



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN TRIBOLÓGICA Y
ELECTROQUÍMICA DE UN RECUBRIAMIENTO Ni-P
CON WC/SiC SOBRE UNA FUNDICIÓN NODULAR**

T É S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

FERNANDO SANDINO PÉREZ MORENO



**DIRECTOR DE TESIS:
M.C. RAÚL GILBERTO VALDEZ NAVARRO
(2016)**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX



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.

A mi Madre Emma Moreno Barrera. Por el gran amor, devoción, apoyo ilimitado e incondicional que siempre me ha dado, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, por ser la mujer que me dio la vida y me sigue enseñando a vivirla. Por buscar hacer de mí un hombre de bien, por su ejemplo como profesionalista, por su entereza en lograr las metas propuestas. Por su infatigable energía de cuidarme y guiarme, gracias Mamá.

La más bella palabra en labios de un hombre es la palabra madre, y la llamada más dulce: madre mía. (khalil Gibran).

Agradezco a mi Padre Ing. Erasmo Pérez González, por el valor, fuerza e inteligencia que ha tenido para levantarse ante cualquier adversidad, por haberme alimentado desde pequeño y darme las herramientas pasado el tiempo para hacerme libre, entre ellas la educación. Pero sobre todo, por su ejemplo de templanza ante la adversidad, gracias Papá.

Un hombre de carácter podrá ser derrotado, pero jamás destruido. (Ernest Hemingway).

Agradezco a mi asesor de Tesis, M.C. Raúl Gilberto Valdez Navarro, su esfuerzo, conocimientos, orientaciones su paciencia y motivación que han sido fundamentales para mi formación como Ingeniero y para llegar a buen puerto la terminación de esta Tesis.

A los Drs: Dra. Alba Covelo Villar y el Dr. Miguel Ángel Hernández Gallegos por siempre contar con su guía y apoyo durante las estancias en el laboratorio de CENISA. Por alentarme y corregirme cuando fue necesario, fueron una luz en mi camino.

Al Dr. Arturo Barba Pingarrón, por su comprensión y apoyo a lo largo de mi estancia en la Facultad de Ingeniería que, sin importar el sentido del temporal a favor o en contra siempre me cuidó y guió. Sus observaciones altamente enriquecedoras en mi tesis y sus amistades me brindaron la oportunidad de mejorar este proyecto.

Al M.I. Gabriel López Domínguez por su contribución como profesor y amigo en mi formación como Ingeniero en la etapa media de la carrera. Sus pláticas reflexivas y siempre motivantes me ayudaron a consolidar la Fe en mí.

Al M.I. Rogelio Darío Gutiérrez Carrillo por su apoyo siempre incondicional como amigo e Ingeniero a lo largo de la carrera. El saber que lo encontraría en los pasillos de la facultad era un sentimiento muy agradable.

Agradezco a todo el personal del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) por su orientación, así como a los Drs. Ana Bolarín Miró y Félix Sánchez de Jesús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por su guía en la realización de los procesos de niquelado químico. Se extiende un agradecimiento adicional al Departamento de Metalurgia de la Facultad de Química de la UNAM, en especial al profesor M.I. Agustín Ruiz Tamayo por su auxilio y asesoría en la fabricación de la fundición nodular.

Agradezco al técnico Iván Puente Lee de la Unidad de Microscopía Electrónica de la Facultad de Química de la UNAM.

Asimismo, agradezco al Proyecto PAPIIT IT102612 *Desarrollo de tecnologías de modificación superficial para la optimización del rendimiento de materiales* por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A mis amigos de la facultad, compañeros de andanzas, cómplices de mil aventuras, apoyo de mis tristezas. Nombrar a uno sería traición a todos. Siempre tuve el apoyo de ellos, mis amigos. Nunca importó la naturaleza de mis problemas siempre acudieron a socorrerme, siempre leales. A todos ustedes, gracias totales.

“Los amigos son como la sangre cuando se está herido, acuden sin que se les llame”. (Anónimo).

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que me cobijo desde preparatoria y que fue y será siempre mi segunda Madre.

Protegedme de la sabiduría que no llora, de la filosofía que no ríe y de la grandeza que no se inclina ante los niños. (khalil Gibran).

Y finalmente agradezco a la vida misma, por darme la oportunidad de estar sano, que lo demás lo pongo yo.

El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable, para los temerosos lo desconocido, para los valientes es la oportunidad. (Victor Hugo).

ÍNDICE

Introducción	8
Objetivos	9
Hipótesis	9
Definición del problema	9
<u>Capítulo 1.0. Marco Teórico.</u>	
1.1.1. Generalidades sobre las fundiciones	10
Clasificación de las fundiciones	10
Principales constituyentes microscópicos de las fundiciones	12
Producción mundial de fundición de metales	13
Clasificación por material fundido en la industria mexicana	14
Resistencia a la corrosión	17
1.1.2. Fundiciones nodulares	17
Fabricación	17
Propiedades y aplicaciones de las fundiciones nodulares	19
Capítulo 1.2. Niquelado químico	21
1.2.1 Tipos de niquelado	21
Niquelado mate	21
Niquelado brillante	21
Niquelado químico	23
1.2.2 Propiedades y aplicaciones del niquelado químico	25
Adherencia	26
Resistencia a la corrosión	26

Dureza y resistencia al desgaste	27
1.2.3 Recubrimiento del níquel químico compuesto	28
Coeficiente de fricción	29
Sistemas recubrimiento partícula	28
Capítulo 1.3 Materiales compuestos.	30
1.3.1 Generalidades	30
Introducción a los materiales compuestos	30
Materiales compuestos de matriz metálica	31
Materiales de la matriz	32
Matrices de metal	32
Materiales del refuerzo	34
Tipos de refuerzo	35
Capítulo 1.4 Corrosión y desgaste.	
Corrosión	36
Corrosión química	36
Ataque por metal líquido	36
Potencial del electrodo en las celdas electroquímicas	37
Ensayo de corrosión por inmersión	38
Tribología	39
Desgaste	40
<u>Capítulo 2.0. Desarrollo experimental</u>	
2.1 Introducción	41
Diagrama general de la etapa de experimentación	41
Obtención del hierro nodular	42

Descripción del proceso de fundición	43
Tabla con equipo primordial	44
Galería de imágenes	46
2.2 Manufactura de las probetas	47
Diagrama experimental para la manufactura de las probetas	48
Descripción de la manufactura de las probetas	48
Equipo necesario para la manufactura de las probetas	49
Galería de imágenes	50
2.3 Recubrimiento de las probetas	51
Diseño experimental para la obtención del recubrimiento de níquelado simple y compuesto	51
Reactivos para la formulación de la solución de níquelado químico	52
Realización del recubrimiento	53
Equipo primordial para la obtención de los recubrimientos de níquelado simple y compuesto	54
Galería de imágenes de equipo necesario	55
2.4 Caracterización de los recubrimientos	55
5	
Diagrama experimental de la caracterización de los casos obtenidos	56
2.5 Desgaste	57
2.6 Evaluación Electroquímica	59
Tabla con equipo primordial de caracterización	60
Galería de imágenes	61

Capítulo 3.0. Resultados y análisis

3.1	Obtención de la fundición nodular	62
	Tabla de composición química	62
	Caracterización de la fundición nodular	63
	Galería de imágenes de los recubrimientos obtenidos	65
3.2	Análisis imágenes SEM/EDX y microscopio óptico	67
	Tabla de resumen de espesores	
	de los diferentes recubrimientos	75
	Ensayo de mecánica de desgaste	76
	Ensayo de corrosión por inmersión	77
	Análisis de resultados globales	80
	Conclusiones finales	81
	Bibliografía	81

Introducción.

Hoy en día desde el ama de casa, el industrial y los desarrolladores de tecnología, van solicitando un aumento de la durabilidad de sus utensilios ya sea con motivo de un confort del devenir diario, por ofrecer un producto novedoso o por necesidades globales.

Lo anterior sumado al afán de investigación propio de la academia es razón por la cual se decidió investigar como acrecentar las propiedades mecánicas y electroquímicas tales como la resistencia al desgaste y a la corrosión respectivamente de una fundición nodular. Se escogió una fundición nodular porque es un material que en sí mismo ya tiene buenas propiedades contra la corrosión y el desgaste pero se busca acrecentar dichas propiedades.

Pero todo esto, ¿cómo? :

Una vez obtenido el material se realizó un recubrimiento de níquel compuesto sobre la superficie, ya que es en dónde se realizaron las pruebas mecánicas y electroquímicas que evaluaron las mejoras o no del recubrimiento propuesto.

El material de las probetas a utilizar fue de hierro nodular, material que fué obtenido mediante fundición en los laboratorios de Ing. Metalúrgica de la Facultad de Química UNAM. De ahí se obtuvo el material en forma de varillas para posteriormente rectificarlo y manufacturar las probetas en tornos mecánicos y CNC en la Facultad de Ingeniería.

Una vez que se obtuvieron las probetas se procedió al recubrimiento de ellas mediante niquelado químico adicionando partículas duras tales como carburos de tungsteno y carburos de silicio según sea el caso, esto se realizó en el Lab. de Materiales Particulados en la UAEH (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo).

Lo anterior es del tema de materiales compuestos que consiste en combinar familias de materiales (polímeros, cerámicos y metales). En este caso el sustrato o material base es el hierro nodular y el recubrimiento es de cerámicos inmersos en níquel.

Una vez que se obtuvieron las probetas con 5 tipos de recubrimientos, se realizaron estudios con microscopía electrónica de barrido (SEM) donde se estudiaron en qué distribución se adhirieron los carburos junto con el níquel, esto se realizó en el edificio E de la Facultad de Química e Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM.

Posteriormente en el Posgrado de Ingeniería en el Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) de la F.I. de la UNAM se realizó la prueba de desgaste, así como la prueba de corrosión para poder identificar si mejoraron dichas propiedades o no.

Finalmente se analizaron todos los resultados y estudios para establecer una conclusión final.

Objetivo.

Mejorar las propiedades de resistencia al desgaste y a la corrosión de un hierro nodular mediante diferentes recubrimientos de Ni-P que serán depositados por la técnica de niquelado químico con adición de partículas de carburo silicio/tungsteno.

Hipótesis.

Al aplicar la técnica de niquelado químico con partículas de SiC (carburos de silicio) y WC (carburos de tungsteno) sobre el hierro nodular, se mejorarán tanto las propiedades tribológicas en la superficie del material, así como también las propiedades electroquímicas. Se espera que mejoren las propiedades antes mencionadas por el recubrimiento de níquel compuesto.

Definición del problema.

Los recubrimientos por niquelado químico se han desarrollado en los últimos 50 años y desde entonces se han reportado diferentes aplicaciones en campos industriales. Tales como la aplicación en una subcapa en los discos duros para computadoras, pistones de freno, etc.

Estos recubrimientos constituidos principalmente por combinaciones de Ni-P, ofrecen características interesantes, tales como: alta versatilidad de la deposición sobre distintos materiales (metales, polímeros y cerámicas), espesores homogéneos y reproducibles (no importa la forma o geometría de las muestras), estructuras amorfas o cristalinas depositadas como consecuencia de variaciones en la composición química de los baños de niquelado y la disponibilidad de lograr tratamientos térmicos en los revestimientos o la incorporación de partículas duras en la superficie con el fin de lograr la mejora en las propiedades de desgaste.

Estos recubrimientos se estudiarán con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y electroquímicas que conducen a otras aplicaciones interesantes de las fundiciones nodulares.

CAPÍTULO 1.0.

MARCO TEÓRICO

GENERALIDADES SOBRE LAS FUNDICIONES

1.1 Fundiciones de hierro [1].

Clasificación de las Fundiciones.

La más antigua y conocida de las clasificaciones (observar Figura 1) de las fundiciones establece 3 grupos de acuerdo a la superficie de fractura: fundición blanca, gris y maleable. A estos 3 grupos se añade en la actualidad otro grupo, el de las fundiciones especiales, en el que se pueden incluir las fundiciones aleadas, las fundiciones nodulares o dúctiles, aciculares inoculadas, etc.

Las fundiciones son aleaciones de hierro carbono (y silicio) que generalmente contienen también manganeso, fósforo, azufre, etc. Son de mayor contenido en carbono que los aceros (2 a 4.5%) y adquieren su forma definitiva directamente por colada, sin ser sometidas a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. En general, no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse.

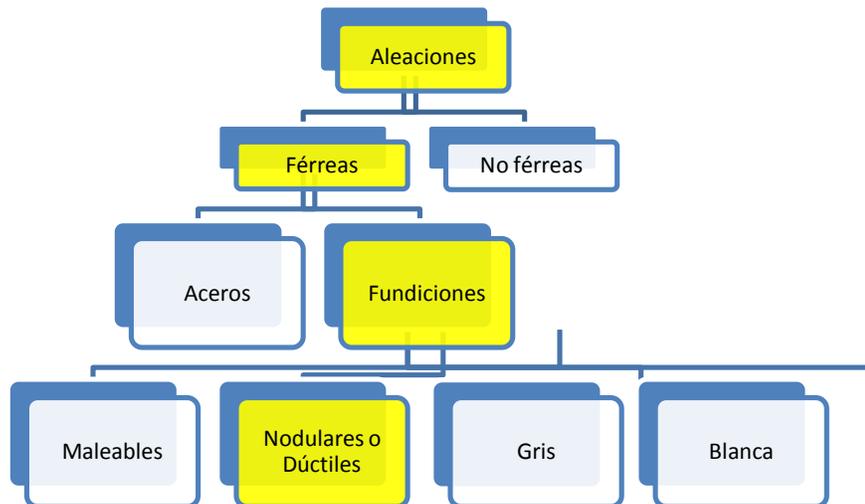


Figura 1. Diagrama de Aleaciones. [1]

Para la fabricación de piezas de fundición se emplea generalmente como materia prima fundamental el arrabio o lingote de hierro, así como también chatarras de fundición.

El contenido en silicio de las aleaciones hierro-carbono y la velocidad de enfriamiento tienen gran influencia en la formación de una u otra clase de fundición.

En el siguiente diagrama de fases (Figura 2) se representa el comportamiento de la fundición respecto a la temperatura.

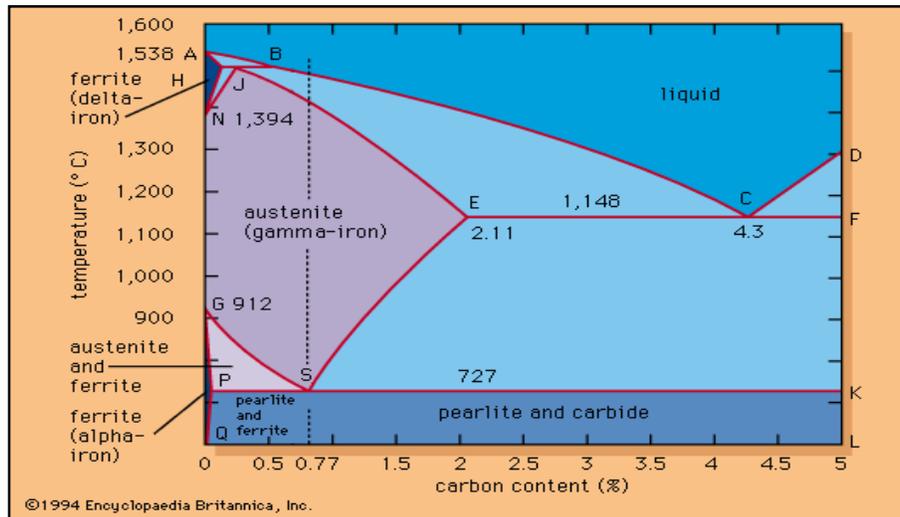


Figura 2 Diagrama de fases hierro-carbono.

Las velocidades de enfriamiento muy lentas favorecen la formación de fundición gris; el enfriamiento rápido tiende en cambio, a producir fundición blanca. Finalmente, el azufre y el manganeso ejercen una cierta influencia contraria a la del silicio, y favorecen la formación de fundición blanca.

Además de estos tres tipos de fundición, se fabrican también desde hace muchos años las fundiciones maleables que en lugar de obtenerse por simple fusión como las que se acaban de citar, se fabrican por recocido de la fundición blanca en condiciones especiales.

Principales Constituyentes Microscópicos de las Fundiciones [1].

Teóricamente las fundiciones pueden contener de acuerdo con el diagrama hierro-carbono de 1.7 a 6.67 % de carbono (Figura 2). Sin embargo, en la práctica varía de 2 a 4.5 % siendo lo más usual de 2.75 a 3.5 %, el contenido en silicio puede variar de 0.5 a 3.5 % y el de manganeso de 0.4 a 2 %.

Para conseguir ciertas características especiales se fabrican fundiciones aleadas que, además de los elementos citados, contienen también porcentajes variables de cobre, níquel y cromo.

Grafito.- El grafito es una forma elemental del carbono. Es blando, untuoso, de color gris oscuro, con un peso específico 2.25% C, que es aproximadamente 1/3 del total que tiene el acero. Se presenta en estado libre en algunas clases de fundiciones, ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características. Estas dependen fundamentalmente de la forma del grafito, del tamaño y de la cantidad en que se encuentre distribuido.

Con respecto a las fundiciones grises se puede decir que la presencia de grafito en cantidad importante, disminuye la dureza, la resistencia mecánica y el módulo de elasticidad en comparación con los valores que corresponden a la misma microestructura sin grafito, es decir, a la matriz que se puede considerar como un acero. El grafito también reduce casi a cero su ductilidad, tenacidad y su plasticidad.

En cambio, el grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión, así como también disminuye el riesgo de endurecimiento por desgaste mecánico en piezas de máquinas y motores, ya que en cierto modo actúa como un lubricante. También mejora la maquinabilidad y reduce las contracciones durante la solidificación.

Cuando se presenta en forma de rosetas (fundición maleable) o en forma esferoidal, la disminución de la tenacidad y resistencia es menor. Por ello estas fundiciones tienen mayores resistencias y alargamientos que las fundiciones grises ordinarias.

Ferrita.- En la ferrita de fundición, se observa que suelen contener en disolución cantidades muy pequeñas de silicio, en comparación con las cantidades que se encuentran en los aceros (que elevan su dureza y resistencia).

Perlita.- Aquí conviene señalar que, debido a la presencia de silicio, el contenido en carbono de la perlita de las fundiciones es inferior al de los aceros. Al variar en las fundiciones el silicio de 0.5 a 3 %, varía el porcentaje de carbono en la perlita de 0.5 % a 0.8 %.

Ledeburita.- Es el constituyente eutéctico que se forma en el enfriamiento de las fundiciones a 1145°C aproximadamente y está formado por 52% de cementita y 48% de austenita saturada.

La fundición maleable se obtiene como ya se ha señalado antes en dos etapas, primero se fabrica la fundición blanca y luego, por recocido de ésta, se obtiene la fundición maleable en la que el grafito tiene forma de roseta.

En la actualidad, existen otras clases de fundiciones con grafito nodular o, mejor dicho, esferoidal, fabricados con cerio o magnesio, que se obtienen por fusión directa llamadas fundiciones nodulares o dúctiles.

Producción mundial de fundición de metales.

La Figura 3 muestra gráficamente el nivel de producción de diferentes países, entre ellos México; cuyo valor de producción es de 56740 toneladas métricas, un valor muy bajo en comparación con países más industrializados como Estado Unidos y China con más de 3.5 y 8 millones de toneladas métricas respectivamente.

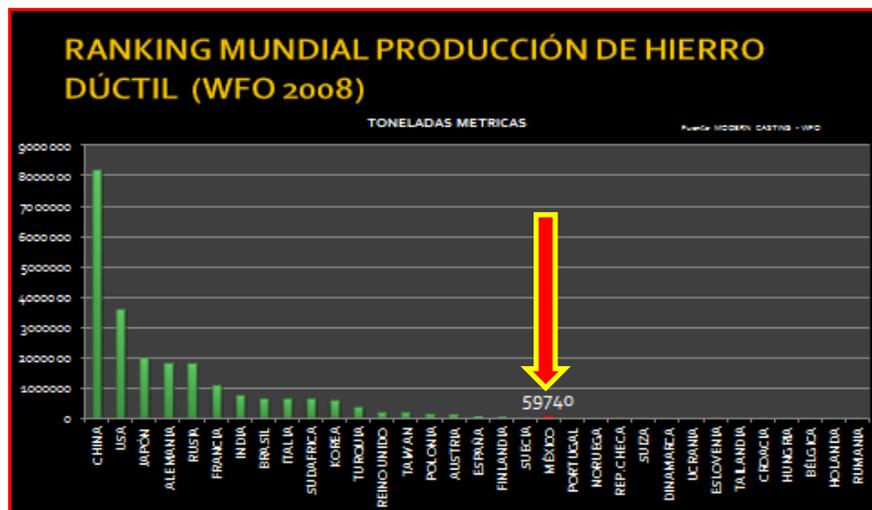


Figura 3 Comparativa de la Producción de Hierro Dúctil en México vs Mundo, donde se observa que México ocupa el lugar 20. [2]

La Figura 4 muestra gráficamente el porcentaje de producción de diferentes fundiciones a nivel mundial, en donde se puede destacar la importancia de las aleaciones ferrosas, que participan con el 83% del total de la producción.



Figura 4 Producción mundial de metales, se observa un tercer lugar del hierro dúctil. [3]

Clasificación por material fundido en la industria mexicana

Ahora bien, la Figura 5 muestra gráficamente el porcentaje de producción de diferentes fundiciones tanto ferrosas como no ferrosas en México, en donde se puede destacar la importancia de las aleaciones ferrosas, que participan con el 36% del total de la producción, siendo la fundición gris y los aceros los que más producción tienen con un 23% y 18% respectivamente.



