de la herramienta de corte y de la pieza de trabajo, a fin de que la remoción de material resultante produzca la forma requerida. Al variar las posiciones y movimientos entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte, se puede efectuar más una operación en la máquina herramienta.

Las herramientas de corte son, ya sea, de un solo filo o de filos múltiples.

Con los avances de la tecnología, se han desarrollado materiales más fuertes y más duros. El procesamiento eficiente de esos materiales no era posible con los procesos tradicionales para remoción de material. Por lo tanto, se han creado varios procesos nuevos y especializados. Al contrario de los procesos tradicionales en donde la remoción del material necesita una herramienta de corte, los procesos no tradicionales se basan en los fenómenos ultrasónicos, químicos electroquímicos, de electrodescarga y haces de electrones, láser e iones. En estos procesos, la remoción de material no está influida por las propiedades del material; se puede maquinar material de cualquier dureza. Ahora bien, algunos de estos procesos se encuentran en la etapa experimental y no se presentan para elevados volúmenes de producción. En la mayoría de estos procesos, se maquina una parte cada vez.

Los procesos no tradicionales son más complejos y se requiere considerable pericia y conocimientos para operarlos en forma eficiente.

Para maquinar nuestro electrodo (pieza de trabajo) como es de un metal no demasiado duro para remoción de material, la herramienta de corte utilizada fue un buril de aleación de cobalto y la máquina herramienta utilizada fue un torno horizontal



*Fig.5.46. Muestra el maquinado en un torno paralelo antes de proyectarla para que sus dimensiones sean exactas*



*Fig.5.47. Exime la pieza después de proyectarla con hollín y oxido superficial*



*Fig.5.48. Muestra la pieza después de proyectarla y empezando a remover el material superficial (empezando a maquinar)*



*Fig.5.49. Pieza terminada del electrodo y el porta electrodo con dimensiones adecuadas*

**El rectificado** tiene por finalidad corregir las imperfecciones de carácter geométrico y dimensional que se producen durante las operaciones de manufactura de piezas, ya sea por maquinado o por tratamiento térmico. Este último caso es particularmente importante para el acero, ya que las piezas son calentadas y sumergidas en un baño de enfriamiento con lo cual sufren deformaciones más o menos pronunciadas. Hoy en día

este proceso también se ha ampliado a piezas de acero sin temprar, bronce, aluminio, fundición, plásticos, etc.

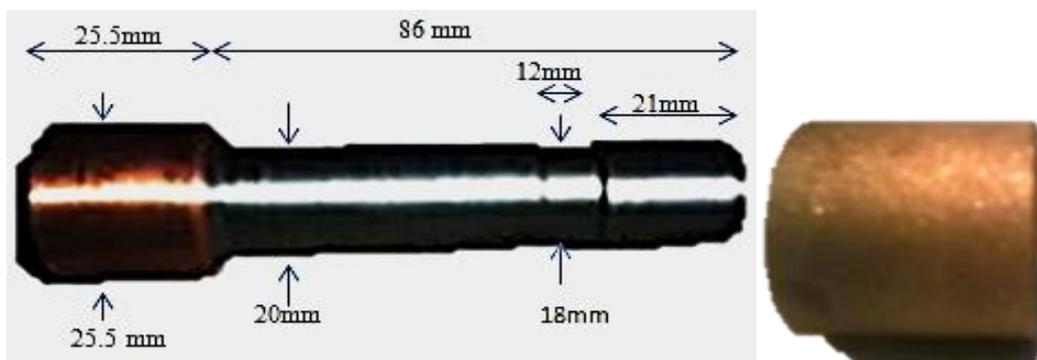
Por lo tanto, con el rectificado se pueden corregir: excentricidad, circularidad, rugosidad, etc. y por otro lado llevar las dimensiones de una pieza a las tolerancias especificadas según su diseño.

La máquina utilizada para rectificar se llama rectificadora. La herramienta con la que se rectifica se llama muela o piedra de rectificar. El movimiento principal del equipo lo da la muela que gira a alta velocidad y el movimiento secundario lo tiene la pieza y la herramienta.

#### Las rectificadoras conocidas son:

- Rectificadoras cilíndricas universales: permiten el rectificado interior y exterior de superficies cónicas o cilíndricas. También permiten el rectificado de caras planas frontales.
- Rectificadoras sin centros: se usan con piezas de forma sencilla y se utiliza cuando no se requieren órganos de fijación ni centrado axial.
- Rectificadoras Verticales: se usa para el rectificado de superficies planas. En este equipo el husillo principal es vertical.
- Rectificadoras Frontales o Planas: En estas el eje del husillo es horizontal y normalmente se usa una muela de disco y platos magnéticos para la sujeción de la pieza.
- Rectificadoras Cortadoras: realiza el corte con rapidez. Se emplea cuando es importante conservar un buen acabado en la zona de corte.
- Rectificadoras Especiales (para engranes, cigüeñales, árboles de levas, etc.).

Por último se obtuvo el electrodo y el porta electrodo de una sola pieza por facilidad de maquinado y por qué no afectaba en lo más mínimo su desempeño y se elaboró de las siguientes dimensiones que se indican en la siguiente *La figura 5.56:*



*Fig.5.50: electrodo ala derecha y a la izquierda esquema del electrodo con porta electrodo de una sola pieza*

## 5.7- Proceso de electroerosión

Una vez que nuestro electrodo está terminado procedemos a hacer pruebas en la maquina electroerosionadora de penetración donde comprobaremos realmente si nuestro electrodo cumple con ser igual o parecido al electrodo original de la máquina. Pero antes quiero mencionar algunos detalles de este proceso

En general, la electroerosión puede compararse a lo que sucede cuando un rayo, en mitad de una tormenta, golpea el suelo con toda su fuerza.

Electroerosionado es un proceso que inició hace 65 años por lo menos, a lo largo de ese tiempo se ha estado mejorando los equipos, la automatización y el crecimiento de sus aplicaciones, es hoy el cuarto método de corte más utilizado en América Latina y el mundo.

El mecanizado por electroerosión, también llamado EDM por su acrónimo en inglés Electric Discharge Machining, ha mantenido un crecimiento de mercado constante desde 2003. Según un estudio realizado en 2007 por el fabricante español ONA Electroerosión, en los últimos cinco años las ventas de maquinaria electroerosionadora de hilo y penetración, representan en promedio 7.5 por ciento de las ventas totales de máquinas-herramienta para corte de metales en el mundo, el doble del promedio registrado entre 1993 y 1998.

El repunte de las ventas ha sido paralelo a la evolución tecnológica de estas máquinas y la diversificación de sus aplicaciones. Por un lado, gracias a la automatización del proceso y los nuevos desarrollos en los equipos, la precisión, velocidad y calidad de los acabados han mejorado drásticamente; por otro, la búsqueda del mecanizado perfecto, ha hecho que cada vez sean más los sectores que adoptan la electroerosión como método de corte.

El mecanizado por electroerosión es un proceso de corte no convencional, es decir, no corta la pieza por métodos mecánicos sino por un efecto erosivo termoeléctrico. Básicamente, la eliminación de material se realiza mediante constantes y rápidos pulsos eléctricos, (generados miles de veces por segundo desde una fuente de potencia hasta un electrodo), que forman gran cantidad de chispas y elevadas temperaturas.

Existen dos formas del proceso de electroerosión y cada una con sus diferentes partes y funcionamientos. Los cuales se explican en el anexo 5

En la electroerosión por penetración dependiendo de la figura que se encuentre en la base del electrodo. Esta será la figura que deje en nuestra pieza.

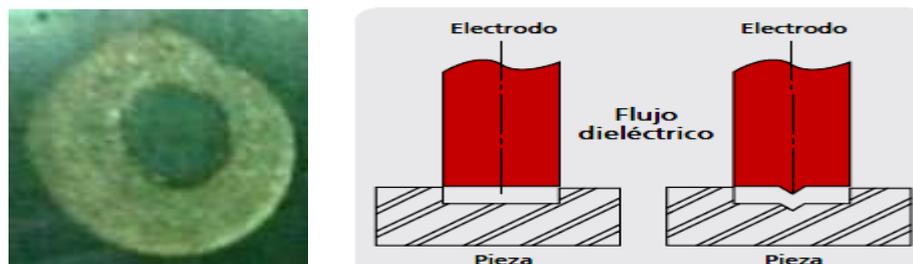


Fig. 5.51. Esquema e imagen de una electroerosión por penetración.



*Fig.5.52 se ven algunos ejemplos de figuras hechas por la erosión de penetración en piezas de acero*

La calidad superficial se ve afectada por el uso de aceites o petróleo como medio dieléctrico, ya que estos son menos eficientes a la hora de limpiar que el agua desionizada.

Algunos resultados son tan buenos o mejores que el acabado por rectificado.

Disminuir la vida útil del electrodo o dañar la pieza a trabajar. Este fenómeno se puede evitar con buen lavado, un aceite de buena calidad y en otros casos, solamente incrementando el tiempo de pausa del pulso eléctrico.

La limpieza del fluido dieléctrico debe ser vigilada periódicamente y cuándo sea necesario cambiar los filtros de papel. Es importante desarmar el porta-electrodos para limpiarlo y de igual forma hacerlo con el sistema de rodillos y boquillas en las máquinas de hilo, de ello depende la vida útil de los equipos, la cual es superior a diez años.

Para los experimentos realizados en la electroerosionadora los campos magnéticos fueron mínimos e imperceptibles

En la electroerosionadora EDM440NC serie L marca Angie Engemag ubicada en el centro de diseño y manufactura (CDM) se colocaron los electrodos elaborados previamente y se comparó la rugosidad promedio entre un electrodo de cobre comprado específicamente para este uso y el elaborado con acero 1018 y recubierto con cobre. La rugosidad del primero se le llamó  $Z_{max\ teo}$  y al segundo  $Z_{max\ exp}$  (Y).



*Fig. 5.53. Fotos de Electroerosionadora de penetración utilizada.*



Fig. 5.54. Electroerosionadora de penetración modelo EDM440nc serie L



Fig. 5.55. Porta electrodo y electrodo

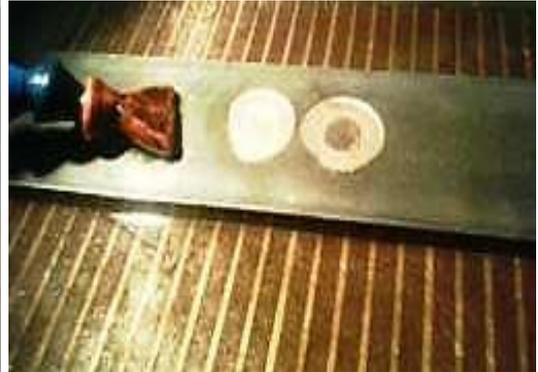


Fig. 5.56. Erosión realizada

Las superficies de los materiales, por muy pulidas que estén, presentan siempre cierto grado de irregularidad que debe ser valorado puesto que influye en numerosos procesos

El 'rugosímetro' es un dispositivo dotado de un palpador de diamante que, desplazando una cierta longitud sobre el material, es capaz de ampliar el paisaje de crestas y valles que presenta su superficie real y que no puede ser observada por el ojo humano.

Además, este equipo también puede determinar una serie de parámetros que aportan el valor numérico de la rugosidad de acuerdo con las reglas de normalización. Para determinar dichos parámetros, definidos como Ra o Rz, el propio equipo divide su recorrido en seis partes: la primera etapa la emplea para la toma de referencias y la corrección de curvaturas; y sobre las otras cinco, realiza las medidas.

Se utilizó un **Rugosímetro** del Fabricante Mitutoyo que maneja el Sistema internacional con Trazabilidad MAHR (Alemania) y nos proporcionó los valores de rugosidad (Ra), rugosidad promedio (Rz) y rugosidad máxima (Rmáx). Estos valores se encuentran en la tabla 5.3



Fig. 5.57 Rugosímetros

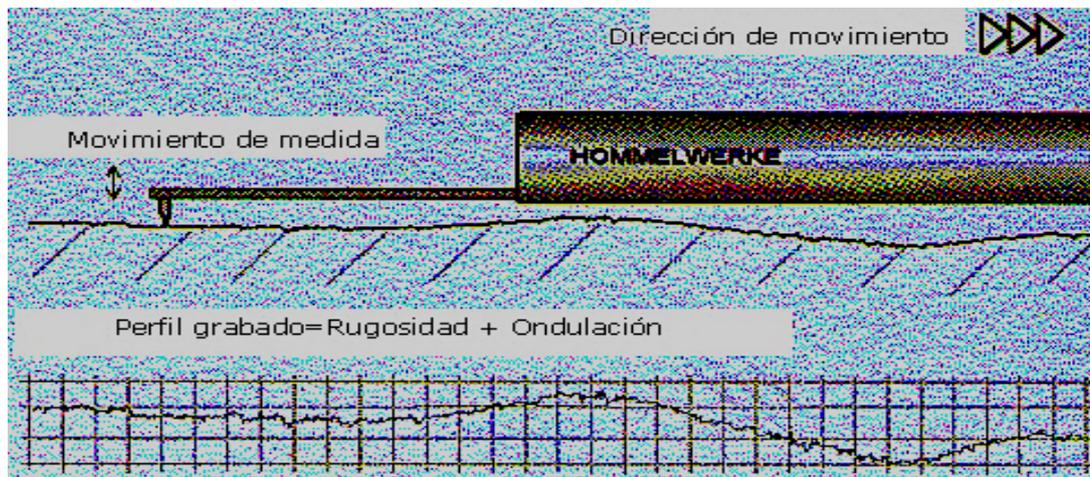


Fig. 5.58 Esquema de rugosímetros

**Descripción de la terminología usada en la electroerosión:**

**Ton** = tempo de duración de la descarga [ $\mu\text{s}$ ]

**Ts**= transistor, establece el nivel de corriente de descarga [Ts]

**Vv**= desgaste del electrodo [%]

**Rmax**= Rugosidad de la superficie electroerosionada [ $\mu\text{m}$ ]

**Vw**= arranque del material [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]

**Vmin**= ajuste mínimo voltaje del gap. [V]

**Iav**= valor mediano de la corriente de erosión [ $\text{cm}^2$ ]

**2Gs** (dos gap side)= diferencia entre la dimensión final de la cavidad erosionada y la dimensión del electrodo [mm]

**TOFF**= pausa entre dos descargas [%]

Tabla 5.3 Tabla comparativa de rugosidades entre los dos diferentes electrodos (el comprado "teo" y el elaborado por proyección térmica "exp") mediante variación de parámetros Ton, ts y Dt.

