

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA



Obtención y evaluación electroquímica de recubrimientos  
por niquelado químico sobre aceros proyectados  
térmicamente con cobre y una aleación cobre-aluminio.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA  
MECÁNICA:

Presenta:

MARÍA DEL PILAR PARRA GÓMEZ.

DIRECTOR: M.C. RAÚL GILBERTO VALDEZ NAVARRO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, 2016



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:

Agradezco este trabajo, que representa la culminación de una de las etapas más importantes en mi vida y el inicio de nuevas metas, principalmente a Dios por llenar mi vida de las herramientas y personas necesarias para llegar hasta aquí.

Quiero agradecer a mi familia por apoyarme día a día, en especial a mis padres quienes trabajaron muy fuerte por conducirme durante esta etapa y a mis hermanos por ser mis cómplices.

Agradezco también a la Universidad Nacional Autónoma de México, muy particularmente a la Facultad de Ingeniería, por prestarme sus aulas en las cuales me desarrollé no solo como un profesional, si no como persona, durante mi trayecto como estudiante conocí personas que sin lugar a dudas marcaron mi vida, y agradezco también a ellos, mis profesores y amigos por las enseñanzas que en mi dejaron.

Finalmente quiero agradecer a aquellos profesores que me brindaron ayuda en el desarrollo de este trabajo, permitiéndome trabajar de manera conjunta y haciendo de este modo posible la investigación que se presenta. Muy en especial al grupo CENISA (Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados), particularmente a la Doctora Alba Covelo Villar, por proporcionar el acceso a equipos y material, pero sobre todo por su apoyo y conocimiento el cual permitió llevar a buen fin el trabajo aquí presentado.

## OBJETIVOS:

- Generar un recubrimiento de cobre mediante el uso de la técnica de proyección térmica por flama con alimentación de polvos sobre un acero de bajo carbono.
- Generar un recubrimiento con la aleación comercial C623 a través de la técnica de proyección térmica por flama con alimentación de alambre, sobre un acero de bajo carbono.
- Generar un recubrimiento de una aleación Níquel-Fósforo (NiP) por el proceso de niquelado químico sobre las superficies proyectadas térmicamente.
- Caracterizar electroquímicamente los recubrimientos obtenidos.

## HIPÓTESIS.

Se espera lograr una mejora en la deposición del niquelado químico sobre el acero recubierto con cobre y la aleación C623, respecto al acero desnudo y como consecuencia se manifieste un incremento en la resistencia a la corrosión.

En la actualidad, el proceso de niquelado químico ha evolucionado notablemente consiguiendo depósitos que se acoplan a las necesidades de la pieza. En otras investigaciones se ha comprobado la mejora en la adherencia con la aplicación de una capa intermedia de cobre[1]. Aunque existen diferentes métodos de depositar cobre y aleaciones metálicas sobre el acero, la proyección térmica presenta ventajas económicas y de tiempo de deposición.

## HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

### 1 CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

#### 1.1 CORROSIÓN.

1.1.1	Generalidades de la corrosión. ....	1
1.1.2	Tipos de corrosión. ....	2
1.1.3	Sistemas de protección de la corrosión. ....	3
1.1.4	Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). ....	5
1.1.4.1	Diagramas de Bode. ....	5
1.1.4.2	Diagramas de Nyquist. ....	6

#### 1.2 PROYECCIÓN TÉRMICA.

1.2.1	Aspectos generales de la proyección térmica. ....	7
1.2.2	Clasificación de los procesos de proyección térmica. ....	8
1.2.3	Descripción del proceso de proyección térmica con alimentación de polvo. ....	12
1.2.4	Descripción del proceso de proyección térmica con alimentación de alambre. ....	13
1.2.5	Aplicaciones y propiedades de los Recubrimientos por Proyección Térmica (RPT). ....	13

#### 1.3 NIQUELADO.

1.3.1	Aspectos generales del proceso niquelado químico. ....	15
1.3.2	Clasificación del proceso de niquelado. ....	15
1.3.3	Descripción del proceso de niquelado químico. ....	16
1.3.4	Aplicaciones y propiedades del recubrimiento de níquel químico. ....	17

### 2 CAPITULO 2. EXPERIMENTACIÓN.

#### 2.1 PROYECCIÓN TÉRMICA.

2.1.1	Preparación de probetas. ....	18
2.1.1.1	Limpieza. ....	18
2.1.1.2	Rugosidad. ....	19
2.1.1.3	Temperatura de precalentado. ....	20
2.1.2	Parámetros del proceso de proyección térmica de cobre con polvos. ....	20
2.1.2.1	Distancia de proyección. ....	20
2.1.2.2	Consumo de polvo. ....	21
2.1.2.3	Consumo de gases. ....	21
2.1.2.4	Tiempo de proyección. ....	21
2.1.3	Parámetros del proceso de proyección térmica con alambre de la aleación Cu67Al33. ....	22
2.1.3.1	Distancia de proyección. ....	23
2.1.3.2	Consumo de alambre. ....	23
2.1.3.3	Consumo de gases. ....	23

2.1.3.4	Tiempo de proyección. ....	23
2.2	NIQUELADO QUÍMICO.	
2.2.1	Preparación de probetas. ....	24
2.2.1.1	Rugosidad. ....	24
2.2.2	Parámetros del baño químico. ....	24
2.2.2.1	Composición. ....	24
2.2.2.2	Temperatura. ....	25
2.2.2.3	pH. ....	25
2.2.2.4	Agitación. ....	25
2.2.2.5	Tiempo. ....	26
2.3	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS). ....	26
2.4	MICROSCOPIA. ....	28
2.5	ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA DE FLURESCENCIA DE RAYOS X..	29
3	CAPÍTULO 3.RESULTADOS Y ANÁLISIS.	
3.1	GRANALLADO. ....	30
3.2	ESTRUCTURA DE LOS RECUBRIMIENTOS.	
3.2.1	Microscopía óptica. ....	30
3.2.2	Microscopía electrónica de barrido. ....	32
3.2.3	Análisis de composición de Rayos X. ....	33
3.3	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA. ....	37
4	CONCLUSIONES. ....	43
5	BIBLIOGRAFÍA. ....	45

## 1. ANTECEDENTES.

### 1.1 CORROSIÓN.

#### 1.1.1 Generalidades de la corrosión [2].

La corrosión es definida como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno, la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del medio y las propiedades de los materiales en cuestión. Una característica importante de los procesos de corrosión es que los eventos ocurren espontáneamente en la naturaleza.

La corrosión ordinaria, es un proceso Redox por el cual los metales se oxidan por medio del oxígeno  $O_2$ , en presencia de humedad. El oxígeno en estado gaseoso es un agente oxidante, y la mayoría de los metales tienen potenciales de reducción menores que éste, por lo tanto son fácilmente oxidables.

Se sabe que la oxidación de los metales tiene lugar más fácilmente en puntos donde la tensión es mayor (donde los metales son más “activos”). La Figura 1.1 muestra esquemáticamente el proceso de corrosión.

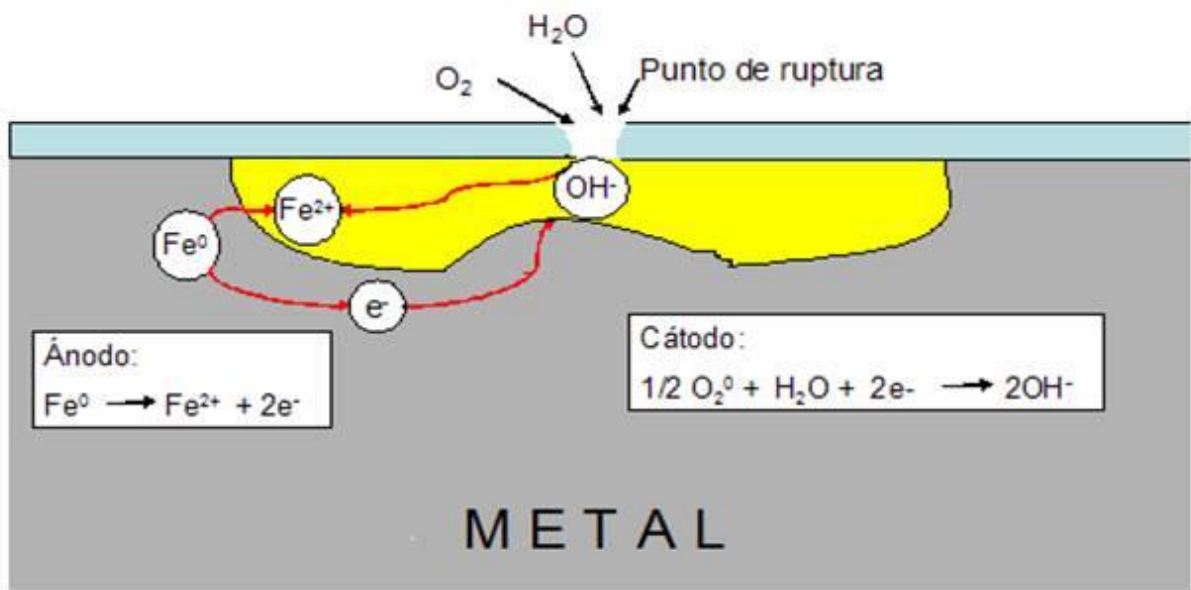
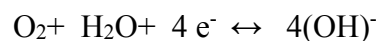
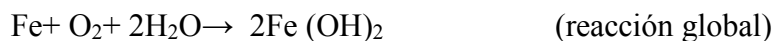
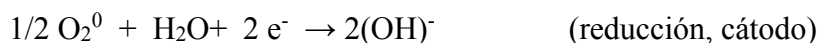


Fig1.1. Esquema del proceso de corrosión [2]

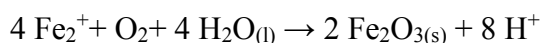
Un punto de tensión en un objeto de acero actúa como ánodo donde el hierro se oxida a iones  $Fe^{2+}$  y se forman hendiduras. Los electrones producidos fluyen hacia las áreas expuestas al  $O_2$ . Estas actúan como cátodos donde el  $O_2$  se reduce a iones hidróxido,  $(OH)^-$ :



Al mismo tiempo, los iones  $Fe^{2+}$  migran a través de la superficie húmeda. La reacción global se obtiene ajustando la transferencia electrónica y sumando las dos semirreacciones:



Los iones  $\text{Fe}^{2+}$  pueden migrar desde el ánodo a través de la disolución hacia la región catódica, donde se combinan con los iones  $(\text{OH})^-$  para formar óxido de hierro (II). El hierro se oxida aún más por el  $\text{O}_2$  hasta el estado de oxidación  $3^+$ , formándose el óxido de hierro (III) o también llamado herrumbre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , de color rojo. El mecanismo de reacción se muestra en la siguiente reacción.



Algunos de los procesos más familiares de corrosión son la herrumbre del hierro y el acero y la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones, bronce y latón. Siempre que se presenta oxidación existe corrosión; sin embargo en algunos casos el óxido formado es resistente y forma una capa gruesa que impide que el resto del material continúe oxidándose. Este fenómeno es común en materiales como el aluminio, zinc o magnesio.

La corrosión es un fenómeno muy amplio que afecta a materiales no metálicos (cerámicas, polímeros, etc.), que sufren corrosión mediante otros mecanismos distintos a los descritos, dependiendo del medio ambiente.

### 1.1.2 Tipos de Corrosión[3].

Los procesos de corrosión se pueden clasificar según criterios muy variados. En la Tabla 1.2 se ofrece un muestrario con algunas clasificaciones.

Mecanismo.	Medio agresivo.	Morfología.	Acciones físicas simultaneas.	Sectores industriales.
-Oxidación directa (corrosión química o seca). -Corrosión electroquímica o húmeda.	-Atmosférica. -De estructuras sumergidas. -De estructuras enterradas. -Por gases calientes. -Por sales fundidas. -Por ácidos, etc.	-Uniforme. -Galvánica. -Selectiva. -Por picaduras. -Intergranular. -Fisurante bajo tensión. -En lámina de cuchillo. -Exfoliante. -En resquicios, etc.	-Erosión-corrosión -Corrosión bajo tensión. -Corrosión por cavitación. -Corrosión por frotamiento. -Corrosión-fatiga.	-Transporte. -Aplicaciones marinas. -Construcción. -Petroquímica. -Generación de energía. -Industria alimentaria.



A continuación se explica la clasificación de acuerdo al mecanismo de oxidación

- *Directa.*

Sucede a temperaturas elevadas, la formación de iones tiene lugar en toda la superficie y sucede en la intercara metal/productos de corrosión y difunden en dirección a la intercara de productos de corrosión/atmósfera

- *Electroquímica.*

La corrosión electroquímica es una de las más comunes que se pueden encontrar. Es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos (con distinto par Redox) se unen eléctricamente en presencia de un electrolito, formando una celda de corrosión (por ejemplo, una solución conductiva). La figura 1.12 muestra esquemáticamente una celda de corrosión electroquímica.

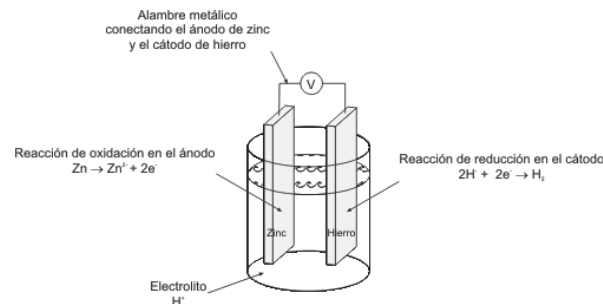


Fig1.2. Ejemplo de celda de corrosión electroquímica [4].

### 1.1.3 Sistemas de protección de la corrosión[4].

Una posible clasificación de los sistemas de protección de la corrosión es la siguiente:

- *Protección con recubrimientos orgánicos.*

La protección de un elemento con revestimientos tiene dos funciones, la de establecer una barrera entre el material y el agente y un aumento en la resistencia eléctrica del medio. Para cumplir con estas funciones se pueden usar planchas de elementos anticorrosivos como lo son los elastómeros, termoplásticos y termoestables; o bien el uso de pinturas que formen la capa necesaria para cubrir la superficie, este tipo de capa es no conductora de electrones [4].

- *Protección con recubrimientos metálicos[4].*

Electrodeposición: es un procedimiento electroquímico mediante el cual se logra cubrir una pieza con una fina capa de determinado metal. Para lograrlo se sumerge la pieza a cubrir en

una solución electrolítica que contiene los iones del metal que formará la capa. Dentro de esta clasificación se encuentra el níquelado.

Dentro de la celda electroquímica, el ánodo estará hecho del metal con que se quiere recubrir la pieza, para que pueda oxidarse, cediendo electrones y aportando iones a la solución, a medida que los iones que estaban presentes en la solución, se reducen y se depositan sobre la pieza a recubrir, que funciona como cátodo en el sistema. Todo este proceso es posible gracias a la corriente continua que permite la movilización de electrones.

Recubrimientos auto-catalítico: El metal que está en forma iónica se reduce sin usar corriente eléctrica, aprovechando la propiedad de catálisis del elemento a recubrir, siendo de este modo los agentes reductores una fuente de electrones. Los materiales más comúnmente utilizados para este tipo de recubrimientos son: níquel, cobalto, paladio, cobre, oro, plata y aleaciones de estos.