Figura 5 Porcentaje de producción de las fundiciones en México . [2]

La Figura 6 muestra la localización geográfica de las regiones donde se produce algún tipo de fundición, destacando la zona centro y norte del país

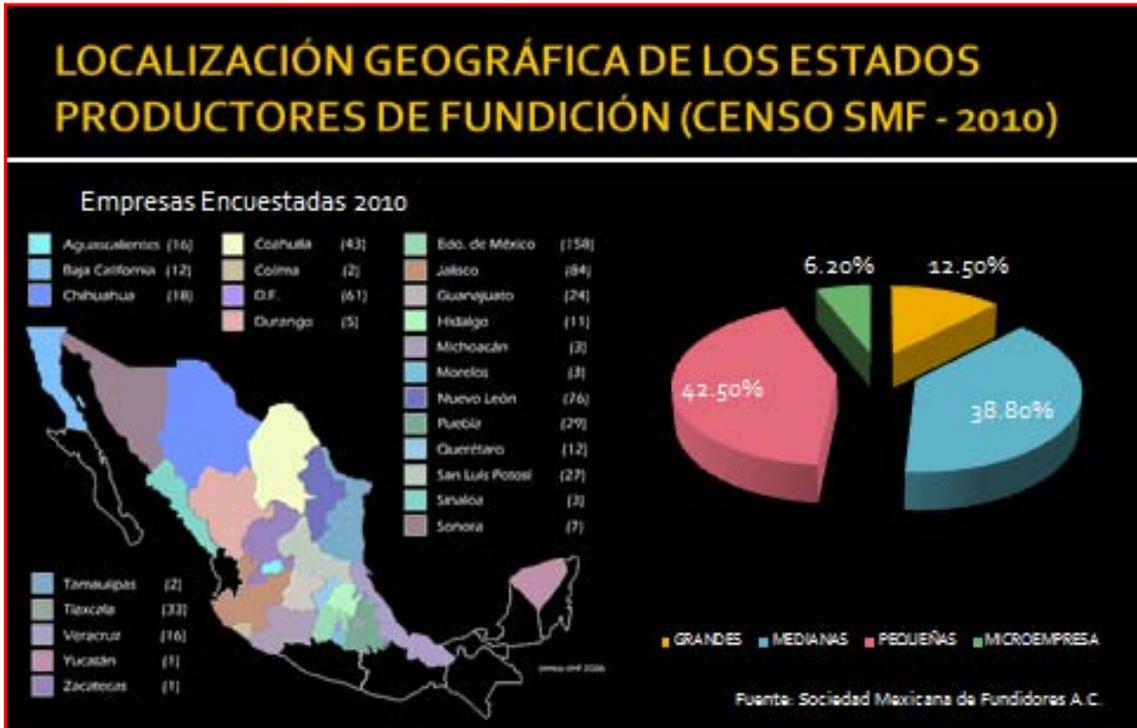


Figura 6 Ubicación Nacional de Fondidores. [2]

La Figura 7 muestra gráficamente el porcentaje de abastecimiento de la industria de la fundición hacia otros sectores productivos del país, en donde se puede destacar la importancia de las fundiciones en la industria automotriz, que participan consumiendo el 74.3% del total de la producción, le siguen industrias como la metalmecánica con un modesto 6.4%.

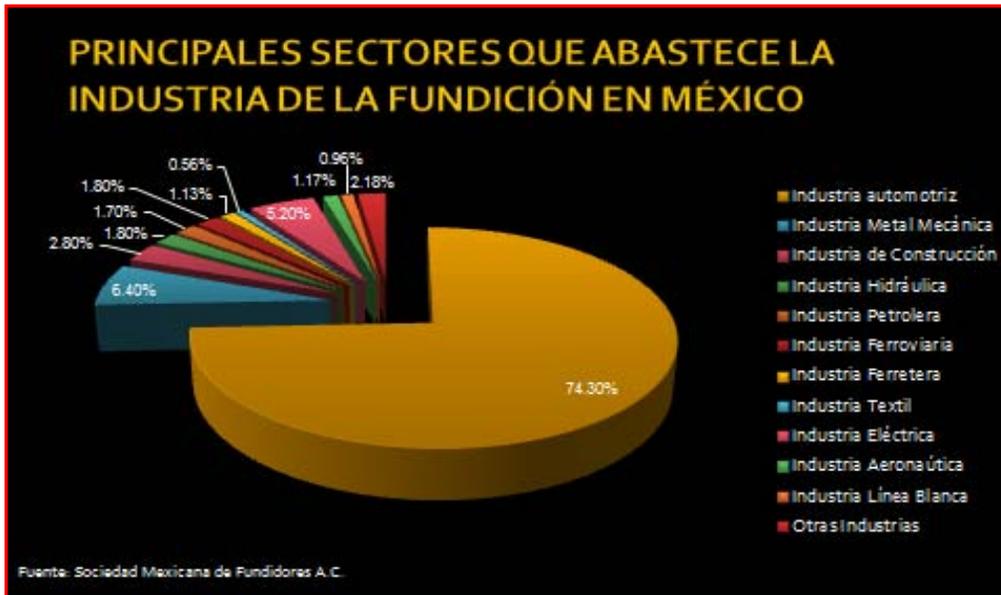


Figura 7 Destino de la producción nacional de fundición. [2]

La Figura 8 muestra algunas de las piezas que se fabrican de distintas fundiciones en el proceso de fabricación de un vehículo. Cabe destacar que las investigaciones sobre la pertinencia de sustituir por fundición algunas piezas que originalmente se desarrollan por otros procesos es cada vez mayor debido a las ventajas competitivas que estas ofrecen



Figura 8 Posible ubicación de piezas fundidas con hierro dúctil en un automóvil. [2]

Resistencia a la corrosión.

Las fundiciones tienen en general una buena resistencia a la corrosión, a los ambientes de ciudades industriales y otros medios ligeramente corrosivos bastante superior a la de los aceros ordinarios. Por eso, las fundiciones son muy empleadas para la fabricación de piezas de maquinaria o instalaciones que quedan a la intemperie o en contacto con el agua como canalizaciones, bombas, radiadores, calderas, compresores, etc.

Además, la superficie un poco rugosa de las fundiciones puede cubrirse muy bien con brea, alquitrán u otras películas protectoras, que mejoran aún más su propia resistencia.

“La marina de guerra francesa observó que en ensayos realizados durante un año con agua de mar encontró que la pérdida de peso por decímetro cuadrado es en el acero ordinario de 27.3 miligramos por día y en la fundición gris es solo de 14.5 miligramos por día” [5].

1.1.2 Fundiciones nodulares.

Fabricación

Para la fabricación de fundiciones nodulares, se pueden emplear fundiciones de composición bastante diversa, los mejores resultados se obtienen con porcentajes de carbono y de silicio superiores a los que generalmente se suelen emplear para las fundiciones ordinarias dedicadas a la fabricación de piezas para usos varios. Se suele emplear, por ejemplo, 3.5% C y 2.5% Si, con carbonos equivalentes de 4.4 a 4.7%, recomendando los valores más altos para piezas delgadas y los valores más bajos para piezas gruesas.

La adición a la fundición líquida del magnesio o de otros elementos alcalinos o alcalinotérreos, que por sus propiedades actúan como desoxidantes, desulfurantes y estabilizadores de carburos, alteran el mecanismo normal de solidificación de la fundición, provocando la separación del grafito en forma nodular.

La microestructura de estas fundiciones en bruto, suele estar constituidas por esferoides de grafito rodeados por aureolas de ferrita sobre un fondo de matriz de perlita, como podemos observar en la Figura 9. O bien de ferrita.

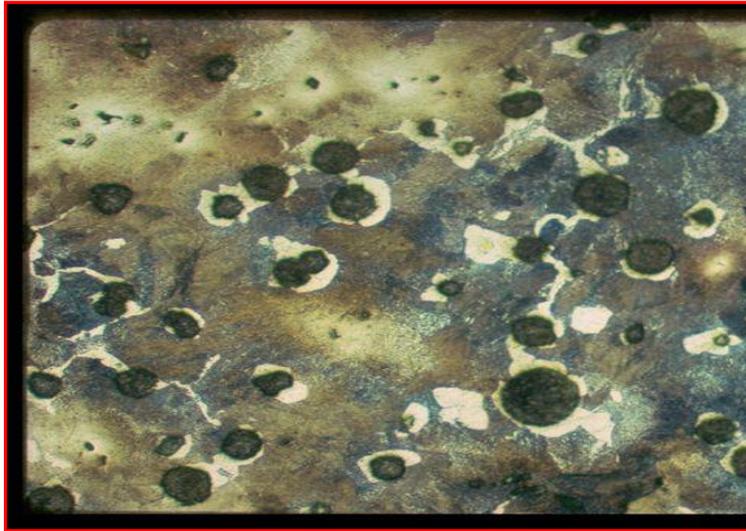


Figura 9 [1] Esferoides de grafito rodeados por aureolas de ferrita

En la práctica normal, para obtener el grafito esferoidal es necesario añadir magnesio en la forma y cantidad conveniente, así como también agregar un elemento inoculante a la fundición.

No conviene añadir el magnesio en forma metálica al baño de fundición porque daría lugar a una acción violenta con desprendimiento de humos, proyecciones de metal y pérdida de magnesio. Normalmente el magnesio se añade en forma de aleaciones níquel-magnesio con 15% de magnesio aproximadamente, y a veces cobre-magnesio con 15 a 25% de magnesio.

Propiedades y Aplicaciones de las Fundiciones Nodulares.

En la Figura 10 se señalan las características más importantes de la fundición con grafito esferoidal en los 4 estados de utilización más frecuente.

R y E (MPa)

R = Resistencia a la tracción y E = módulo de elasticidad

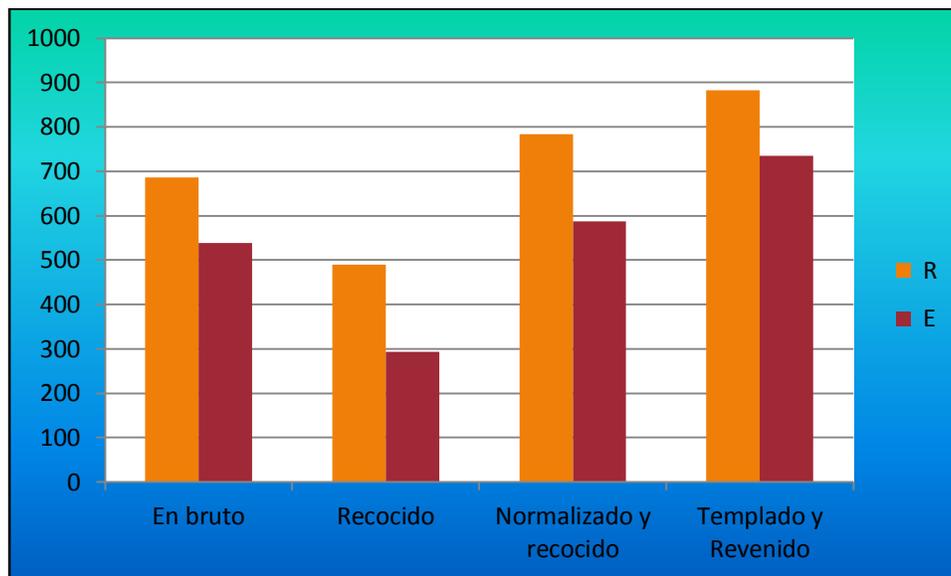


Figura 10 [1]

Propiedades más importantes de la fundición con grafito esferoidal en los 4 estados más comunes, las unidades están en [MPa].

Se observa que estas fundiciones tienen resistencias comprendidas entre 441-882 [MPa], por lo que es posible compararlas en cierto modo con un acero semiduro. Los valores del límite de elasticidad en bruto o en estado recocido son aproximadamente, de un 65% de la carga de rotura y después del temple y revenido el límite de elasticidad es un 85%, aproximadamente, de la carga de rotura. El módulo de elasticidad es 171616 [MPa] un poco inferior al de los aceros. Los valores de la resiliencia y alargamiento son superiores a los de las fundiciones ordinarias, pero inferiores al de los aceros.

En bruto de colada la fundición nodular tiene 686 MPa de resistencia a la tracción y 3% de alargamiento, de tal manera que tiene grandes aplicaciones para numerosos usos industriales. Cuando se desea la máxima ductilidad conviene utilizarlas en estado recocido, en este caso se da al material un recocido de ferritización y queda el material con R = 490 MPa y A = 15% (donde A es el porcentaje de alargamiento).

La fundición dúctil tiene un punto de fusión prácticamente más bajo que cualquier otra aleación hierro-carbono, por ser una composición siempre muy próxima a la eutéctica. Por

ello tiene también mejor colabilidad y mayor fluidez que las demás aleaciones hierro-carbono, pudiéndose fabricar con regularidad piezas complicadas.

Otra de sus propiedades notables es, su alta resistencia al desgaste, que es de gran importancia para la fabricación de elementos de máquinas y motores. La presencia de grafito contribuye directamente a la lubricación de las superficies y actúa, en cierto modo, como un recipiente en donde se acumula el líquido o pasta lubricante. La presencia de grafito sirve también para mejorar la maquinabilidad que puede considerarse similar a la de la fundición gris y es también mucho mejor que la del acero para el mismo nivel de durezas.

A continuación en la Figura 11 se mostraran imágenes de algunas aplicaciones del hierro nodular.

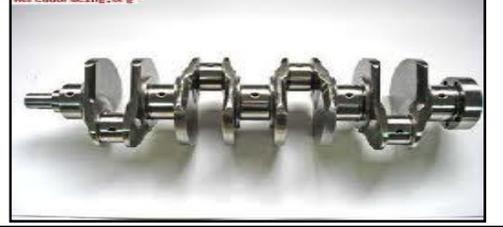
Engranajes en cajas de cambio y cabezas de cilindros		
Tambores de freno y maza		
Discos de Freno y cigüeñales		
Múltiples de escapes y brazos de suspensión		

Figura 11 Aplicaciones de fundiciones nodulares [1].

CAPÍTULO 1.2.

NIQUELADO QUÍMICO [5]

1.2.1 Tipos de niquelado.

El niquelado es un recubrimiento metálico de níquel, realizado mediante baño electrolítico o químico que se da a los metales para así, aumentar su resistencia a la corrosión o el desgaste y también mejorar su aspecto en elementos ornamentales. En cuanto a la corrosión el niquelado químico actúa como un revestimiento de barrera que protege al proporcionar un revestimiento o recubrimiento libre de poros contra el ambiente corrosivo.

Hay varios tipos de Niquelado: niquelado mate, niquelado brillante y niquelado químico.

Niquelado mate. (Mediante electrólisis)

El niquelado mate se realiza para dar capas gruesas (70 micras) de níquel sobre aluminio, cobre, latón y otros metales. Es un baño muy concentrado que permite trabajar con corrientes de 8 – 20 [A] por decímetro cuadrado, con el cual se consiguen gruesas capas de níquel en tiempos razonables.

Componentes habituales que se utilizan en el niquelado electrolítico son: sulfato de níquel, cloruro de níquel y ácido bórico.

Niquelado brillante. (Mediante electrólisis)

El uso tan extendido del niquelado brillante representa más un avance industrial que científico, aun cuando ahora es posible clasificar los abrillantadores en unos pocos grupos medianamente bien definidos, no se han logrado entender claramente las funciones o mecanismos de los diferentes compuestos orgánicos.

El niquelado brillante se realiza con un baño de composición idéntica al anterior (niquelado mate) solo que se le añade un abrillantador, que puede ser sacarina por ejemplo.

Para obtener la calidad espejo la placa base tiene que estar pulida con esa calidad. La temperatura óptima de trabajo está entre 40°C y 50 °C, pero se puede trabajar bien a la temperatura ambiente.

En los baños de niquelado electrolítico se emplea un ánodo de níquel que se va disolviendo conforme se va depositando níquel en el cátodo, por esto la concentración de sales en el baño en teoría no debe variar, y esos baños pueden estar mucho tiempo en activo sin necesidad de añadirles sales.

Si en vez de emplear un ánodo de níquel se emplea un ánodo que no se disuelva en el baño (platino, plomo , etc.), las sales de níquel se convertirán por efecto de la electrólisis paulatinamente en sus ácidos libres sulfúrico y clorhídrico, con lo que se producirán dos fenómenos, una disminución del pH (aumento de la acidez) y una disminución de la concentración de sales, esto llevará a la progresiva pérdida de eficiencia del baño. Por esto, los baños con ánodo inactivo no pueden aprovechar todo el níquel que llevan en disolución y cuando han consumido aproximadamente el 50% del níquel en sales disueltas se tornan ineficientes y sus depósitos no son buenos.

En un estudio sobre niquelado, los abrillantadores se dividen en dos clases, que incluyen respectivamente:

- 1.- Sales de cobalto y sulfonamidas.
- 2.- Sales de cadmio o zinc, cetonas y amino poliarilmetanos.

Los materiales del último grupo producen depósitos brillantes pero quebradizos y sus concentraciones son muy críticas. Las sustancias del primer grupo son menos efectivas como abrillantadores, pero permiten ser toleradas y modificar sus propiedades.

En la práctica, las dificultades para producir depósitos completamente brillantes han llevado a adoptar extensamente depósitos semibrillantes que requieren solamente un ligero bruñido de color, haciendo su control más sencillo.

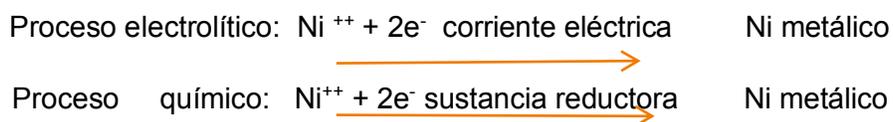
La fórmula básica para la mayoría de los baños de níquel brillante es el baño Watts, con concentraciones relativamente altas de sulfato de níquel, cloruro de níquel y ácido bórico. Los baños brillantes son aún más susceptibles a ciertas impurezas que los baños opacos, es significativo que el cadmio y el zinc algunas veces utilizados como abrillantadores se consideren impurezas en los baños opacos y deban ser cuidadosamente controlados en los baños brillantes.

Niquelado químico.

El niquelado químico, que es realmente un níquel aleado con fósforo (Ni-P) se deposita vía química (oxido-reducción, sin una corriente eléctrica) sobre un amplio espectro de materiales como aluminio, acero inoxidable, aceros al carbono, aceros aleados, aleaciones de cobre, etc. El recubrimiento obtenido no es poroso y puede aumentar la dureza de la superficie.

Los procesos químico-catalíticos empleados para recubrir partes y materiales se caracterizan por, una reducción selectiva de los iones metálicos en la superficie de un sustrato catalítico sumergido en una solución acuosa y por la deposición continua sobre este sustrato a través de la acción catalítica del depósito mismo.

Para llevar a cabo la deposición electrolítica del níquel se requiere, una corriente continua que lleve a cabo la reducción de los iones de níquel a níquel en el cátodo. En cambio en el proceso químico, la reducción se consigue a través del empleo de sustancias químicas reductoras:



Así pues, en el niquelado químico, se emplea un agente reductor que provoca la reducción de una sal de níquel que se encuentra en una solución acuosa, generalmente caliente (86°C) y de este modo se deposita níquel y fósforo sobre una superficie catalítica. A la fecha existen una gran cantidad de formulaciones desarrolladas para realizar un niquelado químico. Sin embargo, una solución de niquelado químico, normalmente contiene y requiere de los siguientes componentes:

- Una sal que suministre el níquel (comúnmente un sulfato o un cloruro).
- Un agente reductor.
- Agentes complejantes, para controlar la cantidad de níquel “libre” disponible para la reacción.
- Un regulador de pH.
- Estabilizadores.
- Aceleradores.
- Una superficie adecuadamente preparada de modo que resulte catalítica.
- 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 y aplicación debido esencialmente a que, a las temperaturas comunes de trabajo en estos baños, se han encontrado fuertes pérdidas de amoníaco, lo que provoca inestabilidad del baño.

Entre los agentes reductores que se han utilizado, conviene mencionar al borohidruro de sodio, diversos compuestos de boro, así como la hidracina y el más empleado que es el hipofosfito de sodio. De hecho, la mayoría de los depósitos químicos de níquel se obtienen mediante el uso de este agente reductor.

Con el baño ácido se puede conseguir una mejor resistencia a la corrosión, un control más sencillo de las condiciones de operación, una mayor velocidad de deposición, mayor estabilidad de la solución, así como un precio de producción más bajo.

Finalmente debido a que los baños son susceptibles de descomposición, se agregan, en algunos casos, compuestos que aumentan el periodo de estabilidad del baño, sobre todo en operaciones industriales.

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, pinturas, etc.

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:

a) La temperatura.

La temperatura óptima para efectuar el proceso de recubrimiento (para baños que trabajan a temperatura elevada, pues recientemente han desarrollado formulaciones que trabajan a temperaturas del orden de 30 °C), está entre 85 °C y 95°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 ión, sería deseable de no ser porque 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.

Se ha encontrado que existe una estrecha zona de proporciones deseables entre las concentraciones de níquel e hipofosfito y una concentración óptima de iones de hipofosfito en el baño que producen depósitos a velocidades aceptables. 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 términos generales, la velocidad de deposición aumenta con el pH de la solución. No se produce prácticamente la deposición por debajo de un pH de 3.0 y arriba de 6.5, de modo que, para un baño ácido la zona de pH recomendada para una solución de niquelado químico está entre 4.3 y 4.8, valores que intentan lograr un buen balance entre una velocidad de deposición mínima aceptable, una adecuada estabilidad del baño y una utilización óptima del hipofosfito.

d) Agitación

En general una mayor agitación aumenta la velocidad de deposición.

