



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO METÁLICO BASE
ALUMINIO APLICADO EN ACERO 1010 Y ACERO 1018.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

JUAN CARLOS TRUJILLO GRANADOS

ASESOR: MIGUEL DE NAZARETH PINEDA BECERRIL

COASESOR: OMAR GARCÍA LEÓN

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

ATN: M. en A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos **La Tesis:**

“ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO METÁLICO BASE ALUMINIO APLICADO EN ACERO 1010 Y ACERO 1018”

Que presenta el pasante: **JUAN CARLOS TRUJILLO GRANADOS**

Con número de cuenta: **41004405-4** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Electricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 03 de marzo de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna	
VOCAL	M. en I. Sergio Martín Durán Guerrero	
SECRETARIO	M. en I. Miguel de Nazareth Pineda Becerril	
1er SUPLENTE	M. en I. Juan Carlos Axotla García	
2do SUPLENTE	M. en I. Marco Alberto Torres Olvera	

NOTA: Los sindocales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.
(Art 127 REP)

HHA/Vc

AGRADECIMIENTOS

A dios

Por permitirme concluir mi carrera y por la vida que me dio.

A mis padres (Carlos T.S y Nestora G.F.)

Por todo el apoyo que me han brindado, por estar siempre conmigo, por confiar en mí, por motivarme y por la educación que me han dado.

A mi abuelita (mamachepa)

Por su apoyo y motivación.

A mis tíos

Por apoyarme y motivarme.

A el M.I. Miguel de Nazareth Pineda Becerril

Por su apoyo a lo largo de mi carrera, en la realización de mi trabajo, por su asesoramiento, disposición y por su motivación de seguir adelante.

Al maestro Noé Alberto Cortes Guerrero

Por apoyarme a la realización de las pruebas de mí trabajo en el laboratorio.

Al maestro Juan José García Ruiz

Por apoyarme a la realización de las pruebas de mí trabajo.

A la FESC y a la UNAM

Por la educación brindada.

Contenido

1.-INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES.....	4
2.1 ACERO	4
2.1.1.-ACEROS 1010.....	6
2.1.2.-ACEROS 1018.....	7
2.2.-PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL.....	7
2.2.1. MODULO DE YOUNG.....	7
2.2.2 CARGA MAXIMA.....	9
2.3. CORROSION.....	11
2.4. RECUBRIMIENTOS METALICOS	17
2.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS REVESTIMIENTOS PROYECCIÓN TÉRMICA	18
2.4.2. PROCESOS DE PULVERIZACIÓN TÉRMICA.....	19
2.5 ROCIADO.....	21
2.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO ...	22
2.5.2 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO.....	23
2.5.3. PROCESOS POR ROCIADO TÉRMICO	24
3.-MATERIAL Y METODOS METODOLOGÍA	29
3.1.-DISEÑO EXPERIMENTAL	29
3.2.-ANALISIS ESTADISTICO.....	29
3.3.-PRUEBA DE TENSION	32
3.3.1.-MÓDULO DE YOUNG O MODULO DE ELASTICIDAD	44
3.3.2. CARGA MÁXIMA.....	45
3.4. PISTOLA FLAMESPRAY MK 61.....	45
MONTAJE DE LA BOQUILLA	48
EL CABEZAL DE GAS Y LA VÁLVULA.....	48
EL CABEZAL DE GAS	49
LA VÁLVULA PRINCIPAL.....	49
UNIDAD DE SUMINISTRO DE ALAMBRE	50
REGULADORES DE PRESIÓN Y SUPRESORES DE RETORNO RÁPIDO.	51
MEDIDORES DE FLUJO Y MANGUERAS.	52
UNIDAD DE REGULACIÓN Y FILTRACIÓN DE AIRE (RFA).	53