Anodizado: Es un proceso electrolítico en el que el metal base es el ánodo de un circuito eléctrico de manera que se oxida y el óxido funge de protector, se diferencia de la electrodeposición porque aquí se trabaja sobre el ánodo. Los materiales más comúnmente utilizados para este tipo de recubrimientos son magnesio, zinc, cobre, cadmio, plata y acero.

Galvanizado en caliente: Consiste en sumergir la pieza en un baño de Zinc fundido a temperaturas entre 440°C y 460°C; antes de extraer la pieza se retiran los óxidos de Zinc y sales no deseadas para enfriarle en agua o al aire libre. Se utiliza el Zinc por ser un material más oxidable en comparación del material a recubrir, por ejemplo el Hierro, de este modo se genera una capa de óxidos que protege al sustrato de la agresión del medio[3].

- *Protección catódica.*

Al rebajar un material por debajo de su energía de corrosión se consigue la protección de este por protección catódica. La corriente sale del cátodo y va al ánodo por el electrolito. El ejemplo más común es el ánodo de sacrificio donde se agrega un metal con mayor electronegatividad para que éste se oxide primero[4].

- *Inhibidores.*

Son sustancias que disminuyen la agresividad del medio. Se utilizan tanto compuestos orgánicos como inorgánicos los cuales actúan sobre la reacción anódica o catódica formando una capa sobre dicha región. Existen inhibidores para medios acuosos y no acuosos. Los inorgánicos pueden ser agentes oxidantes con un pH de 6 a 9, éstos forman un óxido de protección para lo cual necesitan oxígeno disuelto. Los orgánicos por su parte absorben física o químicamente la humedad con el fin de retrasar la reacción de oxidación[4].

#### 1.1.4 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) [5], [6].

La Impedancia Electroquímica (Electrochemical Impedance EI), es una técnica no destructiva que permite caracterizar el comportamiento electroquímico de una interface electrodo electrolito. Tiene aplicaciones importantes como la evaluación del desempeño de metales desnudos o recubiertos en diferentes ambientes, la obtención de productos electro depositados, la corrosión entre otros.

En el procedimiento experimental más usado, se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial, tiempo y corriente, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias”. Los datos obtenidos en los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica, son reportados por los equipos comerciales en una de dos formas:

- a) Módulo de la impedancia ( $|Z|$ ) y ángulo de fase ( $\Theta$ ), respecto a la frecuencia (f).
- b) Componente real de la impedancia total ( $Z'$ ) y componente imaginaria de la impedancia total ( $Z''$ ).

Estos dos métodos de describir los datos de impedancia son la base de dos maneras comunes de presentar los datos, denominados gráficos Bode y Nyquist respectivamente.

La interpretación de este tipo de diagramas está asociada a una analogía eléctrica, que permite el análisis de la respuesta al sometimiento de una onda sinusoidal, la cual genera una respuesta real e imaginaria, brindando un valor absoluto total al cual llamamos impedancia, dicho valor estará relacionado con la resistencia del elemento a la corrosión [6].

##### 1.1.4.1 Diagramas de Bode.

Los gráficos de Bode son representaciones de diferentes parámetros de la impedancia contra frecuencia y existen diferentes variantes. Los gráficos de Bode más comunes son:

- a) Logaritmo base 10 del módulo de la impedancia ( $|Z|$ ) contra logaritmo base 10 de la frecuencia (f). El reporte gráfico de estos valores se puede relacionar de forma directa con la resistencia a la corrosión de los materiales detectados.
- b) Ángulo de fase ( $\Theta$ ) contra logaritmo base 10 de la frecuencia (f). Dicha gráfica permite generar interpretaciones relacionadas con los procesos corrosivos detectados durante las pruebas de impedancia.

Las representaciones de Bode contienen toda la información de un ensayo de EIS, ya que las frecuencias se identifican claramente. En la Figura 1.3 se ilustra una gráfica de Bode de la

frecuencia en logaritmo base 10 contra el ángulo de fase en grados. Este tipo de gráficos puede proporcionar una idea del número de procesos corrosivos presentes[6].

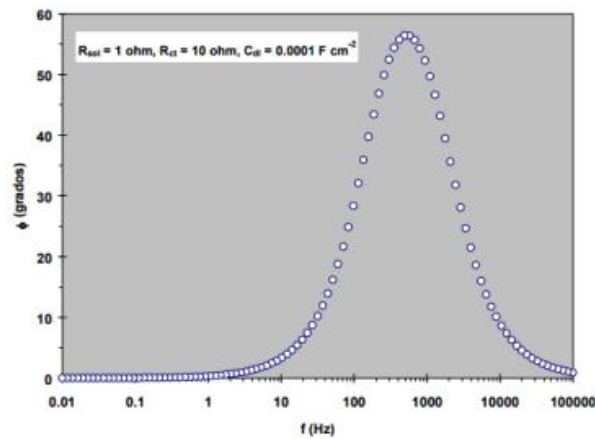


Fig.1.3. Diagrama de Bode de frecuencia contra ángulo. [6]

#### 1.1.4.2 Diagramas de Nyquist.

Este tipo de gráfica es mejor conocida como gráfica en el plano complejo ya que muestra los componentes real e imaginario de la impedancia total. El diagrama de Nyquist corresponde a la interpretación de una analogía eléctrica que se adapta de acuerdo a las necesidades mismas de la reacción sobre un electrodo.

En estudios de corrosión, el análisis gráfico de un espectro de impedancia permite obtener parámetros relacionados con la cinética de corrosión de un metal en un medio dado. A partir del diagrama de Nyquist es posible estimar el valor de la resistencia de la solución a través de la extrapolación de datos experimentales que forman semicírculos, hasta la intersección con el eje equis real. Dicha condición se muestra en la Figura 1.4 [5].

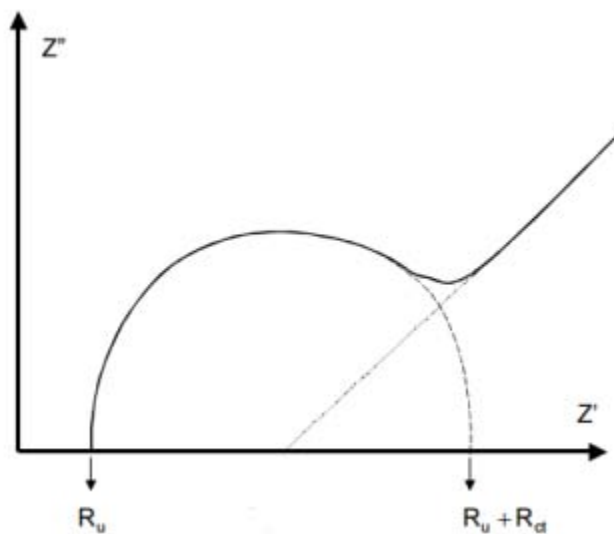


Fig.1.4. Diagrama Nyquist de Impedancias[5].

## 1.2 PROYECCIÓN TÉRMICA.

### 1.2.1 Aspectos generales de la proyección térmica.

La proyección térmica es una técnica de recubrimiento de superficies, en ella se resumen métodos de recubrimiento muy diversos, como la proyección térmica por flama, por detonación, de alta velocidad, entre otras. Estas técnicas se basan, en conferir al material a proyectar (en forma de polvo o alambre) suficiente energía térmica, obtenida bien sea a partir de una combustión de gases, de un arco voltaico o por la recombinación de gases plasmágenos, para conseguir que el material se funda total o parcialmente, posteriormente es proyectado sobre el sustrato, con una alta energía cinética formando un recubrimiento compacto por agregación de las partículas proyectadas. [7].

A continuación se muestra en la Figura 1.5 un esquema del proceso de proyección térmica por flama donde se observan las distintas partes implicadas. Inicialmente, los polvos están en contacto con los gases, la mezcla se dirige hacia la boquilla, impulsados por el propio flujo de los gases, donde se produce la combustión y la fusión de los polvos. Finalmente, la masa fundida genera una corriente de pulverización; para obtener un recubrimiento sobre el sustrato. [8].

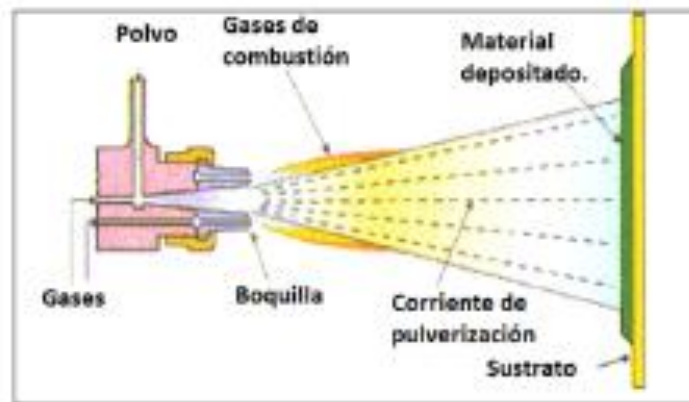


Fig1.5 Representación del proceso de proyección térmica de polvos [8]

Con el proceso de proyección térmica se proveen nuevas propiedades al sistema, aportadas por el recubrimiento, y podría incluso modificar las del material sobre el cual se proyecta. Dichas modificaciones pueden ser el resultado de una reacción química de reducción, oxidación, pronta solidificación, endurecimiento por enfriamiento, etcétera. Estas propiedades (dureza, resistencia a la corrosión, entre otras), dependen del material de alimentación, del proceso de proyección y los parámetros aplicados y del postratamiento. Los materiales de alimentación pueden ser metálicos, cerámicos, polímeros o una combinación de ellos y pueden aplicarse bajo diversas condiciones atmosféricas en caso de así requerirlo.

Dos de los parámetros importantes durante este proceso es la velocidad y temperatura de las partículas, ya que influyen en la dureza de la capa, en la cohesión del material de recubrimiento y en su adherencia al sustrato. Dichas velocidades están en un rango mayor a los 50 [m/s] y menor a los 1000 [m/s]. En cuanto al rango de temperatura, depende del

material y de las propiedades que se busca obtener en el proceso. La energía térmica que se utiliza para adquirir dicha temperatura se obtendrá como resultado de la combustión de los gases que alimentan la pistola. En la Figura 1.6 se ilustra una partícula de material proyectado térmicamente, en ella es posible observar la deformación que tendrá la geometría de la gota al impactar con el sustrato [9].

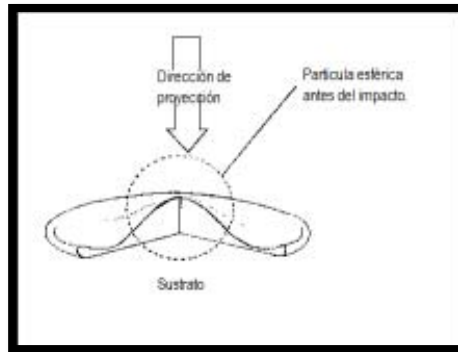


Fig1.6 Imagen que ilustra una partícula proyectada. [10]

### 1.2.2 Clasificación de los procesos de proyección térmica.

Teniendo en cuenta, tanto la fuente que suministra la energía térmica como la velocidad que se alcanza durante el proceso se obtiene la siguiente clasificación:

#### *Proyección por flama*

Este proceso se caracteriza por una velocidad de flujo baja en la flama pero alta en el proceso. Existen diferentes métodos de proyección por flama, los cuales basan su procedimiento en suministrar energía térmica a través de la combustión de una mezcla de gases, para producir una fuente de calor y conferir energía cinética a las partículas que salen de la boquilla de la pistola de proyección, impulsadas por el mismo flujo de los gases. Este procedimiento puede contar con el material de aporte en forma de polvos o de alambre, el cual puede o no entrar en contacto con la flama, fundiéndose y acelerándose hasta impactar al sustrato, por lo que esta forma de proyección se encuentra limitada para los materiales que se funden a temperaturas más altas que la proporcionada por la flama o para materiales que se descomponen durante el calentamiento. En este tipo de proyección se utiliza normalmente una flama generada a partir de la mezcla de gases de acetileno/oxígeno. Debido a la temperatura relativamente baja de dicha flama y la velocidad de la partícula, las capas son generalmente de menor calidad, tienen alta porosidad bajas fuerzas cohesivas y adhesivas y espesor limitado. Dentro de esta clasificación se encuentran los siguientes tipos:

- Proyección de polvos
- Proyección de alambre.
- Proyección térmica de plásticos.

En la Figura 1.7 se muestra un esquema de una pistola de plastificación con flama, donde se especifican; la temperatura máxima, el valor de la energía cinética y la cantidad del material de aporte de este equipo[7].

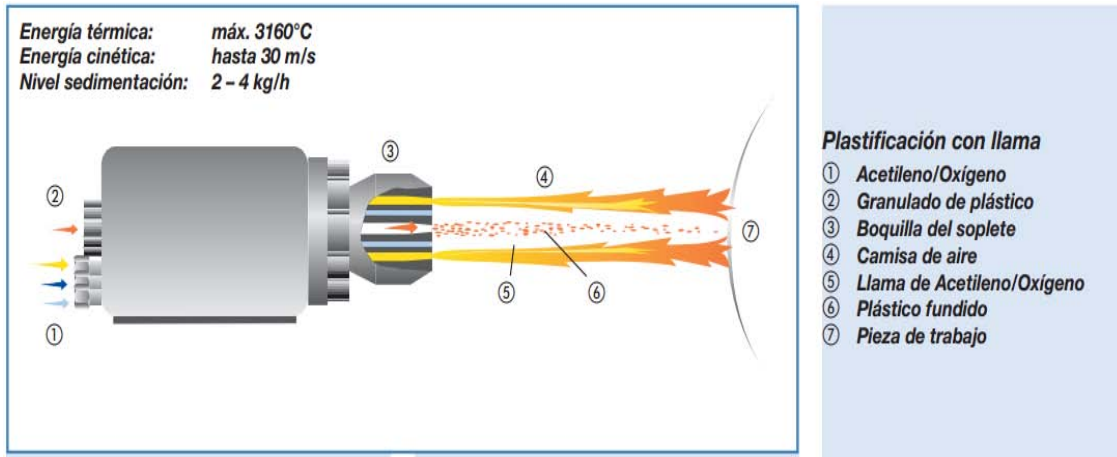


Fig1.7. Esquema del proceso de plastificación con flama [7].

#### Proyección por detonación.

Conocida como proyección térmica por choque, es un proceso de proyección intermitente debido a que se usa la combustión continua con una serie de explosiones o detonaciones intermitentes controladas, que funden el material de alimentación, transformándolo en partículas y lo proyectan por impacto con alta energía cinética hacia el sustrato. Los recubrimientos producidos con este método son de excelente calidad, con alta resistencia a la abrasión y elevadas temperaturas, pero con un costo muy alto [7], [11].

A continuación en la Figura 1.8 se muestra el esquema de una pistola de detonación.