Uno de los problemas que ha llamado la atención sobre el comportamiento de las soluciones de niquelado químico es, la susceptibilidad de dichas soluciones a descomponerse con relativa facilidad.

Algunas disoluciones que se proponen para reducir el problema incluyen el evitar concentraciones elevadas del agente reductor cuando se prepara o ajusta el baño, el evitar ajustes violentos del pH, y sin faltar el preparar adecuadamente la superficie a recubrir. Se puede concluir que el éxito del proceso para el niquelado químico es por lo tanto, un compromiso práctico entre una velocidad de deposición aceptable y una estabilidad de solución máxima compatible con esta velocidad.

En el niquelado químico el mecanismo de recubrimiento provoca, que la velocidad de deposición y de allí su espesor sean los mismo en cualquier sección expuesta. Por otra parte es factible por ejemplo, tener capas tan delgadas como 2-5 micrómetros para componentes electrónicos, capas mayores (50-125 micrómetros), empleadas en ambientes corrosivos y capas hasta de 250 micrómetros para la recuperación de partes.

1.2.2 Propiedades y aplicaciones del niquelado químico.

Las propiedades del níquel químico permiten aplicarlo en aquellos casos en que el fin del recubrimiento sea realizar una o varias de las misiones siguientes:

1. Adherencia.
2. Alta resistencia a la corrosión
3. Resistencia al desgaste
4. Aumentar la dureza
5. Disminuir los coeficientes de fricción.
6. Recuperación de las piezas fuera de cotas.

Adherencia.

En cuanto a la adherencia del depósito al sustrato, en términos generales, se puede calificar de buena. El propio mecanismo de la reacción que produce el recubrimiento, permite que se establezcan en los metales que catalizan la reacción uniones de carácter metalúrgico y mecánico con el sustrato. Entendiendo que las uniones mecánicas se dan a través del contacto entre crestas (no valles) de una superficie y en las uniones metalúrgicas si hay interacción química entre los materiales que entran en contacto.

Cuando se trata de materiales metálicos no catalíticos tales como aceros inoxidable, aceros aleados de alta resistencia, la adherencia es menor, sin embargo mediante una activación adecuada permite elevar dicha adherencia.

Resistencia a la corrosión. Evidentemente una de las particularidades que hacen atractiva la aplicación de los depósitos químicos Ni-P, es su resistencia a la corrosión en diversos ambientes. Los recubrimientos se corroen en general en presencia de reactivos que atacan también el níquel puro. No obstante, su resistencia es función del porcentaje de fósforo y en muchos casos puede superar a la del cromo y níquel.

A continuación en la Tabla 1 se mostrará la pérdida en micras de un recubrimiento Ni-P en diferentes medios.

Tabla 1 [1]

Medio corrosivo	T (°C)	Micras/año
Ácido Acético Glacial	20	0.8
Acetona	20	0.08
Amoniaco (25%)	20	16
Nitrato de Amonio (20%) 20	15	
Benceno	20	No se corroe
Salmuera(3.5% sal), Saturada con CO ₂	95	5
Cloruro de Calcio (42%)	20	0.2
Ácido Cítrico, saturado	20	20
Cloruro Férrico (1%)	20	200
Ácido Fórmico (88%)	20	13
Ácido Clorhídrico (5%)	20	24
Ácido Láctico (85%)	20	1
Fenol (90%)	20	0.2
Sulfato de Sodio (10%)	20	0.8
Ácido Sulfúrico (65%)	20	9
Agua Destilada saturada O ₂	95	No se corroe
Agua de Mar (3.5% NaCl)	95	No se corroe

Dureza y resistencia al desgaste.

La dureza de este tipo de recubrimientos depende de la matriz y de la resistencia adicional proporcionada por las partículas y también se incrementa con la aplicación de tratamientos térmicos.

En cuanto a la resistencia al desgaste, esta es función de diferentes factores, tamaño de la partícula, fracción en volumen de la fase dispersada, dureza de las partículas y de la matriz, así como de la compatibilidad entre la fase dispersa y la matriz.

Así pues, parece lógica una mejor resistencia al desgaste asociada a partículas de más elevada dureza, presentes en tamaños más grandes, mayores porcentajes y con una matriz más dura, que se puede obtener por ejemplo, por medio de tratamientos térmicos.

En la tabla 2.2 se expondrán algunas aplicaciones del niquelado y la mejora lograda.

Las piezas recién niqueladas presentan microdurezas del orden de 500 a 600 Vickers (carga aplicada = 100g), valor semejante al de muchos metales endurecidos. Esta microdureza se puede incrementar a valores del orden de 1000 Vickers.

Espesor de capa exigido [3], según resistencia al desgaste:

- 1.- Ligera resistencia al desgaste 10 micras
- 2.- Resistencia media al desgaste 25 micras
- 3.- Alta resistencia al desgaste 50 micras

Tabla 2 Aplicaciones del niquelado y la razón de su uso en dicha aplicación. [1]

APLICACIONES	RAZON DE USO
INDUSTRIA QUIMICA Y PETROLEO	
Bombas e impulsores	Resistencia a la corrosión y a la erosión
Intercambiadores de calor	Resistencia a la corrosión
Filtros y componentes	Resistencia a la corrosión y a la erosión
Mezcladores, tanques, accesorios para cañerías	Resistencia a la corrosión
Boquillas (spray nozzles)	Resistencia a la corrosión y al desgaste
Válvulas y accesorios	Resistencia a la corrosión y lubricidad
Válvulas de acero inoxidable	Resistencia al desgaste y al engranamiento Protección para evtar rajaduras por stress
Válvulas de control y tapas	Resistencia a la corrosión y al desgaste
Tuberías, packers, mandriles, varillas de bombeo, conexiones	Resistencia a la corrosión y al desgaste
Bombas de lodo y petroleo	Resistencia a la corrosión y la fatiga
Equipos hidráulicos y neumáticos	Resistencia a la corrosión y al desgaste
Componentes de equipos para GNC	Resistencia a la corrosión
Tanques de presión	Resistencia a la corrosión y pureza del producto

1.2.3 Recubrimiento del níquel químico compuesto.

Una posibilidad para modificar las propiedades del níquelado químico, es la codeposición de partículas duras, particularmente de compuestos cerámicos, con el propósito de aumentar la resistencia al desgaste en estos recubrimientos o conferirles determinadas propiedades específicas.

Dicha adición se ha hecho por medio de procesos electrolíticos y se ha encontrado que para lograr un determinado porcentaje de incorporación en volumen o en peso en el depósito, es menor la cantidad de partículas requeridas para el proceso químico que para el electrolítico.

Como ejemplo, se puede mencionar que en la aplicación de partículas tales como el carburo de silicio (SiC) para obtener un mismo porcentaje (en volumen) de partículas, en el depósito químico, se necesitan 10 g/l de SiC y, para electrolítico se requieren 100 g/l de SiC. Una tendencia similar se observa con la incorporación de alúmina. De ello, se intuye que el proceso químico es más eficiente en relación a la cantidad de partículas incorporadas en el recubrimiento. [7]

Coefficiente de fricción.

Contrariamente al níquel que tiene un mal coeficiente de fricción, las aleaciones de níquel-fósforo presentan interesantes propiedades lubricantes.

Sistemas recubrimiento-partícula.

En un inicio, es posible disponer de materiales compuestos con cualquier metal que pueda ser usado como depósito químico. Así, recubrimientos químicos compuestos a base de Ni, Cu, Au, y Sn, son en principio factibles, de los anteriores la más vasta investigación se ha realizado en recubrimientos de níquel aunque se pueden una diversa variedad de partículas, entre las que se puede referir:

- A. Minerales como caolín, grafito, cuarzo, talco, diamante.
- B. Cerámicos principalmente óxidos, carburos, boruros, nitruros, siliciuros, silicatos, carbonatos, fosfatos, oxalatos y fluoruros de: aluminio, boro, cromo, hafnio, molibdeno, silicio, calcio, tantalio, vanadio, tungsteno, zirconio, manganeso, magnesio, bario, estroncio, cerio, hierro y titanio.
- C. Metales y aleaciones de: boro, cromo vanadio titanio, molibdeno, zirconio, hafnio, y tungsteno, así como aceros inoxidable.

A diferencia de lo que ocurre en el niquelado químico normal, en los baños de niquelado químico compuestos resulta crítico para efectos de la estabilidad de la solución y la eficiencia del proceso; el control del pH, el apropiado nivel de agitación y la presencia de estabilizantes y activadores en mayor cantidad en la solución.

Se han reportado en la literatura una diversidad de experiencias en este campo de revestimiento químico compuesto Ni-P y por otra parte el SiC ha sido generado para usarse como recubrimiento resistente al desgaste. La adición de carburo de cromo ha provocado un aumento de la microdureza de los revestimientos a 650 Vickers y con tratamiento térmico (500°C, 5 horas en vacío) para alcanzar los 1225 Vickers.

Cabe añadir que como consecuencia de las partículas que sobresalen de la superficie, es inevitable que la aspereza de la superficie se incremente por la incorporación de partículas dentro del depósito químico.

La aspereza de un recubrimiento químico compuesto depende de varios factores, tales como el acabado superficial del sustrato, el tamaño de la partícula y su distribución, grado de inclusión de las partículas y el espesor de la capa.

CAPÍTULO 1.3.

MATERIALES COMPUESTOS.[12]

1.3.1. Generalidades.

Introducción a los materiales compuestos

Un material compuesto es una combinación macroscópica de dos o más materiales distintos, con una interfaz reconocible entre ellos, dichos compuestos no solo se utilizan por sus propiedades estructurales sino también para aplicaciones eléctricas, térmicas tribológicas o ambientales. Los compuestos modernos son por lo general optimizados para lograr un equilibrio particular de las propiedades de un determinado rango de aplicaciones.

Los materiales compuestos destacan porque son materiales que contienen como tal una matriz continua que une y proporciona la forma de una gran variedad de componentes de refuerzo que son aún más fuertes, más rígidos que antes. El material compuesto resultante tiene un balance de las propiedades estructurales que es superior a cualquiera de los materiales que lo constituyen.

El desarrollo de los MMC (metal-matrix composites) se ha reflejado en la necesidad de lograr combinaciones de propiedades más allá de las alcanzables en metales solamente monolíticos. Es por eso que los compuestos resultantes de la adición de refuerzos a un metal lo que proporciona una mayor rigidez específica sumada con la fatiga mejorada y resistencia al desgaste, o tal vez mayor resistencia mecánica en combinación con las características deseadas como la térmica, (por ejemplo, la reducción de coeficiente de expansión térmica y conductividad). Sin embargo, la meta de lograr mejoras a las propiedades sigue siendo un reto en muchas aplicaciones potenciales de MMC.

Antes de describir los distintos tipos de matrices, conviene repasar cuales son las funciones que debe cumplir la matriz. Estas son:

- 1.- Dar estabilidad al conjunto, transfiriendo las cargas al refuerzo.
- 2.- Proteger al refuerzo de deterioro mecánico y químico.
- 3.- Evitar la propagación de grietas.

Por todo ello se requiere una buena adherencia entre la matriz y el refuerzo.

Materiales compuestos de matriz metálica.

Los primeros esfuerzos enfocados a desarrollar MMC se originaron en la década de 1950 y comienzos de 1960. La motivación principal era ampliar drásticamente la eficiencia estructural de los materiales metálicos manteniendo sus ventajas, como alta resistencia al corte y la buena retención de propiedades a altas temperaturas. Los primeros trabajos fueron sobre polvo de aluminio sinterizado que fue un precursor de la MMC reforzado con fibra discontinua.

Posteriormente fue el desarrollo de monofilamentos de alta resistencia, primeramente con el boro y el carburo de silicio (SiC) aunados al refuerzo con fibras en los MMC a través de las décadas de 1960 y principios de 1970.

La recesión en la década de 1970 produjo que valiosas investigaciones fueran truncadas aunado a los recortes de financiación del desarrollo dando lugar a un final en la fase de descubrimiento y desarrollo de los MMC.

A finales de 1970 los esfuerzos se renovaron utilizando refuerzos en forma discontinua para los MMC llamados "bigotes" (whiskers) que eran de SiC. El alto costo de los whiskers y la dificultad para evitar daños durante la consolidación de los mismos llevó al concepto de refuerzos de partículas, los materiales resultantes proporcionaron resistencia y rigidez casi equivalentes a los whiskers pero con un costo menor y más fácil de procesar.

En la década de 1990 la Fuerza Aérea de EE UU programó una importante inversión para establecer una base de tecnología de MMC para su industria aeroespacial, este programa ha producido varias aplicaciones aeroespaciales militares y comerciales con matriz de aluminio reforzado de forma discontinua. [13] (observar Figura 12).

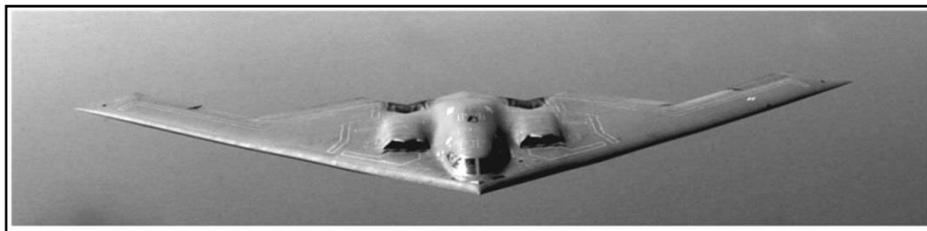
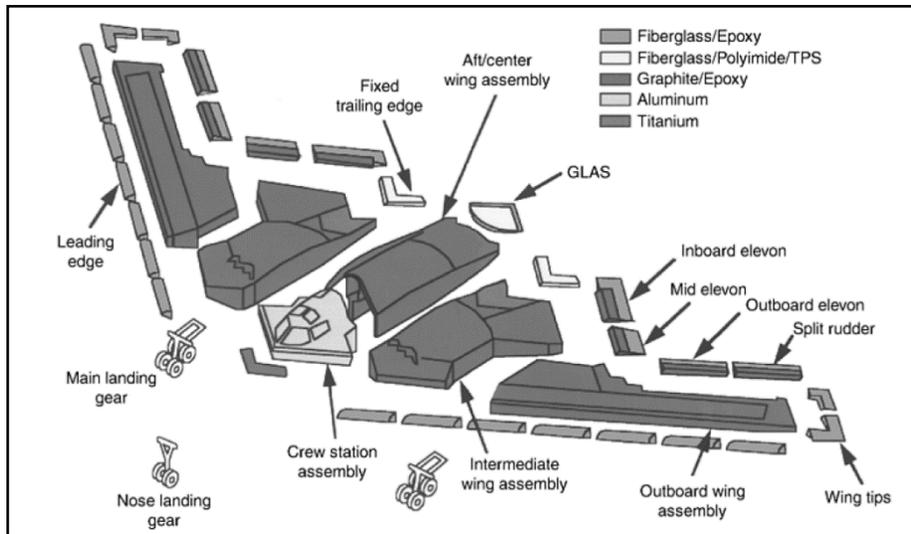


Figura 12 Bombardero B-2 de la Fuerza Aérea de E.U. que es construido en su mayor parte por materiales compuestos avanzados. [12]

Además de estos éxitos espectaculares, se lograron inserciones de MMC en el transporte terrestre e industrial. En las industrias electrónicas el embalaje superó con creces el crecimiento de la industria aeroespacial, por lo tanto la inserción de nuevos materiales en aviones militares y comerciales ha quedado a la zaga en realidad ante el sector industrial, invirtiendo la tendencia de años anteriores para la inserción de nuevos materiales.

Materiales de la matriz.

La matriz es el componente principal de la MMC, su labor consiste en unir y proteger a las fibras para protegerlas de daños mecánicos y ambientales. La matriz también sirve para transferir la carga a las fibras, además de que imparte sus propiedades a los compuestos con características de los metales tales como la ductilidad, conductividad eléctrica y térmica.

Los compuestos se clasifican generalmente en relación con el componente de la matriz, las clases de compuestos más importantes incluyen compuestos de matriz orgánicos (OMC), compuestos de matriz metálica (MMC), y compuestos de matriz cerámica (CMC).

Matrices de metal.

A diferencia de sus contrapartes orgánicas, la matriz metálica en los MMC ofrece una importante contribución a la resistencia de los compuestos. A continuación una imagen (Figura 13) que idealiza una matriz metálica con refuerzos de cerámicos.

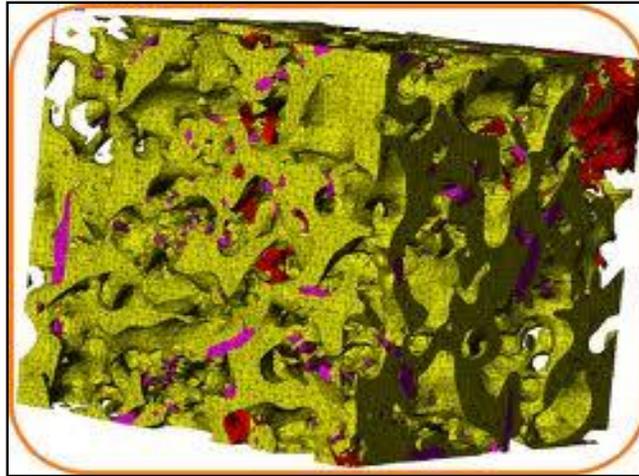


Figura 13. Matriz metálica con refuerzos de partículas.

Éste resultado no sólo da la mayor resistencia de las aleaciones de metales con respecto a las resinas orgánicas que suelen utilizar como matrices, sino también por el hecho de que la mayoría de MMC en la actualidad tiene refuerzos discontinuos y una fracción de volumen de la matriz mucho más alto.

Algunos materiales compuestos de matriz metálica se encuentran actualmente en servicio a través de matrices basadas en aleaciones de aluminio, titanio, hierro, cobalto, cobre, etc.

MMC de cobre, plata, berilio se utilizan para aplicaciones tales como rodillos y troqueles de herramienta, y el MMC de titanio se utiliza principalmente para la industria automotriz, aeroespacial y productos recreativos. MMC cobalto (carburos cementados, o cermet) se incluyen aquí como MMC. Con mucho, la MMC de mayor producción está basada en matrices de aleación de aluminio, y estos son de uso común para la automoción y el transporte ferroviario de tierra, la gestión térmica y embalaje electrónico, aeroespacial y aplicaciones de la recreación.

Otra consideración en la elección de la matriz incluye el potencial de refuerzo/matriz de las reacciones, durante el procedimiento o en el servicio, que podría resultar en un rendimiento compuesto degradado, tensiones térmicas debido a la falta de coincidencia entre la expansión térmica de los refuerzos y la matriz, así como la influencia de la fatiga de la matriz en el comportamiento de la respuesta cíclica del compuesto, de hecho el comportamiento de MMC bajo condiciones de carga cíclicas es un área que requiere una consideración especial.

En MMC para uso a temperaturas elevadas se debe tener en consideración, la diferencia de temperaturas de fusión entre la matriz y los refuerzos. Una alta diferencia de temperatura de fusión puede dar lugar a la fluencia de la matriz, mientras que los refuerzos siguen siendo variables, incluso a temperaturas cercanas al punto de fusión de la matriz, sin embargo la fluencia tanto en la matriz y el refuerzo debe tenerse en cuenta cuando hay una diferencia pequeña del punto de fusión en el compuesto.

Así que serán útiles para las aplicaciones en donde se requiera de una alta conductividad térmica o eléctrica combinada con una alta resistencia al desgaste, por ejemplo, puntos de contacto en donde se pueden utilizar las matrices de metal puro con refuerzos cerámicos.

Materiales del refuerzo.

El propósito principal de los refuerzos es proporcionar niveles superiores de resistencia y rigidez a la composición. En un compuesto reforzado con fibra continua las fibras proporcionan prácticamente toda la resistencia y rigidez, incluso en compuestos reforzados con partículas, se obtienen mejoras significativas, por ejemplo: la adición de un 20% de SiC al aluminio 6061 ofrece un aumento de la resistencia mecánica de más de 50% y un aumento en la rigidez de más del 40%.

Como se mencionó anteriormente, los materiales típicos de refuerzo, (grafito, vidrio, carburo de silicio, alúmina) también pueden proporcionar conductividad térmica y eléctrica, expansión térmica controlada y la resistencia al desgaste, además de las propiedades estructurales.

Aunque la búsqueda de fibras de refuerzo de alto rendimiento fue un gran éxito, la demanda temprana ilimitada fuera de la industria aeroespacial militar no permitió la reducción de costos que habría resultado en un uso más amplio. Como resultado, las aplicaciones industriales generalizadas por la variedad de nuevos materiales ha progresado muy lentamente en todas las aplicaciones especiales, pero donde el aumento de los costos podría ser justificado.

Algunos factores que han cambiado esta situación fueron la amplia utilización de compuestos reforzados con fibra de carbono en equipos de recreación tales como los cuadros de bicicletas, bastones de senderismo, frenos en motocicletas deportivas, bombas de aire de bicicletas, lap top con estructura de fibra de carbono, aunado a la promesa de cantidades comerciales de materiales de fibra de carbono a partir de una serie de fuentes a precios atractivos ha creado un resurgimiento del interés en materiales compuestos avanzados en la industria aeroespacial.

Tipos de Refuerzo

Los refuerzos se pueden dividir en dos grandes grupos:

a) Partículas o whiskers

Un refuerzo es considerado como una “partícula” si todas sus dimensiones son aproximadamente iguales. Por lo tanto compuestos reforzados con partículas incluyen los reforzados por esferas, barras, láminas y muchas otras formas de ejes más o menos iguales.

b) Refuerzos de fibra.

Las fibras aumentan la fuerza en la dirección de su orientación y menor en dirección perpendicular a la orientación de las fibras, es una característica de MMC reforzados con fibra continua.