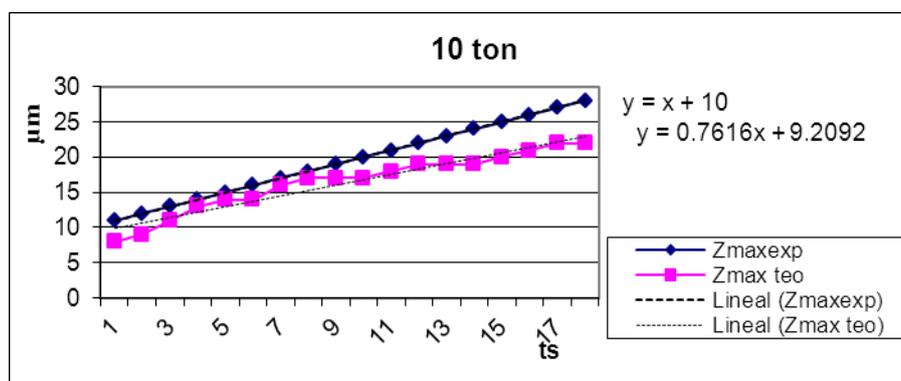
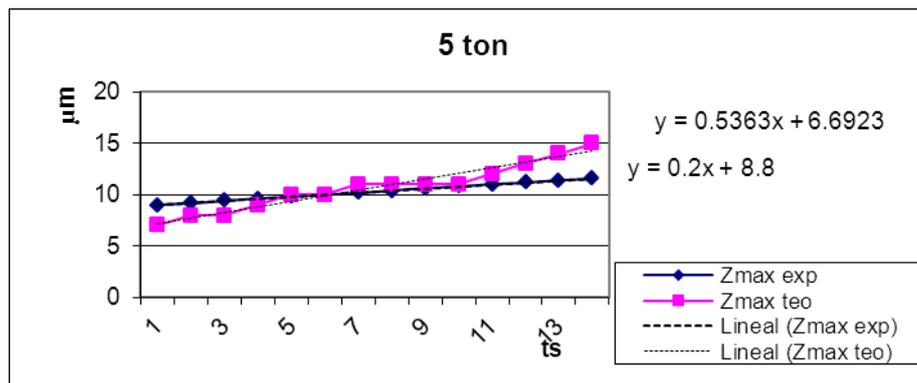
Valores establecidos		Rugosidades				Desgaste electrodo	
ton	Ts (x)	Dt	Zmax teo	Zmax exp(Y)	función	th	Vv
µs	QT	%	µm	µm			%
5	1	48	7	9	$y = 0.2x + 8.8$	0	10
5	2	48	8	9			30
5	3	48	8	9			40
5	4	56	9	10			45
5	5	56	10	10			45
5	6	56	10	10			45
5	7	56	11	10			45
5	8	48	11	10			45
5	9	45	11	11			45
5	10	45	11	11			45
5	11	45	12	11			45
5	12	45	13	11			45
5	13	45	14	11			45
5	14	45	15	12			45
10	1	65	8	11	$y = x + 10$		5
10	2	65	9	12			15
10	3	71	11	13			24
10	4	71	13	14			28
10	5	71	14	15			29
10	6	71	14	16			33
10	7	71	16	17			38
10	8	65	17	18			47
10	9	65	17	19			56
10	10	65	17	20			60
10	11	65	18	21			64
10	12	63	19	22			76
10	13	63	19	23			88
10	14	63	19	24			100
10	15	63	20	25			112
10	16	63	21	26			124
10	17	63	22	27			136
10	18	63	22	28			148

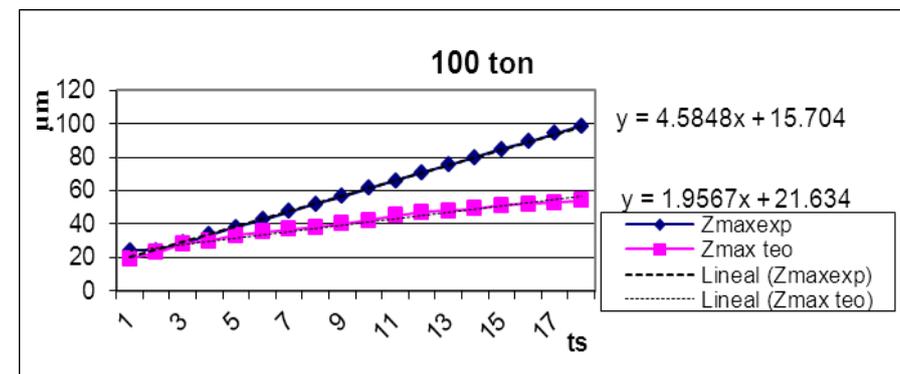
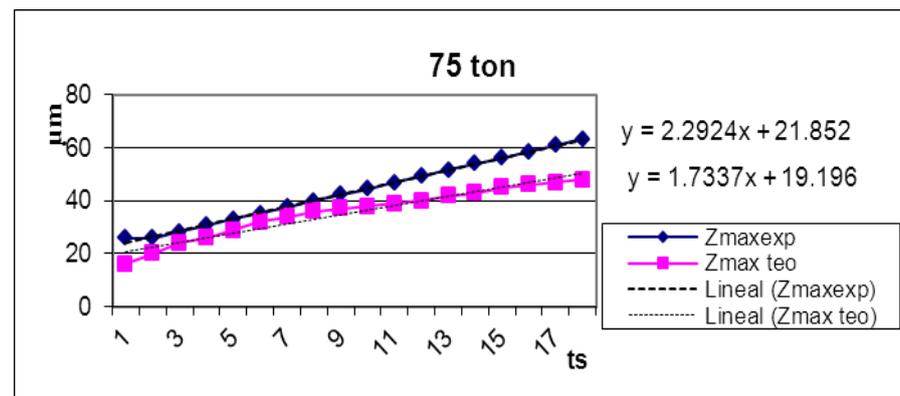
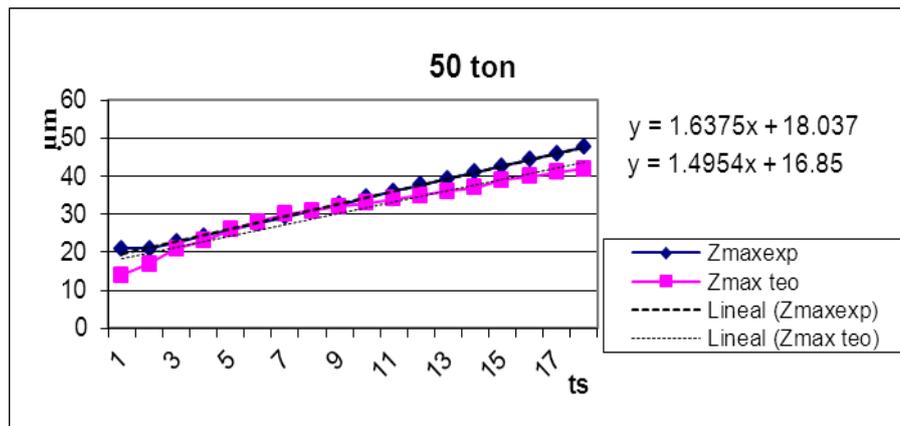
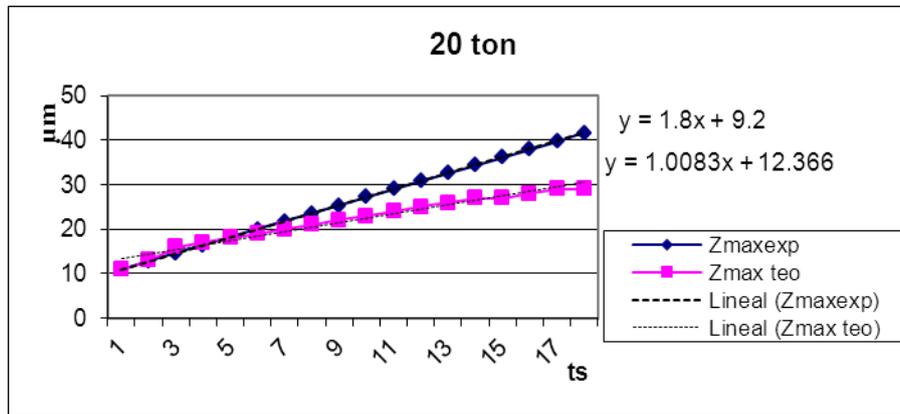
20	1	76	11	11	$y = 1.8x + 9.2$	3
20	2	76	13	13		7
20	3	83	16	15		11
20	4	83	17	16		15
20	5	83	18	18		16
20	6	83	19	20		18
20	7	83	20	22		19
20	8	83	21	24		20
20	9	83	22	25		24
20	10	76	23	27		26
20	11	74	24	29		27
20	12	76	25	31		29
20	13	74	26	33		31
20	14	74	27	34		33
20	15	76	27	36		33
20	16	76	28	38		33
20	17	76	29	40		33
20	18	76	29	42		33
50	1	89	14	21	$y = 1.6667x + 17.667$	1.5
50	2	89	17	21		1.6
50	3	91	21	23		3
50	4	91	23	24		6
50	5	91	26	26		8
50	6	91	28	28		10
50	7	91	30	29		12
50	8	91	31	31		14
50	9	91	32	33		16
50	10	91	33	34		17
50	11	91	34	36		18
50	12	91	35	38		20
50	13	91	36	39		21
50	14	91	37	41		22
50	15	91	39	43		22
50	16	91	40	44		22
50	17	91	41	46		22
50	18	91	42	48		22
75	1	83	16	26	$y = 2.3333x + 21.333$	0
75	2	83	20	26		1.2
75	3	86	24	28		2.1
75	4	86	26	31		3.7
75	5	86	29	33		5.4
75	6	86	32	35		7
75	7	86	34	38		9
75	8	86	36	40		12
75	9	86	37	42		13

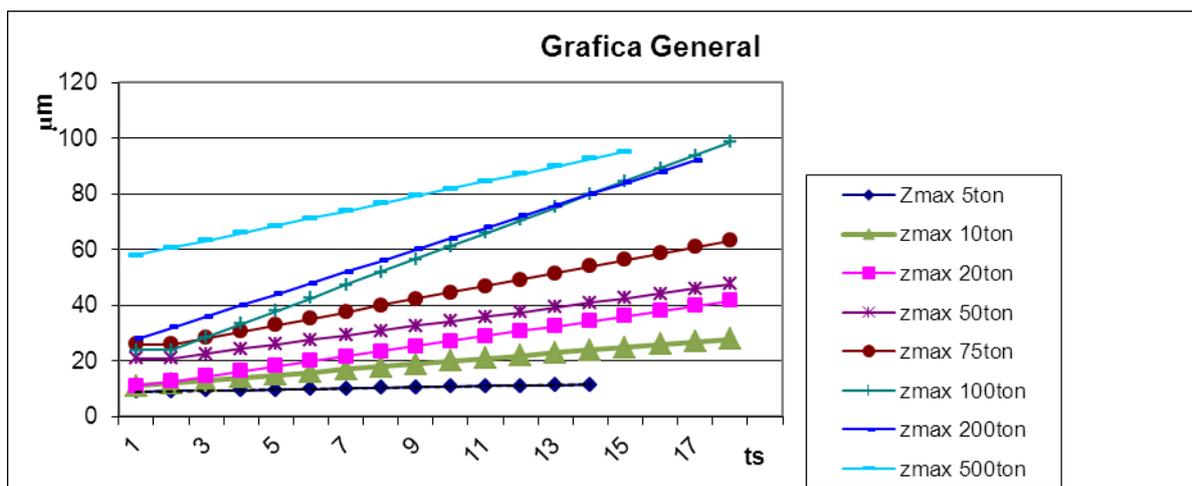
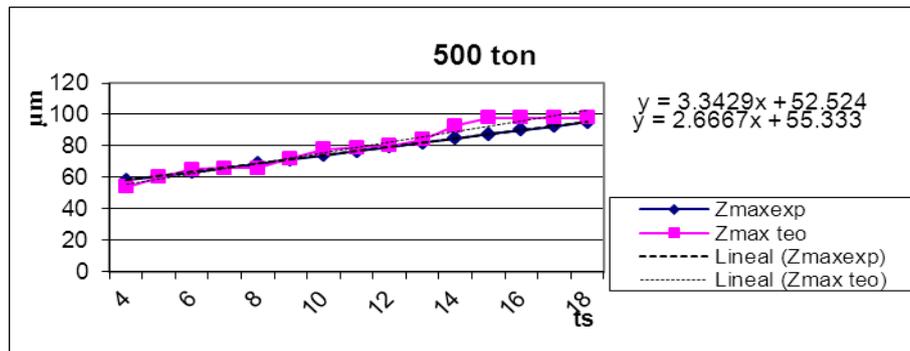
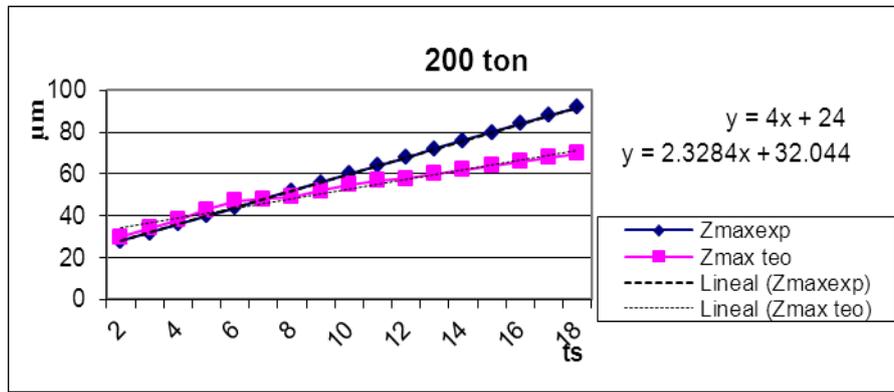
75	10	86	38	45		14
75	11	86	39	47		15
75	12	86	40	49		16
75	13	86	42	52		17
75	14	86	43	54		17
75	15	86	45	56		17
75	16	86	46	59		18
75	17	86	47	61		18
75	18	86	48	63		18
100	1	87	19	24	$y = 4.6667x + 14.667$	0
100	2	87	23	24		.5
100	3	89	28	29		1.2
100	4	89	30	33		1.3
100	5	89	33	38		2.7
100	6	89	35	43		4
100	7	89	37	47		6.5
100	8	89	38	52		9
100	9	89	40	57		10
100	10	89	42	61		11
100	11	89	45	66		12
100	12	89	47	71		13
100	13	89	48	75		13
100	14	89	49	80		13
100	15	89	51	85		13
100	16	89	52	89		14
100	17	89	53	94		14
100	18	89	54	99		14
200	2	90	30	28	$y = 4x + 20$	0
200	3	92	34	32		0
200	4	92	38	36		0.3
200	5	92	43	40		0.9
200	6	92	47	44		1.5
200	7	92	48	48		1.8
200	8	92	49	52		2
200	9	92	52	56		2.8
200	10	92	55	60		3.5
200	11	92	57	64		4.3
200	12	92	58	68		5
200	13	92	60	72		6
200	14	92	62	76		7
200	15	92	64	80		7.5
200	16	92	66	84		8
200	17	92	68	88		8
200	18	92	70	92		8
500	4	97	54	58	$y = 2.6667x + 47.333$	0