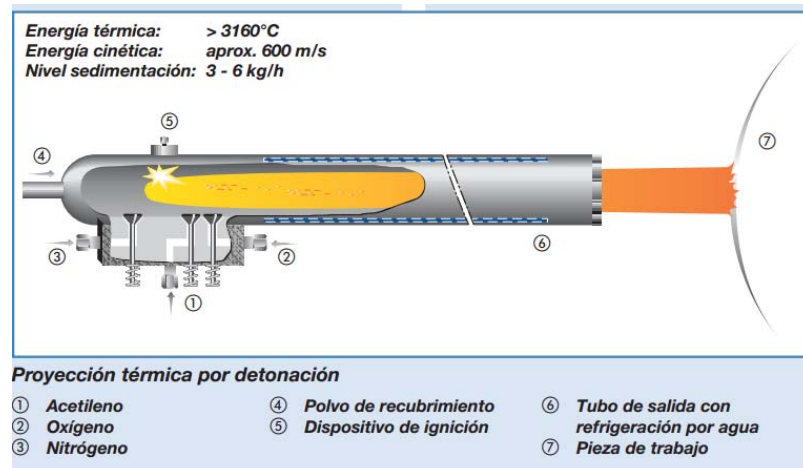


Fig1.8. Esquema del proceso de proyección térmica por detonación. [7]

### Proyección térmica fría de alta velocidad

Este proceso, se basa en la generación de un flujo gaseoso de gran velocidad (más de 1000 [m/s]) originado en la combustión de gases a alta presión y detonación en el interior de la cámara de combustión, la mezcla de gases es acelerada a velocidades supersónicas y el material alimentado en forma de polvo es inyectado dentro de la llama donde es calentado y sometido a la presión adecuada. Una vez que el polvo cambia a estado fundido o semifundido, las partículas proyectadas alcanzan la máxima energía cinética impactando contra el sustrato y formando los recubrimientos. El revestimiento no presenta cambios en sus propiedades, debido a las temperaturas relativamente bajas del proceso.

En la Figura 1.9 se presenta el esquema de una pistola de proyección por alta velocidad donde se especifican; la temperatura máxima, el valor de la energía cinética y la cantidad del material de aporte de este equipo[7] [9].

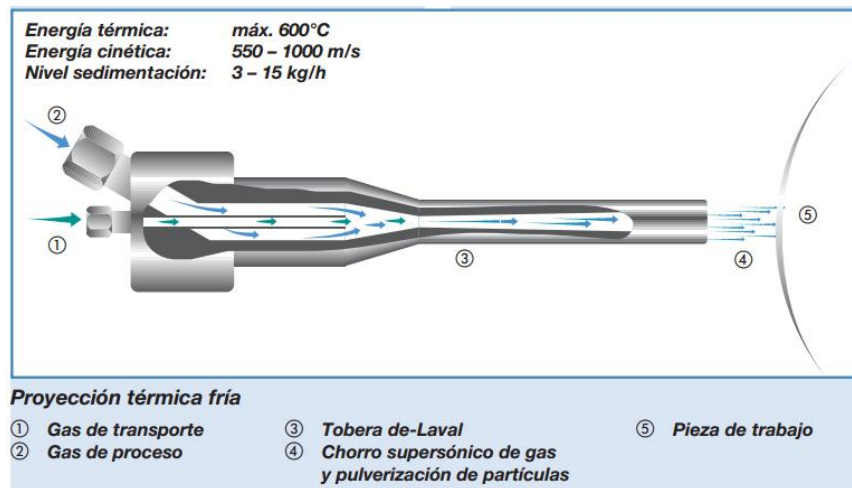


Fig1.9. Esquema de proceso de proyección térmica fría de alta velocidad [7].

### Arco eléctrico.

Para la proyección térmica a través del arco voltaico se usan dos hilos como electrodo, que pueden ser de tipo análogo o diferente. Estos electrodos se funden en un arco y son atomizados, con ayuda de un gas pulverizado. Finalmente son proyectados sobre la superficie ya preparada de la pieza de trabajo. En ocasiones la temperatura y la velocidad de que alcanza el material durante la proyección son capaces de producir un plasma, el plasma se forman bajo temperaturas y velocidades extremadamente altas. En este estado la materia, se comporta como una mezcla de núcleos positivos y electrones libres y tiene la capacidad de conducir electricidad. Teniendo en cuenta estos factores, para este tipo de proyección se requiere utilizar equipos más sofisticados.

En la Imagen 1.10 se presenta el esquema de una máquina de proyección con arco eléctrico, donde se muestra; la temperatura máxima, el valor de la energía cinética y la cantidad del material de aporte para este equipo[7], [11].



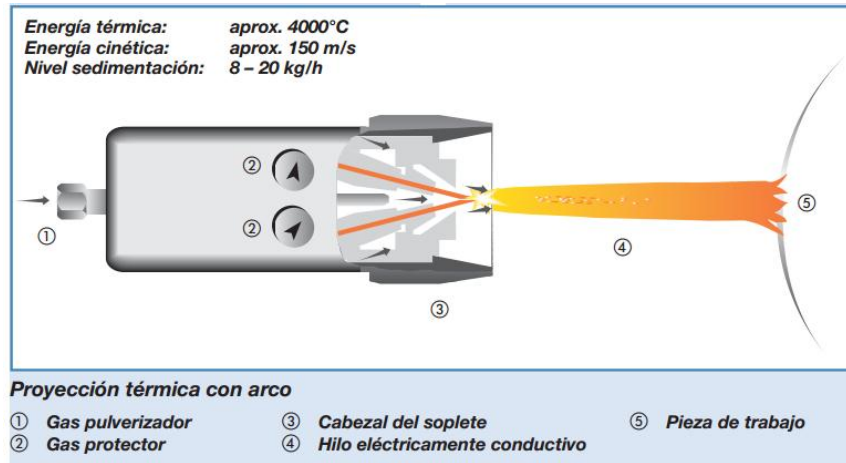


Fig1.10. Esquema del proceso de proyección térmica con arco eléctrico [7].

### Proyección con láser:

Para la proyección térmica con láser se introduce en el rayo láser un material de recubrimiento en forma de polvo, usando una tobera especial para ello. El rayo láser funde tanto el polvo como una parte mínima del material de base, generando un recubrimiento homogéneo y con buena adherencia al sustrato, sin embargo el costo de esta técnica es muy elevado.

En la Figura 1.11 se presenta el esquema de una máquina de proyección con rayo láser donde se muestra la temperatura máxima, el valor de la energía cinética y la cantidad del material de aporte de este equipo [7][11].

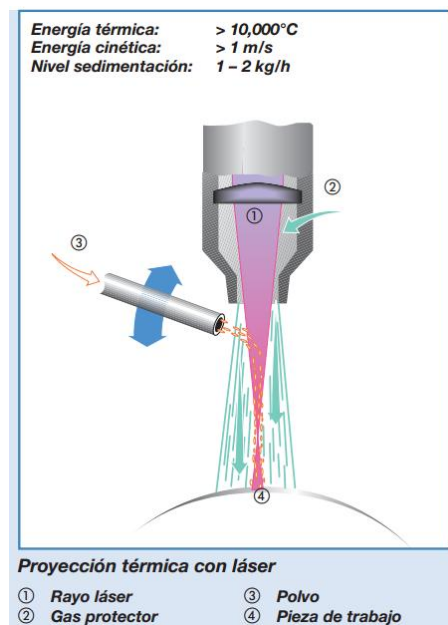


Fig1.11. Esquema del proceso de proyección térmica con rayo láser [7].

### 1.2.3 Descripción del proceso de proyección térmica con alimentación de polvos.

La proyección con polvo, es un tipo de proyección con flama durante el cual la pistola es alimentada continuamente con una mezcla de un gas comburente (oxígeno  $O_2$ ) y un gas combustible (acetileno  $C_2H_2$ , hidrógeno  $H_2$  con propano  $C_3H_8$ ). Con la ayuda de los gases de combustión en expansión, el material en forma de polvos será fundido total o parcialmente mediante la energía térmica generada y posteriormente lanzado sobre la superficie de la pieza a tratar. Las partículas impactan en forma de gotas sobre el material preparado formando el recubrimiento. La mayoría de las aleaciones de metal y material duro se proyectan como polvo.

El proceso se caracteriza por una velocidad de flujo relativamente baja en la flama, menor a los  $100[m/s]$ , alta porosidad, cohesión y un flujo aproximado del material de aporte de  $9[kg/h]$ . Dichas propiedades de porosidad y cohesión son homogéneas en la capa, debido a que el tamaño de los polvos permite su calentamiento a la misma temperatura y poder pulverizarse con mayor facilidad[9], [10].

En algunos casos, se puede usar un gas adicional (por ejemplo argón o nitrógeno) para proyectar las partículas de polvo. La enorme variedad de materiales de aporte, con más de 100 tipos diferentes, ofrece un amplio abanico de posibilidades para la aplicación de este tipo de recubrimientos. Se distinguen entre polvos autofundentes y autoadherentes. Los polvos autofundentes, suelen requerir un tratamiento térmico adicional, para aumentar su dureza. En cuanto a los polvos autoadherentes, se puede prescindir de dichos tratamientos u optar por ellos en caso de ser conveniente, se acuerdo a la mejora en las propiedades del material que se buscan. Esta incrustación de material depositado se lleva a cabo, en la mayoría de los casos, con sopletes de Acetileno/Oxígeno que son idóneos para ello.

En la Figura 1.12 se observa el esquema de una pistola de proyección con polvos donde se muestran; la temperatura máxima, el valor de la energía cinética y la cantidad del material de aporte de este equipo [7] [9].

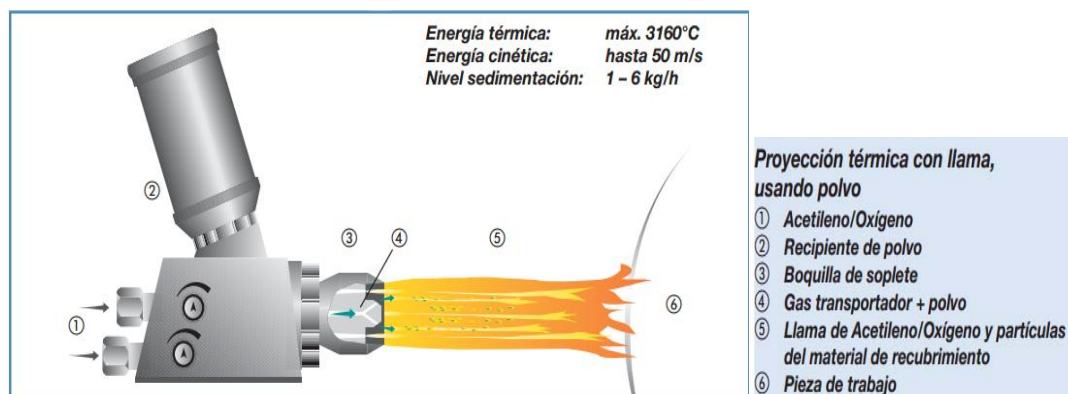


Fig1.12. Esquema del proceso de proyección térmica de polvos [7]

#### 1.2.4 Descripción del proceso de proyección térmica con alimentación de alambre.

La proyección térmica usando alambre es un tipo de proyección por flama, en la cual se va fundiendo el material de aportación en forma de alambre al centro de la pistola de forma continua. La flama de combustión, se realiza con una mezcla de (oxígeno O<sub>2</sub>), gas combustible (acetileno C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, hidrógeno H<sub>2</sub>, o propano C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) y con la ayuda de otro gas, por ejemplo, el aire comprimido o nitrógeno, para su fusión se impulsa a través de un tren de engranes el alambre. Posteriormente gracias al impulso de los gases se separan del área de fusión (a la salida de la boquilla del equipo) diminutas partículas en forma de gotas que son lanzadas sobre la superficie ya preparada de la pieza a recubrir. La tasa de deposición se encuentra entre 0.5 [kg/h] y 9 [kg/h], con un rango de temperatura que va de los 95 °C a los 3160°C.

La Figura 1.13 muestra el esquema de una pistola de proyección con alambre donde se especifica; la temperatura máxima, el valor de la energía cinética y la cantidad del material de aporte de este equipo[7], [11].

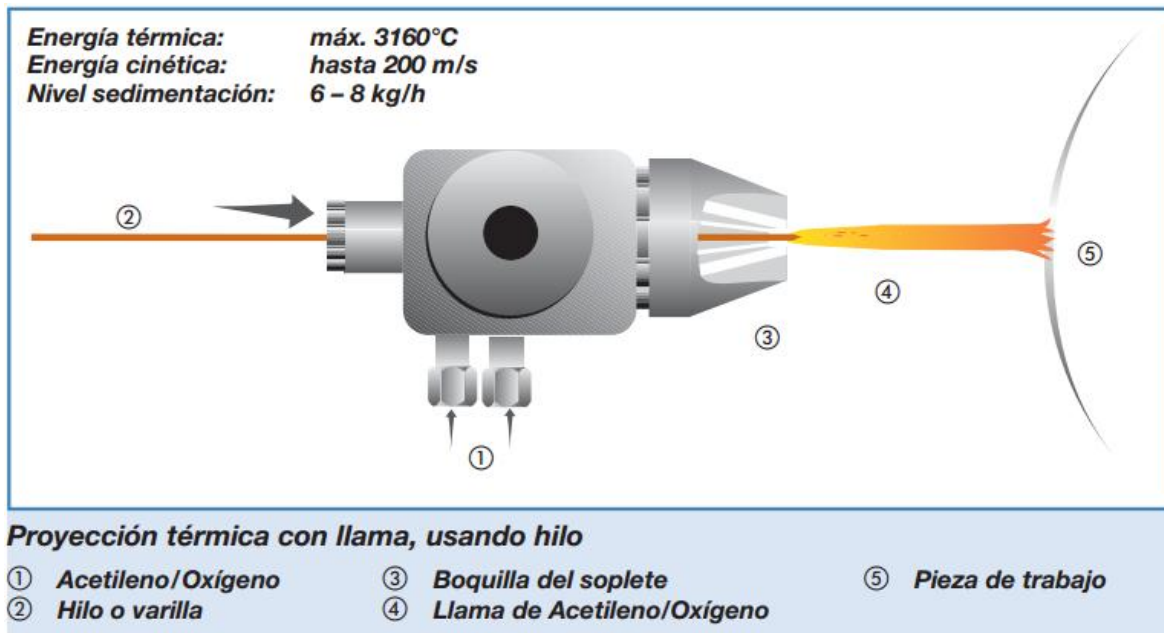


Fig1.13. Esquema del proceso de proyección térmica de alambre [7]

#### 1.2.5 Aplicaciones y propiedades de los recubrimientos por proyección térmica (RPT)[7].

Debido a la gran variedad de ventajas que la proyección térmica ofrece, diferentes industrias han recurrido a estos métodos para brindar a piezas determinadas propiedades favorables tales como; la protección contra el desgaste, resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica, ataque químico, resistencia eléctrica, e incluso como capas decorativas. Dependiendo del método de deposición se puede encontrar diferentes aplicaciones por ejemplo:

- La proyección con alambre es utilizada en la industria automotriz, aplicando molibdeno a las horquillas de cambio, anillos sincrónicos y segmentos.
- La aplicación de polvos es utilizada en los casquillos protectores para ejes, rodillos de transporte, asientos de rodamientos, ventiladores, rotores, serpentines de extrusión, etcétera.
- La proyección con flama a gran velocidad tiene campo de aplicación en las superficies de deslizamiento de las planchas domésticas a vapor, rodillos para la industria fotográfica, así como ciertas piezas de maquinaria para las industrias química y/o petroquímica, por ejemplo: bombas, válvulas correderas, válvulas de esfera, juntas mecánicas etcétera.
- La proyección por plasma es usada en la navegación aérea y espacial (en las turbinas de rodaje), en implantes médicos y generando capas de aislamiento térmico.
- La proyección por láser es usada en el recubrimiento total o parcial de herramientas como los troqueles.
- El uso de arco voltaico está presente en aplicaciones donde se recubren grandes superficies y es usado como protección frente a la corrosión.