CAPÍTULO 1.4.

CORROSIÓN y DESGASTE

Corrosión

La composición y la integridad física de un material sólido se alteran en un ambiente corrosivo. Si se trata de la corrosión química, un líquido corrosivo disuelve el material. Los metales y ciertos materiales cerámicos reaccionan en un ambiente gaseoso, por lo general a temperaturas elevadas el material puede destruirse debido a la formación de óxidos y otros compuestos. Los materiales pueden alterarse si se les expone a la radiación o incluso a las bacterias y finalmente a una diversidad de mecanismos de desgaste y corrosión que modifican la forma de los materiales.

El proceso de corrosión se presenta con la finalidad de reducir el nivel de energía libre de un sistema, ocurre a lo largo de un periodo, ya sea a altas o bajas temperaturas. El secreto para impedir la corrosión consiste en colocar un recubrimiento que evite el contacto con el reactante. La corrosión no solo debe ser vigilada, sino que también debe ser tomada en consideración en el diseño de cada uno de los diferentes componentes.

El proceso de corrosión, consiste en el deterioro de un material metálico debido a una reacción con productos químicos presentes en el entorno, pero estos no siempre son dañinos en un producto final. El purificado de ciertos metales, como el cobre, utiliza un proceso electroquímico de disolución.

Corrosión química.

En la corrosión química, es decir, en una disolución directa, un material se disuelve en un medio corrosivo líquido, el material seguirá disolviéndose hasta que se consuma totalmente o hasta que se sature el líquido. Las aleaciones base cobre, por ejemplo, desarrollan una patina verde a causa de la formación de carbonato e hidróxidos de cobre, esta es la razón por la cual por ejemplo la estatua de la Libertad se ve verde. La corrosión química del cobre, del tantalio, del silicio, del bióxido de silicio y de otros materiales se puede lograr mediante condiciones extremadamente bien controladas.

Ataque por metal líquido.

Los metales líquidos atacan primero un sólido en lugares de alta energía, como son los límites de grano (interfaz entre dos granos o cristalitas), si esta regiones continúan siendo atacadas de manera preferencial, finalmente se presentaran grietas y con frecuencia, esta forma de corrosión se complica por la presencia de fundentes que aceleran el ataque o mediante corrosión electroquímica, algunos metales líquidos como el litio líquido, también pueden atacar los materiales cerámicos.

Potencial de electrodo en las celdas electroquímicas.

En la electrodeposición, se requiere de un voltaje impuesto para hacer que fluya una corriente en la celda; pero en la corrosión se desarrolla de manera natural una diferencia de potencial al colocar un material en una solución. Para desarrollar el potencial requerido para que se desarrolle la corrosión se necesita lo siguiente:

Potencial del electrodo.- Cuando en un electrolito se coloca un metal puro, se desarrolla un potencial en el electrodo que está relacionado con la tendencia del material a ceder sus electrones, sin embargo la fuerza impulsora para la reacción de oxidación se compensa por una fuerza impulsora igual pero opuesta para la reacción de reducción. No ocurre una reacción neta, en consecuencia no podemos medir el potencial del electrodo para un material de un solo electrodo.

Serie de fuerza electromotriz. Para determinar la tendencia de un metal a ceder sus electrones, medimos la diferencia de potencial entre el metal y un electrodo estándar utilizando una semicelda. El electrodo de metal a probar se coloca en una solución de 1 mol (Mol) de sus iones. También se coloca un electrodo estándar de referencia en una solución 1 molar de sus iones, los dos electrolitos están en contacto eléctrico, pero sin permitir que se mezcle el uno con el otro. Cada electrodo establece su propio potencial de electrodo. Al medir el voltaje existente entre los dos electrodos cuando el circuito está abierto, obtenemos la diferencia de potencial. Al potencial del electrodo de hidrógeno, que se toma como nuestro electrodo estándar de referencia, se le da arbitrariamente el valor de cero volts. Si el metal tiene una tendencia a ceder electrones más que el hidrógeno, entonces el potencial del metal es negativo, es decir, el metal es anódico con respecto al electrodo de hidrógeno.

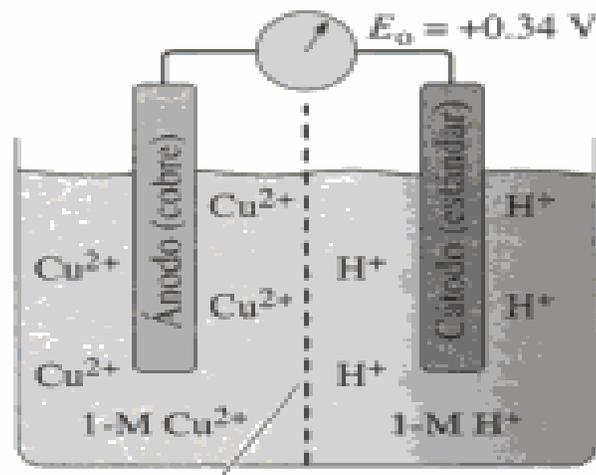


Figura 14 Semicelda utilizada para medir el potencial del electrodo del cobre bajo situaciones estándar. El potencial del electrodo del cobre es la diferencia de potencial entre éste y el electrodo estándar de hidrógeno en un circuito abierto. Puesto que E_0 es superior a cero, el cobre es catódico en comparación con el electrodo de hidrógeno.

Cuando más negativo sea el valor del potencial para la oxidación del metal, éste será más electropositivo, esto significa que el metal tendrá una tendencia más elevada a sufrir la reacción de oxidación.

Ensayo de corrosión por inmersión [14].

Técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica.

EIS es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) determinando la respuesta correspondiente [10].

En el procedimiento experimental más comúnmente usado se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias.

En el caso de los estudios de corrosión que utilizan la técnica de EIS, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, estos circuitos eléctricos son denominados “circuitos eléctricos equivalentes”.

Un circuito equivalente es una combinación de elementos pasivos (resistencias, capacitancias, inductores, y otras formas de impedancias distribuidas) que dan la misma respuesta, a toda frecuencia, de una celda de corrosión.

Cuando el análisis de los datos de EIS se realiza mediante un ajuste de los datos experimentales a un circuito eléctrico equivalente, se obtienen valores de diferentes parámetros eléctricos. Estos valores son utilizados para obtener información, tanto de velocidades de corrosión como de mecanismos de corrosión.

El número de circuitos equivalentes que pueden cumplir el comportamiento de una celda de corrosión es prácticamente infinito. No obstante, existe una condición esencial para la selección de un circuito equivalente: tanto los componentes del circuito eléctrico como el circuito eléctrico en sí mismo, deben tener una explicación física.

Presentación de datos:

Los datos obtenidos en los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica, son reportados por los equipos comerciales en una de las dos formas:

- a) *Módulo de la impedancia ($|Z|$) y ángulo de fase (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 gráficas de Nyquist y de Bode.

En el caso de esta tesis se usó el gráfico de Bode.

Los gráficos de Bode son representaciones de los parámetros del módulo de impedancia contra la frecuencia.

A diferencia de los gráficos de Nyquist, las representaciones de Bode contienen toda la información de un ensayo de EIS, ya que las frecuencias se identifican claramente.

Tribología [18].

El término tribología relativamente nuevo fue creado hace unos 30 años, la definición estricta de esta palabra es: "Ciencia y tecnología de la interacción de dos superficies que se encuentran en movimiento relativo entre sí, así como los fenómenos relacionados".

Dicha ciencia trata de conceptos como fricción, lubricación y desgaste.

La importancia de esta ciencia recae en el hecho de que alrededor de un tercio de la energía global de consumo se desperdicia en pérdidas debidas a la fricción, es por ello que los esfuerzos de investigación y desarrollo vayan encaminados a las reducciones de estas pérdidas, lo cual traería un aumento en la eficiencia (menor contaminación y mayor ahorro económico) de los equipos sujetos a fricciones.

El instrumento que se utiliza para medir estos parámetros se denomina tribómetro, en principio este es un instrumento sencillo, ideado por Coulomb, que sirve para demostrar las leyes de rozamiento. En un principio consistía en una mesa sobre la cual se deslizaba un prisma de madera con una fina varilla de metal incrustada en su parte superior, en las que se podían insertar diversas pesillas, el prisma va unido a un cordón que pasa por una polea y que se une finalmente al extremo de un dinamómetro. Variando la masa total del conjunto prisma-pesillas con la inserción de pesas, se aprecia que la fuerza necesaria para ponerlo en movimiento variaba proporcionalmente con la masa total, mostrando con ello que la fuerza de rozamiento estática máxima es directamente proporcional a la fuerza normal ejercida por la superficie sobre el prisma, que en este caso es el producto de la masa total por el peso.

Los dispositivos más usados para estas pruebas son lo que se pueden apreciar en la Figura 15: (a) *Punta de disco (pin-on-disk)*, (b) *punta en cilindro*, (c) *cilindros cruzados* y (d) *plataforma reciprocante*. La *W* indica la carga.

En la actualidad se han variado estos instrumentos y han evolucionado en una serie de dispositivos, sencillos y complejos, que sirven para medir el desgaste debido a la fricción, sobre una pieza de metal (o de otros metales), la cual es sometida a condiciones de trabajo (carga) similares a los requerimientos de la pieza. Generalmente durante estas pruebas, se pesa la pieza al inicio del ensayo y se pesa al final del mismo, al igual que se inspecciona visualmente, de tal forma que se pueda cuantificar la cantidad de desgaste que presenta la pieza a ciertas condiciones de trabajo. A estos ensayos se les conoce actualmente como ensayos de desgaste o tribométricos y se encuentran regulados por normas tales como ASTM G99 [18], referente al dispositivo de punta disco usado en esta tesis.

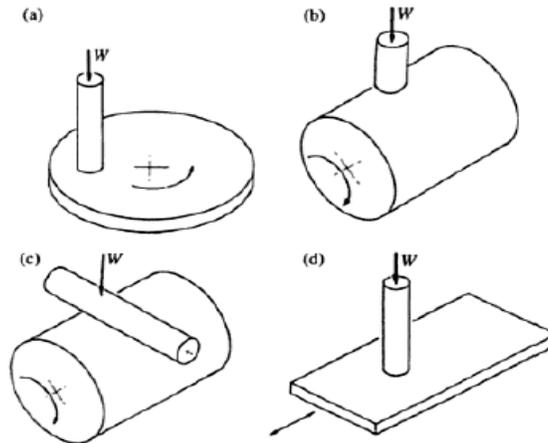


Figura 15: (a) Punta de disco (pin-on-disk), (b) punta en cilindro, (c) cilindros cruzados y (d) plataforma reciprocante. La W indica la carga

Desgaste.

El desgaste se define como el daño progresivo que implica pérdida de material, el cual ocurre en la superficie de un material como consecuencia del contacto y frotamiento que existe entre este y otros materiales adyacentes. El desgaste es un compañero inevitable de la fricción, donde hay desgaste hay fricción. Es evidente que una disminución del desgaste trae consigo muchos beneficios, tal como el aumento de la vida útil de las piezas y herramientas, disminuyendo gastos por reemplazos así como evitar pérdidas en producción por mantenimiento.

El desgaste es un fenómeno complejo y son muchos los parámetros que entran en juego en el proceso de desgaste de una pieza, tales como las características superficiales (acabados, recubrimientos, perfilometría), las características intrínsecas del material (dureza, densidad, porosidad, ductilidad, etc.), el tipo de movimiento que hay entre las piezas, así como la presencia/ausencia de lubricantes, óxidos, partículas, residuos y otras partículas entre las superficies en contacto.

CAPÍTULO 2.0.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Introducción.

A continuación se explicará la investigación y desarrollo de los experimentos realizados en esta tesis. Se detallará desde la obtención del sustrato o material base, su maquinado, depósito del recubrimiento hasta su caracterización con diferentes pruebas de laboratorio.

Todo lo anterior fue creado y desarrollado en Laboratorios de la UNAM y de la UAEH.

Diagrama de flujo de la etapa de experimental.

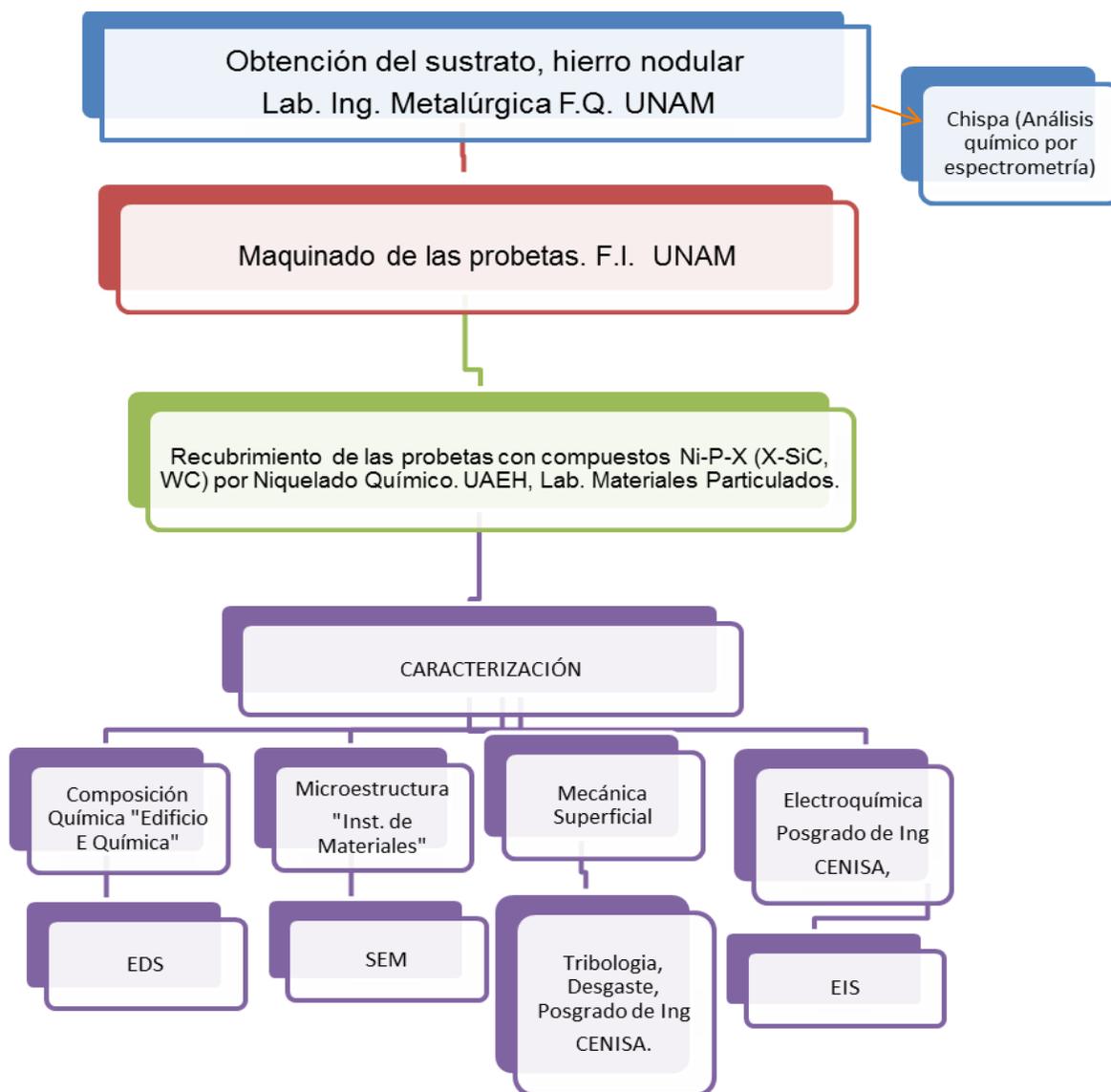


Figura 16 Diagrama de flujo de la etapa total de experimentación

Obtención del Hierro Nodular.

El hierro nodular se obtuvo en la Facultad de Química de la UNAM, específicamente en los laboratorios de Ingeniería Metalúrgica.

La fundición nodular es utilizada por importantes empresas fabricantes de automóviles. [6].

Diseño experimental para la obtención del hierro nodular.

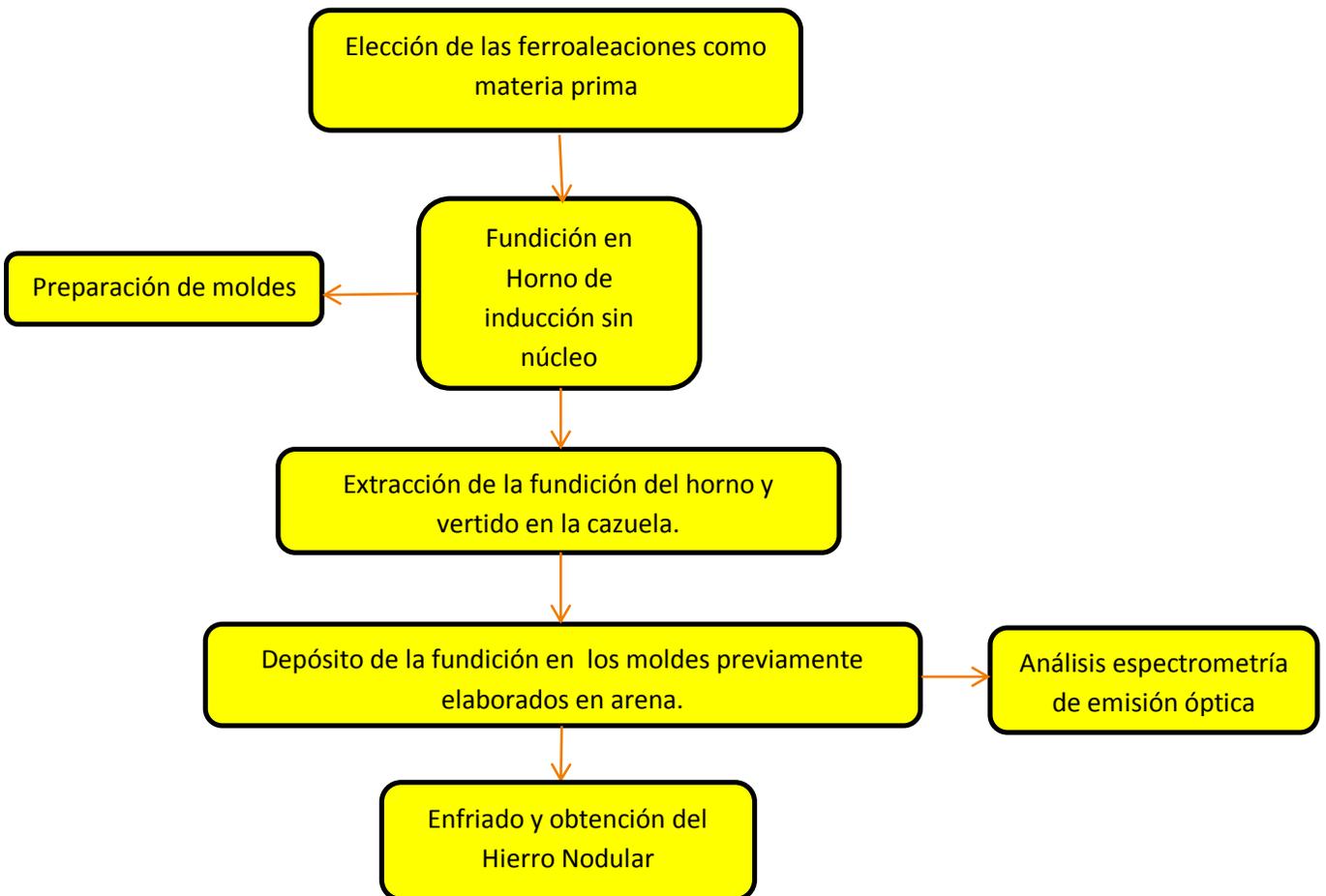


Figura 17 Diagrama del proceso de obtención del Hierro Nodular

Descripción del Proceso de Fundición.

Los materiales necesarios para la fundición fueron tomados en el laboratorio de Ingeniería Metalúrgica, eran ferroaleaciones de FeSi, FeMn, FeCr, etc., así como también recarburantes (empleados para ajustar el carbono) utilizados estos últimos para realizar el ajuste de carga y llegar a la composición química requerida.

Dichos materiales fueron agregados en un horno de inducción sin núcleo, la temperatura de trabajo fue en el rango de 1470-1490°C y la temperatura de colada a moldes a su vez fue de entre 1390-1420°C. Se monitoreó la composición mediante un espectrómetro para así lograr la composición requerida.

En paralelo se realizaron los moldes en los que se vertería la fundición. La mezcla de moldeo que se utilizó fue moldeo en verde, la cual consistió principalmente de arena sílice, bentonitas y agua; las condiciones para la elaboración de los moldes fueron las siguientes: Arena Sílice con tamaño de malla AFS de 60-70, 10% de bentonita (6% bentonita sódica y 4% bentonita cálcica) y 3.5% de humedad en % de peso.

Para la realización de los moldes se escogió una pieza que contuviera la forma del volumen deseado, en este caso, se eligieron varillas de 1/2" y varillas de 3/4" de diámetro x 20 cm de largo.

Se compactaron los moldes mediante un apisonador neumático y se colocaron los moldes en el suelo de arena del laboratorio.

Una vez que la fundición estuvo lista en cuanto al porcentaje de elementos propios del hierro nodular, se vertió en los moldes de arena para después esperar su enfriamiento.

Cuando el material es enfriado se le hace una caracterización a la fundición para observar el porcentaje de nódulos que se obtuvieron y cotejar que realmente sea el resultado esperado.

A continuación se mostrará una tabla con el equipo primordial para llevar a cabo la fabricación de las barras de fundición nodular.