500	5	97	60	61	0.2
500	6	97	65	63	0.2
500	7	97	66	66	0.3
500	8	97	66	69	0.4
500	9	97	72	71	0.5
500	10	97	78	74	0.6
500	11	97	79	77	0.6
500	12	97	80	79	0.7
500	13	97	84	82	0.8
500	14	97	93	85	0.9
500	15	97	98	87	1
500	16	97	98	90	1
500	17	97	98	93	1
500	18	97	98	95	1

Las gráficas 5.59. A continuación se variaron los 3 parámetros (Ton, ts y Dt). Las gráficas muestran las rugosidades que dejaron los dos electrodos (el elaborado llamado experimental y el original llamado teórico). La grafica general al final muestra el amplio rango de rugosidades dejadas por electrodo elaborado (exp.). Las cuales son las siguientes:







*Esta ultima grafica nos muestra el rango de rugosidades(desde 8 hasta 95 aproximadamente) que se lograr con el electrodo elaborado y que se pueden obtener de manera segura*

## 5.8- Resultados

Si se procede siguiendo las especificaciones necesarias y dando los valores obtenidos en la tabla 3.14 se obtendrán los siguientes resultados:

- Económicamente es un proyecto viable porque según los precios tomados a finales del año 2010 el precio de un electrodo era de arriba de \$30 pesos cada uno

Ahora pensemos que compramos una barra de cobre de 3.66m de una pulgada de diámetro la cual cuesta alrededor de \$ 3466 pesos y luego cortamos y maquinamos electrodos de una pulgada de altura. Obtendríamos 144 electrodos de un costo de \$ 24 pesos cada uno

Por ultimo pensemos en comprar una barra de acero de 6m de una pulgada de diámetro la cual cuesta alrededor de \$350 pesos, luego cortamos y maquinamos electrodos de una pulgada de altura se obtienen 236 electrodos y cada uno cuesta \$1.4 pesos. A hora los proyectamos de cobre puro electrolítico (Metco 55) el cual cuesta \$30 dólares por 4.536 kg y en cada electrodo solo utilizamos 40 gramos para recubrir una capa de 1.25 mm de espesor y suponiendo que “desperdiciamos” (aunque lo podemos reutilizar) 35 gramos en la deposición y en el maquinado. Por lo que recubrir de cobre nuestro electrodo cuesta aproximadamente un costo de \$ 6.25 pesos (si el dólar está a 12 pesos). Por lo tanto el costo neto de hacer un electrodo de acero recubierto de cobre es de \$7.65 pesos. El cual es mucho menor al precio del vendedor y el de cortarlo de la barra. Se tendrá un ahorro aproximado del 74.5%

- El proceso de proyección térmica por flama con polvo de cobre es muy rápido. Si consideramos que ya una vez instalado todo el equipo y la pieza o electro ya está preparada, se pueden elaborar electrodos en 13 segundos aproximadamente dando una sola capa aproximada de 1 [mm]
- Para preparar la pieza o electrodo se utilizó alúmina del tamaño 12 con una presión de trabajo de 20 psi aproximadamente y con un ángulo de 90° respecto a la perpendicular de superficie de la pieza. Obteniendo una buena macrorugosidad de 50µm en promedio. Para la limpieza se usó acetona y alcohol.
- El precalentamiento es una parte fundamental ya que si este es considerable como para el caso de los electrodos de acero donde se precalentó a 1000°C se tendrá mejor adherencia ya que se llega a formar una capa de una mezcla fierro-cobre como se observó en los estudios de metalografía en el tema 5.1, además se obtiene un menor desgaste, menor porosidad y por lo tanto se tendrá una mejor conducción eléctrica.
- Para los experimentos realizados en la electroerosionadora los campos magnéticos fueron mínimos e imperceptibles
- En los experimentos hechos en la electroerosión se logró demostrar que el electrodo elaborado compite muy bien con el original, ya que no se encontró ningún problema al utilizarlo solo el desgaste es mínimamente mayor al original.
- El electrodo de cobre genera muy buen acabado superficial a corrientes bajas y buena remoción de material a corrientes altas.
- De acuerdo ala experimentacion no se recomienda el utilizar el Ton a 750 o más por que es riesgoso para el electrodo, la maquina y el operario
- Aunque teóricamente ya se sabía que el cobre es un excelente conductor al hacer un electrodo de Nylamid XL se puede garantizar ya que la carga pasó por el cobre que recubría al electrodo sin dificultades. Aunque el Nylamid es mal conductor.
- En cuanto a los tratamientos térmicos solo se recosió para emparejar las capas de cobre. También hay que tomar en cuenta que a mayor número de tratamientos térmicos mayor será el costo de producción.

- Se encontraron pocas inclusiones de óxido por el carácter oxidante del proceso de proyección térmica expuesto a las condiciones atmosféricas locales. Pero no tiene mucha importancia, por el tamaño que estas tienen
- Las imágenes obtenidas con un ataque químico muestran como el cobre utilizado en comparación con otras imágenes de cobre son idénticas por lo que el material utilizado cumple con características estructurales, composición química promedio, etc.
- Se obtuvo una eficiencia de deposición del 80 % además de una densidad en el recubrimiento superior al 95% por lo que el material se comportó excelente y la técnica de aplicación fueron adecuados. En cuanto a velocidades, presiones y temperaturas

## Capítulo 6- Trabajos futuros

En vista de haber podido proyectar cobre sobre el electrodo de plástico (Nylamid) mejorando en este su propiedad de conductividad eléctrica. Se está haciendo pruebas y estudiando la factibilidad de manufacturar piezas de prototipos rápidos los cuales son económicos, se pueden hacer piezas muy elaboradas y ahorro de tiempo en cuanto a maquinado, Sirven para evaluar aspectos estéticos y ergonómicos, Se usan para probar concordancia geométrica, la forma y los ensambles, Muestran las características es una prueba del producto final, Se usan para evaluar todas las funciones de la pieza final. Ya teniendo la pieza de plástico ABS de prototipo se recubre de cualquier material factible (puede ser cobre, otro polímero, metal, etc.)

El **prototipo rápido** es un proceso utilizado para fabricar artículos de plástico, metal o cerámica. También conocida como "Additive Technology". Ya que su proceso de fabricación es ir añadiendo material capa a capa, de esta manera se evita el fabricar los costosos moldes para realizar un prototipo que podría cambiar su forma. Se utiliza en diferentes industrias como la aeroespacial, dental, aeronáutica, etc.

En general se pueden crear casi todo tipo de geometrías a lo que una máquina de prototipo rápido puede crear, el hecho es que el resultado de los prototipos rápidos es lo que uno pueda crear en un archivo CAD o en 3D (tercera dimensión). Se debe de tomar en cuenta que el prototipo que se crea en estos programas no siempre se podrá producir a gran escala, ya que en el caso del prototipo rápido solo es una muestra del concepto que se creara y el siguiente paso que podemos tener en base a ese prototipo es la ingeniería de dicho objeto.

Aunque se han hecho recubrimientos exitosos con la pistola de polvos. Sin embargo es recomendable utilizar la pistola de proyección térmica con aporte de alambre. Esta última cuenta con la propiedad de poder recubrir piezas sin necesidad de precalentarlas, ya que funde el alambre lo proyecta a la pieza y como al tocar la pieza esta tiene una superficie mayor el material de aporte se enfría rápidamente lo que nos beneficia por que se evita que piezas hechas de plásticos como el ABS se derritan y de deformen



*Fig.6.1 Ejemplos de prototipos rápidos a la izquierda, prototipo semirecubierto con cobre y a la derecha una pieza proyectada con cobre con la pistola de polvos, la cual se deformó un poco*

## Capítulo 7- Conclusión

La aplicación de un recubrimiento se ha apoyado como soluciones de ingeniería mejora o declina significativamente las propiedades de nuestra pieza a recubrir, tales como resistencia a la corrosión, conductividad, desgaste, degradación térmica, fenómenos superficiales, etc. esto traerá como consecuencia mejorar la eficiencia estructural y mecánica de los mismos

Las aplicaciones más comunes del proceso de rociado térmico por combustión de polvos son las siguientes: reconstrucción y salvamento de piezas, resistencia a la abrasión, resistencia al desgaste, resistencia al impacto, resistencia al ataque químico, control de la corrosión a temperatura ambiente, control de la corrosión a altas temperaturas.

Por lo general en un proceso de proyección térmica el cambio en las propiedades físicas del metal aplicado, provoca un aumento en la porosidad y una disminución correspondiente en su resistencia a la tensión. La razón de esto es que la unión es mecánica y no fundida, como en el caso de la soldadura. La resistencia a la compresión es alta y hay algo de aumento en la dureza.

El proceso de proyección térmica tiene enormes beneficios como son: económico y larga vida útil, fácil operación, versatilidad y confiabilidad, relativamente bajo ruido de operación, gran variedad de materiales para recubrimientos, alta producción de recubrimientos, el proceso puede ser automatizado, portabilidad, el costo del equipo para proyectar en un principio es caro pero conforme se va utilizando en poco tiempo se va amortizando su costo.

La proyección térmica tiende a disminuir el límite de fatiga de los elementos, a consecuencia de la rugosidad superficial, sin embargo, tiende a mejorar las propiedades antifricción, sobretodo en capas porosas. Sin duda es un método productivo y barato

Los electrodos elaborados para la electroerosionadora fueron un éxito. Ya que maqunarlos solo lleva un par de horas y recubrirlos en segundos, económico ya que se tiene ahorro de aproximadamente 75%, durabilidad relativamente buena, propiedades eléctricas casi idénticas al original, entre muchas otras.

Se descubrió que hacer el electrodo y el porta electrodo de una sola pieza no causa efectos extraños como puntos calientes u otros que modifiquen el funcionamiento del mismo. Por lo que se decidió hacerlos de una sola pieza y así aumentar la facilidad para maqunarlos.

Al momento de hacer las pruebas en la electroerosionadora se encontró calor de Thomson el cual no fue ningún problema porque el aceite dieléctrico que no conduce la electricidad también se encargó de servir como refrigerante al estar en contacto con la pieza de trabajo y el electrodo.

Otro efecto no deseado en este caso era el Seebeck porque teníamos dos metales en contacto (cobre-acero). Favorablemente no se presentó o si se presentó fue de manera insignificante o despreciable para nuestra causa

Al recubrirlos a veces quedaban capas del mismo material que no se alcanzaban a mezclarse por diversas razones, pero con un recosido se mejoraba y se tenían características muy parecidas a los electrodos comunes. En el caso que no se hiciera el recosido los electrodos, estos si funcionan bien pero tienden a desgastarse de manera dispareja sobre todo en las uniones de las capas del mismo material que está en contacto con la pieza de trabajo o sustrato. Se pueden seguir haciendo tratamientos

térmicos solo hay que tomar en cuenta que a mayor número de tratamientos térmicos mayor será el costo de producción. Pero las propiedades serán idénticas al original.

Se descubrió que conviene hacer electrodos recubiertos de cobre por: facilidad, practicidad, rapidez, ahorro de material, se pueden modificar al gusto del usuario y por lo tanto el costo no se incrementa tanto.

En vista del éxito obtenido en proyectar cobre sobre el electrodo de plástico (nylamid). Se está estudiando la factibilidad de manufacturar piezas de prototipos rápidos los cuales son económicos, se pueden hacer piezas muy elaboradas y ahorro de tiempo en cuanto a maquinado, sirven para evaluar aspectos estéticos y ergonómicos, Se usan para probar concordancia geométrica, la forma y los ensambles, Muestran las características es una prueba del producto final, Se usan para evaluar todas las funciones de la pieza final. Ya teniendo la pieza de plástico ABS de prototipo se recubre de cualquier material factible (puede ser cobre, otro polímero, metal, etc.)