### 1.3 NIQUELADO QUÍMICO [12]

#### 1.3.3 Aspectos generales del proceso de niquelado químico

El niquelado es un recubrimiento metálico de base níquel, realizado mediante baño electrolítico o químico, que se da a los metales, para aumentar su resistencia a la oxidación, la corrosión o el desgaste, así como para mejorar su aspecto en elementos ornamentales. Los recubrimientos obtenidos son conocidos por la uniformidad de espesor, con independencia de la geometría de la pieza, así como por su alto grado de dureza, lubricación y su elevada resistencia a la corrosión. En la Figura 1.14 se muestran una fotografía de distintas piezas niqueladas.



*Fig1.14. Imagen de piezas niqueladas [12].*

El niquelado químico deposita por vía química, en su opción más común, una aleación níquel - fósforo (NiP) sobre un amplio espectro de materiales tales como aluminio y sus aleaciones, acero inoxidable, aceros al carbono y aleados, cobre, latón, cerámicas, polímeros y materiales compuestos. El recubrimiento obtenido no es poroso y, en la mayoría de los casos, aumenta la dureza superficial del material base. Las características del depósito sobre la probeta variarán dependiendo del porcentaje de fósforo.

#### 1.3.4 Clasificación del proceso de niquelado.

Hay varios tipos de procesos de niquelado químico según su porcentaje de fósforo (y con posible adición de partículas, tales como SiC, WC, teflón, etcétera)

De acuerdo al baño, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Bajo contenido en fósforo: con un contenido del 2-4% de fósforo.
- Medio contenido en fósforo: 6-8 %. Para aleaciones no férricas, dureza hasta 1000 HV.
- Alto contenido en fósforo: 10-14 %. Máxima resistencia a la corrosión, dureza de 500-600 HV.

### 1.3.5 Descripción del proceso de niquelado químico.

Los procesos químico-catalíticos empleados para recubrir partes y materiales se caracterizan tanto por una reducción selectiva de los iones metálicos en la superficie de un sustrato catalítico, es decir que tiene la capacidad de acelerar la reacción química de reducción sin modificarse. Dicho sustrato se encuentra sumergido en una solución acuosa, como por la deposición continua sobre este sustrato, a través de la acción catalítica del depósito mismo.



En el niquelado químico, se emplea un agente reductor que provoca la reducción de una sal de níquel que se encuentra en la solución acuosa, generalmente caliente y de este modo, se deposita níquel y fósforo sobre una superficie catalítica, es decir del elemento a recubrir.

A la fecha existe una gran cantidad de formulaciones desarrolladas para realizar un niquelado químico. Sin embargo, la solución de niquelado químico, normalmente contiene y requiere, de los siguientes componentes:

- a) Una sal que suministre el níquel (comúnmente un sulfato o un cloruro).
- b) Un agente reductor.
- c) Agentes complejantes, para controlar la cantidad de níquel “libre” disponible para la reacción.
- d) Un regulador de pH.
- e) Estabilizadores.
- f) Aceleradores.
- g) Una superficie adecuadamente preparada de modo que resulte catalítica.
- h) Una temperatura apropiada.

Industrialmente se emplean baños de tipo ácido (pH entre 4.5 y 6) y de tipo alcalino (pH entre 7.5 y 10). Éste último ha encontrado menor difusión debido a que, a las temperaturas comunes de trabajo en estos baños, presentan fuertes pérdidas de amoníaco, lo que provoca inestabilidad del baño.

Entre los agentes reductores más utilizados, conviene mencionar al borohidruro de sodio, diversos compuestos de boro, así como la hidracina, aunque el más empleado, es el hipofosfito de sodio.

Como puede suponerse, las partes que se desean revestir mediante este proceso deberán tener una superficie limpia, sin presencia de partículas de óxido y deberán removerse residuos de grasas, aceites, etcétera. En general, el tratamiento previo a la realización del niquelado, es muy semejante al usado para los recubrimientos electrolíticos, adicionalmente, las superficies deben ser adecuadamente activadas con el fin de que, posteriormente, funcionen como un catalizador eficiente de la reducción de los iones de níquel.

Si se considera una composición constante del baño, la velocidad de deposición guardará una relación directa con los siguientes parámetros:

- a) La temperatura: La temperatura óptima para baños está entre 85 y 95°C, recientemente han desarrollado formulaciones que trabajan a temperaturas del orden de 30 °C, donde se obtienen las mayores velocidades de deposición; sin embargo, a medida que la temperatura se acerca al valor del punto de ebullición de la solución, la estabilidad de ésta tiende a disminuir.
- b) Cantidad de agente reductor: La velocidad de deposición es una función directa de dicha concentración. De este modo, un alto contenido de este ion, sería deseable. Sin embargo una alta concentración de iones hipofosfito resulta en una elevada cantidad de iones de níquel reducidos, lo que se opone a la selectividad propia del proceso. La concentración de hipofosfito más recomendada es de 0.22 a 0.24 moles por litro y la relación molar níquel-hipofosfito de 0.3 a 0.4.
- c) pH: En baños ácidos, la velocidad de deposición aumenta con el pH de la solución hasta pH cercanos a 6.5. No se produce prácticamente la deposición por debajo de un pH de 3.0. La zona de pH recomendada para una solución de níquelado químico está entre 4.3 y 4.8. Donde se intenta lograr un equilibrio entre una velocidad de deposición aceptable, una adecuada estabilidad del baño y una utilización óptima del hipofosfito.
- d) Agitación: En general una mayor agitación aumenta la velocidad de deposición.

### 1.3.6 Aplicaciones y propiedades del recubrimiento de níquel químico

Debido a las propiedades que se mejoran con el Níquel Químico se ha encontrado utilización en un buen número de aplicaciones industriales. En la Tabla 1.1 se resume algunos de los sectores donde han encontrado aplicación este tipo de revestimientos.

Tabla 1.2 Tabla de aplicaciones del níquelado químico [12].

Industria	Aplicaciones
Química y del petróleo	Bombas e impulsores
	Intercambiadores de calor
	Filtros y componentes
Alimenticia y farmacéutica	Recipientes para mezclas
	Tornillos extrusores de alimentos
Otras industrias	Marina: Cadenas, grilletes
	Aeronáutica: Cuadros metálicos de avión, canalización de fuelles, etc.
	Armamento: Interiores de cañones, mecanismos, piezas de cañones y fusibles

## CAPITULO 2. EXPERIMENTACIÓN.

### 2.1 PROYECCIÓN TÉRMICA

#### 2.1.1 Preparación de probetas.

Para realizar el proceso de proyección térmica es necesario preparar el sustrato previamente a la deposición del material con el fin de conseguir mejores condiciones de homogeneidad y adherencia en la superficie. En la Tabla 2.1 se describen los sistemas realizados.

Tabla 2.1 Tabla de sistemas.

Nomenclatura	Sustrato	Proyección Térmica (PT)	Material de aporte PT.	Parámetros PT.
NiP	Acero	-----	----	-----
NiP-Cu	Acero	Polvos	Cu	Distancia= 30 [cm] Consumo de polvo= $1.8 \left[ \frac{kg}{h} \right]$ Gases: Oxigeno= $2 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$ Acetileno= $1 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$
NiP-C623	Acero	Alambre	C623	Distancia= 25 [cm] Consumo de polvo= $4.95 \left[ \frac{kg}{h} \right]$ Gases: Oxigeno= $1 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$ Acetileno= $1 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$

##### 2.1.1.1 Limpieza

Se cortaron probetas de  $2.54 \times 2.54$  [cm]. de una solera de  $1/8''$  ( $0.32$ [cm]) de espesor y considerando que se trata de un acero de bajo contenido de carbono, se prescindió del uso de agua, con el fin de evitar la formación de óxidos, por lo que el proceso de limpieza al que se le sometió consistió en un proceso de granallado y cepillado para eliminar restos propios del proceso [13].

En la preparación de las probetas se utilizó granallado por succión, utilizando aire comprimido para impulsar las partículas abrasivas encargadas de eliminar la corrosión superficial. Como partículas se empleó alúmina ( $Al_2O_3$ ) la cual desbasta por acción mecánica al contacto la superficie sobre la cual se va a proyectar. Posteriormente, se cepilló la superficie con el fin de quitar restos de alúmina y polvo. Cabe mencionar la necesidad del uso de guantes de látex para evitar contaminar con grasa e impurezas la superficie ya preparada.



En la Figura 2.1 se muestra el proceso de granallado. En la Figura 2.2 se muestran los elementos principales de dicho sistema [14].

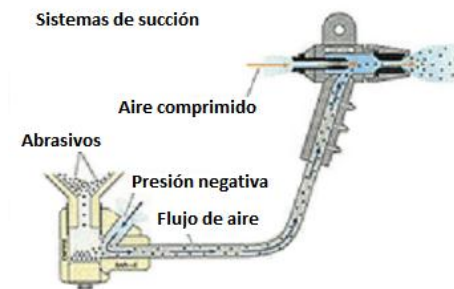


Fig. 2.1 Sistema de granallado[15]



Fig. 2.2 Pistola de granallado y abrasivo [16]

### 2.1.1.2 Rugosidad.

Una ventaja más del proceso de granallado es el cambio en la rugosidad de la superficie sobre la cual se dispara el abrasivo, dicha situación incrementa la superficie de adherencia sobre el sustrato. En este caso se utilizó un tiempo de granallado de 7[*min*] , y una distancia de granallado de 15[*cm*] con lo que se consiguió una rugosidad apropiada para buscar incrementar la adherencia del recubrimiento al sustrato mediante el aumento de la superficie de contacto, dichos parámetros se obtuvieron de los utilizados en trabajos anteriores[17] Para medir la rugosidad se utilizó un rugosímetro de la marca Mitutoyo (Surftest-402) el cual se muestra en la Figura 2.3. Este equipo mide la altura y profundidad de los picos generados en el granallado de esta manera calcula la rugosidad promedio de la superficie.



Fig. 2.3 Rugosímetro y disposición utilizada para el proceso de medición.

### 2.1.1.3 Temperatura de precalentado.

Para obtener una buena deposición es deseable evitar la presencia de óxidos entre la superficie y el recubrimiento por lo cual la presencia de humedad es un evento poco deseable al momento de proyectar puesto que la humedad favorece la generación de óxidos sobre la superficie y esto repercute en una deficiencia en la deposición de la capa. Las probetas se precalentaron a una temperatura de 150 [°C] con el fin de asegurar la evaporación total de agua. Al precalentar la pieza se evita también un posible choque térmico.

### 2.1.2 Parámetros del proceso de proyección térmica de cobre con polvos.

Para proyectar los polvos se utilizó una pistola de proyección por polvos como la que se muestra en la Figura 2.4. Donde los polvos de cobre almacenados en el contenedor se dejan salir de manera regulada y son arrojados por la boquilla mientras se realiza la combustión de gases oxígeno y acetileno.



Fig. 2.4 Pistola de proyección térmica de polvos. [18]

Los parámetros utilizados se obtuvieron de manera experimental partiendo de experimentos realizados previamente [17].

#### 2.1.2.1 Distancia de proyección.

La distancia de proyección es un parámetro muy importante que está involucrado directamente en la energía de impacto de las partículas de polvo sobre la superficie, así como con el tiempo de exposición a la flama. La modificación de estos parámetros representa una variación en la transferencia de calor que repercute en la fundición de cada partícula. [4]. La distancia a la que se proyectó fue de aproximadamente 30 [cm]. La Figura 2.5 muestra la distancia que se utilizó en la deposición de los polvos sobre el sustrato.

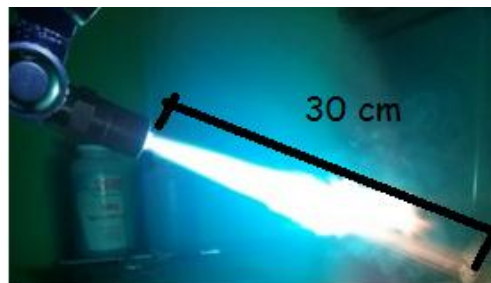


Fig. 2.5 Proyección térmica del cobre.

#### 2.1.2.2 Consumo de polvo.

El consumo de polvos de la pistola se obtuvo a través de la experimentación y probando las diferentes aperturas del diafragma de la pistola.

Para su cálculo se realizó la proyección de una probeta sin proceso previo de preparación, considerando el tiempo de proyección. Finalmente se desprendió dicha capa del sustrato metálico y se llevó a una báscula, se realizó lo mismo con tres probetas, reportando el valor promedio. La cantidad de polvos de cobre depositados en el sustrato es  $1.8 \left[ \frac{kg}{h} \right]$ .

#### 2.1.2.3 Consumo de gases.

Buscando alcanzar una temperatura adecuada que garantice la fundición total se utilizó una presión de  $2 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$  de oxígeno, mientras que el acetileno se manejó a una presión de  $1 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$ . En el flujómetro se utilizó una regulación de 75 [SCFH] (pies cúbicos por minuto estándar, por sus siglas en inglés Standar Cubic Feet per Minute) es decir  $2.124 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$ , para el oxígeno y 10[SCFH] para el acetileno ( $0.283 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$ ) [17]. En la Figura 2.6 se muestra el flujómetro empleado para medir el consumo de gases.



Fig. 2.6 Flujómetro.

#### 2.1.2.4 Tiempo de proyección

El tiempo de proyección que se empleó para la generación de los recubrimientos por proyección térmica de polvos, se obtuvo probando con diferentes tiempos y observando al microscopio los espesores obtenidos; en este caso se optó por proyectar sobre el sustrato durante un tiempo de 15[s]. El espesor obtenido de aproximadamente 2[mm], dicho espesor fue sometido a un proceso de desbaste con el fin de preparar la pieza para el niquelado.

### 2.1.3 Parámetros del proceso de proyección térmica con alambre de la aleación C623.

Para llevar a cabo la proyección de alambre es necesario realizar la conexión del equipo como se ilustra en la Figura 2.7 y considerar los parámetros previamente descritos en los apartados anteriores, dejando fijos el consumo de alambre, la distancia de proyección y el tiempo de la misma con el fin de obtener reproductividad en todas las probetas proyectadas [19].

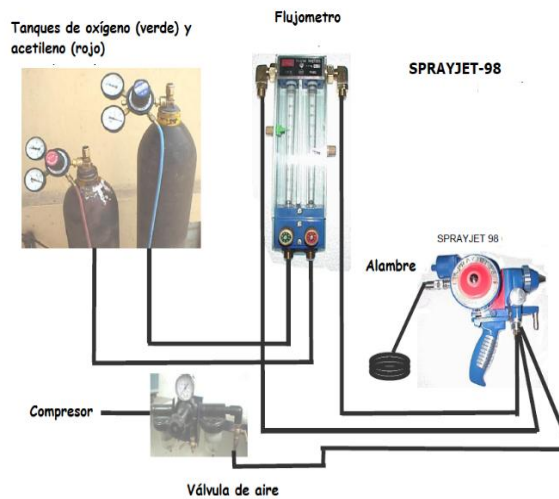


Fig. 2.7 Esquema de conexión de la pistola de proyección de alambre [19].

Primeramente se realizaron proyecciones sobre una superficie de acero más grande con el fin de distinguir la apariencia del recubrimiento y seleccionar aquel en cuya apariencia se distinguiera mayor homogeneidad. Se dejaron fijos los parámetros (ver Tabla 2.1) de distancia de proyección, consumo de gases y tiempo de la misma, variando la velocidad de consumo de alambre. Finalmente una vez seleccionado el recubrimiento más homogéneo se proyectó sobre la probeta con la preparación previa adecuada. Posteriormente se llevó a cabo la metalografía para valorar el recubrimiento. En la Figura 2.8 se muestra una imagen del aspecto de las probetas proyectadas bajo distintos parámetros experimentales.