Tabla con equipo primordial.

Tabla 3

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
<p>Horno de inducción sin núcleo</p>	<p>Marca SEHM Modelo GW-50-26000</p> <p>En un horno de inducción sin núcleo (se le llama sin núcleo porque no necesita un metal líquido previo para que opere). Marca SEHM Modelo GW-50-26000 Para que opere se necesitan tres unidades.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Unidad de enfriamiento 2.- Unidad de Potencia 3.- Unidad de Fusión <p>La bobina de cobre encierra una capa de material refractario alrededor de toda la longitud interior del horno. En funcionamiento una poderosa corriente eléctrica a través de la bobina crea un campo magnético que penetra al refractario y rápidamente funde el material de carga metálica dentro del horno</p> <p>El tipo de refractario utilizado fue ácido: SiO_2, Al_2O_3, 10 % y Al_2O_3 10%.</p>
<p>Mezcla de moldeo</p>	<p>La mezcla de moldeo que se utilizó fue moldeo en verde, la cual consta principalmente de arena sílice, bentonitas y agua.</p>
<p>Trajes aluminados.</p>	<p>Su diseño es multicapa en la capa exterior y se añaden materiales aluminados que mediante evaporación en vacío reflejan la alta energía emitida por radiación.</p>

<p>Análisis químico por espectrometría de emisión óptica "Chispa"</p>	<p>Es de la marca Spectro y analiza 16 elementos. El principio consiste en crear un arco eléctrico que calienta a los materiales hasta generar una luz, el equipo recibe esta luz y la divide según sus longitudes de onda (cada material genera una longitud de onda distinta) para así identificar los componentes del material.</p>
<p>Cajas de Moldeo</p>	<p>Lámina de acero de bajo carbono.</p>
<p>Análisis térmico</p>	<p>Durante la fundición se inserta una escobetilla y mediante un software se analiza las curvas de enfriamiento y se observan las fases y los micro constituyentes, para tener la composición adecuada.</p>

Galería de Imágenes.



Figura 18.1 Horno de inducción sin núcleo.

1.- Unidad de fusión, 2.- Unidad de enfriamiento, 3.- Unidad de Potencia



Figura 18.2

Chatarra clasificada



Figura 18.3

Espectrometría



Figura 18.4

Cajas de moldeo.



Figura 18.5

1.- Traje aluminizado.

2.- Depósito de moldes y fundición.

3.- Pinzas molde para la moneda o muestra (análisis de chispa).



Figura 18.6

Revolvedora de arena

2.2. Manufactura de las probetas en torno manual y CNC por computadora.

Una vez obtenido el hierro nodular en forma de barra con un diámetro aproximado de $\frac{3}{4}$ " y longitud de 20 cm se comenzó a manufacturar las probetas, primero en torno mecánico para finalizar su maquinado en CNC, para un total de 40 unidades (observar Figura 19).

Diagrama experimental para la manufactura de las probetas.

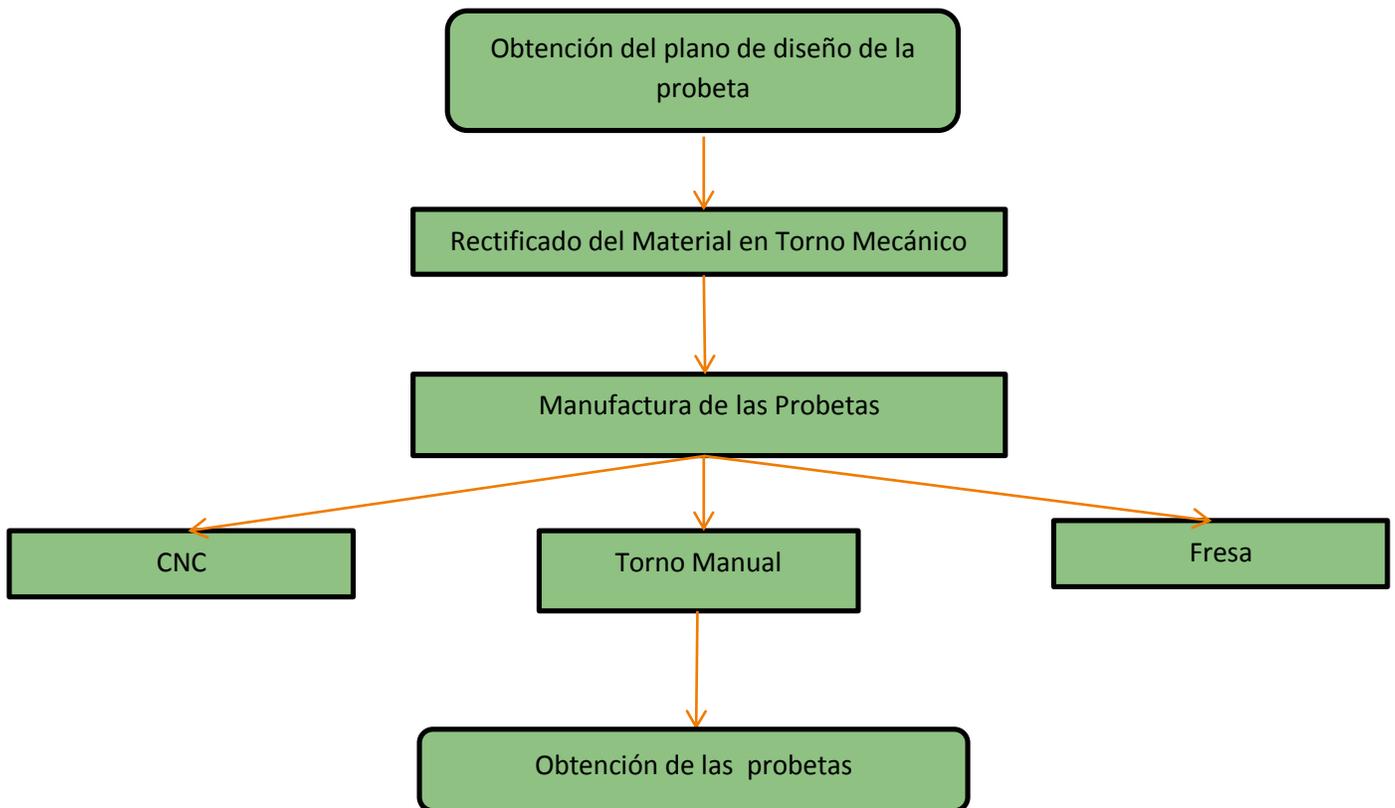


Figura 19 Diagrama experimental para la manufactura de las probetas.

Descripción de la manufactura de las probetas.

Una vez que se obtuvo el material base o sustrato en forma de barra, se realizó un rectificado en el torno manual tomando en cuenta el plano de prueba para no afectar las medidas.

Posteriormente se procedió a la manufactura de las probetas en torno manual y para facilitar la manufactura de las caras paralelas que tiene la probeta se utilizó la fresa manual.

Al darse cuenta que los tornos manuales tuvieron juego en los engranes al acercar el buril, se decidió continuar en CNC, en donde las medidas ya fueron en milímetros tanto en torno como en fresa ya que al ser mucho más pequeños como las piezas que se necesitaban manufacturar se tuvo mayor precisión. De esta forma se terminaron todas las piezas.

La razón del plano de diseño (observar figura 20) fue porque así lo exigió la máquina de desgaste en donde fueron introducidas y evaluadas las probetas.

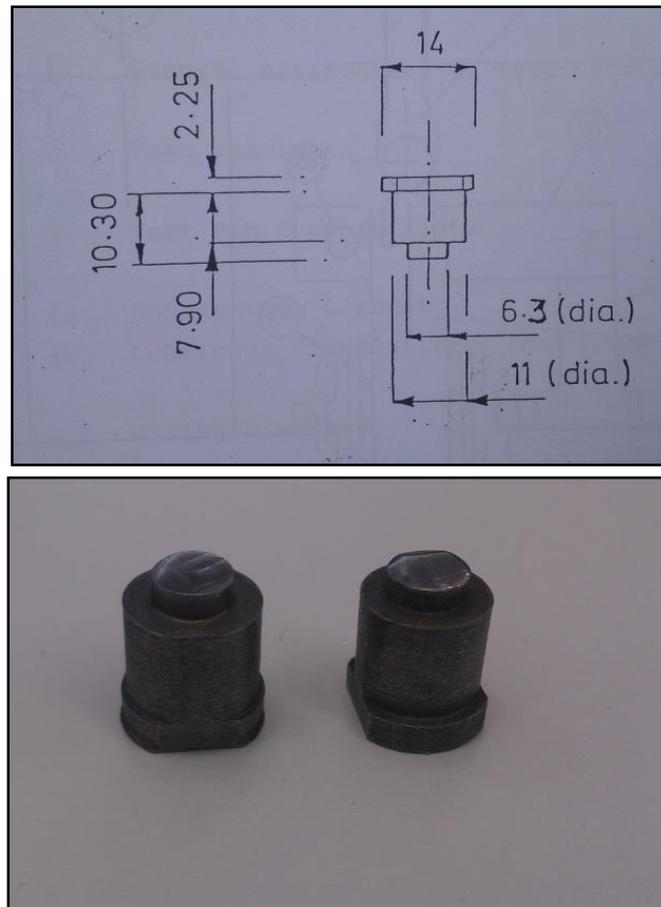


Figura 20. Plano e imagen de las Probetas.

Equipo necesario para la manufactura de las probetas

Tabla 4

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Fresa Manual	Marca INDUMA Potencia del motor 2 HP Fresa manual de banco con 5 grados de libertad. Largo de bancada 1 m. Graduación en pulgadas
Torno Manual	Torno paralelo de banco con 3 grados de libertad. Largo de bancada entre puntos 70 cm. Graduación en pulgadas Motor monofásico
Torno CNC	Potencia 0.6 HP Velocidad 4000 RPM Motor DC Tipo GNF560
Fresa CNC	Marca EMCO con 3 grados de libertad. Tipo: GNF 50-D Motor AC

Galería de Imágenes.



Figura 21.1 Torno Manual



Figura 21.2 Fresa Manual



Figura 21.3 Sierra de cinta



Figura 21.4 Overol



Figura 21.5 Fresa CNC



Figura 21.6 Torno CNC

2.3. Recubrimiento de las probetas con níquel simple Ni-P y compuestos Ni-P-X (X= SiC o WC) por niquelado químico.

Una vez obtenidas las probetas anteriores prosiguió la deposición del recubrimiento, cada baño con una duración de 3 a 5 horas.

Diseño experimental para la obtención del recubrimiento de niquelado simple y compuesto.

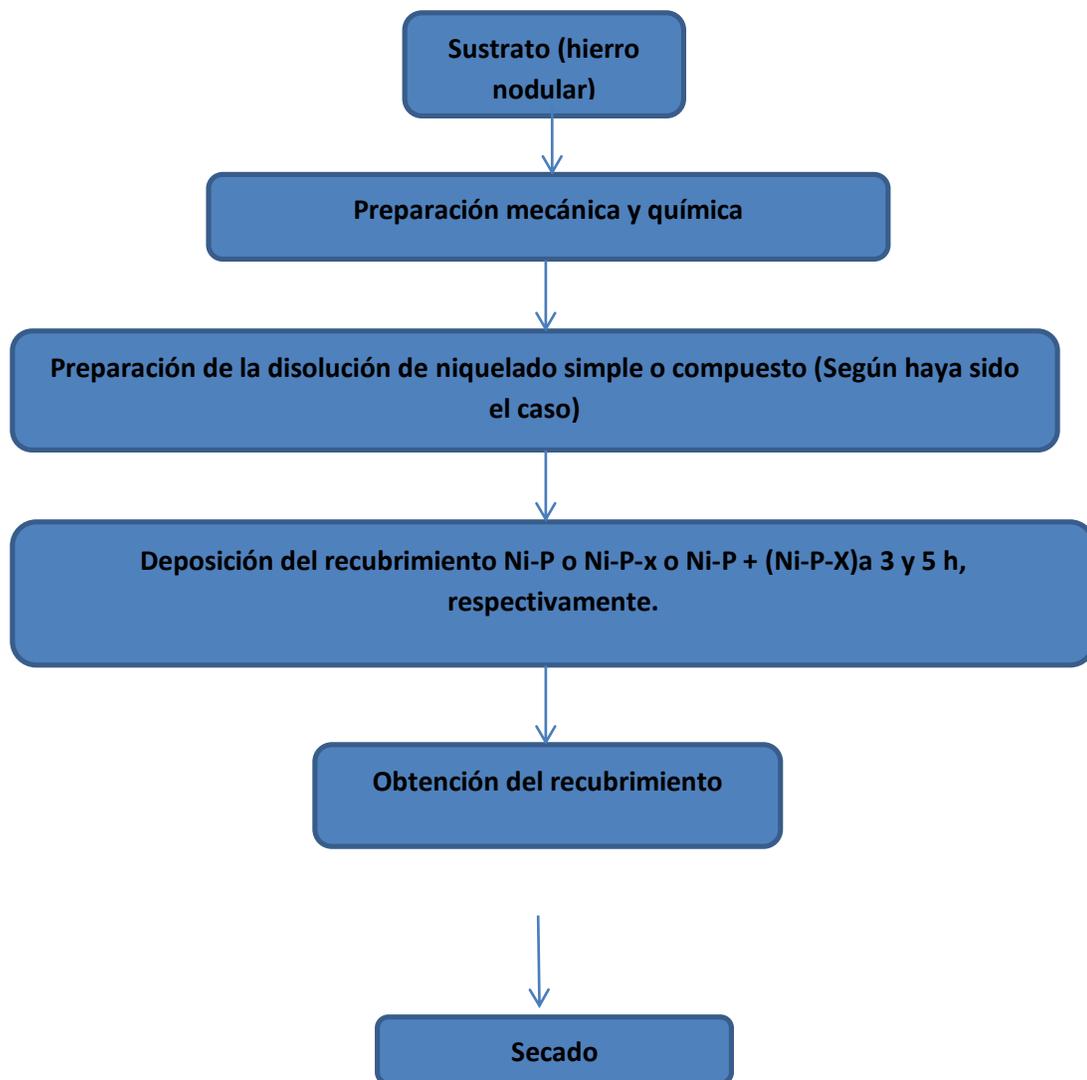


Figura 22. Obtención del recubrimiento niquelado simple y compuesto.

Reactivos para la formulación de la solución de niquelado químico.

Para obtener la disolución de niquelado químico se utilizaron los siguientes reactivos, agregados en orden ascendente a como fueron presentados y diluyéndolos completamente a una temperatura de 86°C.

- 1.- Agua destilada a 600 ml (disolvente)
- 2.- 20 g Sulfato de Níquel. (NiSO_4) [0.2 M]
- 3.- 14 g Hipofosfito de Sodio. (NaPOH_2) [0.25 M]
- 4.- 3 g Ácido Propiónico. ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$) [0.1 M]
- 5.- 15 g de Ácido Láctico ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) [0.25 M]
- 6.- 1 Granalla de Plomo. (4 mg/l de Pb) [$1.13 \cdot 10^{-6}$ M]
- 7.- 20 g de Acetato de Sodio ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$) [0.3 M]
- 8.- En caso de Niquelado Compuesto 1.8 g de SiC [0.07 M] o 0.36 g de WC [0.003 M].

Realización del recubrimiento.

Lo primero que se hizo fue desbastar las probetas con la pulidora metalográfica marca Metkon modelo Gripo 2V con lija de malla 800, buscando dejar un plano uniforme en la superficie de prueba de las probetas y también para quitar óxidos desarrollados en toda la probeta.

Posteriormente siguió la preparación de la disolución en el vaso de precipitados graduado a 600ml de agua destilada, más los elementos anteriormente mencionados.

Finalmente se activó la superficie del sustrato con ácido clorhídrico al 10% por 15 minutos.

Las probetas fueron colocadas en grupos de 6 (observar Figura 23) dentro del recipiente recubierto con poliestireno para otorgar aislamiento térmico; se colocó la resistencia en forma de espiral que proporcionó el calor necesario para elevar la temperatura del agua (tipo baño María) a 86°C. Se agregó el agua necesaria para recubrir el vaso de precipitados con la disolución depositada, tapando el vaso con un plástico para que el agua no se evaporara en cantidades importantes.

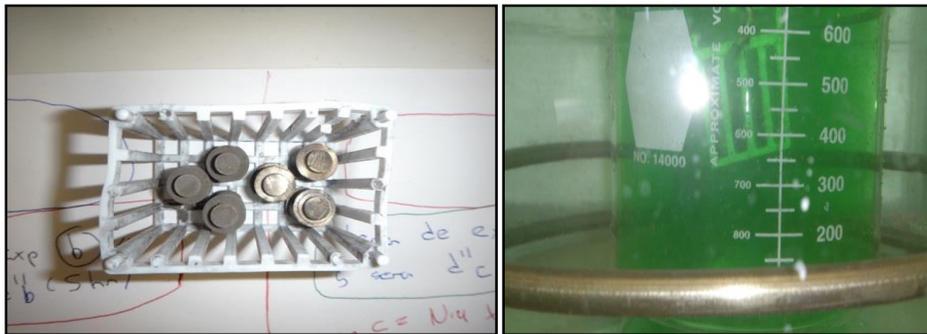


Figura 23 Probetas en gradilla y vaso precipitado aplicando el níquel a las probetas.

Se fijó el termómetro para llevar un control de la temperatura del baño y un regulador de energía, que controló el paso de corriente para estabilizarla en 86°C. Por debajo del recipiente se colocó un sistema de agitación buscando mantener las partículas en suspensión para lograr una correcta codeposición.

Una vez que la temperatura se mantuvo estable, se colocó el vaso que contuvo la disolución (níquelado simple o níquelado + carburos, según sea el caso) dentro del recipiente del baño María o también llamado, calentamiento indirecto por convección térmica del medio, en este caso agua.

Se colocó la rejilla o gradilla de plástico mediante un alambre en forma de U, buscando que dicha rejilla haya quedado inmersa en la disolución.

Tabla 5 Equipo primordial necesario para la obtención de los recubrimientos de níquelado simple y compuesto.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Balanza analítica	La balanza es de la marca OHAUS modelo EXPLORER y cuenta con un intervalo de carga de 0 a 110 g, con una sensibilidad de 0.0001 g.
Parrilla de agitación y calentamiento	Esta parrilla es de la marca CORNING modelo PC-420 y cuenta con un plato de agitación.
Pulidora-desbastadora	La pulidora-desbastadora es de la marca METKON modelo GRIPO 2V
Baño termoregulado	Consta de un termómetro, utilizado para medir la temperatura del recubrimiento (86°C) y vigilar que se mantuviera en dicha temperatura. También cuenta con una parrilla y calentamiento con agitador que se utilizó en modo agitación para mantener las partículas de SiC y WC en suspensión. El recipiente tiene una resistencia eléctrica en forma de serpentín que se usó para poder calentar el baño de niquelado químico compuesto y a su vez se cuenta con regulador de temperatura para mantenerla estable.

Galería de imágenes de equipo necesarios para la obtención de los recubrimientos de níquelado simple y compuesto.



Figura 24.1

1.- (1) Baño termoregulado , (2) Vaso de precipitado con solución, agitación y (4) Regulador de temperatura.

(3) Parrilla de



Figura 24.2

Báscula



Figura 24.3

Resistencia en forma de Serpentin.



Figura 24.4

Pulidora / desbastadora Metalográfica



Figura 24.5 Reactivos

2.4. Caracterización de los recubrimientos.

Una vez realizados los recubrimientos, las probetas se sometieron a pruebas de corrosión (espectroscopía de impedancia electroquímica) y desgaste (tribología) pero antes y en primer lugar se analizaron sus características morfológicas mediante un microscopio electrónico de barrido. La composición química de los recubrimientos se analizó vía EDS (espectroscopía de energía de dispersión) y su microestructura por medio de SEM (microscopio electrónico de barrido) utilizando la modalidad de electrones retrodispersados.

Diagrama experimental de la caracterización de los casos obtenidos.

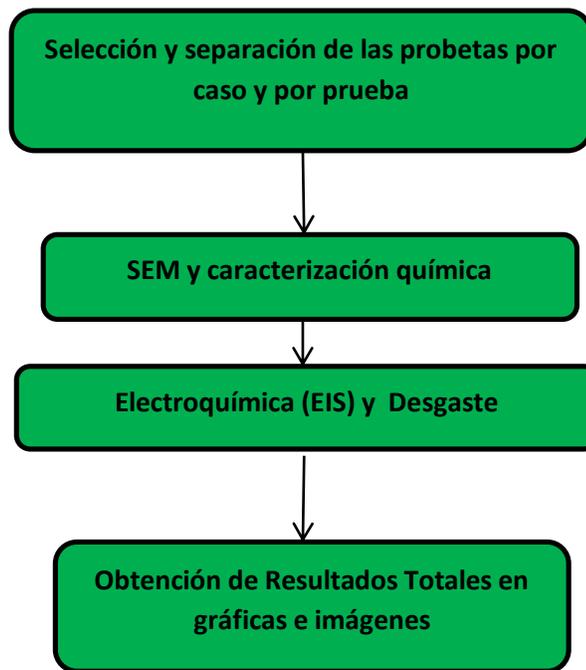


Figura 25. Diagrama experimental de las probetas obtenidas

2.5. Desgaste

Aquí se midió de forma indirecta el desgaste que presentaron las probetas mediante la pérdida de masa de las mismas mediante el desgaste ejercido según los parámetros propios del equipo para posteriormente registrar el peso de las muestras mediante una balanza analítica Ohaus.

Tabla 6 Parámetros de la Máquina de desgaste.