Por eso y por muchas razones se aprecia un enorme incremento en la utilización de la proyección térmica así como en el de electroerosión.

### **Capítulo 8-Bibliografía Básica:**

- 1- H.J. Kim, S.Y. Hwang, C.H. Lee, P. Juvanon. Surface and Coatings Technology 172, (2003) 262-269.
- 2- Chattopadhyay, R. (2004). Procesos superficiales termales asistidos avanzados de la ingeniería. MA, LOS E.E.U.U.: Editores académicos de Kluwer. ISBN 1-4020-7696-7.
- 3- George E. Dieter Mc Graw Hill Engineering Desin 3ra ed materials and procesing Approach
- 4- Willian F. Smith Mc Graw Hill 3ra ed Fundamento de la ciencia e ingeniería de materiales
- 5- Kalpakjian- Schmid Prince Hall 4ta ed Manufactura Ingenieria y tecnologia
- 6- William F. Smith (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Madrid: Editorial Mc Graw Hill.
- 7- Chattopadhyay, R. (2001). Desgaste superficial - análisis, tratamiento, y prevención. OH, LOS E.E.U.U.: ASM-Internacional. ISBN 0-87170-702-0
- 8- [www.metalactual.com](http://www.metalactual.com)-----feb 2010
- 9- francisco Martínez Pérez, La tribología ciencia y técnicas para el mantenimiento editorial limusa noriega editores
- 10- Sulzer Metco Type 5p-II Termospray "Instructions" 1995

## Anexo 1 Compresores y Tornos Paralelos

### Tipos de compresores:

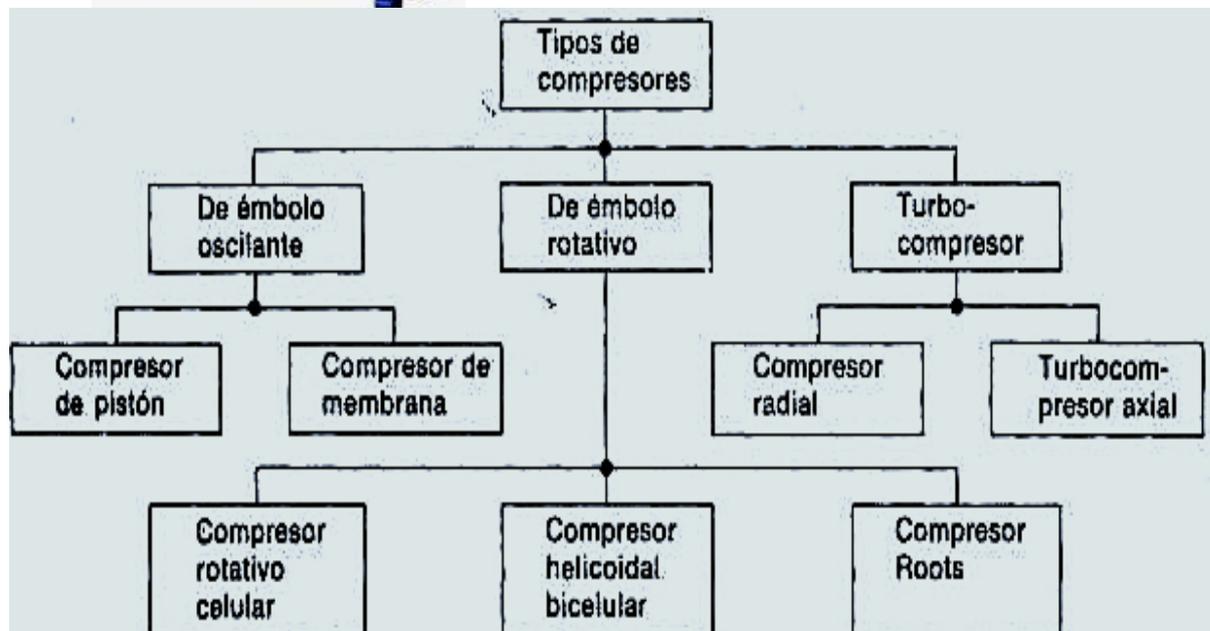
Según las exigencias referentes a la presión de trabajo y al caudal de suministro, se pueden emplear diversos tipos de construcción. Se distinguen dos tipos básicos de compresores:

El primero trabaja según el principio de desplazamiento. La compresión se obtiene por la admisión del aire en un espacio hermético, donde se reduce luego el volumen. Se utiliza en el compresor de émbolo (oscilante o rotativo).

El otro trabaja según el principio de la dinámica de los fluidos. El aire es aspirado por un lado y comprimido como consecuencia de la aceleración de la masa (turbina).



Imagen A1.1. De un compresor común



El siguiente diagrama A1.2 muestra los diferentes tipos de compresores

### TORNO PARALELO

El torno paralelo su función principal es cilindrar y roscar, trabaja la pieza situada horizontalmente; es el más utilizado, gracias a la universalidad de sus movimientos. Algunos tornos paralelos modernos tienen dimensiones verdaderamente considerables; se construyen en la actualidad tornos paralelos que, para una altura de puntos de 900 mm. Tienen una longitud útil de 18 metros

Todos los tornos, sin importar su diseño o tamaño, su funcionamiento es básicamente igual y realizan tres funciones que consisten en: Dar soporte para los accesorios del torno o la pieza, una manera de sostener y hacer girar la pieza, un medio para sostener y mover la herramienta de corte.

El diagrama A1.3 Muestra imagen y el nombre de las piezas importantes del torno

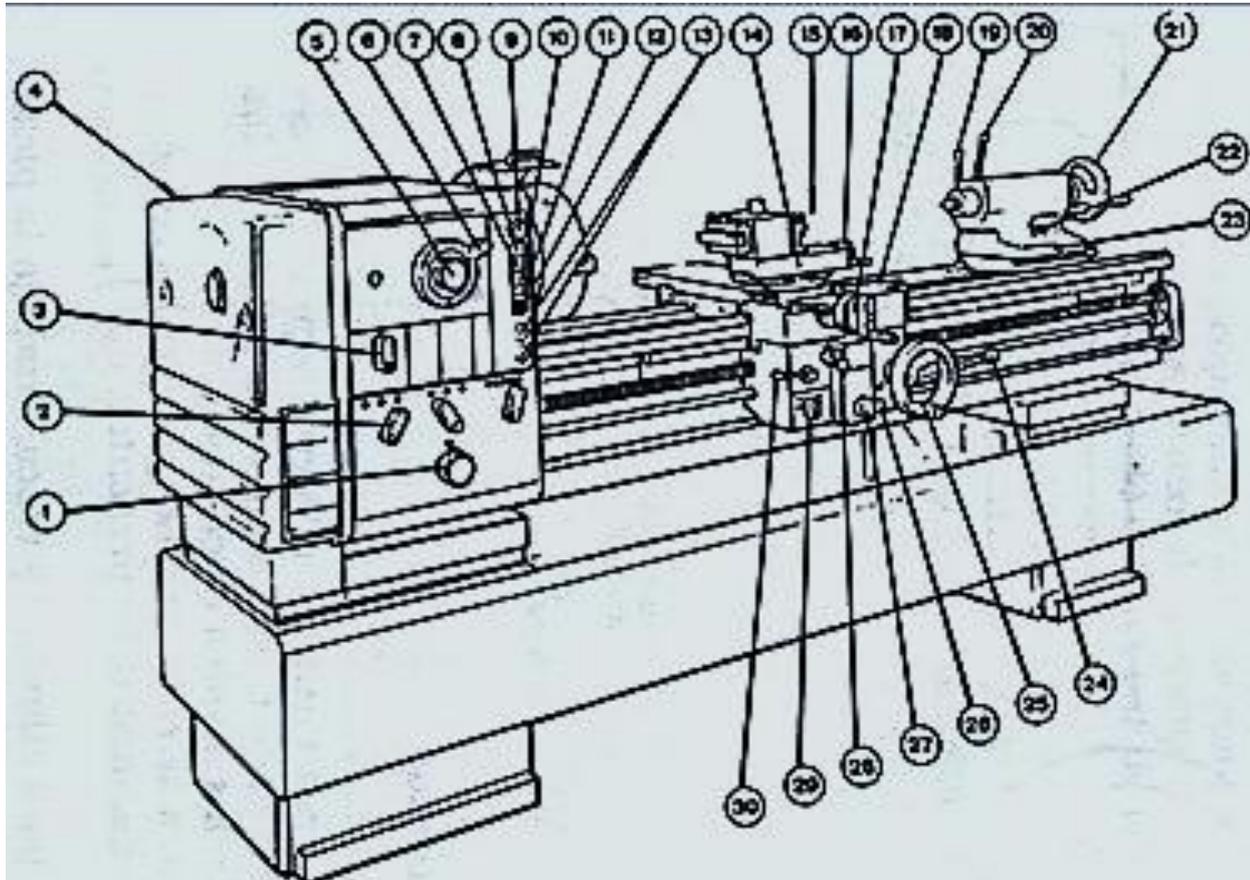
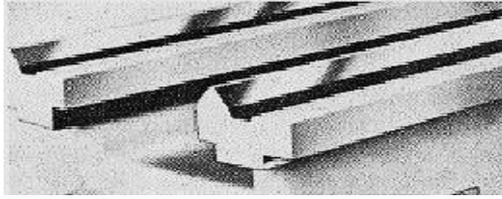


Tabla A1. Nomenclatura básica de un torno

1) Dial selector de avances,	16) Manivela de translación del carro superior.
2) Selectores de avance	17) Manivela de translación del carro transversal.
3) Selector sentido de avance, sentido de la rosca.	18) Tornillo de bloqueo del carro longitudinal.
4) Interruptor principal (en la parte posterior)	19) Bloqueaje de la caña del contrapunto.
5) Dial selector de velocidades	21) Volante de translación de la caña.
6) Palanca selectora de la gama de velocidades.	22) Balón de bloqueo auxiliar del contrapunto.
7) Pulsador de marcha (motor principal)	23) Tornillo de desplazamiento del contrapunto.
8) Pulsador de parada (motor principal)	24) Palanca de mando del husillo.
9) Pulsador de parada de emergencia.	25) Volante de translación del carro longitudinal.
10) Pulsador para soltar el freno	26) Mando de engrase central.
11) Pulsadores de la bomba de refrigeración.	27) Regulación de disparo de avance.
12) Pulsadores de la bomba hidráulica.	28) Acoplamiento de avance.
13) Pulsadores de plato de potencia.	29) Inversión del avance.
14) Tornillo de bloqueo del carro superior.	30) Acoplamiento del avance de roscado.
15) Tornillo de bloqueo del carro transversal	

### Bancada

Es una pieza fundida, templada de fragua y rectificadas con el fin de reducir el desgaste y mantener la precisión. Esto con el fin de soportar las partes de trabajo del torno, en su parte superior están las guías o rieles con las que se dirigen y alinean las partes principales del mismo.



*Figura A1.4 Se observa un ejemplo de la bancada de este torno tiene guías planas y planas y prismáticas o en V.*

### **Cabezal**

Está sujeto al lado izquierdo de la bancada. El husillo del cabezal, una flecha cilíndrica hueca apoyada en cojinetes, proporciona una transmisión del motor a los dispositivos para sostener la pieza. Para sostener e impulsar el trabajo, puede ajustarse un punto vivo y manguito, un plato plano o cualquier otro tipo de plato a la nariz del husillo. Los tornos actualmente están equipados con engranes y el husillo a impulsado por una serie de ellos que se encuentran en el cabezal. Esta disposición permite obtener varias velocidades del husillo para ajustarse a tipos y tamaños diferentes de la pieza. La palanca de inversión del avance puede colocarse en tres posiciones: la de arriba hace que la barra alimentadora y el tonillo principal de avance se muevan hacia adelante, la central es neutra y la de abajo invierte la dirección de movimiento de la barra y del tornillo.

### **Caja de engranes de cambio rápido**

Esta caja, la cual contiene varios engranes de tamaños diferentes, hace posible dar a la barra alimentadora y al tornillo principal de avance varias velocidades para las operaciones de torneado y de roscado. La barra alimentadora y el tornillo de avance constituyen la transmisión para el carro principal al embragar la palanca de avance automático o la palanca de tuerca dividida.

### **Carro principal**

Soporta en nuestro caso el mecanismo de 4 barras donde se apoya la pistola o la herramienta de corte y se emplea para moverla a lo largo de la bancada en las operaciones de torneado. El carro consta de tres partes principales: el asiento, la palanca delantal y el cursor transversal.

El asiento, una pieza fundida con forma de H que se encuentra montada sobre la parte superior de las guías del torno, da soporte al carro transversal, el cual proporciona el movimiento transversal a la herramienta de corte. El soporte combinado (u orientable) se emplea para sostener la herramienta de corte y se le puede hacer girar hasta formar cualquier ángulo horizontal para realizar las operaciones de torneado cónico. El cursor transversal y el soporte combinado se mueven por medio de tornillos de avance. Cada uno de ellos tiene un tambor graduado para poder hacer ajustes exactos de las herramientas de corte.

La placa delantal está sujeta al asiento y aloja los mecanismos de avance, los cuales dan lugar a un avance automático del carro. Se utiliza la palanca de avance automático para embragar el avance deseado al carro. La manivela del carro puede hacerse girar a mano para que el carro se mueva a lo largo de la bancada. Esta manivela está conectada a un engrane que se acopla a una cremallera sujeta a la bancada. El émbolo direccional de avance puede colocarse en tres posiciones: en la posición adentro embraga el avance longitudinal del carro, la central o neutra se emplea en el roscado, para permitir el embrague de la palanca de tuerca dividida; la posición afuera sirve cuando se requiere un avance transversal automático.