Fig. 2.8 Probetas proyectadas a diferentes velocidades de consumo de alambre.

A continuación se describen los parámetros utilizados para la proyección de alambre.

### 2.1.3.1 Distancia de proyección.

La distancia de proyección en este caso se seleccionó de tal manera que la flama toca al sustrato. De este modo, buscamos que las partículas toquen al sustrato con una mayor temperatura y por tanto procurar una mejor fundición y una capa proyectada homogénea, dicha distancia fue de aproximadamente 25[cm], de acuerdo al manual del equipo [19]. La Figura 2.9 se ilustra la distancia a la que se depositaron las partículas de la aleación C623 sobre el sustrato.

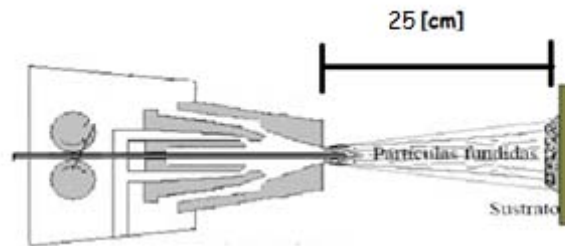


Fig. 2.9 Distancia de proyección de latón.

### 2.1.3.2 Consumo de alambre.

El consumo de alambre está directamente relacionado con la velocidad en que los rodillos impulsan al material, en este caso se calculó considerando la cantidad de material depositado, del mismo modo que se describe en la proyección de polvos. Es decir, obteniendo pesos de una capa proyectada durante cierto tiempo y que se desprendió del sustrato. Se tiene un consumo de alambre de  $4.953 \left[ \frac{kg}{h} \right]$ . Con lo que se consiguió una capa de 4 [mm] aproximadamente, de igual manera dicho espesor decreció al ser sometido a un proceso de desbaste previo al niquelado.

### 2.1.3.3 Consumo de gases

Al igual que en la proyección por polvos también es necesario ajustar los parámetros de consumo de gases en este caso se optó por una relación uno a uno es decir,  $1 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$  en ambos tanques (Oxígeno y Acetileno). Mientras que el flujómetro se registró 52 [SCFH] ( $1.47 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$ ) para el Oxígeno y 24 [SCFH] ( $0.68 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$ ) para el acetileno.

### 2.1.3.4 Tiempo de proyección.

El tiempo de proyección que se empleó para la generación de los recubrimientos por proyección térmica de alambre, se obtuvo probando con diferentes tiempos y observando al microscopio los espesores obtenidos; para este caso se optó por proyectar el sustrato durante un tiempo de 15[s].

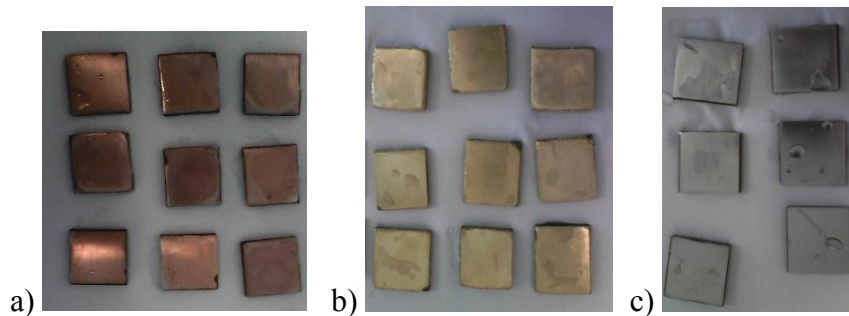
## 2.2 NIQUELADO QUÍMICO.

### 2.2.1 Preparación de probetas.

#### 2.2.1.1 Rugosidad.

Para realizar el proceso niquelado químico es necesario preparar la superficie sobre la cual se hará la deposición. Las probetas se sometieron a un proceso de lijado para conseguir un perfil de rugosidades similar en todos los sistemas (acero desnudo y probetas proyectadas). Por lo cual se lijaron las probetas con una lija malla 600.

Cabe mencionar que dicho lijado se realizó en seco para minimizar la formación de óxidos no deseados en las probetas. Los resultados de dicho proceso se ilustran en la Figura 2.10 donde se muestran las probetas preparadas antes de ser sometidas al proceso de niquelado.



*Fig. 2.10 Probetas preparadas para ser niqueladas químicamente (a) Probetas proyectadas con cobre, (b) probetas proyectadas con C623, (c) probetas de acero desnudo.*

### 2.2.2 Parámetros del baño químico [20]

El niquelado químico se realizó en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) en el Laboratorio de Materiales Particulados.

#### 2.2.2.1 Composición

Los componentes del baño químico fueron agregados en un vaso de precipitados de uno por uno mientras se agitaban en una parrilla con agitador magnético, teniendo en cuenta que es necesario disolver cada uno de ellos completamente para la correcta preparación del baño. Los componentes del baño químico fueron

1. agua desionizada
2. sulfato de níquel (suministra sales de níquel).
3. hipofosfito de sodio (sustancia reductora).
4. ácido propiónico (acelerador)
5. ácido láctico (regulador de pH, quelatos, acelerador)
6. granalla de plomo (estabilizador)
7. acetato de sodio (regulador de pH)

En la Figura 2.12. se muestra el baño preparado ya con las probetas sumergidas en una malla plástica que no interviene con el proceso químico.



Fig. 2.11 Imagen del baño químico con las probetas sumergidas.

#### 2.2.2.2 Temperatura.

Para garantizar una temperatura homogénea se utilizó una resistencia térmica sumergida en agua conectada a un termostato, se mantuvo la temperatura del baño en 85°C. En la Figura 2.12 se muestran los elementos (termómetro, regulador de corriente y resistencia) que se emplearon para conocer y regular la temperatura del baño termoregulado.

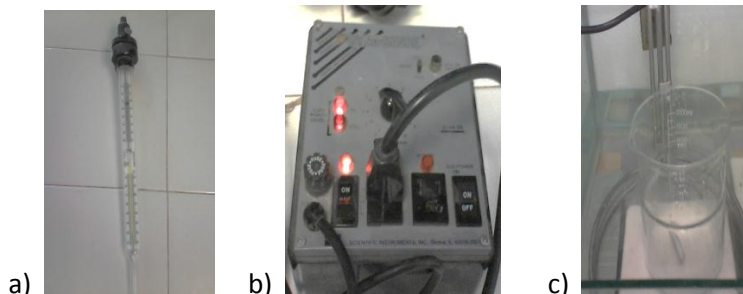


Fig. 2.12 Elementos que integran el baño termoregulado (a) termómetro, (b) regulador de corriente (c) resistencia.

#### 2.2.2.3 pH.

El pH del baño oscila aproximadamente en un valor no mayor de 4[12].

#### 2.2.2.4 Agitación.

Una vez que la disolución está preparada y es sumergida en el baño termoregulado, es sometida a una agitación constante con ayuda de un agitador magnético, con el fin de homogenizar la disolución. En la Figura 2.13 se muestra el baño químico, sumergido en el baño termoregulado durante el proceso de deposición.





*Fig. 2.13 Baño químico sumergido en el baño termorregulado durante la deposición del níquel.*

#### 2.2.2.5 Tiempo

El tiempo determinante para la generación de la capa de NiP corresponde al que pasaron las probetas sumergidas en el baño químico, puesto que es en este momento donde ocurre la reacción química. El tiempo de reacción fue de 5[h].

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

Una vez niqueladas las probetas se sometieron a las pruebas de Espectroscopia de Impedancia electroquímica, con el fin de evaluar su resistencia a la corrosión. Las muestras se colocaron en unas celdas electroquímicas de tres electrodos donde, posteriormente se colocó una solución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a una concentración 0.1 molar, con el fin de promover la corrosión en el medio. Posteriormente se coloca la celda electroquímica a un potenciostato marca ACM Instruments modelo Gill AC con la configuración que se muestra en el esquema de la Figura 2.14 [5].

Dichas mediciones se realizaron por espacio de tres semanas. La Figura 2.15 se muestra la celda armada y conectada al potenciostato. Como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de mercurio, el cual se muestra en la figura 2.16.



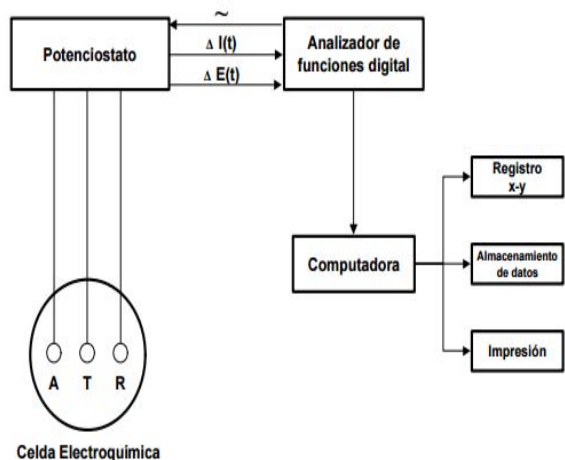


Fig. 2.14. Conexión al potenciostato donde A es el electrodo auxiliar T es el electrodo de trabajo y R el electrodo de referencia [5].

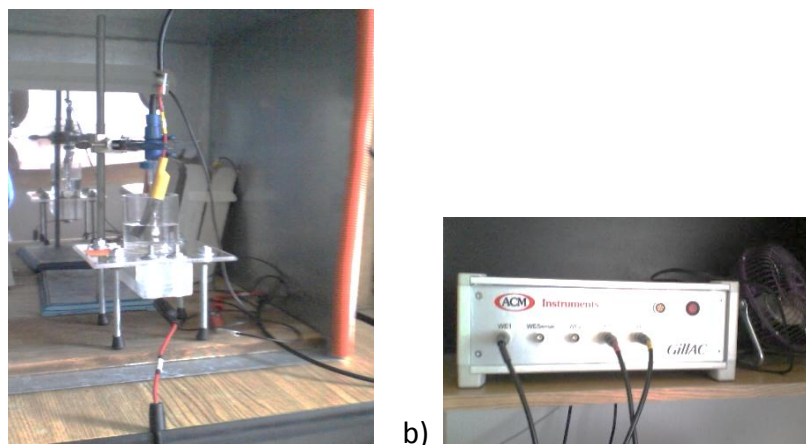


Fig. 2.15. Imagen de la celda electroquímica (a) y del potenciostato (b) para las medidas de impedancia electroquímica.



Fig. 2.16. Electrodo de referencia de Sulfato de Mercurio utilizado.

Los parámetros experimentales utilizados para medir la impedancia electroquímica se muestran en la Tabla 2.2.

*Tabla. 2.2 Condiciones de Impedancia Electroquímica*

Electrodo de Referencia	Sulfato de mercurio HgSO <sub>4</sub>
Contra Electrodo	Grafito
Medio	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 0.1 M
Frecuencia	0.1 Hz a 100kHz
Equipo	ACM Gill AC Instruments
Amplitud	10mV
Puntos por década	10
Área de trabajo del electrodo de trabajo	3.8 cm <sup>2</sup>

## 2.4 MICROSCOPIA.

Primeramente se realizó microscopía óptica sobre las probetas proyectadas con el fin de evaluar el recubrimiento generado a través de la proyección térmica de polvos y de alambre respectivamente, de esta manera se evaluaron los parámetros a utilizar y se seleccionaron los de mejores resultados. Para poder observar las piezas fue necesario un proceso metalográfico para generar un acabado espejo sobre la superficie transversal de las probetas.

Posteriormente las probetas sometidas al niquelado químico, fueron llevadas al microscopio electrónico de barrido donde se realizó un análisis SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscopy), donde mediante el barrido de un haz de electrones se inspeccionó la sección transversal de las probetas permitiendo observar y medir el espesor de las capas. Para realizar dicho proceso fue necesario empastillar las probetas en una resina de cobre, dicha resina al ser conductora permite el flujo de electrones, de esta manera no se acumulan sobre la superficie permitiendo observar la imagen de forma adecuada y sin exceso de brillo. Para generar una imagen de mayor calidad se usaron electrones secundarios utilizando el detector SEI por sus siglas en inglés SEI (Secondary Electron Image) que permiten generar un rayo de electrones concentrado y de esta manera describir con mayor resolución la topografía de la superficie. El microscopio electrónico Philips XL20 y las probetas preparadas para ser utilizadas se muestran en la Figura 2.17 [21].

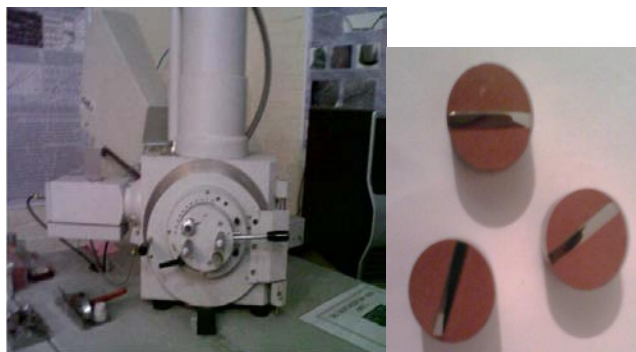


Fig. 2.17. Microscopio electrónico Philips XL20 y probetas empastilladas en resina de cobre.

## 2.5 ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

Se realizaron pruebas de espectrometría de fluorescencia de Rayos X (XRF) con la pistola marca Bruker, dicho equipo realiza un barrido con rayos Gamma que excita a los electrones, provocando una diferencia de energías, la cual se emite en forma de Rayos X. Dicho proceso es denominado fluorescencia de Rayos X y es específica de cada elemento. El proceso de barrido penetra el material a una profundidad del orden micrométrico. Bajo dicho proceso se obtiene la composición química de los elementos, la cual se lee directamente por el software y se presenta de forma clara como se muestra en la Figura 2.18[22].

El	Mtr.	%	Más.   +/- (2)
Al	18.50	0.30	10.00   0.38
Cu	80.00	99.69	98.00   0.19
Si	0.00	0.17	0.75   0.05
Sn	0.00	0.05	0.60   0.03
Zn		0.02	
Fe	2.00	0.25	4.00   0.01
Ni	0.00	0.05	1.00   0.01
Mn	0.00	0.05	0.50   0.01
Z		0.00	

Fig. 2.18. Ejemplo de la información arrojada por la pistola de Rayos X.

## CAPÍTULO 3.RESULTADOS Y ANÁLISIS.

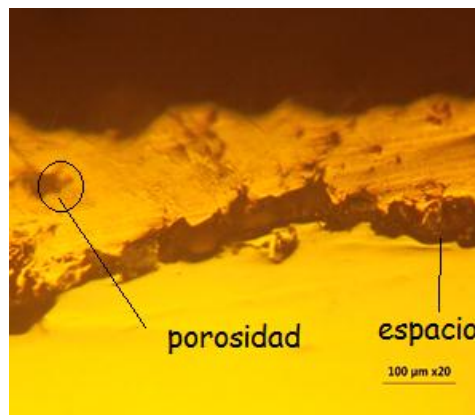
### 3.1 GRANALLADO.

Con el proceso de granallado previamente descrito, se consiguió una rugosidad promedio de  $9.6 [\mu m]$  sobre la superficie del sustrato.