PARÁMETROS	
Temperatura	<i>Ambiente</i>
Área de contacto	<i>0.31 cm²</i>
Lubricación	<i>No</i>
Recorrido	<i>1000 [m]</i>
Velocidad	<i>150 rpm</i>
Carga	<i>Peso muerto del eje 1 [kg]</i>

En las pruebas de desgaste los ensayos tuvieron una duración de 27 minutos a la velocidad indicada en los parámetros (150 rpm). Al terminar dicho intervalo de tiempo la probeta se desmontó y se limpió. Cabe aclarar que la limpieza que se hizo fue ultrasónica en una disolución 50% acetona y 50% agua destilada para asegurarnos del retiro de polvos, grasas, aceites, etc. Dicha limpieza se hizo antes de iniciar el ensayo y al termino del mismo. Al término del ensayo se pesó la probeta y así se calculó su pérdida o no de masa.

Para obtener el tiempo del ensayo se despejo t de la siguiente ecuación:

$$S_{0=(rpm)}(\emptyset \pi)(t)$$

Donde el \emptyset está dado por la posición que ocupó la probeta en el disco de desgaste; la distancia se fijó en 1000 m, $\pi=3.141526$, las rpm se buscó que fueran las mínimas posibles que permitió el aparato (150 rpm) de tal manera que sólo se despejó el tiempo en la fórmula quedando de 27 minutos.

Finalmente el último parámetro que se necesitó para obtener el coeficiente de desgaste fue V_d , el cual se obtuvo de realizar la diferencia de pesar antes y después la probeta de la prueba dividida entre la densidad del material.

$$\frac{P_i - P_F}{\rho} = \frac{D_p}{\rho} = V_d$$

V_d = Volumen de desgaste [cm^3]

P_i = Peso inicial de la probeta [g]

P_f = Peso final de la probeta [g]

ρ = densidad del material (7.81 g/cm^3) se toma la densidad del Ni-P.

D_p = diferencia de pesos [g]

2.6. Evaluación Electroquímica.

Se realizó la prueba electroquímica llamada Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), la cual se considera una técnica de análisis no destructiva.

Se colocaron las probetas en embudos que previamente se les cortó el cilindro que guió el líquido dejando sólo la copa, (ver Figura 26). Se le agregó la disolución de sulfato sódico concentrado 0.1 [M] de (NaSO₄.) Se establecieron periodos de toma de lectura de 0, 72, 192 y 240 h para las pruebas de EIS.



Figura 26 Probetas prueba corrosión – EIS

Tabla 7 Condiciones para las pruebas fueron las que se muestran en esta tabla.

Electrodo de Referencia	Relleno de Sulfato de Sodio 0.1 M
Contra electrodo	Grafito
Medio	NaSO ₄
Equipo electroquímico	ACM Gill AC Instrumental
Frecuencia	10 ⁻¹ a 10 ⁴ Hz
Amplitud de señal	10 mV
Velocidad de barrido	10 puntos por década

Tabla con equipo primordial de caracterización.

Tabla 8 Equipo empleado para caracterización de las probetas.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Microscopio Electrónico de Barrido	Microscopio electrónico de barrido de presión variable marca JEOL modelo 5900LV con un rango de magnificación de 18X A 300000X. La superficie analizada depende de la magnificación seleccionada llegando a obtener un límite de detección de 1µm.
Equipo de desgaste	Máquina para prueba de desgaste y Fricción de discos Fabricado por Swansea Tribology Centre. Modelo Cignus. Dimensiones de gabinete: 460 mm de ancho 460 mm de profundidad 550 mm de altura
Electroquímica EIS	Electrodo de referencia Contraelectrodo Medio corrosivo Equipo electroquímico ACM Gill Instrumental (observar tabla 4.5)

Galería de imágenes



Figura 27.1 Microscopio Electrónico de Barrido



Figura 27.2 Máquina de desgaste



Figura 27.3
Sistema total para las pruebas de corrosión

- 1.- Cabina y soporte universal
- 2.- Máquina GILLAC
- 3.- Software que nos muestra los resultados

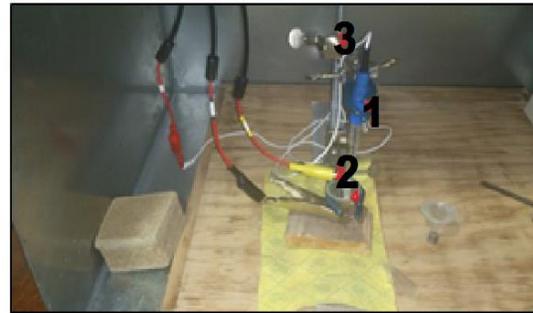


Figura 27.4
Dentro de la cabina

- 1.- Electrodo de sulfatos
- 2.- Electrodo de referencia
- 3.- Soporte universal

CAPÍTULO 3.0.

RESULTADOS y ANÁLISIS.

3.1 Obtención de la fundición nodular

Tabla de composición química.

A continuación la tabla de composición química del hierro nodular que se obtuvo en los laboratorios de Ing. Metalúrgica, mediante espectrometría de emisión óptica (chispa):

Tabla 9

Composición del hierro nodular obtenido.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	3.87	2.531	0.3993	0.0106	0.0114	0.0847	0.5	0.0343	0.0131
s	0.1214	0.0142	0.0024	0.0005	0.0019	0.0006	0.0002	0.0008	0.0001
Sr	0.554	0.561	0.597	5.059	17.096	0.726	0.418	2.24	1.043
	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
\bar{x}	0.0059	0.1475	0.003	0.0039	0.0053	0.0027	0.0312	92.8	
s	0.0004	0.0022	0	0	0.0001	0	0.0037	0.0283	
Sr	6.065	1.473	1.108	1.108	1.066	1.664	11.784	0.0310	

Donde \bar{x} = Media, S= desviación estándar, Sr=desviación estándar de reproducibilidad.

Se observa que los valores son cercanos a los esperados [17], con los valores del porcentaje de carbono observados en la tabla de composición, se espera una matriz perlítica.

Caracterización de la fundición nodular.

Para confirmar que la fundición que se produjo fue hierro nodular se evaluaron los patrones pertinentes a 100 X, que fueron: [7].

1.- Porcentaje de nodularidad; esto es que tanto del carbono adoptó la forma de esferoides.

En este caso se observó un porcentaje cercano al 100% de nodularidad comparada con los patrones AFS (American Foundrymen Society).

En la Figura 28 y 29 se observa la imagen real y la imagen patrón para determinar el porcentaje de nodularidad.

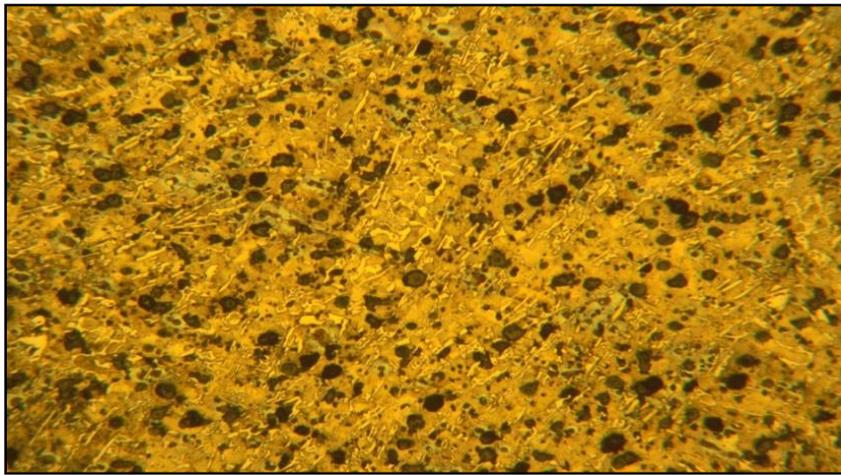


Figura 28. Hierro Nodular a recubrir.

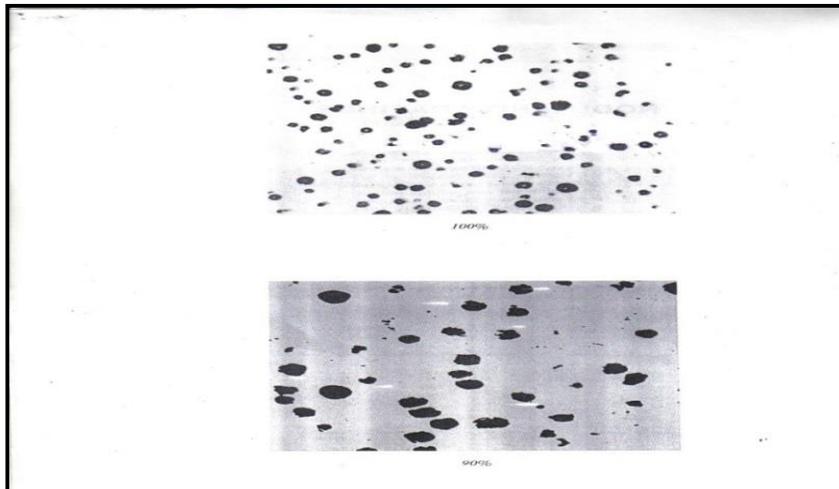
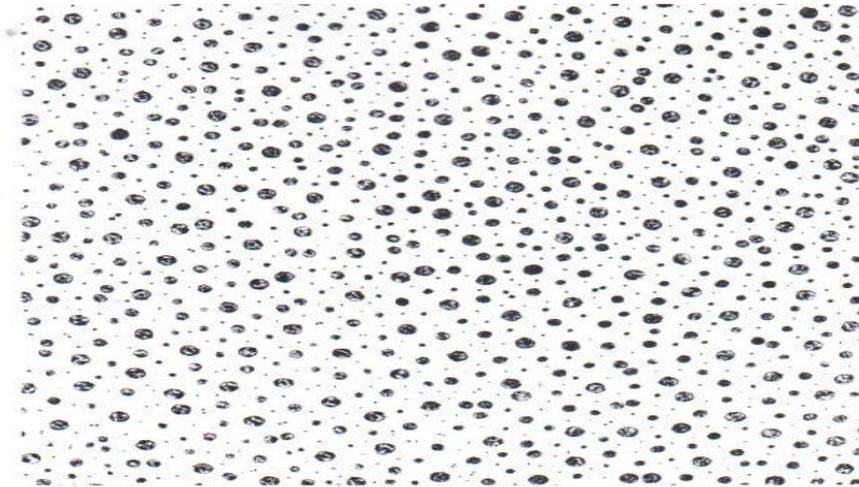
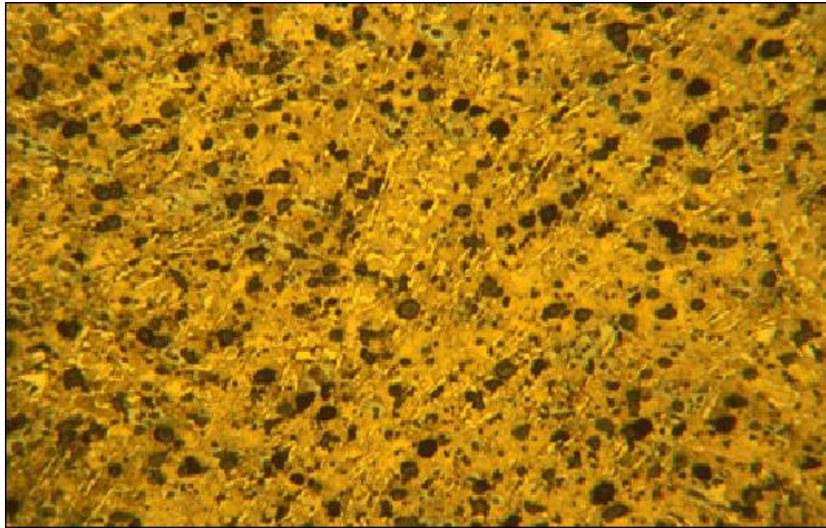


Figura 29. Patrones de modularidad de la AFS (American Foundrymen Society).

2.- Tamaño de nódulo.

Se comparó con la imagen patrón y se observó un tamaño de (2mm) a 100X correspondiente al tamaño 7.



*Size 7
2 mm diameter 100X - Unetched*

Figura 30

3.- Densidad del nódulo: ≈ 300 nódulos/mm².

4.- Tipo de matriz.

En la Figura 31 se observa una matriz perlítica en donde la parte clara es ferrita y perlita la oscura.

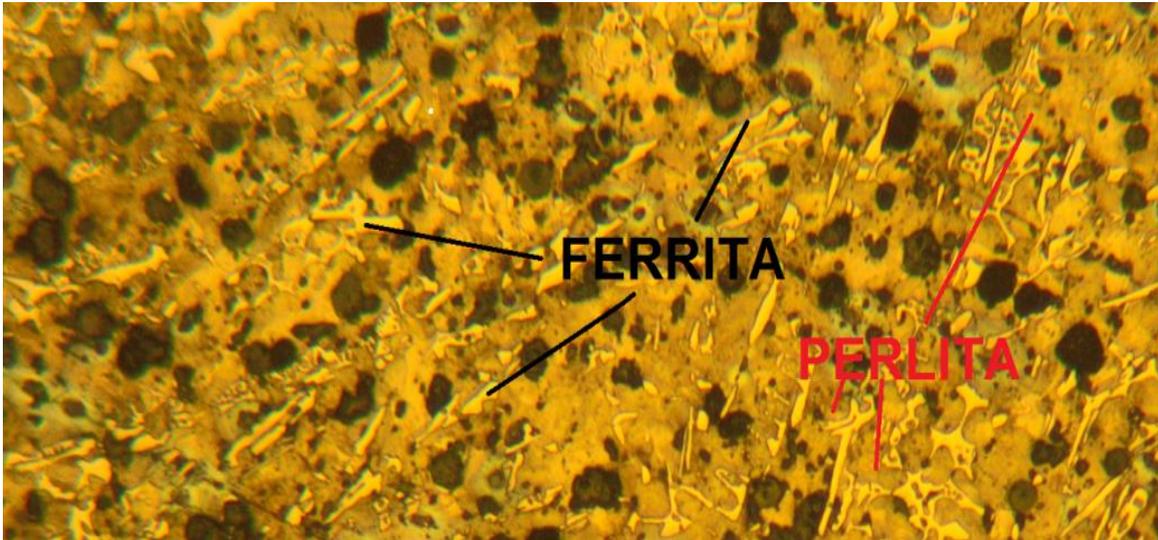
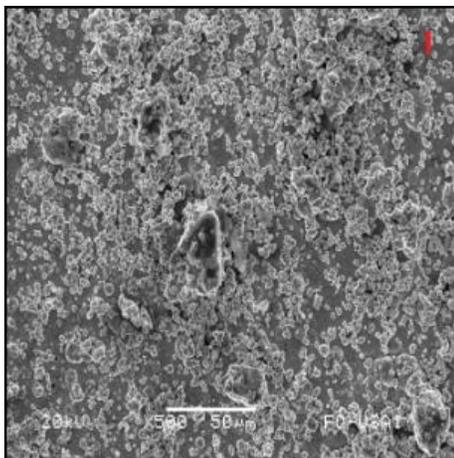


Figura 31. Microestructura de la fundición nodular obtenida.

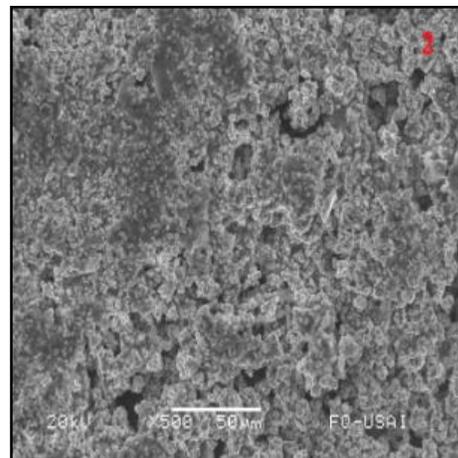
Enseguida se muestran las imágenes de SEM a 500 aumentos de todos los casos con algunas observaciones importantes para cada situación.

Galería de imágenes obtenidas por SEM (Microscopía Electrónica de barrido), 500 X, de los 5 tipos de recubrimientos obtenidos.



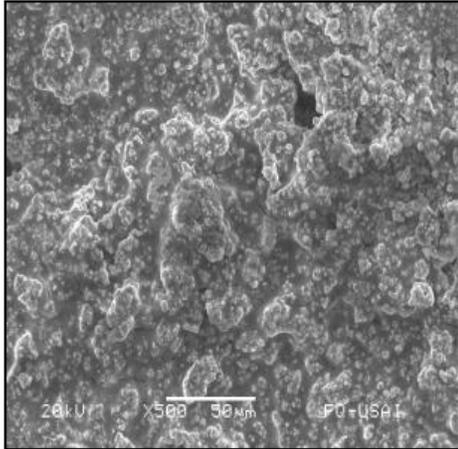
Caso 1. Niq 3 h

Se observa una deposición medianamente homogénea del níquel



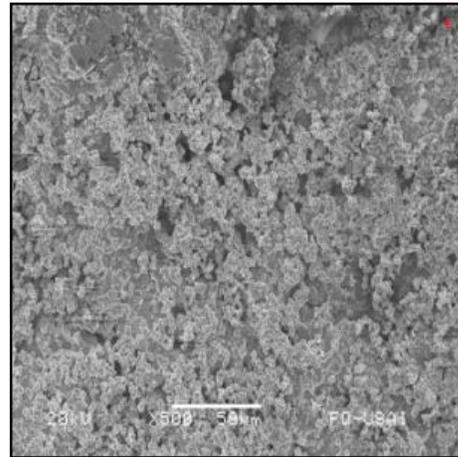
Caso 2. Niq 5 h

Aquí la deposición del níquel es más compacta y hay capas superpuestas



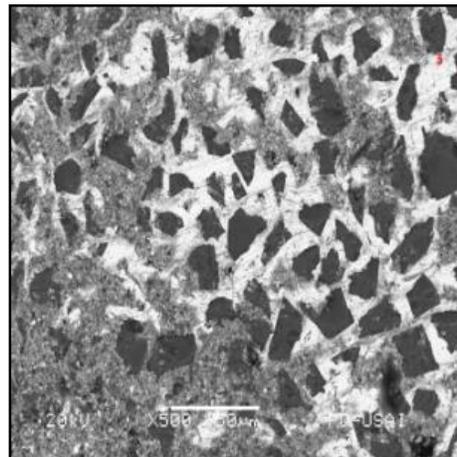
Caso 3. Niq+WC 3 h

Se observan conglomeraciones de WC adheridos junto con el Níquel.



Caso 4. Niq+WC 5h

Se observan aglomeraciones de WC mas densamente encontradas denotadas por una uniformidad en el tono de la imagen.



Caso 5. Niq+SiC 3 h

Se observa la forma de la partícula de SiC que no fue embebida totalmente por el Níquel.

Figura 32

3.2 Análisis imágenes SEM/EDX y microscopio óptico.

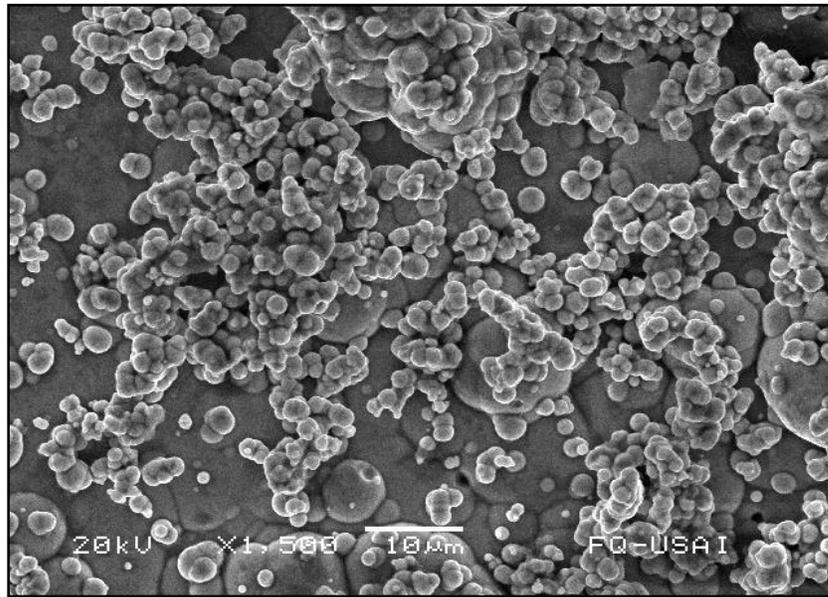


Figura 33. Caso 1 níquel a 3 h.

Se observa a 1500X, el aspecto de un recubrimiento de níquel químico típico, con presencia de clusters unos sobre otros, cuyo tamaño promedio es de 3 micras.