### **Cabeza móvil**

Está formada por dos unidades. La mitad superior puede ajustarse sobre la base por medio de dos tornillos, a fin de alinear los puntos del cabezal móvil y del cabezal fijo cuando se va a realizar torneado cilíndrico. También pueden emplearse estos tornillos

para descentrar el cabezal móvil con el fin de realizar torneado cilíndrico entre los puntos. El cabezal móvil puede fijarse en cualquier posición a lo largo de la bancada si se aprieta la palanca o tuerca de sujeción. Uno de los extremos del punto muerto es cónico para que pueda ajustarse al husillo del cabezal móvil, mientras que el otro extremo tiene una punta de  $60^\circ$  para dar un apoyo de cojinete al trabajo que se tornea entre los puntos. En el husillo de este cabezal también pueden sostenerse otras herramientas estándar de mango cónico, como los escariadores y las brocas. Se emplea una palanca de sujeción del husillo, o manija de apriete, para mantener al husillo en una posición fija. La manivela mueve al husillo hacia adentro y hacia afuera de la pieza fundida que constituye el cabezal móvil: también puede emplearse para realizar avance manual en las operaciones de taladrado y escariado.

### Carro longitudinal.

El carro longitudinal es el cual tiene como desplazamiento la bancada, este carro nos proporciona el movimiento a través de un engrane con la cremallera y un tornillo sin fin, cuenta con un automático el cual es operado por medio de la barra colisa, este automático sirve para hacer la operación de roscado. El volante tiene una graduación para que uno mida la profundidad que se le da a los cortes.

### Carro transversal

Este Carro cuenta con un movimiento transversal a eso debe su nombre, también tiene una manivela graduada, cuenta con el carro automático, y sobre él está montado el carro auxiliar.

### Carro auxiliar.

El carro auxiliar es el cual tiene la responsabilidad para realizar el tallado de los conos variando el ángulo de inclinación del mismo, este está regulado por una placa graduada y para su fijación del carro cuenta por lo regular con 4 tornillos. Sobre este se encuentra la tórtea portaherramientas.

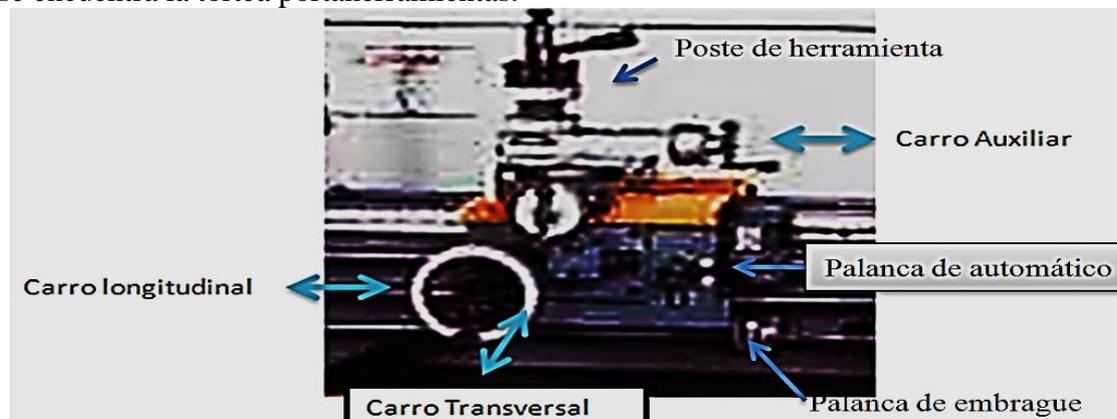


Fig. A1.5. Es un diagrama básico de los diferentes carros y sus partes en un torno paralelo

### Torno moderno de control numérico.

El torno de control numérico es un ejemplo de automatización programable. Se diseñó para adaptar las variaciones en la configuración de los productos. Su principal aplicación se centra en volúmenes de producción medios de piezas sencillas y en volúmenes de producción medios y bajos de piezas complejas. Uno de los ejemplos más importantes de automatización programable es el control numérico en la fabricación de partes metálicas. El control numérico (CN) es una forma de automatización programable en la cual el equipo de procesamiento se controla a través de números, letras y otros símbolos. Estos números, letras y símbolos están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para desarrollar una tarea concreta.

## Anexo 2: Procedimiento previo para microscopia

Los materiales blandos (de dureza menor a 35 Rc) pueden seccionarse por aserrado, pero los materiales más duros deben cortarse con un disco abrasivo. Las sierras de corte metalúrgico con hojas abrasivas y flujo de refrigerante son las herramientas que se usan para este propósito y para eso utilizamos una cortadora o micro-cortadora metalográfica: es un equipo capaz de cortar con un disco especial de corte por abrasión, mientras suministra un gran caudal de refrigerante, evitando así el sobrecalentamiento de la muestra. De este modo, no se alteran las condiciones microestructurales de la misma.

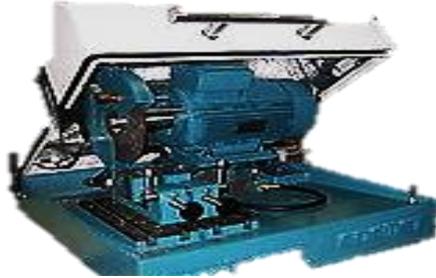


Fig. A2.1. Cortadora metalográfica

Cuando las muestras son de tamaño mínimo, la muestra cortada se encapsula o monta en resina para su mejor tratamiento posterior y almacenado. El encapsulado se puede realizar mediante resina **en frío**: normalmente dos componentes, resina en polvo y un catalizador en líquido, o bien **en caliente**: mediante una encapsuladora, que, mediante una resistencia interior calienta la resina (monocomponente) hasta que se deshace. La misma máquina tiene la capacidad de enfriar la muestra, por lo que es un proceso recomendado en caso de requerimientos de muchas muestras al cabo del día.



Fig. A2.2 Embutidora metalográfica

### Pulido metalográfico

Los granos y otras características de los metales no pueden verse al menos que la muestra se desbaste y se pula para eliminar las ralladuras. Se utilizan diferentes métodos de pulido tales como el electrolítico, el rotatorio o el de vibración.

Se usa el equipo Devastadora o Pulidora Metalográfica, se prepara la superficie del material, en su primera fase denominada Desbaste Grueso, donde se devasta la superficie de la muestra con papel de lija, de manera uniforme y así sucesivamente disminuyendo el tamaño de grano (Nº de papel de lija) hasta llegar al papel de menor tamaño de grano.

El procedimiento más común consiste en desbastar primero la superficie de la muestra en una lijadora de banda y luego a mano con papel abrasivo de varios grados, desde el número de partícula de 180 hasta de 600.

Luego se procede a un pulido intermedio donde la muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente.

El primer papel es generalmente no. 1, luego 1/0, 2/0, 3/0 y finalmente 4/0. Por lo general, las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en seco; sin embargo, en ciertos casos, como el de preparación de materiales suaves, se puede usar un abrasivo de carburo de silicio. Comparado con el papel esmeril, el carburo de silicio tiene mayor rapidez de remoción y, como su acabado es a base de resina, se puede utilizar con un lubricante, el cual impide el sobrecalentamiento de la muestra, minimiza el daño cuando los metales son blandos y también proporciona una acción de enjuague para limpiar los productos removidos de la superficie de la muestra, de modo que el papel no se ensucie.

Por último el pulido Fino o espejo, en la que se requiere de una superficie plana libre de ralladuras la cual se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño para ello existen gran posibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido; en tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio parece haber preferencia por la gama de óxidos de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre y óxido de cerio para pulir aluminio, magnesia y sus aleaciones.

La etapa del pulimento es ejecutada en general con paños macizos colocados sobre platos giratorios circulares, sobre los cuales son depositadas pequeñas cantidades de abrasivos, en general diamante industrial en polvo fino o bien en suspensión, con granulometrías como por ejemplo de 10, 6, 3, 1, y 0,25 micras

El tiempo utilizado y el éxito del pulido fino dependen en mucho del cuidado puesto durante los pasos de pulido previo.

Existe gran posibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio parece haber preferencia por la forma gama del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre, y óxido de cesio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos para pulido final que se emplean a menudo son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

La selección de un paño para pulir depende del material que vaya a pulirse y el propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo variable, desde aquellos que no tienen pelillo (como la seda) hasta aquellos de pelillo intermedio (como paño de ancho, paño de billar y lonilla) además de aquellos de pelillo profundo (como el terciopelo). También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el abrasivo en forma de pasta o semidiluida con agua destilada y el micro paño son los que se utilizan más ampliamente. Una muestra pulida en forma de cuadro mostrará únicamente las inclusiones no metálicas; además, estará libre de ralladuras.

El pulido se realiza sujetando la muestra a tratar con la mano o bien mediante un cabezal automático para pulir varias muestras a la vez. El cabezal automático ejerce una presión pre-configurada hacia el disco o paño de desbaste o pulido durante un tiempo concreto. Estos parámetros deben ser configurados según tipo de material

(dureza, estado del pulido, etc...) Opcionalmente existen sistemas con dosificador automático de suspensión diamantada.



*Fig. A2.3: A la izquierda Pulidoras metalográficas y a la derecha se ve como se hace un pulido fino sobre paño de forma manual*



*Fig. A2.4: ala izquierda se encuentra Pulidora metalográfica con cabezal de pulido automático y ala derecha de forma manual*

## Anexo 3 Electricidad

Thales de Mileto (640-546 ac) observó efectos cargas estáticas.

Aristóteles cita la descarga eléctrica del pez torpedo, y los antiguos indios conocían que ciertos cristales calentados atraían a cenizas calientes (piroelectricidad).

En el siglo XVI con la obra "De Magnete" de W. Gilbert donde introduce el término electricidad y encuentra que también la adquieren por frotamiento el cristal de roca y algunas gemas.

En el siglo XVIII son varios los hallazgos. Stephen Gray descubrió la transmisión por contacto y por inducción de la electricidad, clasifica los materiales en aislantes y conductores.

Du Fay habló de dos tipos de electricidad, la vítrea adquirida por el vidrio, la lana y las piedras preciosas y la resinosa adquirida por el papel, la goma o el hilo, y estableció la ley empírica de que electricidades del mismo tipo se repelen y de distinto se atraen.

En 1752 Benjamin Franklin realizó su famoso experimento de la cometa y una botella, demostrando la naturaleza eléctrica del rayo.

El estudio cuantitativo de la electricidad comienza cuando Coulomb en el año 1777, estudiando la fuerza ejercida entre dos cargas consideradas puntuales mediante una balanza de torsión llegó a la expresión de la ley que lleva su nombre y cuya expresión es similar a la Ley de Gravitación Universal de Newton.

La invención de la pila eléctrica en 1800 por A. Volta, pues su pila proporcionaba corriente más estable y duradera que la de la botella de Leyden. Con esto el estudio de la electrostática al de la corriente eléctrica fue facilitado

Desde que, en 1831, Faraday descubriera la forma de producir corrientes eléctricas por inducción este fenómeno que permite transformar energía mecánica en energía eléctrica se ha convertido en una de las formas de energía más importantes para el desarrollo tecnológico debido a su facilidad de generación y distribución y a su gran número de aplicaciones.

Los experimentos de Oersted (1820) y Faraday (1831) demostraron que el fenómeno de la electricidad va siempre acompañado de fenómenos magnéticos, estudiándose ambos conjuntamente y dando lugar a uno de los apartados más notables de la Física: El electromagnetismo.

La electricidad y el magnetismo son dos aspectos diferentes de un mismo fenómeno físico, denominado electromagnetismo, descrito matemáticamente por las ecuaciones de Maxwell. El movimiento de una carga eléctrica produce un campo magnético, la variación de un campo magnético produce un campo eléctrico y el movimiento acelerado de cargas eléctricas genera ondas electromagnéticas (como en las descargas de rayos que pueden escucharse en los receptores de radio AM).

La **electricidad** (del griego *elektron*, cuyo significado es ámbar) es un fenómeno físico cuyo origen son las cargas eléctricas y cuya energía se manifiesta en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos, entre otros en otras palabras es el flujo de electrones. Se puede observar de forma natural en fenómenos atmosféricos, por ejemplo los rayos, que son descargas eléctricas producidas por la transferencia de energía entre la ionosfera y la superficie terrestre (proceso complejo del que los rayos solo forman una parte) o en el funcionamiento del sistema nervioso. Es la base del funcionamiento de muchas máquinas,

Además es esencial para la producción de sustancias químicas como el aluminio y el cloro.

También se denomina **electricidad** a la rama de la física que estudia las leyes que rigen el fenómeno y a la rama de la tecnología que la usa en aplicaciones prácticas.

Debido a las crecientes aplicaciones de la electricidad como vector energético, como base de las telecomunicaciones y para el procesamiento de información, uno de los principales desafíos contemporáneos es generarla de modo más eficiente y con el mínimo impacto ambiental.

Las Interacciones entre cargas de igual naturaleza se repelen y de distinta naturaleza se atraen

La carga eléctrica es una propiedad que poseen algunas partículas subatómicas y que se manifiesta mediante las fuerzas observadas entre ellas. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos siendo, a su vez, generadora de ellos. La interacción entre carga y campo eléctrico es la fuente de una de las cuatro interacciones fundamentales, la interacción electromagnética. La partícula que transporta la información de estas interacciones es el fotón. Estas fuerzas son de alcance infinito y no se manifiestan de forma inmediata, sino que tardan un tiempo,  $t=d/c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el medio en el que se transmite y  $d$  la distancia entre las cargas.

Las dos partículas elementales cargadas que existen en la materia y que se encuentran de forma natural en la Tierra son el electrón y el protón, aunque pueden encontrarse otras partículas cargadas procedentes del exterior (como los muones o los piones). Todos los hadrones (como el protón y el neutrón) además, están constituidos por partículas cargadas más pequeñas llamadas quarks, sin embargo estas no pueden encontrarse libres en la naturaleza.

Cuando un átomo gana o pierde un electrón, queda cargado eléctricamente. A estos átomos cargados se les denomina iones.