ESPECIFICACIONES.....	54
CIFRAS DE RENDIMIENTO TÍPICAS.....	54
DIMENSIONES.....	55
SERVICIOS REQUERIDOS.....	55
SUPRESORES DE RETORNO RÁPIDO	55
MEDIDAS DE SEGURIDAD.	56
3.5. CORROSIÓN.....	56
3.6.-ADHERENCIA	72
3.7. RUGOSIDAD	75
3.8.-ESPESORES.....	85
4.- EXPERIMENTACION.....	87
4.1.-PREPARACION DE LAS PROBETAS	87
4.2. PRUEBA DE RUGOSIDAD	96
4.3.-RECUBRIMIENTO METALICO	96
4.4.-PRUEBA DE ESPESORES.....	98
4.5.-PRUEBA DE TENSIÓN	99
4.6.-PRUEBA DE CORROSION	101
4.7.-PRUEBA DE ADHERENCIA	103
5.-ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	104
5.1.-ENSAYO DE TENSION.....	105
5.1.1.-MODULO DE YOUNG.	105
5.1.2.-CARGA MAXIMA.	106
5.2.-PRUEBA DE CORROSION.	108
5.3.-PRUEBA DE RUGOSIDAD.....	111
5.4.-PRUEBA DE ADHERENCIA.	114
5.5.-PRUEBA DE ESPESORES.....	114
6.-CONCLUSIONES	116

1.-INTRODUCCIÓN

Se puede definir como un material a un conjunto de elementos que son necesarios para actividades o tareas específicas para la producción de bienes y servicios. Las propiedades técnicas de los materiales son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otros. Entre las propiedades están la resistencia a esfuerzos de tracción, compresión, flexión y torsión, así como desgaste y fatiga, dureza, resiliencia, elasticidad, tenacidad, fragilidad, cohesión, plasticidad, ductilidad, maleabilidad, porosidad, magnetismo, las facilidades que tenga el material para soldadura, mecanizado, tratamiento térmico así como la resistencia que tenga a los procesos de oxidación, corrosión. Asimismo es interesante conocer el grado de conductividad eléctrica y la conductividad térmica que tenga y las facilidades que tenga para formar aleaciones. Debido a que cada material se comporta diferente, es necesario analizar su comportamiento mediante pruebas experimentales.

Uno de los materiales que más se utiliza es el acero. El acero es el material más utilizado en las edificaciones actuales por sus características casi ideales. Se utiliza en la construcción de puentes colgantes, los hilos, vigas etc. Las construcciones que lo utilizan de inmediato obtienen sus beneficios pues es un material que cuenta con una gran rapidez estructural, lo cual lo hace preferido en el campo económico. Tiene características de flexibilidad, costo, rapidez y peso sobre muchos materiales existentes. Aunque de igual forma presenta desventajas como a la erosión y al aumento de temperatura. Todas estas características han sido evaluadas por los ingenieros para llegar a la conclusión de que hoy en día, aun con sus deficiencias es el material más utilizado en grandes edificaciones.

El acero es una aleación de hierro con una pequeña proporción de carbono, que tiene propiedades especiales tales como dureza y elasticidad. En general, también se pueden fabricar aceros con otros componentes como manganeso, níquel o cromo. El hierro es un constituyente fundamental de algunas de las más importantes aleaciones de la ingeniería. El hierro es un metal alotrópico, por lo que puede existir en más de una estructura reticular dependiendo fundamentalmente de la temperatura. Es uno de los metales más útiles debido a su gran abundancia en la corteza terrestre (constituyendo más del 5% de esta, aunque rara vez se encuentra en estado puro, lo más normal es hallarlo combinado con otros elementos en forma de óxidos, carbonatos o sulfuros) y a que se obtiene con gran facilidad y con una gran pureza comercial. Posee propiedades físicas y mecánicas muy apreciadas y de la más amplia variedad.

Las propiedades mecánicas que describen la forma en que el material responde a una fuerza aplicada, incluyen resistencia, rigidez y ductilidad. Sin embargo, es importante la manera en que se comporta un material al ser expuesto a un golpe repentino e intenso (impacto), sometido a la aplicación de cargas cíclicas en el tiempo (fatiga), expuesto a altas temperaturas (termofluencia) o sujeto a condiciones abrasivas (desgaste). Las propiedades mecánicas también determinan la facilidad con la cual se puede deformar un material para llegar a una forma útil.