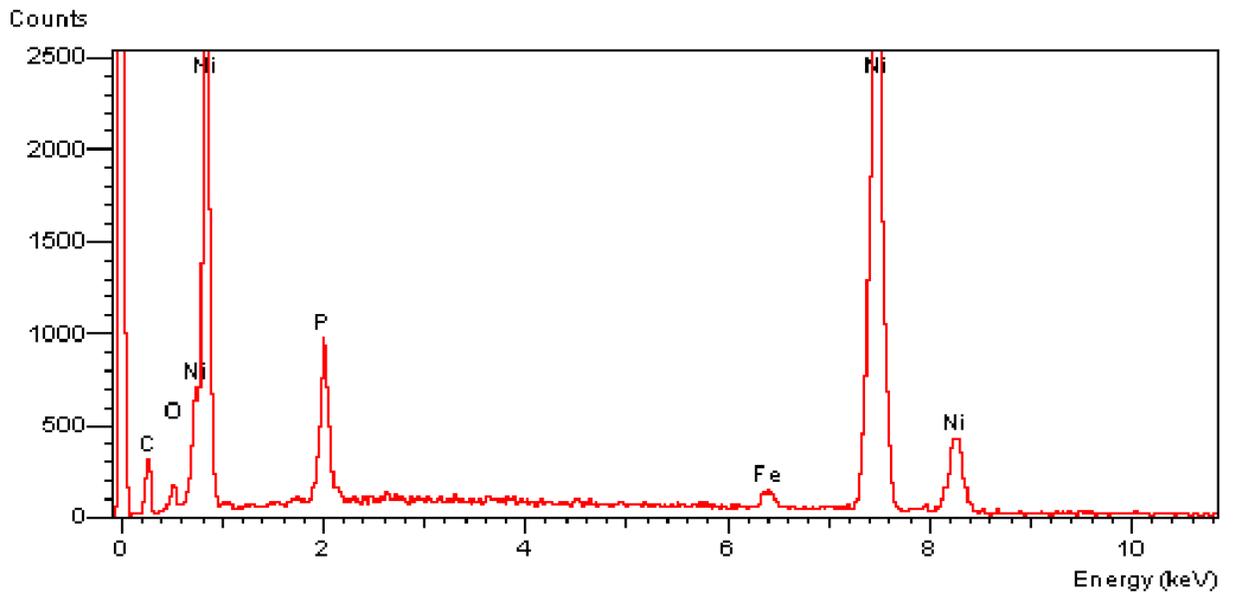


Figura 34 Caso 1 niquelado químico a 3 h.

En el análisis químico se observa que si se consigue un depósito de níquel con presencia de fósforo como se evidencia en el espectro de EDX.

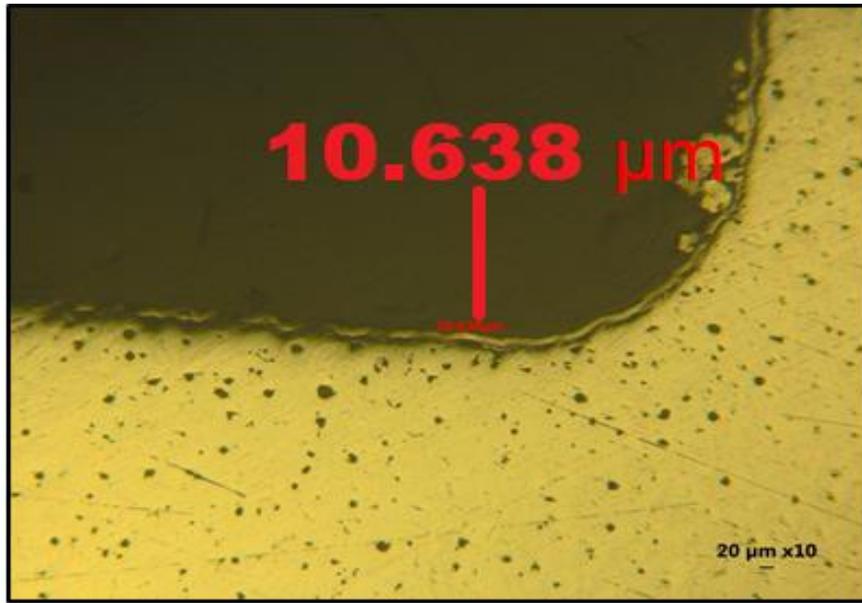


Figura 35. Caso 1 niquelado químico a 3 h.

Observado en microscopio óptico se muestra un grosor en el recubrimiento de 10.63 micras prácticamente uniformes siguiendo el contorno de la pieza base.

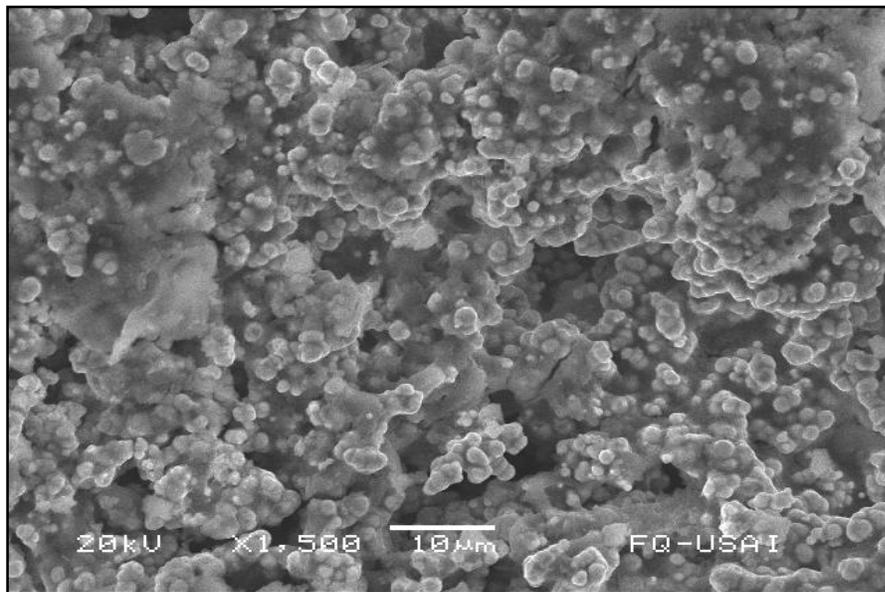


Figura 36. Caso 2 niquelado químico a 5 h.

Se observa a 1500X, una mejora en la homogeneidad del depósito de níquel químico, definiendo a la homogeneidad como la distribución regular del recubrimiento en la superficie del sustrato, pero a la vez la formación de varias capas o más detalladamente agregados.

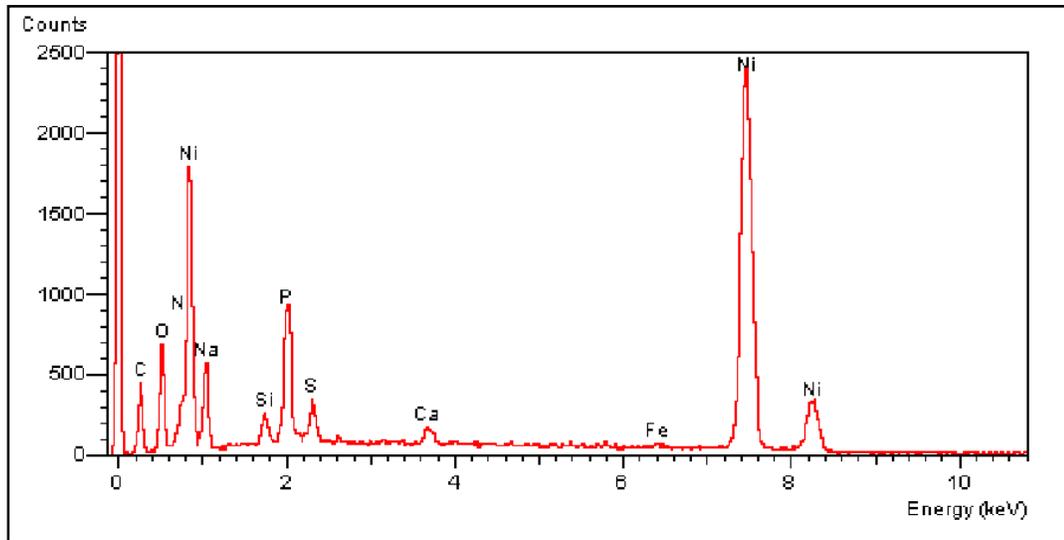


Figura 37. Caso 2 niquelado químico a 5 h.

El resultado obtenido en EDS de este recubrimiento permite verificar que se ha conseguido el niquelado químico.

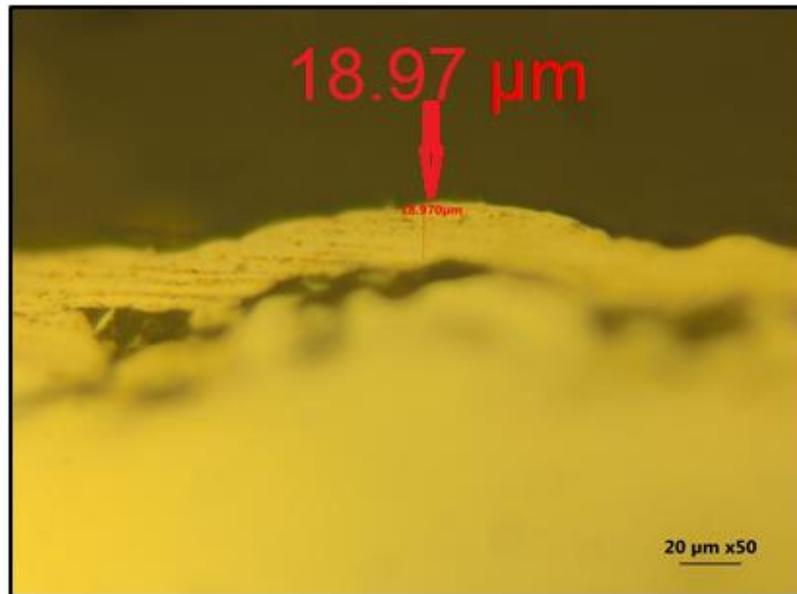


Figura 38. Caso 2.

Observado en microscopio óptico se muestra un grosor en el recubrimiento de 18.97 micras.

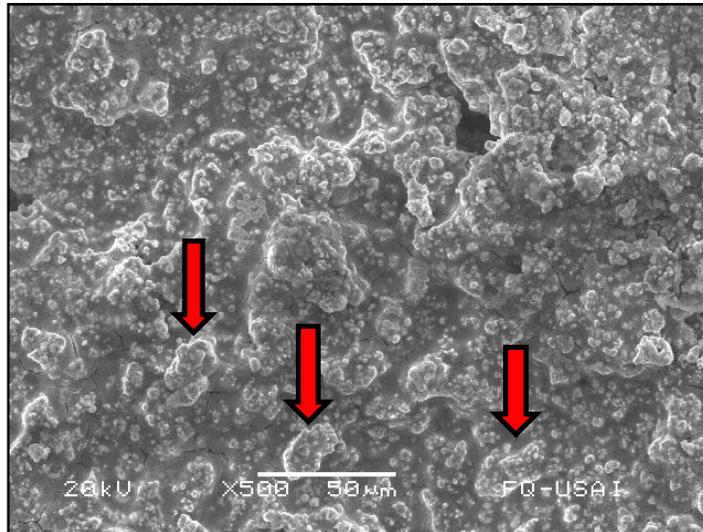


Figura 39. Caso 3 niquelado + WC 3 h.

Se visualiza a 500X un recubrimiento aparentemente más denso y más compacto con una distribución uniforme de las partículas de WC (partículas indicadas con flecha roja).

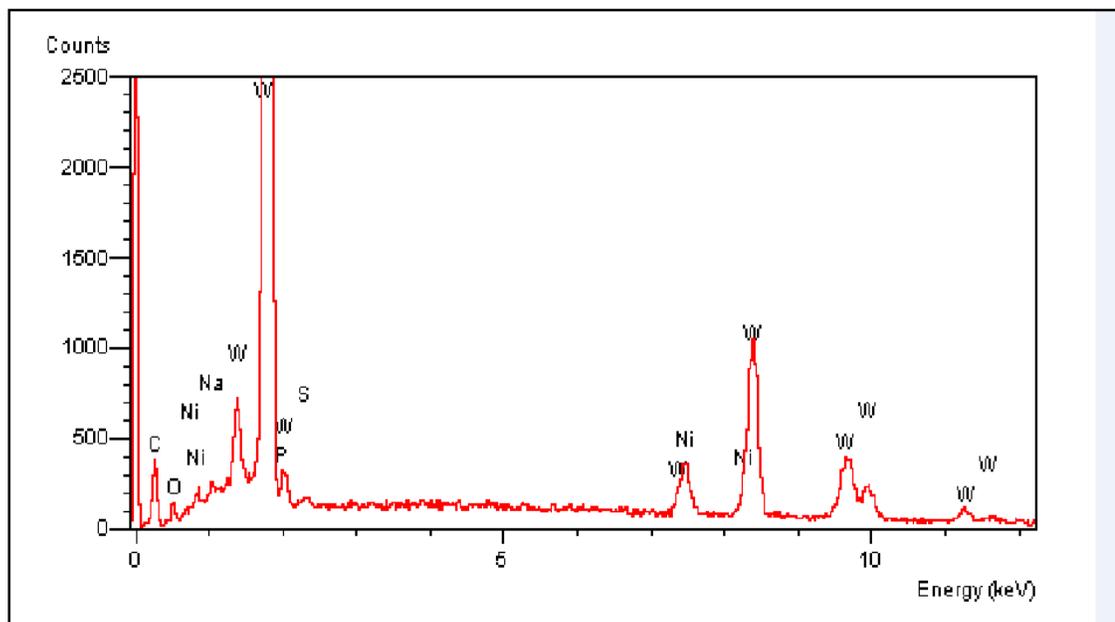


Figura 40. Caso 3 niquelado + WC 3 h.

En el análisis químico de las partículas que se presenta se comprueba de la presencia de WC en los depósitos químicos

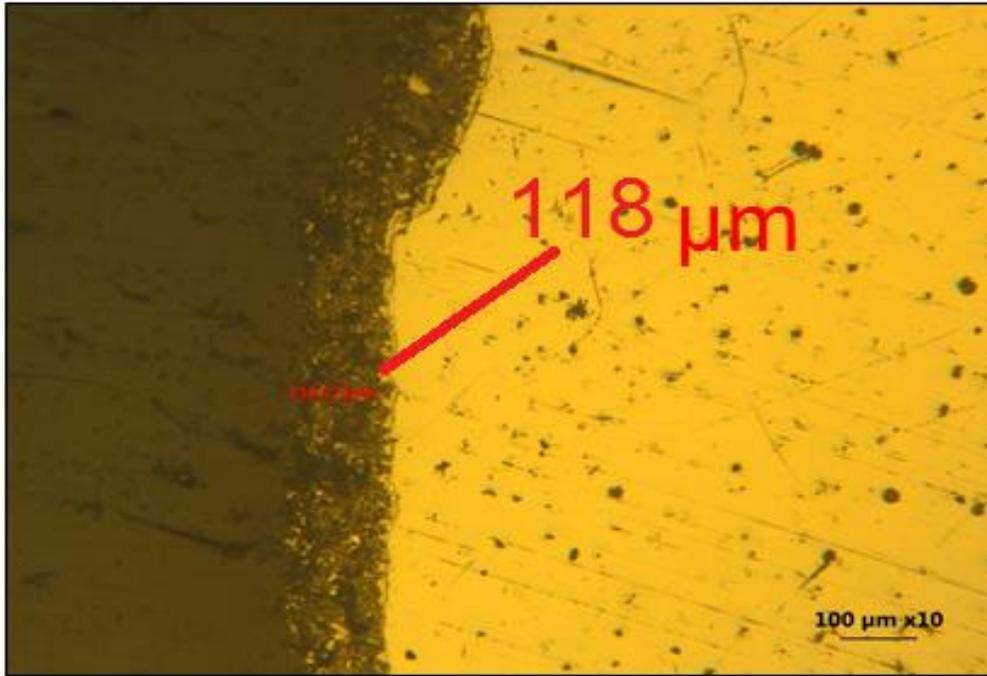


Figura 41. Caso 3 niquelado + WC 3h.

Se observa un grosor en el recubrimiento químico compuesto (Ni-P-WC) de 118 micras.

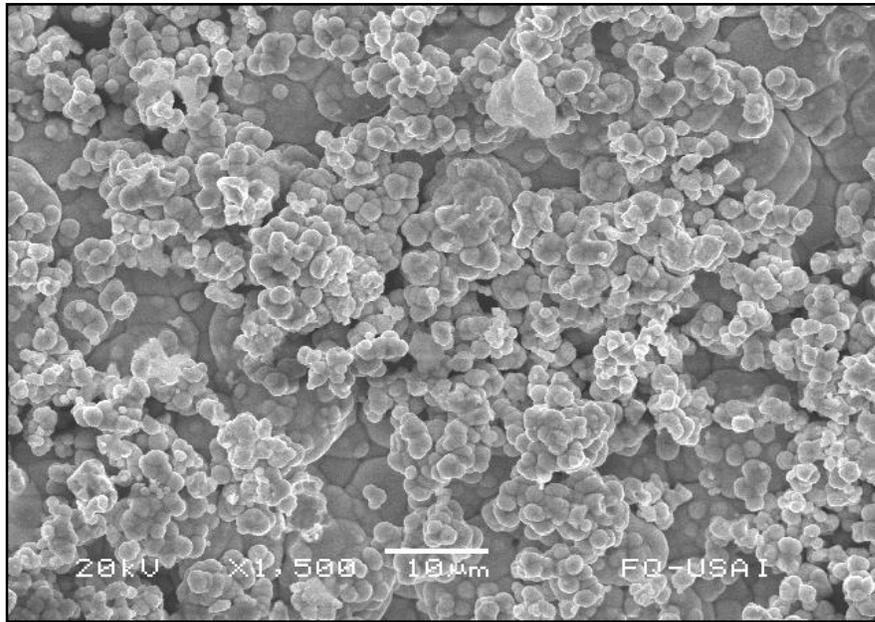


Figura 42. Caso 4 niquelado + WC 5 h.

Se logra observar a X1500, un recubrimiento homogéneo, vista superior.

Se logra observar a X1500, un recubrimiento homogéneo, vista superior, parecido al del caso 3 pero con partículas más grandes, se aprecia que se recubrió el sustrato pero la deposición no fue uniforme.

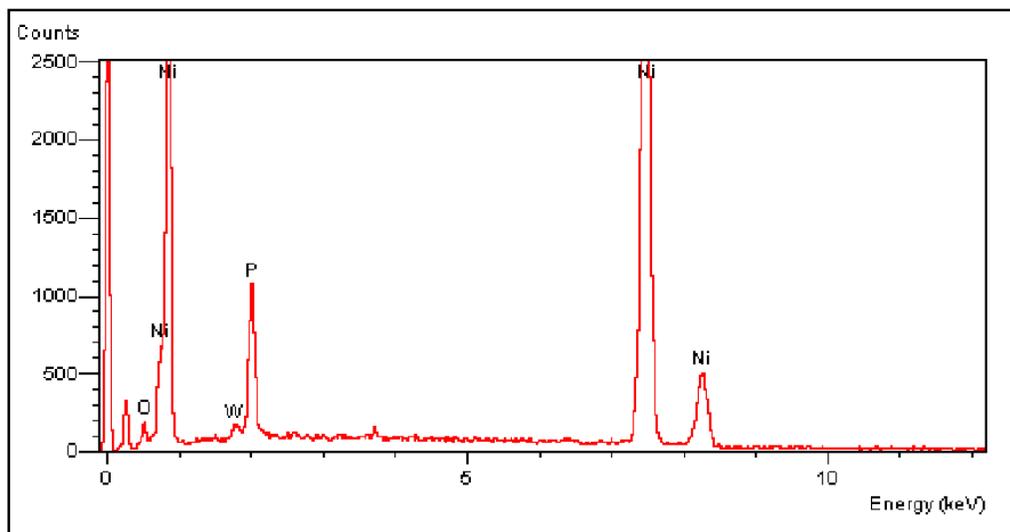


Figura 43. Caso 4 niquelado + WC 5 h.

El análisis químico corrobora que se ha conseguido el recubrimiento químico compuesto Ni-P-WC.

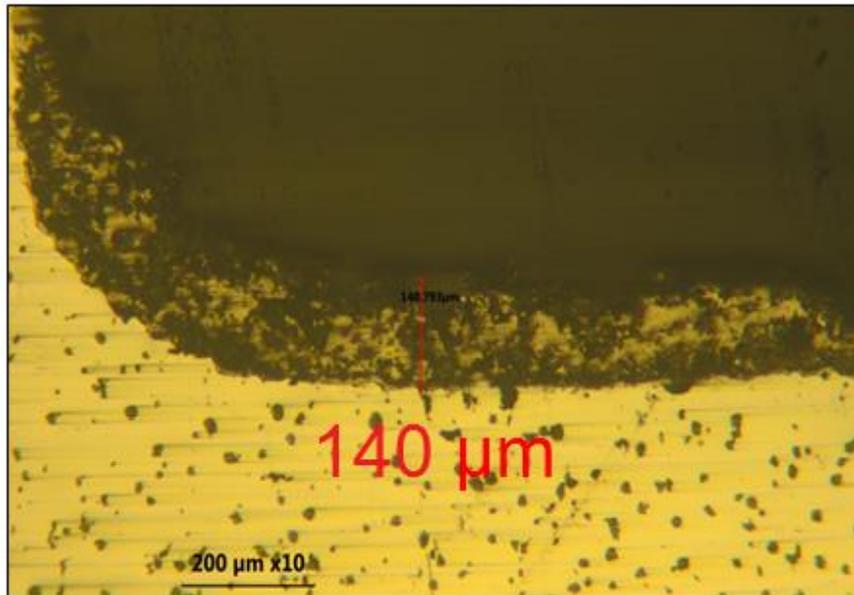


Figura 44. Caso 4.

Recubrimiento con un espesor de 140 micras.