Los trabajos de investigación realizados en la segunda mitad del siglo XIX por el premio Nobel de Física Joseph John Thomson, que le llevaron en 1897 a descubrir el electrón, y de Robert Millikan a medir su carga, determinaron la naturaleza discreta de la carga eléctrica.

En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga eléctrica se denomina culombio (símbolo C) y se define como la cantidad de carga que pasa por una sección en 1 segundo cuando la corriente eléctrica es de 1 amperio. Se corresponde con la carga de  $6,24 \times 10^{18}$  electrones aproximadamente.

La carga del electrón:  $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$  (1 eV en unidades naturales).

La unidad de carga resulta entonces una unidad derivada, que se define como la cantidad de carga eléctrica que fluye durante 1 segundo a través de la sección de un conductor que transporta una intensidad constante de corriente eléctrica de 1 amperio:  
 $C=A \cdot S$

Voltio (V, unidad de potencial eléctrico y fuerza electromotriz) se define como la diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente con una intensidad de un amperio utiliza un vatio de potencia:

$$V = \frac{J}{C} = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^3 \cdot \text{A}}$$

Ohmio ( $\Omega$ , unidad de resistencia eléctrica) es la resistencia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia de potencial constante de 1 voltio

aplicada entre estos dos puntos produce, en dicho conductor, una corriente de intensidad 1 amperio, cuando no haya fuerza electromotriz en el conductor:

$$\Omega = \frac{V}{A} = \frac{m^2 \cdot kg}{s^3 \cdot A^2}$$

**La fuerza entre cargas** por primera vez las determinó Coulomb, en 1785, el valor de las fuerzas ejercidas entre cargas eléctricas. La magnitud de la fuerza con que se atraen o repelen dos cargas eléctricas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de las magnitudes de cada carga e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$$\vec{F}_i = F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

Donde  $q_1$  y  $q_2$  son las cargas,  $r$  es la distancia que las separa y la constante de proporcionalidad  $k$  depende del sistema de unidades.

Una propiedad fundamental de estas fuerzas es el principio de superposición que establece que, cuando hay varias cargas  $q_j$ , la fuerza resultante sobre una cualquiera de ellas es la suma vectorial de las fuerzas ejercidas por todas las demás. La fuerza ejercida sobre la carga puntual  $q_i$  en reposo está dada en el SI por:

$$\vec{F}_i = 9 \cdot 10^9 \cdot q_i \cdot \sum_{j \neq i} q_j \cdot \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3}$$

Donde  $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$  denota el vector que une la carga  $q_j$  con la carga  $q_i$ .

Cuando las cargas están en movimiento aparecen también fuerzas magnéticas. La forma más sencilla de describir el fenómeno es con el uso de campos eléctrico ( $\vec{E}$ ) y magnético ( $B$ ), de los que a su vez se pueden derivar las fuerzas a partir de la fórmula de Lorentz:  $F=q(\vec{E} + v \times B)$

En el caso general de cargas distribuidas de manera arbitraria, no es posible escribir expresiones explícitas de las fuerzas. Hay que resolver las ecuaciones de Maxwell, calcular los campos y derivar las fuerzas a partir de las expresiones de la energía electromagnética.

### Campos eléctrico y magnético

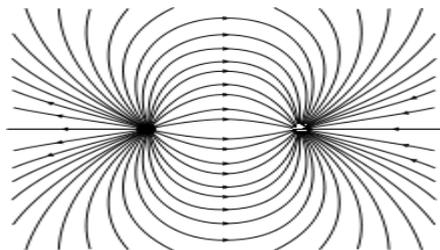


Fig.A3.1. de un campo magnético de dos cargas eléctricas de igual valor absoluto y signos opuestos.

Los campos eléctrico ( $\vec{E}$ ) y magnético ( $B$ ), son campos vectoriales característicos en cada punto del espacio y cada instante del tiempo por un módulo, una dirección y un sentido. Una propiedad fundamental de estos campos es el principio de superposición, según el cual el campo resultante puede ser calculado como la suma vectorial de los campos creados por cada una de las cargas eléctricas.

Las líneas de fuerza o de campo, que son curvas tangentes a la dirección de los vectores de campo. En el caso del campo eléctrico, esta línea corresponde a la

trayectoria que seguiría una carga sin masa que se encuentre libre en el seno del campo y que se deja mover muy lentamente.

Normalmente la materia es neutra, es decir, su carga eléctrica neta es nula. Sin embargo, en su interior tiene cargas positivas y negativas y se localizan corrientes eléctricas en los átomos y moléculas, lo cual da lugar a campos eléctricos y magnéticos. En el caso de dos cargas opuestas se generan campos dipolares, como el representado.

Se denomina tensión eléctrica o voltaje a la energía potencial por unidad de carga que está asociada a un campo electrostático. Su unidad de medida en el SI son los voltios.

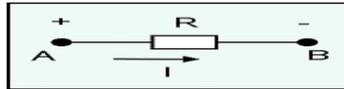


Fig.A3.2. Esquema de una resistencia  $R$  por la que circula una intensidad de corriente  $I$  debido a la diferencia de potencial entre los puntos  $A$  y  $B$ .

Matemáticamente, la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos  $A$  y  $B$  es la integral de línea del campo eléctrico:

$$V(A) - V(B) = - \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Generalmente se definen los potenciales referidos a un punto inicial dado. Cuando no hay campos magnéticos variables, el valor del potencial no depende de la trayectoria usada para calcularlo, sino únicamente de sus puntos iniciales y final. Se dice entonces que el campo eléctrico es *conservativo*. En tal caso, si la carga eléctrica  $q$  tan pequeña que no modifica significativamente  $\vec{E}$ , la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos  $A$  y  $B$  será el trabajo  $W$  por unidad de carga, que debe ejercerse en contra del campo eléctrico  $\vec{E}$  para llevar  $q$  desde  $B$  hasta  $A$ . Es decir:  $V = \frac{W}{q}$ .

Otra de las formas de expresar la tensión entre dos puntos es en función de la intensidad de corriente y la resistencia existentes entre ellos. Así se obtiene uno de los enunciados de la ley de Ohm:  $V=R \cdot I$

Cuando por dos puntos de un circuito puede circular una corriente eléctrica, la polaridad de la caída de tensión viene determinada por la dirección convencional de la misma; esto es, del punto de mayor potencial al de menor. En el caso de campos no estacionarios el campo eléctrico no es conservativo y la integral de línea del campo eléctrico contiene efectos provenientes de los campos magnéticos variables inducidos o aplicados, que corresponden a una fuerza electromotriz inducida (f.e.m.), que también se mide en voltios.

La fuerza electromotriz, cuyo origen es la inyección de energía externa al circuito, permite mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Esta energía puede representarse por un campo de origen externo cuya circulación (integral de línea sobre una trayectoria cerrada,  $\oint_C \vec{E} \cdot ds$ ) define la fuerza electromotriz del generador. Esta expresión corresponde el trabajo que el generador realiza para forzar el paso por su interior de una carga, del polo negativo al positivo (es decir, en contra de las fuerzas eléctricas), dividido por el valor de dicha carga. El trabajo así realizado puede tener

origen mecánico (dínamo), químico (batería), térmico (efecto termoelectrico) o de otro tipo.

En todos los materiales sometidos a campos eléctricos se modifican, en mayor o menor grado, las distribuciones espaciales relativas de las cargas negativas (electrones) y positivas (núcleos atómicos). Este fenómeno se denomina polarización eléctrica y es más notorio en los aisladores eléctricos debido a la ausencia de apantallamiento del campo eléctrico aplicado por los electrones libres.

Se denomina **corriente eléctrica** al flujo de carga eléctrica a través de un material sometido a una diferencia de potencial. Se fijó el sentido convencional de circulación de la corriente como un flujo de cargas desde el polo positivo al negativo. Sin embargo, posteriormente se observó, gracias al efecto Hall, que en los metales los portadores de carga son electrones, con carga negativa, y se desplazan en sentido contrario al convencional.

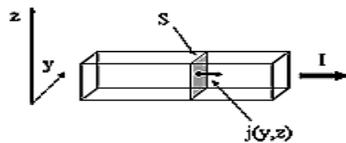


Fig.A3.3. Esquema de la Relación existente entre la intensidad y la densidad de corriente.

A partir de la corriente eléctrica se definen dos magnitudes: la intensidad y la densidad de corriente. El valor de la intensidad de corriente que atraviesa un circuito es determinante para calcular la sección de los elementos conductores del mismo.

- La intensidad de corriente ( $I$ ) en una sección dada de un conductor ( $s$ ) se define como la carga eléctrica ( $Q$ ) que atraviesa la sección en una unidad de tiempo ( $t$ ):  

$$I = dQ/dt$$
 Si la intensidad de corriente es constante, entonces  $I = Q/t$
- La densidad de corriente ( $j$ ) es la intensidad de corriente que atraviesa una sección por unidad de superficie de la sección ( $S$ ).  $j = I/S$

### Fenómenos termoelectricos

Cuando se hace circular una corriente a través de una unión bimetálica, para mantener constante la temperatura de la unión hay que entregar o extraer calor, según sea el sentido de circulación. Este fenómeno, llamado efecto Peltier, tiene aplicación práctica en dispositivos de refrigeración pequeños, teniendo la ventaja, a diferencia de los refrigeradores basados en la compresión y descompresión de gases, de no tener partes móviles que se desgasten.

Es menos conocido el fenómeno denominado **calor de Thomson**, descubierto por lord Kelvin. Cuando fluye una corriente a través de un conductor homogéneo de sección transversal constante donde se ha establecido un gradiente de temperatura, para mantener invariable la distribución de temperatura hay que entregar o extraer calor del conductor.

Otro fenómeno sucede cuando dos metales distintos a temperaturas diferentes se ponen en contacto formando una unión bimetálica, entre ambos lados de la unión se genera una fuerza electromotriz. Este fenómeno se denomina efecto Seebeck y es la base del funcionamiento de los termopares, un tipo de termómetro usado en el control del flujo de gas en dispositivos domésticos como cocinas, calefactores y calentadores de agua corriente.

## Anexo 4 Tratamientos Térmicos.

### ➤ Recocido:

Todo metal que haya sido previamente trabajado en frío, sean por medio de los mecanismos de deformación plástica por deslizamiento y por maclaje logra alterar las propiedades mecánicas de este metal. El resultado del trabajo en frío es deformar los granos dentro del metal adicionando imperfecciones a los cristales que servirán de anclaje evitando el movimiento interplanar con el consiguiente aumento de las propiedades de Dureza, la resistencia a la Tensión y la resistencia eléctrica; y, por el contrario, disminuyo la ductilidad.

Se puede entender el recocido como el calentamiento del cobre por encima de las temperaturas de transformación a la fase austenítica seguida de un enfriamiento lento. El resultado de este lento enfriamiento es el de obtener un equilibrio estructural y de fase en los granos del metal.

Dependiendo del porcentaje de carbono; luego del recocido se pueden obtener diversas estructuras

El fin último del recocido del cobre tiene baja dureza, baja resistencia y sobretodo el homogenizar las diferentes capas de cobre

El recocido total es el proceso mediante el cual la estructura distorsionada en frío retorna a una red cuyo estado se halla libre de tensiones por medio de la aplicación de calor. Este proceso se efectúa totalmente en estado sólido y puede dividirse en las tres etapas siguientes: Recuperación, Recristalización y Crecimiento del Grano.

#### **Recuperación**

La deformación plástica que ha sufrido un metal provoco la operación de esfuerzos internos que distorsiona la red cristalina incrementando la dureza y disminuyendo la ductilidad del metal.

Si llevamos la muestra de metal a una temperatura superior a la ambiental pero por debajo de la temperatura de austenización; las propiedades mecánicas de este no variaran en gran medida lo que es cónsono con la mínima variación de la microestructura del metal.

Siendo el único efecto apreciable el del alivio de los esfuerzos internos productos de la deformación plástica.

Cuando calentamos el metal las dislocaciones se mueven y reagrupan mientras que los esfuerzos residuales se reducen. Durante esta etapa aumenta relativamente la conductividad eléctrica del metal tratado.

#### **Re cristalización**

Si el calentamiento continuo, el grano original donde están presentes las dislocaciones dará lugar a granos de menor tamaño que estarán libres de imperfecciones y de esfuerzos residuales. Estos nuevos granos no presentan la forma alargada de los granos originales sino que son más uniformes en sus dimensiones.

Esta parte del proceso tiene como fin último el refinar el tamaño del grano, eliminando las tensiones internas y disminuyendo la heterogeneidad estructural, el recocido contribuye a mejorar las propiedades de plasticidad y viscosidad en comparación con las obtenidas después de fundido forjado o laminado.

El proceso de Recristalización requiere elevar la temperatura por debajo del cual no se dará el proceso de recristalización, mas esta temperatura no es un valor definido sino una temperatura aproximada que recibe el nombre de Temperatura de Recristalización

definida como "La temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora".

La Temperatura de Recristalización depende de diversos factores pero entre los principales tenemos:

1. La severidad de la deformación plástica.
2. El tamaño del grano original deformado plásticamente.
3. La temperatura a la cual ocurre la deformación plástica.
4. El tiempo en el cual el metal deformado plásticamente es calentado para obtener la temperatura de Recristalización.
5. La presencia de elementos disueltos en el metal.

Obsérvese que a mayor cantidad de deformación previa, menor será la temperatura necesaria para iniciar el proceso de la Recristalización debido a la mayor distorsión y a la mayor cantidad de energía interna disponible.

Si aumentamos el tiempo de recocido lograremos disminuir la temperatura de Recristalización.

Si la intensidad del trabajo en frío es similar en dos muestras; aquella que presente los granos más finos introducirá un mayor endurecimiento por deformación en el metal y por lo tanto, menor será la temperatura de Recristalización que en aquella de grano mayor.