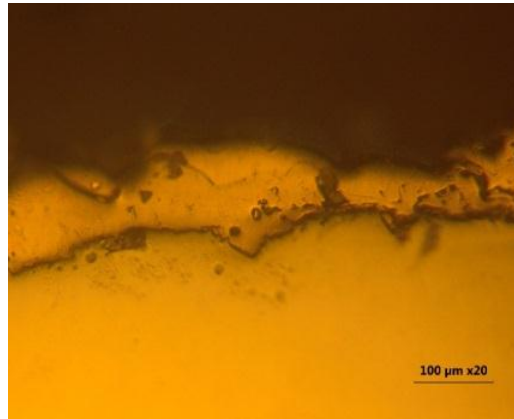
### 3.2 ESTRUCTURA DE LOS RECUBRIMIENTOS.

#### 3.2.1 Microscopía óptica.

En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran las imágenes de la metalografía de un par de probetas de la aleación C623, las cuales fueron proyectadas una con precalentamiento y la otra sin éste. En dichas imágenes es clara la presencia de un espacio en la probeta sin precalentar entre el sustrato y el recubrimiento por proyección térmica, lo cual indica una deposición irregular, observando una mejora en dicha situación en aquella en la que la probeta alcanzó los  $150[^\circ C]$  antes de depositar la aleación C623; por lo que las probetas a las que se les aplicó el niquelado posterior fueron precalentadas.

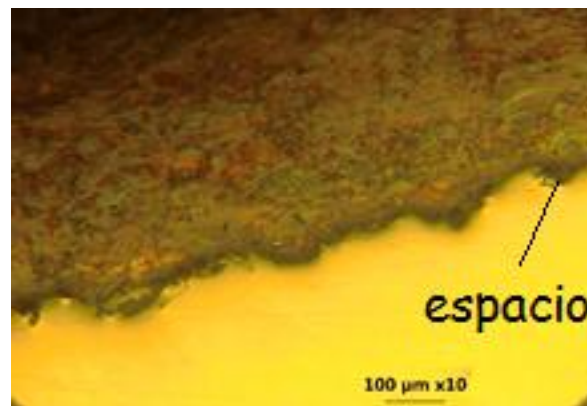


*Fig. 3.1 Probeta proyectada C623 sin precalentar, se distingue un espacio intermedio grueso.*



*Fig. 3.2 Probeta proyectada C623 precalentando a 150[°C], se distingue una mejora en la adherencia y una disminución de la porosidad.*

En las Figuras 3.3 y 3.4 se muestran los resultados obtenidos en las proyecciones de cobre y de la aleación C623 respectivamente; en una primera inspección visual se aprecia para el caso del cobre, una buena deposición sin porosidades de gran tamaño. Esta homogeneidad en el proceso es típico del proceso de proyección por polvos, cuando existe una correcta fundición de las partículas. En cuanto a la aleación de cobre-aluminio se aprecia un recubrimiento adecuado, en la Figura 3.4, presentando una buena fundición del material de aporte y una reducción en el espacio entre capas. Se observan también porosidades inherentes al proceso, las cuales tienen un mayor tamaño en comparación con las generadas por la técnica de proyección por polvos.



*Fig. 3.3 Probeta proyectada con cobre.*

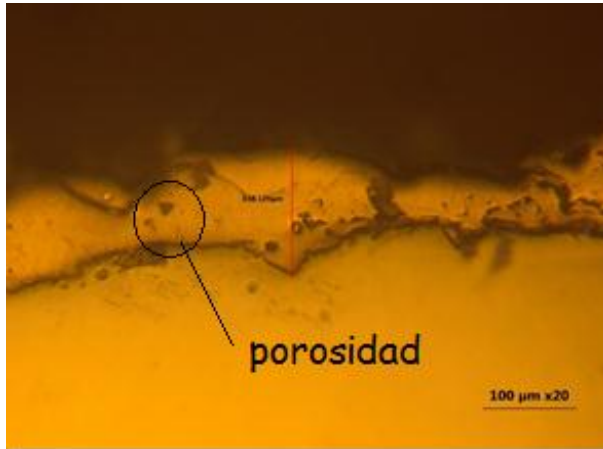


Fig. 3.4 Probeta proyectada con la aleación cobre-aluminio.

### 3.2.2 Microscopía electrónica de barrido.

En la Figura 3.5 se muestra la capa de níquel sobre el acero, se distingue la homogeneidad de la capa de níquelado químico la cual es bastante buena, típica de un recubrimiento de este tipo, al distinguirse un espesor de la capa prácticamente constante sobre la superficie del sustrato. El espesor de la capa de níquel tiene una magnitud promedio de 3.9 [ $\mu\text{m}$ ] medidos con el microscopio electrónico de barrido, el cual sigue la trayectoria de la geometría del sustrato.

Por otro lado en a pesar de que en la Figura 3.5, se observa una capa bien adherida al sustrato, la Figura 3.6 nos muestra que dicha situación podría no ser constante en la superficie total de la pieza, al mostrarnos una separación evidente de la capa de níquel y el sustrato.

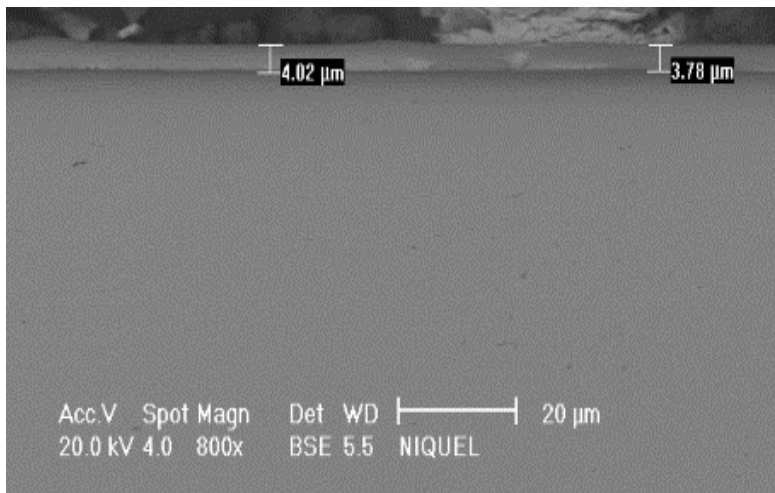
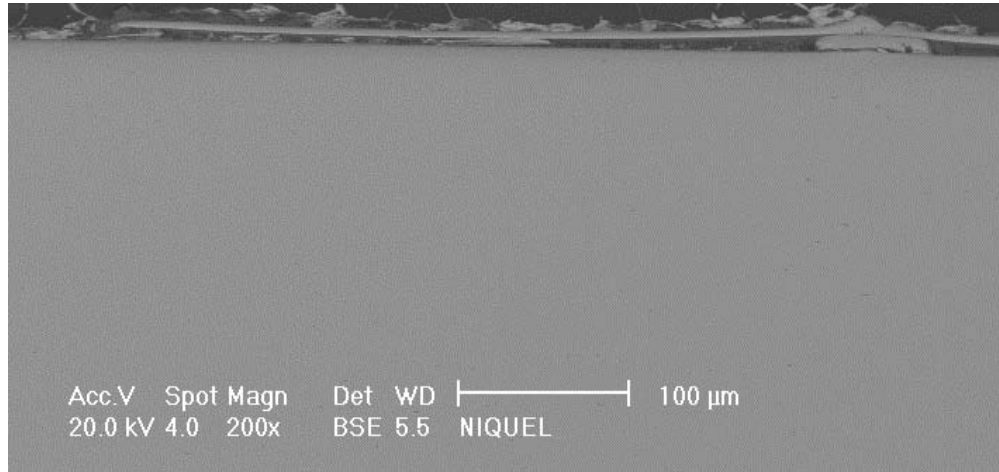
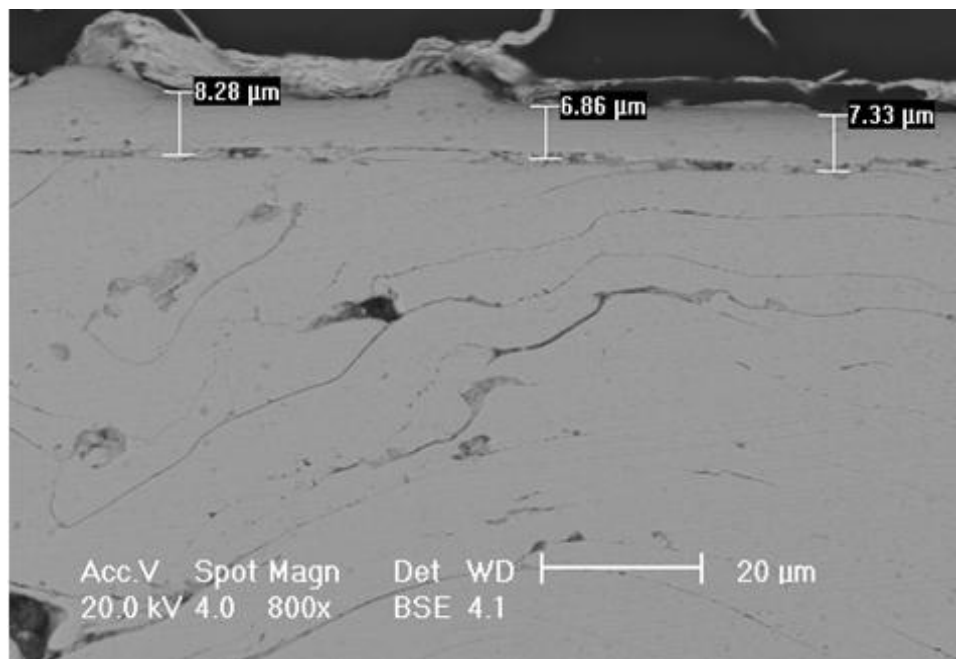


Fig. 3.5 Probeta de acero recubierta únicamente con níquel químico 800x



*Fig. 3.6 Probeta de acero recubierta únicamente con níquel químico 100x*

Las probetas cuya capa intermedia es la aleación C623 mostraron más porosidades comparadas con las generadas por proyección de polvos, dichas porosidades son frecuentes en el proceso de proyección de alambre. En la Figura 3.7. se muestra la sección transversal de la probeta proyectada en la cual es posible observar las porosidades descritas y la capa de níquel. El espesor de la capa de níquel promedio es de 7.5 [μm] y un espesor del recubrimiento dúplex promedio de 221 [μm] mostrado en la Figura 3.8.



*Fig. 3.7 Capas de níquel químico generada sobre la Aleación C623 800x*

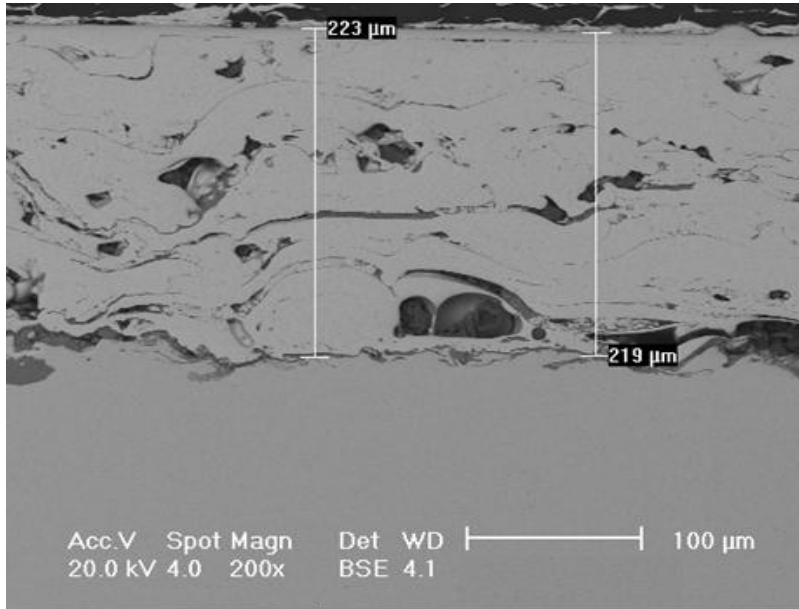


Fig. 3.8 Espesor total de la capa generada con la aleación C623 - níquel 200x

En cuanto a las probetas cuyo recubrimiento intermedio es el cobre, el espesor promedio de la capa de níquel que se consiguió fue de 5.67 [μm] el cual se muestra en la Figura 3.9. En cuanto al espesor promedio del recubrimiento duplex es de 168 [μm] la cual se observa en la Figura 3.10. La homogeneidad de la capa intermedia conseguida por proyección de polvos de cobre es mejor, que la proyección de la aleación C623, mientras que la capa de níquel químico sugiere que la adherencia parece mejorar en los sistemas donde se tenía una capa intermedia.

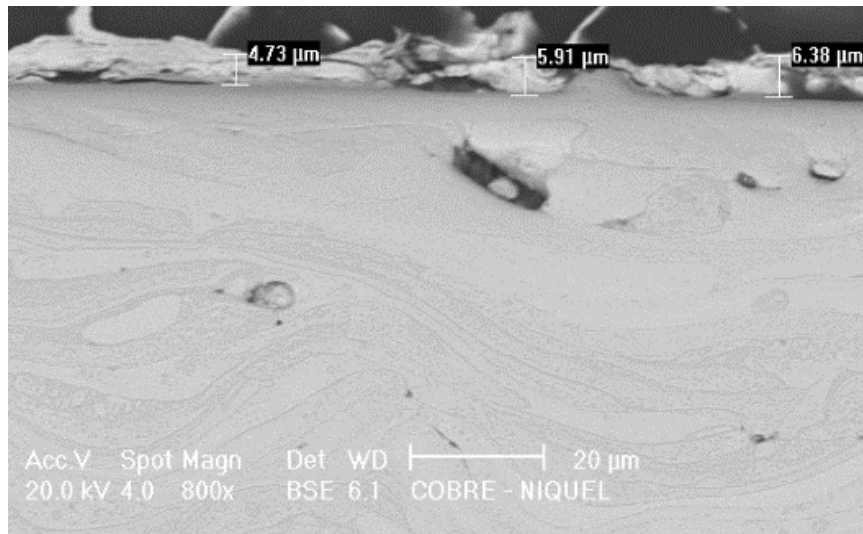


Fig. 3.9 Capa de níquel químico generada sobre cobre 800x .



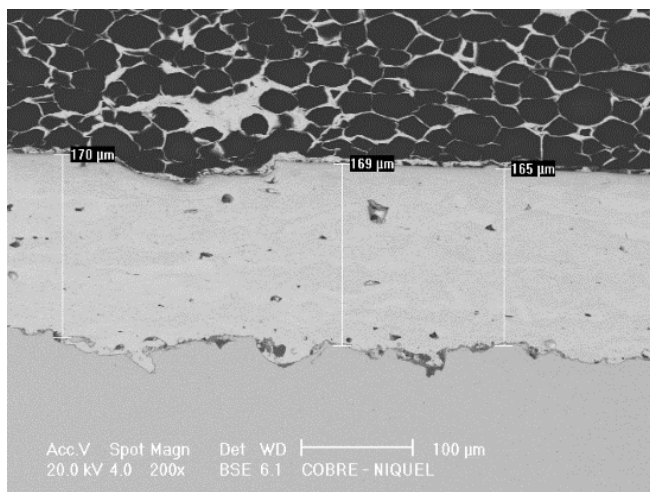


Fig. 3.10 Espesor de la capa generada con cobre- níquel 200x

En la Tabla 3.1 se muestra una comparativa de los espesores de las capas conseguidos en los tres casos anteriormente descritos. Primeramente el espesor total de las capas generadas (proyección y niquelado químico), posteriormente se muestra el espesor de la capa de níquel generada en cada uno de los casos y finalmente el espesor de la capa intermedia generada por proyección térmica, en los casos correspondientes.