Una forma de mejorar las propiedades de los aceros es mediante tratamientos o mediante la aplicación de recubrimientos. El objeto de los tratamientos es mejorar las propiedades

mecánicas de los metales bien mejorando su dureza y resistencia mecánica o bien aumentando su plasticidad para facilitar su conformado. Estos tratamientos no deben alterar de forma notable la composición química de un metal.

El fin más frecuente e importante de los recubrimientos metálicos es el de proteger a otros metales de la corrosión. Otros usos son: lograr un conjunto de propiedades diferentes que no están reunidas en un metal solo o fines decorativos. La mayoría de los metales, expuestos a la acción del ambiente, sufren transformaciones físicoquímicas que los degradan, reducen su utilidad y llegan a destruirlos. Los fenómenos que originan estos cambios se agrupan en el concepto de corrosión, o, con mayor amplitud, en el de deterioro de materiales.

La aplicación de un recubrimiento metálico tiene por finalidad proteger de la corrosión a otro metal más barato. Para ello, lo más eficaz es elegir como protector a otro situado en la serie de fuerzas electromotrices por encima del que se va a proteger. En el caso particular del hierro, los que más utilizados son el aluminio, el zinc. En estos casos el metal que forma el recubrimiento se sacrifica en beneficio del hierro. Puede ocurrir, que por exigencias de dureza, de resistencia al desgaste mecánico, de aspecto decorativo o de conductividad eléctrica, se prefiera un metal (níquel, estaño, cobre, plata, oro) o aleación (acero inoxidable, metal monel, etc.), que aun estando por debajo del hierro en la serie de fuerzas electromotrices presente, por su tendencia a la pasivación, mayor resistencia a la corrosión. Entonces es importante que el recubrimiento no presente poros ni otros defectos que dejen el hierro al descubierto, ya que al comportarse éste anódicamente con respecto al que forma el recubrimiento, la corrosión en dichas zonas sería más intensa que si no estuviera recubierto. En el valor protector influyen, por consiguiente, el método de aplicación y el espesor de la película protectora.

Los metales termorociados han demostrado producir una mayor vida útil al acero que el sistema de pintado. El aluminio puede ser dejado a una abierta exposición corrosiva y, a pesar de ello, resistir más al desgaste corrosivo. Uno de los beneficios obtenidos es que el recubrimiento puede ser utilizado casi inmediatamente después de ser aplicado, inclusive puede ser aplicado a zonas parciales (cuando por ejemplo se están haciendo reparaciones con soldadura), no teniendo que esperar como en la pintura tradicional. Un proceso alternativo es el rociado o spray térmico. El rociado o spray térmico es un grupo de procesos en donde un material de alimentación se calienta y se proyecta como partículas individuales o gotas sobre una superficie. La pistola de rociado térmico genera el calor necesario mediante el uso de gases combustibles o mediante un arco eléctrico. A medida que los materiales se calientan, se transforman a un estado plástico o fundido y están confinados y acelerados mediante un flujo de gas comprimido que se proyecta al sustrato. Las partículas golpean el sustrato, se aplanan, y forman placas delgadas (splats) que conforman y se adhieren a las irregularidades de la superficie preparada y también se adhieren entre sí. A medida que las partículas rociadas inciden sobre la superficie, se enfrían y se acumulan, placa por placa, en una estructura laminar que forma el recubrimiento por rociado térmico.

El aluminio termorociado trabaja muy bien en ambientes con elevada temperatura, inclusive por arriba de los 120°. El termorociado con aluminio protege al acero contra la corrosión alcalina casi hasta el más severo nivel. Comparativamente con los recubrimientos orgánicos, ofrece un mayor coste/beneficio por la larga vida de duración. Recubrimientos densos con

aluminio o zinc pueden ser aplicados para resistir las más severas condiciones de corrosión y dar de 5 a 15 años de vida útil sin prácticamente mantenimiento. Recubrimientos delgados compiten perfectamente en costo con otros métodos como el cromado o el pintado.