Si la deformación en frío ocurre a una temperatura menor en una muestra que en otra, mayor será el grado de deformaciones introducidas disminuyendo efectivamente la temperatura de Recristalización para cierto tiempo de recocido que en la otra muestra.

#### ➤ **El temple :**

Es un tratamiento térmico al que se somete el metal, concretamente a piezas o masas metálicas ya conformadas en el mecanizado, para aumentar su dureza, resistencia a esfuerzos y tenacidad. El proceso se lleva a cabo calentando el cobre a 550<sup>0</sup>c y el acero a una temperatura aproximada de 915°C en el cual la perlita se convierte en austenita, después la masa metálica es enfriada por lo general rápidamente (salvo algunos caso donde el enfriamiento es "lento" aceros autotemplables), sumergiéndola o rociándola en agua, en aceite , aire positivo o en otros fluidos o sales. Después del temple siempre se suele hacer un revenido.

Es uno de los principales tratamientos térmicos que se realizan y lo que hace es disminuir y afinar el tamaño del grano de la alineación de acero correspondiente. Se pretende la obtención de una estructura totalmente martensítica.

Se basa en calentar la pieza a una temperatura comprendida ente 700 °C y 1000 °C, para luego enfriarla rápidamente controlando el tiempo de calentamiento y de enfriamiento.

#### **Tipos de temple**

Hay dos tipos de temples, uno de ellos es el que se temple la totalidad de la pieza, incluyendo su núcleo, y otro es el que solo se temple su superficie externa, dejando el núcleo menos duro, para que sea más flexible. A este segundo temple se le llama "temple superficial" y existen dos tipos de éste según la manera de calentar: "a la llama" (en desuso) y el temple por inducción.

También la dureza superficial se obtiene por medio del cementado, sin endurecer el núcleo, aplicado en engranajes y otros elementos que requieran similares características.

## Factores que influyen en el temple

- La composición química del acero a temprar, especialmente la concentración de carbono. También es muy importante la presencia de aleantes ya que amplían la franja temporal de enfriamiento en la que se puede obtener martensita.
- La temperatura de calentamiento y el tiempo de calentamiento de acuerdo con las características de la pieza.
- La velocidad de enfriamiento y los líquidos donde se enfría la pieza para evitar tensiones internas y agrietamiento.
- Las tensiones internas son producidas por las variaciones exageradas que se le hace sufrir al acero, primero elevándola a una temperatura muy alta y luego enfriándola. Estas tensiones y grietas son consecuencia del cambio de volumen que se produce en el interior del acero debido a que el núcleo enfría a menor velocidad. A las piezas templadas hay que darles un tratamiento posterior llamado revenido para eliminar las tensiones internas

## Características generales del temple

- Es el tratamiento térmico más importante que se realiza
- Hace el acero más duro y resistente pero más frágil
- La temperatura de calentamiento puede variar de acuerdo a las características de la pieza y resistencia que se desea obtener.
- El enfriamiento es rápido
- Si el temple es muy enérgico las piezas se pueden agrietar.

### ➤ Revenido:

consiste en calentar el metal después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

Con este último tratamiento se consiguen lo siguientes:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad.
- Disminuir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple.
- Modificar las características mecánicas, en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos:
- Disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza.
- Aumentar las características de ductilidad; alargamiento estricción y las de tenacidad; resiliencia.

### **Los factores que influyen en el revenido son los siguientes:**

la temperatura de revenido sobre las características mecánicas, el tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido), la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25mm de espesor o diámetro).

El acero templado se vuelve frágil, haciéndolo inútil en estas condiciones, por eso vamos al revenido. Esta operación viene es para que las tiranteces y tensiones generadas en el acero no tengan tiempo de actuar provocando deformaciones o grietas. Este proceso hace más tenaz y menos quebradizo el acero aunque pierde algo de dureza.

## **Anexo 5 Electroerosión.**

Hay dos variantes del proceso: la electroerosión por penetración y la electroerosión de corte por hilo. En la electroerosión por penetración se reproduce (copia) en la pieza la forma de la herramienta utilizada (que se denomina electrodo), Mientras que en el proceso de electroerosión de corte por hilo, el cable o hilo conductor, normalmente de latón o molibdeno, se utiliza como electrodo para cortar un perfil en el metal. Cabe definir la facultad de copiado como: la capacidad de reproducción de la forma de la cara del electrodo sobre la cara de la pieza.

En ambos casos, la corriente genera una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza, normalmente entre 80 y 270 voltios y del orden de 50 a 106 amperios/cm<sup>2</sup>. El electrodo o hilo, controlado por un sistema de servomotores, se acerca a la pieza a mecanizar, las dos partes están inmersas en un fluido dieléctrico con el fin de controlar la resistencia a la descarga eléctrica en la zona de corte, este líquido puede ser aceite, si se trata de erosión por penetración o agua des ionizada si es por hilo. Cuando el electrodo está a centésimas de milímetros de la pieza, la potencia es capaz de superar la rigidez dieléctrica del medio aislante, causando la aceleración extrema de los electrones y positrones, lo cual crea un canal plasma. Las partículas aceleradas, chocan contra los materiales tanto del electrodo como de la pieza, la temperatura crece a valores de fusión (entre 8.000 °C y 12.000 °C) y así, se funden y vaporizan ciertas y localizadas secciones del metal. Posteriormente, se genera una implosión y la materia fundida, en forma de partículas carbonizadas, es enfriada por el medio dieléctrico y proyectada fuera del área de corte en la pausa de cada pulso.

Las sucesivas descargas a través de toda la superficie del electrodo siempre se producen en los puntos situados a la menor distancia. De esta manera, la superficie de la pieza de trabajo va adquiriendo la forma que tenga el electrodo. A medida que el proceso continúa y el electrodo va avanzando automáticamente para mantener constante la distancia con la pieza de trabajo, se genera la cavidad o el corte como una réplica del electrodo.

El ciclo del proceso puede repetirse hasta 250.000 veces por segundo.

En suma, el proceso genera altos niveles de temperatura, superiores a la resistencia del material, en consecuencia, el corte es indiferente de la dureza mecánica de las piezas, esto permite el mecanizado de alta precisión de todo tipo de materiales conductores de la electricidad, como metales, aleaciones metálicas y grafito, entre otros, sin importar su dureza

Actualmente, las máquinas cuentan con porta electrodos que pueden moverse y girar en trayectoria circular sobre su propio eje y paralelamente a la superficie de la pieza de trabajo. Un ejemplo claro, es la utilización de un electrodo con cabeza en forma de L, el cual, una vez se ha introducido a una profundidad determinada se le puede hacer girar sobre su eje produciendo mecanizados interiores de formas complejas.

En últimas, la orbitación del electrodo consigue hacer un arranque de material en el fondo de agujero.

Hoy los equipos, tanto de hilo como de penetración son completamente automáticos, las electroerosionadoras cuentan con un sistema CNC, conectado con la máquina a través de una red de datos. En la computadora el usuario carga los parámetros de corte previamente y puede alejarse y dejar sin vigilancia el corte durante un fin de semana completo.

En las electroerosionadoras modernas las dimensiones máximas de la pieza de trabajo para el corte con hilo se acercan a 1.500 mm en Y, 1.000 mm en Z y sin límite en X. Para el Electroerosionado por penetración, las piezas de trabajo son de máximo 1.500 mm en Y, 500 mm en Z y 3.000 mm en X, el ángulo máximo de inclinación es  $\pm 45$  grados y la máxima combinación ángulo/altura es 30 grados, con 450 mm de altura. Así mismo, cuentan con grandes tanques de trabajo, que garantizan amplios recorridos en los ejes X-Y-Z (4.000, 2.000, 1.250 mm, respectivamente), una capacidad de carga de hasta 25.000 kilogramos y alcanzan velocidades de remoción de material de hasta 500mm<sup>2</sup>/min.

La precisión de una máquina es de  $\pm 0.002$  mm para electroerosionadoras de hilo y  $\pm 0.001$  mm para las de penetración, mientras el acabado superficial es aproximadamente de 0,5 y 2 Ra (rugosidad superficial promedio) para hilo y para penetración.

Básicamente las electroerosionadoras están compuestas por:

- *Columna*: armazón vertical, dónde se encuentra el generador de potencia, una de las partes más importantes del equipo de electroerosión.

El generador de potencia está compuesto, comúnmente, por un circuito, sistema de encendido y apagado transistorizado de alta frecuencia, un equipo de protección eléctrica (resistencia) y un estabilizador oscilante.

El generador es el encargado de crear el diferencial eléctrico entre el electrodo y la pieza, a través de una descarga en forma de pulsos, la duración de cada pulso es muy rápida, ya que pueden producirse del orden de hasta varias decenas de miles de pulsos en un segundo.

- *Cabezal*: en él están los servomotores o los motores de paso, según el equipo, y son aquellos que ejecutan los movimientos de corte sobre cinco ejes coordinados. Además, sostiene el porta-electrodo en la máquina de penetración y en el caso del Electroerosionado con hilo, cuenta con sistema de rodillos y boquillas por donde pasa el alambre, y se encarga también de tensionar el hilo.

- *Mesa de fijación de la pieza*: está inmersa dentro del tanque de trabajo y es dónde se fija el material a mecanizar. En el corte por penetración, el fluido dieléctrico siempre cubre la pieza, mientras que en la máquina por hilo, puede o no estar sumergida totalmente y en ambos casos hay presencia permanente de chorros de fluido dieléctrico.

- *Bancada*: es la parte inferior del equipo donde está montada la máquina, allí se encuentran las guías de los ejes X y Y, reguladas por servomotores.

- *Control numérico*: una sofisticada red de transmisión de datos se conecta con la computadora, la cual transmite a través de una interface el programa de corte, previamente elaborado. Las máquinas actuales cuentan con un puerto serial o USB que sirve para que le sean instalados memorias externas y así ampliar la capacidad interna del equipo.
- *Sistema hidráulico de lubricación, des ionizado y refrigeración*: todas las máquinas cuentan con un sistema cíclico de refrigeración, lubricación y aislante eléctrico, que se encarga de impulsar y hacer circular el fluido dieléctrico, con la ayuda de bombas hidráulicas, desde un tanque de enfriamiento hasta el tanque de trabajo, para después ser filtrado y nuevamente reciclado. El sistema de refrigeración mantiene el fluido a una temperatura constante de 20 °C.

En el proceso de electroerosión se utilizan tres insumos fundamentalmente:

1) *Fluido dieléctrico*, es un medio líquido que varía según las características del proceso: en el corte con hilo de latón comúnmente es agua des ionizada, agua mezclada con un aceite soluble de tipo orgánico; para el mecanizado con hilo de molibdeno al igual que para el de penetración, se usa aceite dieléctrico derivado del petróleo, queroseno o hidrocarburo activado de elaboración sintética. Comúnmente se emplean aceites minerales con punto de inflamación entre 120 y 150 °C, con elevada viscosidad; petróleos con punto de inflamación comprendido entre 70 y 80 °C y viscosidad media.

El fluido dieléctrico tiene un papel fundamental en el proceso: crea el medio ideal para el canal conductor, controla la potencia de la abertura de la descarga y actúa a la vez como aislante y refrigerante. Además, por acción de una bomba auxiliar está en continuo movimiento, lo que sirve para barrer, a través de un desagüe, las partículas erosionadas y preservar la limpieza del 'GAP' (espacio entre la herramienta y la pieza).

2) *Electrodos*: tanto en el corte con hilo como de penetración, la elección de los electrodos depende directamente del trabajo a realizar.

Por penetración: El proceso de electroerosión por penetración comienza con la fabricación del electrodo, trabajo que no es habitual en los métodos convencionales de arranque de viruta, es necesario disponer de electrodos preformados por lo que un factor clave es el diseño de los mismos. Generalmente están hechos de cobre o grafito, el más común es el electrodo de cobre, que genera muy buen acabado superficial a corrientes bajas y buena remoción de material a corrientes altas. El segundo material más utilizado es el grafito, dependiendo su calidad, puede utilizarse para desbaste y acabados, entre más fino sea el grano del grafito, mejor será el acabado superficial; para procesos de desbaste se suele trabajar con grano de 0,20 mm, mientras que en procesos de acabado el tamaño es del orden de 0,013 mm,

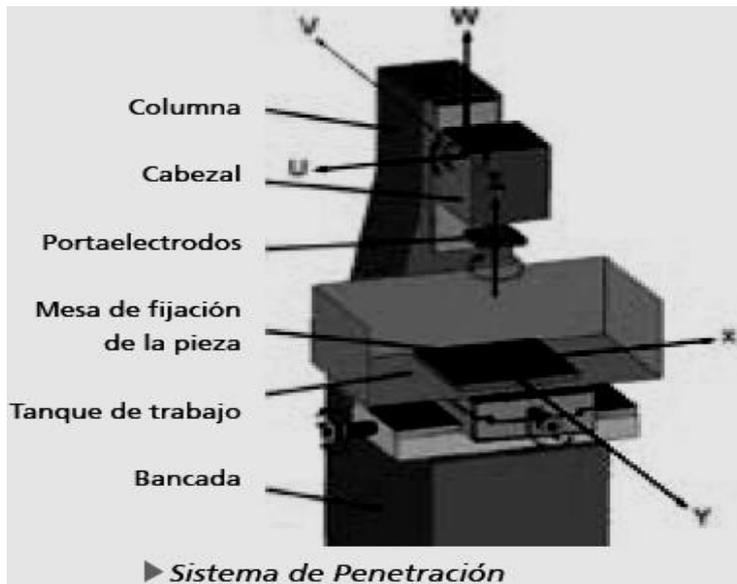
Confección de electrodos para electro-erosión se puede hacer a partir de croquis o planos. Elaboración de rutas con la ayuda de programas de diseño. Maquinado con routers tecno- isel de 0,01mm de precisión, aproximadamente.



Fig.A5.1 de un electrodo elaborado en cnc.