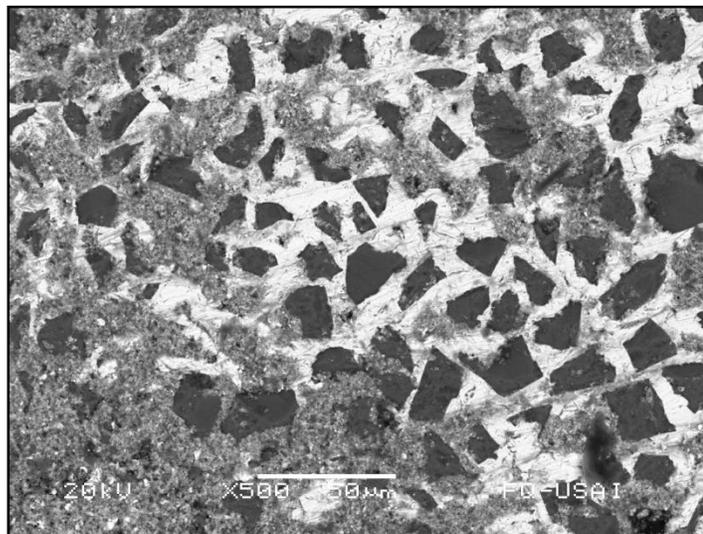


Figura 45. Caso 5 niquelado + SiC

La imagen de SEM permite apreciar la presencia de las partículas de SiC en el niquelado químico como se aprecia en la imagen.

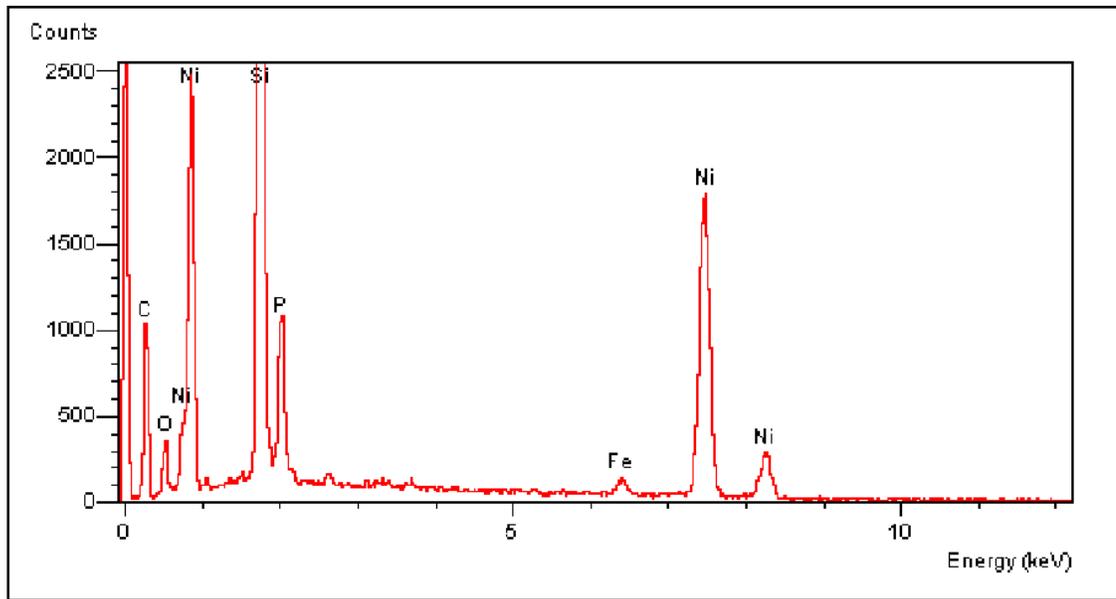


Figura 46. Caso 5 niquelado + SiC.

El análisis químico muestra que se consiguió el recubrimiento químico compuesto Ni-P-SiC.

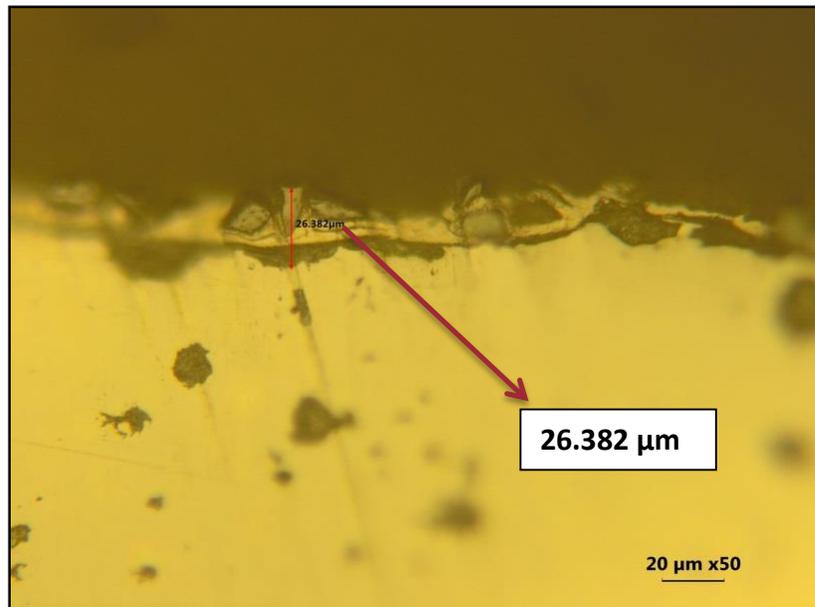


Figura 47. Caso 5

La imagen muestra un recubrimiento Ni-P-SiC con un espesor de 26.38 micras.

A continuación se resumen los espesores obtenidos para cada caso y ver la diferencia entre ellos.

TABLA 10 RESUMEN ESPESORES DE LOS DIFERENTES RECUBRIMIENTOS.

Recubrimiento	Espesor
Caso 1 Niquelado a 3 horas	10.638 μm
Caso 2 Niquelado a 5 horas	18.97 μm
Caso 3 Niquelado más WC a 3 horas	118 μm
Caso 4 Niquelado más WC a 5 horas	140 μm
Caso 5 Niquelado más SiC a 3 horas	26.38 μm

Se observa los diferentes tipos de espesores q se lograron, destacando caso 3 y caso4.

Ensayo de mecánica de desgaste.

Los resultados del ensayo de desgaste efectuado a las diferentes probetas o casos con sus respectivos recubrimientos se muestran en la siguiente gráfica (Figura 48), las columnas indican la pérdida de material en gramos de cada caso:

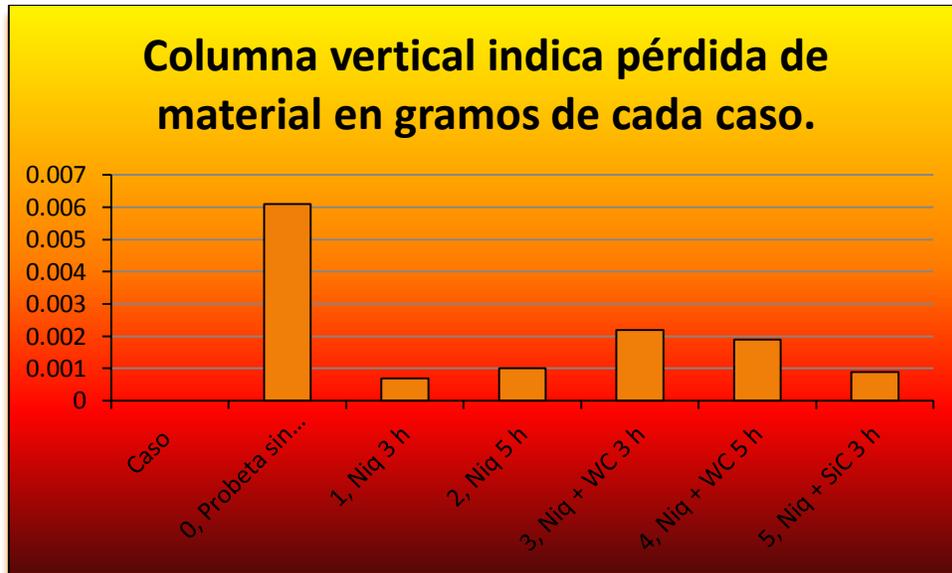


Figura 48. Desgaste mostrado en cada caso y se aprecia la pérdida de material en gramos.

A partir de los resultados obtenidos en la máquina de desgaste se observa que el hierro nodular, que es el material virgen tuvo un mayor desgaste y el que menos se desgastó fue el caso 1 que es al que se le aplicó níquel químico solo, evidenciando la conveniencia de la aplicación del recubrimiento Ni-P para evitar el desgaste, argumentando en que su pérdida de masa en gramos fue la menor..

También comentar que las gráficas muestran que, en cualquier caso los recubrimientos consiguen una significativa reducción de la pérdida de masa respecto a la probeta de fundición nodular desnudo, lo cual evidencia la conveniencia de la aplicación de los recubrimientos propuestos. Ahora bien, los resultados mostrados en aquellas probetas que además del níquelado se incorporaron partículas sobre todo de WC al recubrimiento, no mostraron mejoras, de hecho disminuye su resistencia al desgaste respecto a los recubrimientos generados solo con níquelado químico; esto probablemente se explica por un posible desprendimiento de las partículas cerámicas pobremente adheridas al níquelado que al quedar sueltas entre el recubrimiento y el disco de la máquina de desgaste, actúan como abrasivos que hacen más agresiva la pérdida de material.

Ensayo de corrosión por inmersión.

En la parte de espectroscopia de impedancia electroquímica se sometieron los 5 casos a 4 periodos de toma de lecturas, 0, 72, 192, 240 h respectivamente, resultando el caso 2 y 3 los que mejor se opusieron a la corrosión a 192 h, como se puede observar en las Figuras 49 y 50. Cabe aclarar que a mayor sea el valor donde corta la curva el eje de las ordenadas mayor será su resistencia a la corrosión, todo lo anterior a una frecuencia de 10^{-1} a 10^4 [Hz].

Enseguida una gráfica del diagrama de Bode mostrando el comportamiento de los 5 casos realizados más el material virgen que es caso 0, tomando la lectura a 192 h.

Figura 49. Diagrama de Bode en módulo de impedancia vs frecuencia a 192h de prueba.

Como se observa en la Figura 49, los casos que mejor se comportaron oponiéndose a la corrosión son el caso 2 (NiP a 5 h) y caso 3 (NiP+WC 3 h), obteniendo valores de módulo de impedancia cercanos a los 100 ohms.cm² y 60 ohms.cm² respectivamente a altas frecuencias. Respecto a la resistividad total del sistema ambos casos presentan valores muy cercanos a los 2500 ohms.cm² para mismo tiempo de ensayo.

A continuación se presenta el diagrama de Bode del caso 2 (Ni-P a 5 h), graficando los 4 periodos de toma de lecturas.

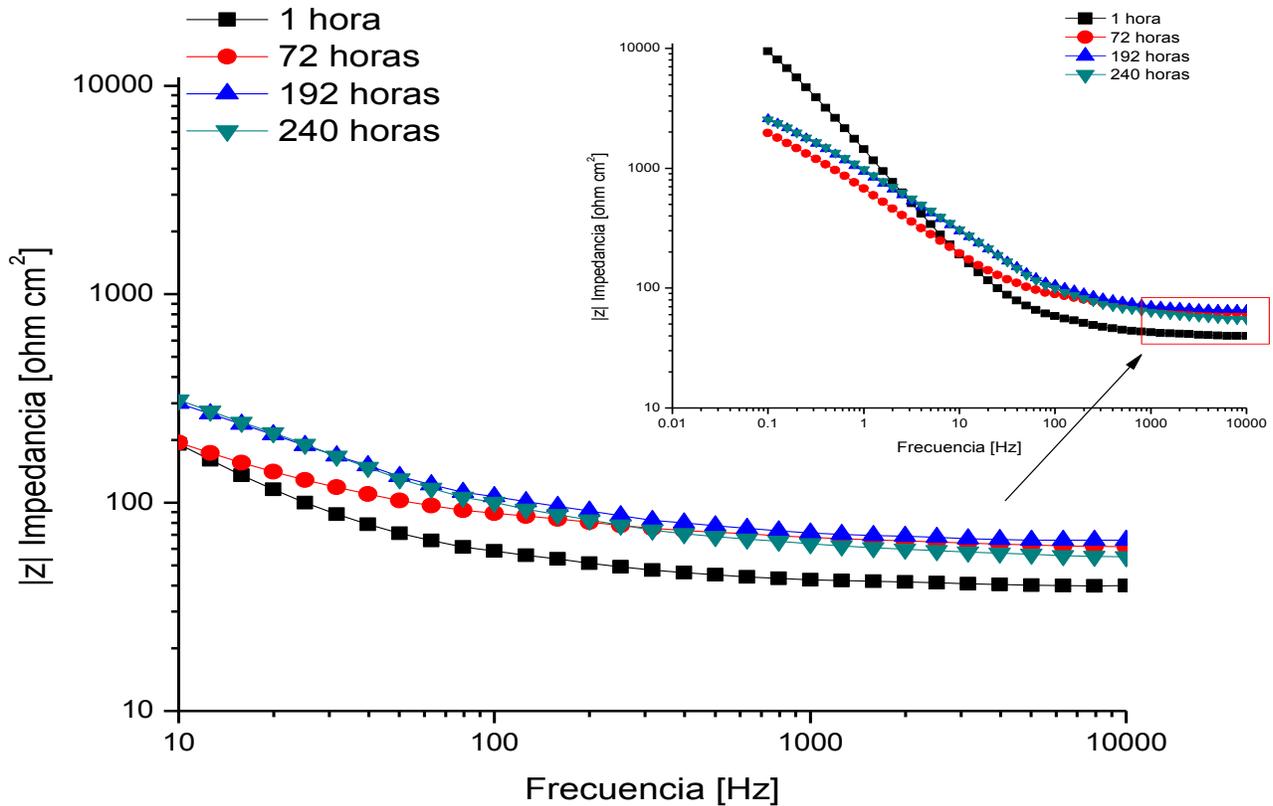


Figura 50. Diagrama de Bode caso 2 (NiP a 5h)

Como se observa en la Figura 50, el caso 2 que mostró el valor más alto de resistencia a la corrosión a las 192h resulta que a mayores tiempos de exposición no es estable pues su resistencia decae a valores cercanos a los 60 ohms.cm^2 lo cual hace suponer que la capa de niquelado pudo no estar bien adherida al sustrato, lo que se corrobora en la Figura 38, o bien contener grietas y poros que permitieron el paso del electrolito que formaron productos de corrosión poco adherentes que bloquearon al corto plazo el paso del electrolito degradando el recubrimiento y generando la corrosión en el sustrato. Debe comentarse que la resistencia global fue muy alta al comienzo de la prueba (10000 ohms.cm^2) pero decae a las 72 h a un valor cercano a 2000 ohms.cm^2 para recuperarse un poco a las 192h y 240h finalizando en casi 2500 ohms.cm^2 .

En segundo lugar en cuanto a resistencia a la corrosión a las 192 h de exposición es el caso 3 (NiP+WC 3h) del que se observa su diagrama de Bode completo a continuación:

Figura 51. Diagrama de Bode del caso 3 (Ni+WC 3h), graficando los 4 periodos de toma de lecturas.

Como se observa en la Figura 51, el caso 3 que mostró el segundo valor más alto de resistencia a la corrosión a las 192h resulta que incluso originalmente al tiempo de prueba de 1h el valor de resistencia era mayor, del orden de 70 ohms.cm² pero este fue disminuyendo con el paso del tiempo en todo momento, a pesar de tener un espesor de 118 micras, hasta llegar a un mínimo de 40 ohms.cm² a las 240h de ensayo; lo cual hace suponer que la presencia de carburos de tungsteno pobremente adheridos no agrega resistencia a la corrosión, posiblemente por los poros generados y la posibilidad de generar pares galvánicos que afecten fuertemente el desempeño electroquímico del recubrimiento compuesto; pues lo mismo pasa a bajas frecuencias, presentando un máximo de 5000 ohms.cm² a la primer hora de prueba para, posteriormente decaer a un valor cercano a 2000 ohms.cm² al finalizar las pruebas.

Análisis de resultados globales

Se lograron obtener los recubrimientos químicos de níquel-fósforo y de níquel fósforo-partículas de carburo, logrando los siguientes espesores en los recubrimientos. 10.63 micras en el caso de níquel simple 3 h, 18.97 micras en níquel simple 5h, 118 micras en niquelado + WC 3h, 140 micras en niquelado + WC a 5 h y 26 micras en niquelado + SiC a 3h.

En cuanto a resistencia al desgaste se obtuvo un aumento de resistencia en el caso 1 que es níquel simple a 3 horas recubrimiento, en la Figura 33 se observa que hubo una fijación homogénea del níquel químico y en las gráficas de composición química se puede observar que hubo una mayor deposición de níquel-fósforo.

El caso 5 Ni+SiC tuvo un buen comportamiento contra el desgaste, solo antecedido por el caso 1, la razón por la cual el caso 5 presentó dicho comportamiento posiblemente puede argumentarse con base en la homogeneidad del recubrimiento y en la buena incorporación y distribución de los carburos, como se puede observar en la Figura 45, en donde a partir de la vista superior de esta imagen de SEM, se puede observar la buena codeposición de carburos de silicio amalgamados con el Ni-P, razón por la cual pudieron resistir al desgaste mejor que los casos restantes. Lo anterior no puede extrapolarse a los recubrimientos con presencia de WC, pues a pesar de observarse mejoras respecto al metal desnudo, pudieron haberse presentado partículas con menor adherencia y distribución heterogénea que propiciarán un mecanismo de desgaste de 3 cuerpos que acelerara la pérdida de masa de los recubrimientos propuestos.

En lo relativo a la corrosión, tenemos que el caso que mejor se comportó a 192 horas de proceso para impedir la corrosión fue el caso 2, que es niquelado solo a 5 h como se puede observar en el diagrama de Bode (Figura 50), donde se observa un valor cercano a 100 ohms.cm² a altas frecuencias, seguido del caso 3, Ni + WC a 3h donde obtuvo un valor cercano a 60 ohms.cm² a altas frecuencias y de 2500 ohms.cm² a bajas frecuencias para ambos casos.

De lo anterior podemos inferir que a mayor tiempo del proceso de niquelado químico si inciden positivamente en la resistencia a la corrosión, para argumentar dicho comportamiento se puede ver la imagen del caso 2 en SEM (Figura 36) donde se puede ver un recubrimiento bastante homogéneo y de mayor espesor que con 3 horas de recubrimiento, de tal manera que podría impedir más eficientemente la filtración de algún líquido que propicie la corrosión.

Conclusiones Finales.

Al evaluar la resistencia al desgaste y a la corrosión en ambos casos hubo mejoras. En cuanto al desgaste, en el mejor caso con el recubrimiento de níquelado a 3 horas la mejora fue del orden del 800%. En cuanto a la resistencia a la corrosión se lograron mejoras del orden del 500%, en ambos casos respecto al material virgen observando la Figura 48 y 49 respectivamente.

En el tema de resistencia al desgaste, se observa que el caso de mejor resistencia al desgaste es el caso 1 que es níquel simple, en segundo lugar en cuanto a oposición al desgaste está el caso 5 que es Ni + SiC. Habrá de hacerse notar la importancia de lograr un amalgamiento, distribución y contenido apropiados para lograr un incremento importante con la incorporación de carburos que justifique su utilización, sobre todo, en los carburos de tungsteno.

En lo relativo a la resistencia a la corrosión, se tiene que el caso que mejor se comportó en oponerse a la corrosión fue el caso 2, que es Níquel solo a 5 horas, en ello juega un papel importante el contenido de fósforo observado en la Figura 37, el espesor y homogeneidad logrados.

En lo futuro se espera que este trabajo sirva como una guía para lograr generar recubrimientos compuestos con propiedades atractivas que los hagan competitivos y encuentren áreas de aplicación aún no exploradas.

Bibliografía.

- [1] Barreiro Apraiz José. (1977). Fundiciones. Madrid. Ed. Dossat. Madrid. 165
- [2] Información interna donada por la Sociedad Mexicana de Fundidores A.C. 2012.
- [3] Modern casting. World casting production by metal. December 2010. USA. PP 24-27
- [4] UMSS Facultad de Ciencias y tecnología Ing. Mecánica, Fundición en Molde Permanente Moldeo y fundición. No 199. Páginas 30-34.
- [5] Wyman, L. L., Moore, G. A., "Quantitative Metallographic Evaluations of Graphite Microstructures," Modern Castings, Vol 43, No 1, p. 7 Jan 1963.
- [6] J. Salvande y R. Dommarco. 2000. Estudio de la resistencia a la fatiga de contacto de fundición nodular. IV Coloquio Latinoamericano de fractura y fatiga. 7 páginas.
- [7] Barba Pingarrón Arturo. (2000) Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. Ed Consejo superior de investigaciones científicas. Madrid, Pág. 617.
- [8] Dennis J. K. (1993). Nickel and Chromium plating Ed. Butterworths USA. 464
- [9] Field Samuel. (1955). Recubrimientos electrolíticos. Ed Gustavo Gili. (Barcelona).
- [10] Blum William. (1982). Galvanotecnia y Galvanoplastia. Ed. Continental S.a. de C.V. México D.F. 710
- [11] Dr. Félix Sánchez de Jesús. 2005. Efecto del sistema de agitación sobre la codeposición de alúmina en recubrimientos de niquelado químico compuesto. Superficies y Vacío. 8 páginas.
- [12] ASM Handbook. Volume 21. Compositos. 2001. Miracle Daniele B and Donaldson Steven. Ohio USA. 1143
- [13] Department of defense handbook USA. 2002. Composite materials handbook. Volume 4 Metal Matrix Composites. USA. Department of defense. 316.
- [14] Genescá Llongueras Juan, Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión. Espectroscopia de impedancia electroquímica.
- [15] http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/pfcm15_9_2.html - consultado el 26 julio 16.
- [16] De donde convertí Kg/mm² a MPa
- <http://www.translatorscafe.com/cafe/EN/units-converter/pressure/6-28/megapascal-kilogram-force%2Fmillimeter%C2%B2/>, consultado 26 julio 16
- [17] metalurgia fundiciones-adi.html – consultada 26 julio 16
- [18] Principles and Application of Tribology. Bharat Bhushan. Ed. John Wiley and Sons, 1999.