En el presente trabajo a los acero 1010 y 1018 se les aplico tratamiento metálico, el cual fue el termorociado a base de aluminio; con la finalidad de investigar si este tratamiento mejora las propiedades mecánicas del material es en especial al módulo de Young. Se eligió el recubrimiento por rociado térmico, ya que es una aplicación en frío, que es fácil de aplicar y que se utiliza comúnmente en una gran variedad de aplicaciones industriales para la recuperación de piezas desgastadas o mal maquinadas con características superficiales.

Se analizaron 12 probetas de acero 1010 y 12 probetas de acero 1018 recubiertas de aluminio por termorociado, para determinar el cambio que sufren estos con respecto a la elasticidad, ya que esta es una propiedad mecánica muy importante en el material. Otra propiedad del material que se investigó fue la rugosidad, se analizaron 3 probetas de acero 1010 y 3 de acero 1018 antes de aplicarles el tratamiento, ya que esta medida es importante para que el recubrimiento tenga una mayor adherencia. Además se estudió el espesor del recubrimiento de aluminio de las probetas de acero 1010 y acero 1018, con la finalidad de determinar a qué tamaño de espesor se obtiene la mayor adherencia del recubrimiento. Por último se analizaron los efectos de la corrosión sobre las 6 probetas recubiertas y 6 probetas no recubiertas, lo mismo para el acero 1018, para analizar la velocidad de corrosión se utilizó el método de la curva de Tafel. Para determinar el efecto del acero recubierto en las propiedades mecánicas, se hizo la prueba de tensión a 6 probetas recubiertas y 6 no recubiertas para los aceros 1010 y 1018.

2. ANTECEDENTES.

Como se ha visto en la introducción el material a recubrir será un acero 1010 y 1018, entonces a continuación se revisan las características del sustrato y sus propiedades de interés en el presente trabajo.

2.1 ACERO

Los metales y las aleaciones empleados en la industria y en la construcción pueden dividirse en dos grupos principales: Materiales ferrosos y no ferrosos. Ferroso viene de la palabra ferrum que los romanos empleaban para el fierro o hierro. Por lo tanto, los materiales ferrosos son aquellos que contienen hierro como componente principal.

Los materiales no ferrosos no contienen hierro. Estos incluyen al aluminio, magnesio, zinc, cobre, plomo y otros elementos metálicos. Las aleaciones, por ejemplo, el latón y el bronce, son una combinación de algunos de estos metales no ferrosos y se les denomina Aleaciones no ferrosas.

Uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, más adaptable y más ampliamente usado es el acero. A un precio relativamente bajo, el acero proporciona una resistencia adecuada y la posibilidad de ser trabajado, lo que se presta para fabricaciones mediante muchos métodos. Además, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones.

Los aceros simples se pueden definir como la aleación de hierro con carbono, con un contenido de este último en el rango de 0.02 % hasta el 2%, con pequeñas cantidades de otros elementos que se consideran como impurezas tales como P, S, Mn, Cu, Si, etc.

En función del porcentaje de carbono, los aceros se pueden clasificar de la siguiente manera:

Aceros dulces: Cuando el porcentaje de carbono máximo es del 0.25%. La resistencia última de rotura para estos aceros se encuentra en el rango de 48-55 kg/mm^2 una dureza Brinell de 135 a 160 *HB*. Son aceros que presentan una buena soldabilidad aplicando la técnica adecuada. Aplicaciones: Piezas de resistencia media de buena tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes, etc.

Aceros semidulces: El porcentaje de carbono se encuentra alrededor de 0.35%. Tiene una resistencia última a la rotura de 55-62 kg/mm^2 y una dureza Brinell de 150-170 *HB*. Estos aceros bajo un tratamiento térmico por templeado pueden alcanzar una resistencia mecánica de hasta 80 kg/mm^2 y una dureza de 215-245 *HB*. Aplicaciones: Ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, herrajes.

Aceros semiduros: El porcentaje de carbono es del 0.45%. Tienen una resistencia a la rotura de 62-70 kg/mm^2 y una dureza de 280 *HB*. Después de someterlos a un tratamiento de templeado su resistencia mecánica puede aumentar hasta alcanzar los 90 kg/mm^2 .