Tabla 3.1 Comparativa de espesores

	Níquel sobre acero.	Aleación C623 sobre acero.	Cobre sobre acero.
Capa total. [ $\mu\text{m}$ ]	3.9	221	168
Capa de níquel. [ $\mu\text{m}$ ].	3.9	7.5	5.67
Capa de proyección térmica. [ $\mu\text{m}$ ].	-	213.5	162.33

En la tabla anterior se puede destacar que a pesar de haber sido niqueladas en el mismo baño y bajo las mismas condiciones, las probetas no consiguieron genera el mismo espesor en la capa de níquel. Evidenciando que la aleación Cu67Al33 favorece la formación de una capa de níquel de mayor espesor sobre el sustrato proyectado, seguidas del cobre que también propició la generación de una capa más gruesa de níquel, comparadas con el espesor de la capa obtenido al realizar el proceso de niquelado sobre el acero desnudo sin capas intermedias.

### 3.2.3 Análisis de composición de Rayos X.

A continuación en la Tabla 3.2 se presentan los elementos detectados a través del análisis de composición XRF.

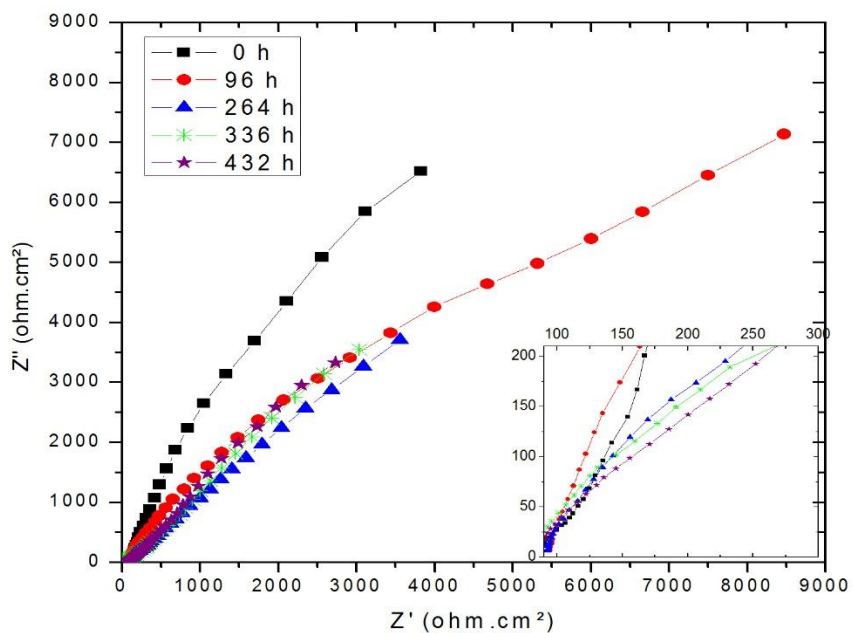
Tabla 3.2 Tabla de análisis de composición química.

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>	
<b>Sustrato.</b>	- Fe 97.33%, Si 0.76%, Mn 0.87%, Cr 0.9%, S 0.07%
<b>Capas de proyección térmica.</b>	- C623: Al 11%, Cu 87.7 %, Si 0.2%, Fe 0.9%, otros 0.2% - Cobre: Cu 98.7%, Si 0.49%, Sn 0.46%, otros 0.35%
<b>Capas de Niquelado.</b>	- C623-NiP: - Cu-NiP: Ni 59.13%, Cu 37.33%, Si 0.44%, P 2.68%, otros 0.42% - NiP: Ni 85.45%, Fe 11.02%, Sr 0.37%, P2.46%, Cu 0.2%

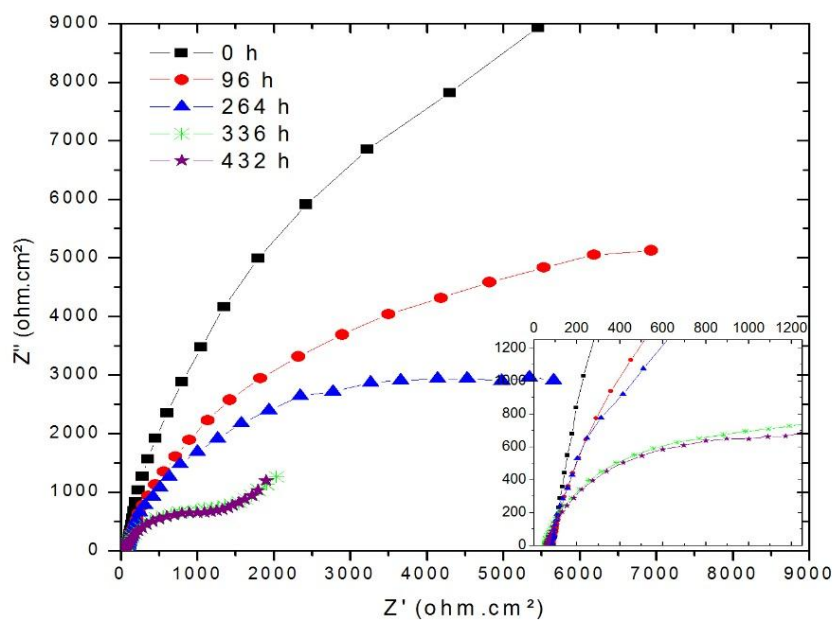
### 3.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

A continuación se muestran las gráficas de Bode y Nyquist de los valores obtenidos a inicios, mediados y a finales de dichas pruebas.

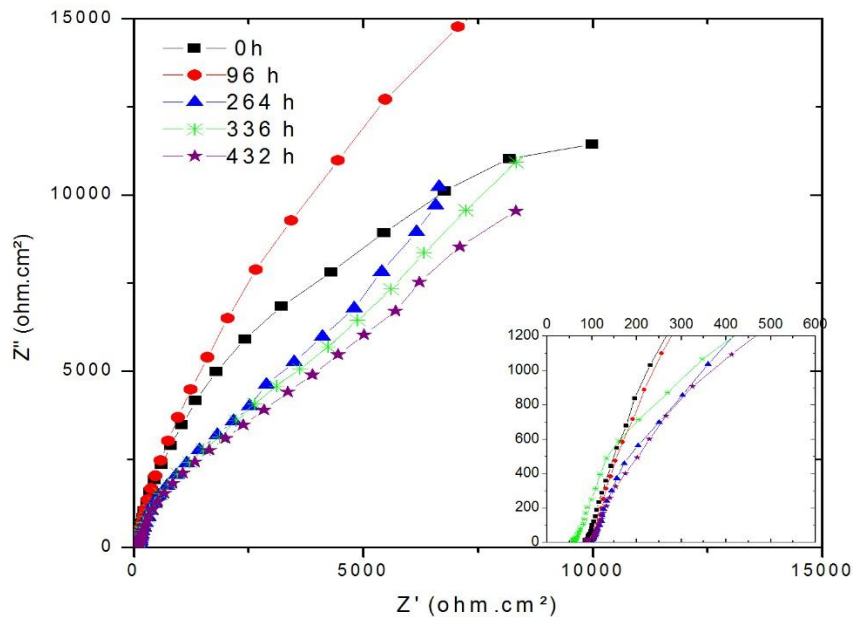
Diagramas de Nyquist



a)



b)

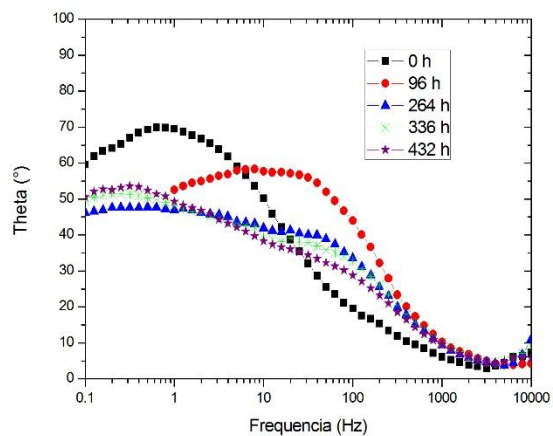


c)

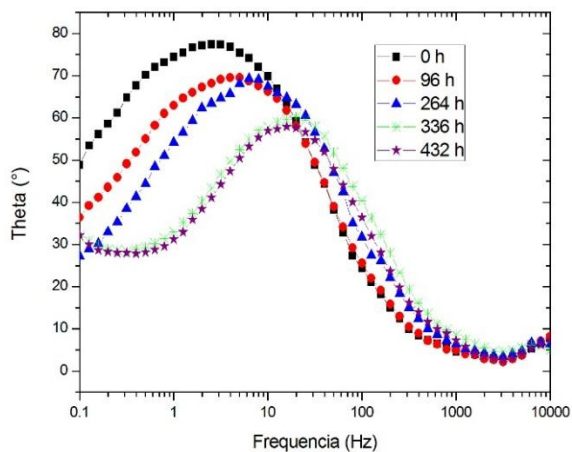
Graf. 3.1 Diagrama de Nyquist – a) Recubrimiento de NiP, b) Recubrimiento NiP- Cu, c) Recubrimiento NiP-C623, a diferentes valores de tiempo.

En las Gráficas 3.1 se observa la presencia de semicircunferencias que podrían sugerir una idea de la resistencia a la corrosión asociada a los recubrimientos y a una resistencia global del sistema. Como se puede apreciar en la Gráfica 3.1 (a) la resistencia que presenta la probeta únicamente niquelada tiene una mejoría a las 96[h] pero dicha resistencia decrece, esto probablemente sucede debido a la presencia de óxidos de Fe, los cuales no suelen tener una buena adherencia por lo cual se desprenden y desprotegen al sustrato, dejando nuevamente libres las porosidades y fracturas por las cuales se oxida el sustrato.

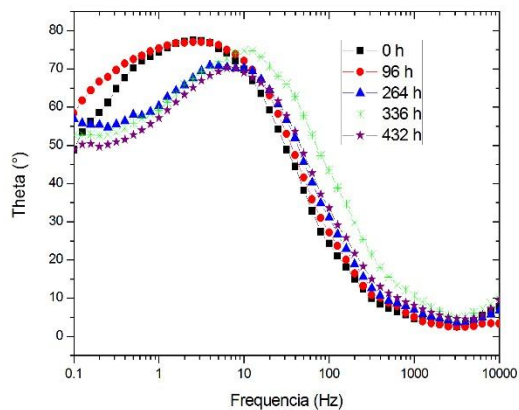
Ahora bien en realizando una comparativa de los niquelados que contienen una capa intermedia se distingue una diferencia significativa entre sí. Se observa que el sistema NiP-Cu, Gráfica 3.1 (b), tiene una tendencia a deteriorarse paulatinamente a medida que pasa el tiempo; sin embargo para el caso de la capa NiP-C623, se muestra un comportamiento mucho más favorable que en los otros dos casos, dicho sistema alcanza un máximo a las 96 [h], y disminuye, sin embargo muestra una tendencia a intersectar los semi círculos en puntos más lejanos sugiriendo una mayor resistencia a los procesos corrosivos.



a)



b)



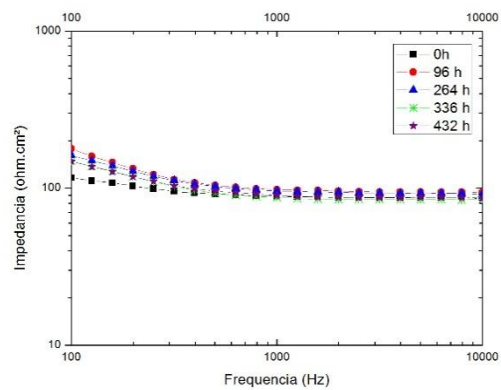
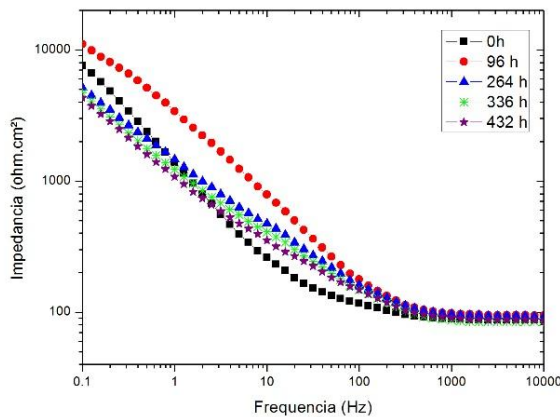
c)

Graf. 3.2. Diagrama de Bode de Angulo Theta° contra Log10 de la frecuencia – a) recubrimiento de NiP, b) Recubrimiento de NiP- Cu, c) Recubrimiento de NiP- C623,

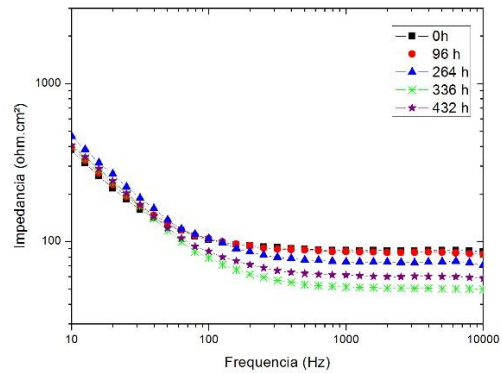
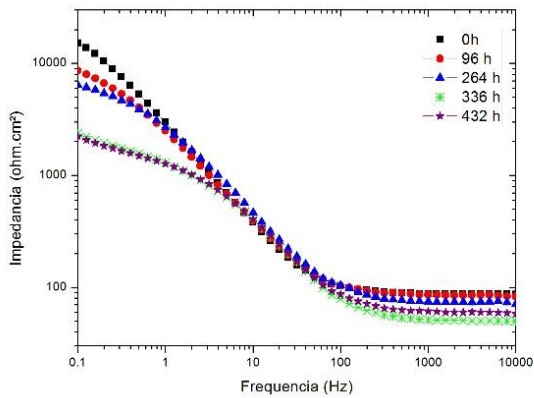
Ahora bien, analizando las Gráficas 3.2 correspondientes a el diagrama de ángulo de fase, podemos observar la posible presencia de dos picos iniciales que podrían estar siendo leídos como uno solo, abarcando dos procesos corrosivos. Analizando el pico inicial a bajas frecuencias podemos asociar el comportamiento del mismo con la resistividad del sistema a los procesos de corrosión por lo cual observando la capa de NiP , Grafica 3.2 (a) tiene una tendencia a disminuir su ángulo de fase e incrementar la frecuencia, lo cual nos indica primeramente un posible deterioro del material al tener un valor inicial de Theta de  $70^\circ$  y disminuir a un valor cercano a los  $35^\circ$  al final de la prueba. Mientras que los valores de frecuencia característica tienden a incrementar, lo cual sugiere una aceleración en los procesos corrosivos, teniendo un valor inicial cercano a 1 [Hz.] y final de 20 [Hz] al final de la prueba.