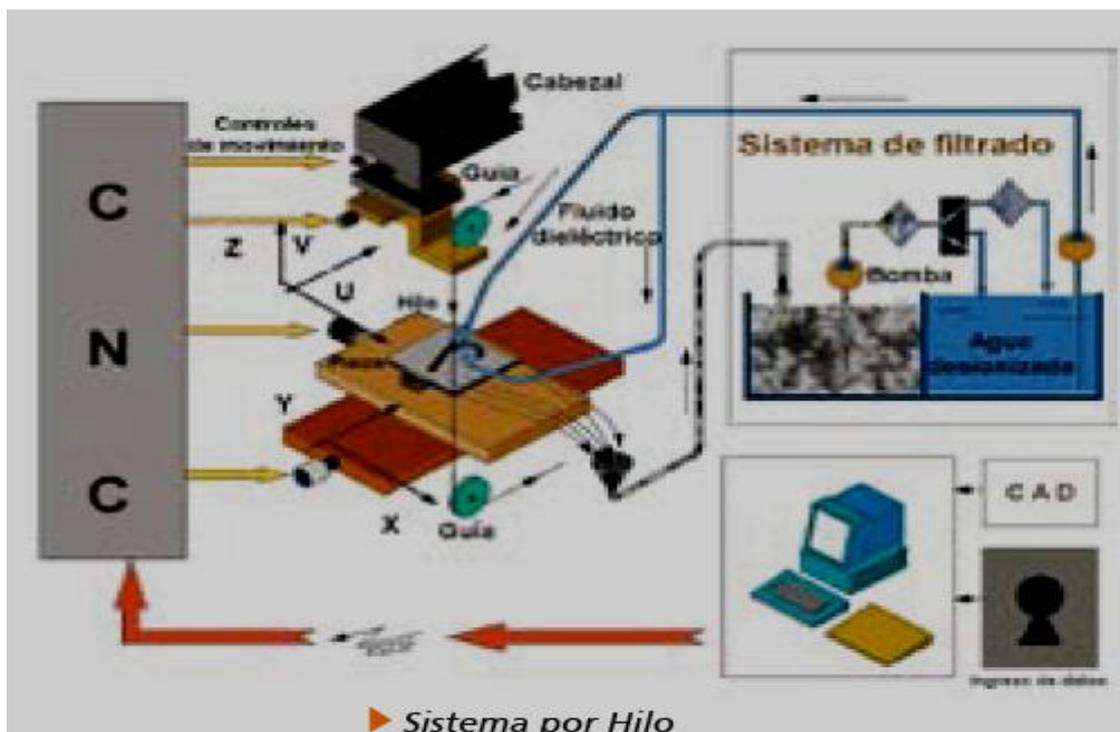
Principales ventaja del grafito son: facilidad de mecanizado para formas complejas. Para las herramientas en grafito la máxima corriente que soporta por centímetro cuadrado es de 15A/cm<sup>2</sup>,

Principales ventaja del cobre son: para el cobre no es recomendado pasar de 10A/cm<sup>2</sup>. En teoría, cualquier material conductor de la electricidad puede usarse como electrodo.



► Sistema de Penetración

Esquema A5.2. Penetración



► Sistema por Hilo

Esquema de A5.4.esquema de electroerosión adora de hilo caliente

3) *Filtros*: son los encargados de retener las partículas erosionadas y limpiar el fluido dieléctrico, están hechos de papel y varían dependiendo del tamiz que tengan. La mayoría de filtros debe cambiarse cada tres meses.

Para lograr un excelente acabado superficial, es importante elegir el refrigerante adecuado. Generalmente, el más utilizado por economía es el petróleo, sin embargo, no se recomienda para la mayoría de trabajos, pues éste debería usarse sólo en desbastes de media potencia y acabados finos. Para mecanizar piezas pequeñas no influye mucho el tipo de aceite, pero para mecanizar piezas grandes lo mejor es usar aceites sintéticos. En la electroerosión de súper acabado o acabado espejo, se recomienda emplear aceite sintético y para obtener un mejor rendimiento se pueden usar aditivos lubricantes también de aceite, del tipo dieléctrico, lo cual aumenta la velocidad de remoción y facilita el buen acabado.

**Anexo 6:** ficha técnica del cobre (Metco 55)

Issued October 2000  
Supersedes October, 1980



## Metco® 55 Copper Powder

Technical Bulletin #10-064

## Metco® 55 Copper Powder

Coatings of Metco 55 have excellent electrical conductivity. They are suitable for radio-frequency shielding. They are also recommended for salvage and build-up applications on copper and copper alloy parts.

Metco 55 is a pure copper powder. It produces coatings similar to gas-wire copper coatings except for hardness; Metco 55 coatings are softer due to a lower oxide content. This revision has been issued to: Publish parameters for the Metco Type 7M Plasma Spray System. Revise arc voltages for Sets #5 and #6. Change 5P Flow Control Valve settings from 16-18 to 12-16. Add metric equivalents.

\*\*\*\*\* Metco 55 Copper Powder can be sprayed with both Metco 3M and Metco 7M Plasma Flame Spray Systems, as well as all Metco ThermoSpray Systems utilizing hydrogen as the fuel gas.

### Applications

Metco 55 is recommended for the following applications:

Coating No.	Coating Function	Typical Applications
P55-11 T55-10	Electrical Conductivity	Capacitor electrical contacts Ground connectors
P55-11 T55-10	Radio Frequency Shielding	Instrument nuts, Missile systems
P55-10 T55-10	Salvage and Build-up Copper and Copper Alloys	Mis-machined parts, Worn parts

## Powder Characteristics

**Typical Composition:** Copper 99.+%

**Typical Size Range:** -170 +325 mesh

**Melting Point (approx.)** 1080°C (1980°F)

After the package has been opened, the powder may lose its bright color during storage. This has no apparent effect on the coating.

## Typical Physical Properties of the Coatings

P55-10		P55-11		T55-10
<b>Texture, as-sprayed:</b>	Fine		Fine	Fine
<b>Macrohardness:</b>	Rh85		Rh60	Rh85
<b>Bonding:</b>	Good		Good	Good
<b>Density (g/cc):</b>	7.2		6.7	7.6

## Spraying

Copper powder oxidizes readily; especially when exposed to temperatures above 177°C (350°F). The following technique will help to keep oxidation to a minimum: Maintain spray distance shown in the spraying parameter charts. Make quick, even passes across the work.

Do not let the coating temperature exceed 149°C (300°F). For continuous spraying, a moderate flow of cooling air on the surface being sprayed is recommended.

## Finishing

Coatings of Metco 55 can be machined with high speed steel or carbide tools. Speeds, feeds, and surface finish are similar to those used for free-machining copper alloys.

## Safety Measures

Flame spraying is a completely safe process when performed in accordance with “Metco’s Safety Measures”. Familiarize yourself with local safety regulations before starting spraying operations. **DO NOT** operate your spraying equipment or use the spray material supplied before you have thoroughly read the Metco Instruction Manual.

**Disregarding these instructions may be dangerous to your health.**

## System Parameters Thermospray

	Set #1	Set #2	
<b>Spray Gun</b>			
Type:	2P	5P	6P
Nozzle:	P7-B	P7-G	P7A-MH
Siphon Plug:	Std.	Std.	6P 205
Air Cap:	Std.	Std.	6P 4
Metering Valve:	5	12	N/A
Cooler:	PC	Note 1	N/A
psi:	40		
bars:	2.8		
Vibrator:	Yes	Yes	No
<b>Gas</b>			
Pressure -Oxygen, psi:	(Note 2) 25	41	45
bars:	(Note 2) 1.7	2.83	3.1
Hydrogen, psi: (Note 2)	25	41	40
bars: (Note 2)	1.7	2.83	2.8
Flow - Oxygen:	20	28	40
Hydrogen:	40	56	75
<b>Powder Feed</b>			
Flow Control Valve - clicks open:			
(Note 3)	13-15	12-16	N/A
Unit:			3MP or 3MP-DUAL
Meter Wheel:			S
RPM:	(Note 3)		20
Nitrogen Carrier Gas - Pressure, psi:			55
bars:			3.8
Flow:			40
<b>Spraying</b>			
Spray Distance, inches:	3.75-4.75	4-5	4 $\frac{1}{2}$
mm:	95-121	102-127	114
Spray Rate, lb/hr: (Note 4)	6	16	12
kg/hr:	2.72	7.26	5.4
Gas Consumption -Oxygen, ft <sub>3</sub> /hr:	30	54	80
m <sub>3</sub> /hr:	.85	1.53	2.27
Hydrogen, ft <sub>3</sub> /hr:	148	315	375
m <sub>3</sub> /hr:	4.19	8.92	10.6
Nitrogen, ft <sub>3</sub> /hr:	---	---	10
m <sub>3</sub> /hr:	---	---	2.83
Coverage, ft <sub>2</sub> /hr/.001":	145	360	287
m <sub>2</sub> /hr/0.1mm:	3.37	4.07	6.67

Powder Required, lb/ft <sup>2</sup> /.001":	.042	.044	.042
kg/m <sup>2</sup> /0.1mm:	.80	.84	.80
Deposit Efficiency, %: (Note 5)	95	90	95

**Notes:**

bars) air pressure.

2. Type 2GF Flowmeter. When using a Type GF Flowmeter, reduce pressure for oxygen 10 psi (.69 bars) and reduce hydrogen 10 psi (.69 bars), to obtain flowmeter readings shown.

3. Use as a starting point. Adjust as necessary to obtain spray rate shown.

4. Spray rates and deposit efficiencies shown were obtained by skilled operators with all equipment in first-class condition.

5. Deposit efficiency figures have been rounded for easy calculation.

**System Parameters Plasma Flame**

Set #3	Set #4	Set #5	Set #6
N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	A/H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	A/H <sub>2</sub>

**Spray Gun**

Type:	2MB	2MB	3MB/7MB	3MB/7MB
Nozzle:	E	E	G	GH
Nozzle Attachment, Cat. No. 404A	Yes	Yes	No	No
Powder Port:	—	—	#1	#1
Uni-Jet Ring: (Note 1)	—	3M 275	—	3M 275
Insulator: (Note 2)	N/A	N/A	7M 55	7M 50

**Gas**

Pressure -Primary, psi:	50	100	50	100
bars:	3.45	6.9	3.45	6.9
Secondary, psi:	50	50	50	50
bars:	3.45	3.45	3.45	3.45
Flow -Primary:	100	100	150	150
Secondary: (Note 3)	5	15	10	5

**Power**

Unit (Note 4)

Arc Amps:	250	250	400	500
Arc Volts:	75-80	50-55	70-80	60-70

**Powder Feed**

Unit:	2MP	2MP	3MP	or 3MP-DUAL
Type CR Speed Dial Setting:	55	55	N/A	N/A
Meter Wheel:	—	—	S	S
RPM: (Note 5)	—	—	30	30
Carrier Gas Flow:	Full Open	Full Open	37	37

**Spraying**

Spray Distance, inches:	4-7	4-7	4-6	4-6
mm:	100-175	100-175	100-150	100-150
Spray Rate, lb/hr:	7	7	15	15
kg/hr:	3.2	3.2	6.8	6.8
Coverage, ft <sup>2</sup> /hr/.001":	151	106	285	247
m <sup>2</sup> /hr/0.1mm:	3.51	2.47	6.63	5.74
Powder Required, lb/ft <sup>2</sup> /.001":	.046	.066	.053	.061
kg/m <sup>2</sup> /0.1mm:	.88	1.26	1.01	1.16
Deposit Efficiency, %: (Note 7)	85	60	75	65
Deposition Rate, lb/hr:	5.95	4.2	11.3	9.75
kg/hr:	2.7	1.91	5.13	4.42

**Notes:**

1. The Type 3MB Gun only uses Cat. No. 3M 275 Uni-Jet Ring with the Cat. No. 3M 276 Electrode Nut. Install ring with the 45° internal recess facing the nut and with the jet hole toward the top of the gun, approximately 180° from the gas inlet.
2. With the Type 7MB Gun, use Cat. No. 7M 50 Insulator with Argon, and Cat. No. 7M 55 Insulator with Nitrogen.
3. The secondary gas flow shown in the chart may be adjusted as much as ±5 points, if necessary, to obtain voltage within the range shown; EXCEPT THAT the secondary gas flow may **not** be reduced to zero, and hydrogen flow may **not** exceed 25. If the required voltage is not obtained with this preliminary gas flow adjustment, check the equipment for a worn nozzle, a worn electrode, or a gas leak between the flowmeter and the gun. If there is no gas leak, and the nozzle and electrode are not badly worn, further adjustment of the secondary gas flow, up to an additional ±5 points, is permissible, if this second adjustment does not result in a flow of zero or a hydrogen flow exceeding
25. If the required voltage is not then obtained, replace the worn parts.
4. The Metco Type 2MR, 4MR, 6MR or 7MR Power Supply Units can be used. **CAUTION:** When using the Type 6MR and 7MR units with a Type 3MB Gun, do not exceed 40KW operation.
5. Use as a starting point. Adjust as necessary to obtain spray rate shown.
6. Rounded off for easy calculation.

**Producing Recommended Coatings**

Coating No.:	P55-10	P55-11	T55-10
<b>Surface</b>			
<b>Preparation:</b>	Any standard method.	Any standard method.	Any standard method.
<b>Spraying:</b>	Set Nos. 3 or 5	Set Nos. 4 or 6	Set Nos. 1 or 2
<b>Finishing:</b>	Machine	Machine	Machine

*The information provided in this document is for the convenience of Sulzer Metco's customers for the purpose of evaluation and proper use of the Sulzer Metco product(s) described herein. This document and the information contained herein is the property of Sulzer Metco and shall not be used, disclosed, or reproduced in whole or in part for any purpose other than for the use of said product(s). Nor shall this information be used in any way with goods not manufactured and sold by Sulzer Metco. Sulzer Metco makes no warranties, express or implied, as to the information contained herein.*