En cuanto al sistema NiP-Cu Gráfica 3.2 (b), se observa una tendencia a disminuir su ángulo de fase con el paso del tiempo reportando un valor inicial de  $75^\circ$  aproximadamente y final de  $55^\circ$  aproximadamente, por otro lado analizando el corrimiento de la frecuencia, encontramos que de igual manera que el caso de únicamente NiP se aprecia una tendencia a incrementar los rangos de frecuencia característica, reportando un valor inicial de cercano a los 3[Hz] y final de 20[Hz] aproximadamente.

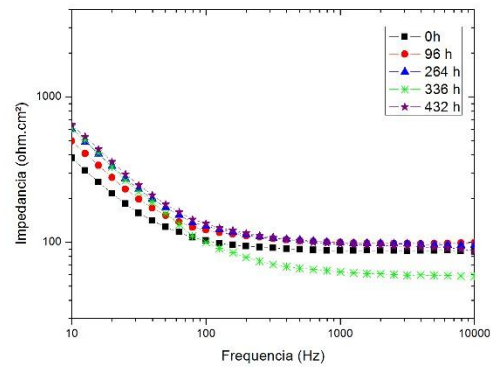
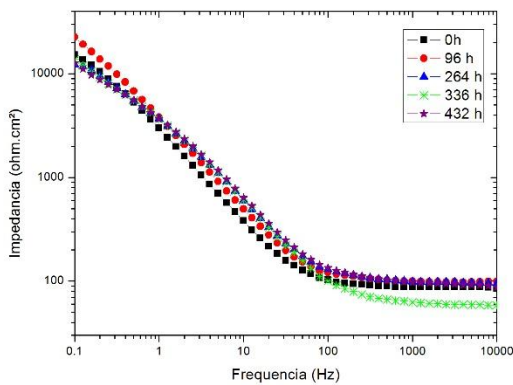
Finalmente analizando el sistema NiP-Cu623 vemos una respuesta favorable en comparativa con los otros dos casos, teniendo un deterioro menor del sistema asociado al ángulo de fase al tener un valor inicial de  $80^\circ$  y final de  $70^\circ$ . En cuanto a la aceleración de los procesos se observa que es menor al tener un valor inicial de 2 [Hz] y final de 10[Hz].



a)



b)



c)

Graf. 3.3 Diagrama de Bode de  $\text{Log}_{10}$  de la impedancia contra  $\text{Log}_{10}$  de la frecuencia – a) recubrimiento de NiP, b) Recubrimiento de NiP- Cu, c)Recubrimiento de NiP- C623

Asociando los valores reportados en las gráficas de módulo de impedancia, Gafica 3.3. Podemos observar que para el caso de la probeta de NiP, Gráfica 3.3 (a) encontramos una región plana a altas frecuencias la cual se relaciona con la respuesta de la capa, la cuál para este caso muestra un comportamiento estable a lo largo del tiempo que se encuentra en un valor aproximado de  $100 \text{ [ohm}\cdot\text{cm}^2]$ , en cuanto al lado de bajas frecuencias suponiendo la presencia de una segunda región lineal en el corte con el eje de las ordenadas, se puede asociar dicho valor con una resistencia global del sistema la cual tiene un valor máximo de los  $10000 \text{ [ohm}\cdot\text{cm}^2]$  aproximadamente y decrece a un valor cercano a los  $4000 \text{ [ohm}\cdot\text{cm}^2]$ . Dicha situación corrobora lo previamente descrito en las gráficas anteriores, que esta capa tiene una mejor respuesta que la capa NiP-Cu, Gráfica 3.3 (b), la cual muestra a altas frecuencias que el valor decrece paulatinamente a partir de los  $100 \text{ [ohm}\cdot\text{cm}^2]$ . Observando a bajas frecuencias, setiene un valor de impedancia máximo cercano a los  $11000 \text{ [ohm}\cdot\text{cm}^2]$ , pero

que decrece hasta un valor estimado de  $2500[\text{ohm}\cdot\text{cm}^2]$ , mostrando así que este sistema se deteriora paulatinamente con el paso del tiempo.

Ahora bien analizando el sistema NiP-Cu623, Gráfica 3.3 (c), podemos observar una mejora en su resistencia a los procesos corrosivos, puesto que a altas frecuencias la capa tiene una tendencia a aumentar con el paso del tiempo, registrando valores mayores a los  $100[\text{ohm}\cdot\text{cm}^2]$  en casi todas las lecturas, por otro lado, cuenta con valores asociados a la resistividad total del sistema mayores a los  $10000 [\text{ohm}\cdot\text{cm}^2]$  incluso después de las  $432[\text{h}]$ , al tener un valor inicial de  $11000[\text{ohm}\cdot\text{cm}^2]$  y un valor máximo cercano a los  $15000[\text{ohm}\cdot\text{cm}^2]$ . A pesar de que existe un decremento a las  $336[\text{h}]$  se observa nuevamente una tendencia del sistema global a incrementar sus valores de resistencia; se puede atribuir dicha condición de recuperación global del sistema, a la capa de óxidos, que al tratarse posiblemente de óxidos de Aluminio con mayor adherencia, lograron cubrir las porosidades y/o grietas mejorando nuevamente la resistencia del sistema y protegiendo al sustrato.

A continuación, en la Figura 3.1, se muestran las imágenes de las probetas al final de las pruebas de impedancia, se puede observar que la presencia de óxidos toma un papel significativo en el desempeño del sistema ante los efectos corrosivos.

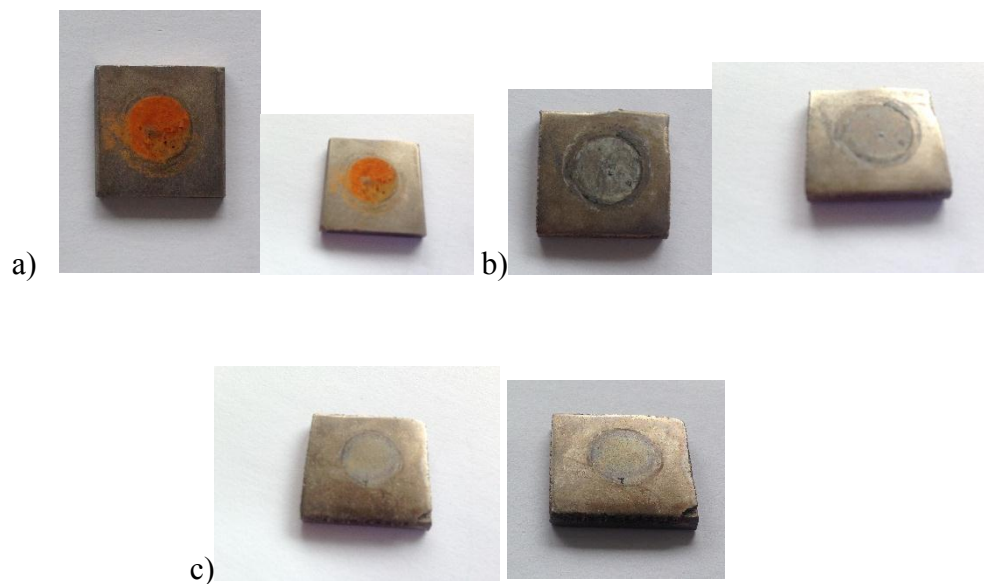


Fig. 3.1 Probetas después de prueba de Impedancia– a) recubrimiento de NiP, b) Recubrimiento de NiP- Cu, c)Recubrimiento de NiP- C623



## CONCLUSIONES:

### **Proyección térmica**

- Se generaron recubrimientos con buena deposición utilizando la proyección por polvo. Se puede concluir que es un proceso que genera recubrimientos con una homogeneidad importante. Es un proceso rápido, sin embargo por la estructura misma de la pistola es un proceso que se vería interrumpido al implementarse en elementos de mayor tamaño, puesto que el tamaño del contenedor del polvo es relativamente pequeño. Por otro lado sería deseable tener una manera más precisa de regular el flujo de polvos.
- La proyección por alambre manifiesta mayor porosidad pero de igual manera una buena deposición, al generar capas en las que en el material de aporte no se distinguen gotas que no alcanzaron a integrarse como un solo conjunto; tiene como ventaja la generación de recubrimientos con mayor espesor en menor tiempo, así como la posibilidad de disponer del material de aporte de manera continua, haciendo de este un método más constante y por lo tanto con una mayor viabilidad de uso en procesos industriales.

### **Niquelado químico.**

- Se obtuvieron recubrimientos sobre una superficie de acero virgen observando en las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido una deposición homogénea y sin porosidades, a lo largo de la superficie con un espesor de capa delgado pero irregular en comparativa con los obtenidos con una capa intermedia. El espesor de esta capa es de 4 [ $\mu\text{m}$ ].
- Se obtuvieron recubrimientos con una capa intermedia generada por proyección térmica de dos materiales diferentes, cobre y la aleación C623, obteniendo para ambos casos un incremento en el espesor de la capa obtenida a través del baño, siendo la aleación C623 la que de alguna manera favoreció la obtención de un espesor de capa mayor con un valor de 7.5 [ $\mu\text{m}$ ], mientras que el de la probeta proyectada con cobre es de 5.67 [ $\mu\text{m}$ ].
- El tiempo de deposición y el material del cual está formada la superficie a recubrir a través de Niquelado Químico (NiP) está relacionado con el espesor de la capa, la cual protege al sustrato de los efectos corrosivos.
- El contenido de fósforo conseguido durante el baño, permite clasificarlo dentro de un Niquelado de bajo contenido de Fósforo.

### **Caracterización electroquímica de los recubrimientos.**

- A través de la respuesta electroquímica de las probetas se puede asociar un incremento en la resistencia a la corrosión con el incremento en el espesor de la capa de NiP obtenida considerando que la aleación C623 tiene una diferencia notable con respecto a los otros dos casos.
- Se observa un mejor desempeño de las probetas recubiertas con una capa intermedia de la aleación C623, obteniendo una resistencia final (12661 (ohm.cm<sup>2</sup>)) a las 432[h] lo cual es aproximadamente tres veces mayor al recubrimiento de únicamente níquel (4305.9 (ohm.cm<sup>2</sup>)). Dicha situación podría atribuirse a diferentes elementos como podría ser el aumento en la capa de NiP sobre este, o bien a que la capa de la aleación C623 podría estar funcionando como ánodo de sacrificio, tomando en cuenta que los óxidos de aluminio que podrían tener lugar durante el proceso, podrían estar bloqueando los poros o fracturas, aumentando la resistencia a la corrosión global del sistema.
- El desempeño de las probetas cuya capa intermedia es de cobre manifiesta la menor resistencia final, lo cual sugiere un comportamiento desfavorable con el paso del tiempo.
- La selección del material de aporte en la capa intermedia, puede mejorar significativamente la resistencia a la corrosión del sistema, considerando que debido a la presencia de este material, la capa adquiere diferencias, no solo de espesor si no de generación de óxidos, los cuales pueden ser una ventaja importante en la protección que la capa ofrece al sustrato.

Es importante destacar los posibles campos de investigación de este proceso entre los que se consideran importantes el sometimiento de las probetas a un tiempo de EIS mucho mayor con el fin de apreciar las ventajas de los recubrimientos, por otro lado, podría ser favorable el estudiar la influencia del espesor y material de la capa intermedia como medio promotor de adherencia de la capa de níquel, lo cual deja un amplio espacio de investigación.

## Bibliografía

1. Barba-Pingarrón A., Hernández-Gallegos M. A., Sánchez-de Jesús F., Bolarín-Miró A.M., Valdez-Navarro R., Rosas-Islas J. C., Suárez-Juárez E., Morales-Soto J. A., Obtención de Recubrimientos Duplex Níquel Químico, Proyección térmica de acero de bajo carbono. Efecto en su comportamiento en un medio salino; 2011, Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Facultad de Ingeniería. UNAM, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
2. Enríquez García Raquel, Corrosión de metales un proceso espontáneo, Proyecto INFOCAB SB202507, Subtema 1.2.4, UNAM. (Disponible: <http://prepa8.unam.mx/academia/colegios/quimica/infocab/unidad124.html> (04/04/2015)).
3. González Fernández José A., 1989, Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas, capítulo 3, Consejo superior de investigaciones científicas, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid.
4. Bilurbina Luis, Liesa Fco., Iribarren José (2003), Corrosión y protección, Barcelona, Ediciones UPC.
5. Mendoza Juan, Durán Rubén, Genescá Juan, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, Notas Inst. mexicano del Petróleo, Facultad de Química UNAM.
6. Camargo Ulises, Olaya Flórez John Jairo (2010), Impedancia electroquímica, Interpretación de diagramas típicos con circuitos equivalentes, Dyna vol. 77 num.164, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Colombia.
7. Abello Linde, S.A.,Lindspray, Proyección Térmica de Superficies, Barcelona España (Disponible: [http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/LINSPRAY%20proyecci%C3%B3n%20t%C3%A9rmica%20de%20superficies%2013049-0207316\\_60056.PDF](http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/LINSPRAY%20proyecci%C3%B3n%20t%C3%A9rmica%20de%20superficies%2013049-0207316_60056.PDF) (07/12/15))
8. J. Fernández, J.M. Guilemany M. Gaona, CPT, La proyección térmica en la obtención de recubrimientos biocompatibles: ventajas de la proyección térmica por alta velocidad (HVOF) sobre la proyección térmica por plasma atmosférico (APS), 2005 pp. 16-39. Universidad de Barcelona.
9. Pawlowski Lech 2008, The Science and Engineered Thermal Spray Coatings Segunda Edición, Editorial John Wiley and Sons, pp. 1-32, Inglaterra.

10. Gordon England Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coatings Industry (2013), Inglaterra (Disponible: <http://www.gordonengland.co.uk/xtsc.htm> (11/11/2015)).
11. Davis JR (2004), Coatings Equipment and Theory, Handbook of thermal spray Technology, pp. 54-77, Estados Unidos, ASME International.
12. Vázquez Vaamonte Alfonso José, Damborenea González Juan (2000), Ciencia e Ingeniería de la superficie de los materiales metálicos, Capítulo 15, Consejo Superior de Investigaciones Científicas Madrid, 2000.
13. Ferrocortes 2015 (Disponible: <http://www.ferrocortes.com.co/laminas/lamina-calidad-estructural-astm-a36>(08/07/2015))
14. Donaldson Company 2014, Granallado abrasivo. (Disponible: <http://www2.donaldson.com/torit/es-mx/pages/applications/blasting.aspx> (08/07/2015))
15. Mec-Mex (2015), Gabinetes Estándares de Blasting (Disponible: <http://mecmex.com/gabinetes-estandar-de-blasting/>(08/07/2015))
16. <http://www.ebay.es/itm/222246-Aire-Arena-Granallado-Blaster-Herramienta-Old-Pintura-Removedor-De-oxido-/271686391536> (08/07/2015)
17. Cabuto Osuna José Manuel 2011, Tesis de licenciatura, Generación de electrodos de electroerosión mediante la técnica de proyección térmica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
18. Spray Tech, Flame Spray Technologies, Noviembre 2009
19. MANUAL FOR OPERATION & MAINTENANCE OF SPRAYJET-98
20. Morales Soto Juan Alberto, Suárez Juárez, Rosas Islas (2013), Obtención y caracterización de sistemas proyección térmica níquel químico sobre aceros de bajo carbono, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

21. Aguilar Nallely, Microscopio electrónico, Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados, Monterrey México (Disponible: <http://mty.cimav.edu.mx/sem/> (05/12/15)).
22. Meléndez Pizarro Carmen, Camacho Dávila Alejandro 2009 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, Facultad de Ciencias químicas, Universidad de Chihuahua, Aventuras del pensamiento.