Aplicaciones: Ejes y elementos de máquinas, piezas bastante resistentes, cilindros de motores de explosión, transmisiones, etc.

Aceros duros: El porcentaje de carbono es del 0.55%. Tienen una resistencia mecánica de $70-75 \text{ kg/mm}^2$, y una dureza Brinell de 200-220 *HB*. Bajo un tratamiento de templado estos aceros pueden alcanzar un valor de resistencia de 100 kg/mm^2 y una dureza de 275-300 *HB*. Aplicaciones: Ejes, transmisiones, tensores y piezas regularmente cargadas y de espesores no muy elevados.

El AISI American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero) usa un sistema de designación con cuatro dígitos para el acero al carbón y aleado. Los dos primeros dígitos señalan el grupo específico de aleaciones que identifica a los principales elementos aleantes, aparte del carbono en el acero. Los últimos dos dígitos indican la cantidad de carbono en el acero.



Figura 1. Designación de los aceros según la norma AISI.

Aunque la mayor parte de las aleaciones de acero contienen menos de 1.0% de carbono, este se incluye en la designación debido a sus efectos sobre las propiedades del acero. Como se observa en la figura 1, los últimos dos dígitos indican el contenido de carbono, en centésimos de porcentaje. Por ejemplo, cuando los últimos dos dígitos son 20, la aleación contiene aproximadamente 0.20% de carbono. El contenido de carbono en un acero con 20 puntos de carbón varía de 0.18% a 0.23%.

A medida que aumenta el contenido de carbono, también aumenta la resistencia y la dureza, con las mismas condiciones de procesamiento y tratamiento térmico. Ya que la ductilidad disminuye al aumentar el contenido de carbono, la selección de un acero adecuado implica cierto compromiso entre resistencia y ductilidad.

10xx	Acero puro al carbón: sin elementos importantes de aleación, excepto de carbono y manganeso; menos de 1.0% de manganeso. También se les llama no resulturizados.
11xx	Acero de corte libre: Resulturado. Su contenido de azufre (por lo regular 0.10%) mejora la maquinabilidad.
12xx	Acero de corte libre: Resulturado y refosforizado. La presencia de mayor cantidad de azufre y fósforo mejora la maquinabilidad y el acabado superficial.
121xx	Acero de corte libre: El plomo agregado al acero 12xx mejora la maquinabilidad.
13xx	Acero con manganeso: No resulturado. Presencia de aproximadamente 1.75% de manganeso aumenta la templabilidad.
15xx	Acero con carbón: No resulturado, con más de 1.0% de manganeso.
23xx	Acero con níquel: Nominalmente 3.5% de níquel.
25xx	Acero con níquel: Nominalmente 5.0% de níquel.
31xx	Acero con níquel-cromo: Nominalmente 1.25% Ni, 0.65% Cr.
33xx	Acero con níquel-cromo: Nominalmente 3.5% Ni, 1.5% Cr.
40xx	Acero con molibdeno: 0.25% de Mo.
41xx	Acero con cromo-molibdeno: 0.95% Cr, 0.2% Mo.
43xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 1.8% Ni, 0.5% o 0.8% Cr, 0.25% Mo.
44xx	Acero con molibdeno: 0.5% Mo.
46xx	Acero con níquel-molibdeno: 1.8% Ni, 0.25% Mo.
48xx	Acero con níquel-molibdeno: 3.5% Ni, 0.25% Mo.
5xxx	Acero con cromo: 0.4% Cr.
51xx	Acero con cromo: Nominalmente 0.8% de Cr.
51100	Acero con cromo: Nominalmente 1.0% Cr, acero para rodamientos 1.0% C.
52100	Acero con cromo: Nominalmente 1.45% Cr, acero para rodamientos 1.0% C.
61xx	Acero con cromo-vanadio: 0.50%-1.10% Cr, 0.15% V.
86xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 0.55% Ni, 0.5% Cr, 0.20% Mo.
87xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 0.55% Ni, 0.5% Cr, 0.25% Mo.
92xx	Acero con silicio: 2.0% de silicio.
93xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 3.25% Ni, 1.2% Cr, 0.12% Mo.

Tabla 1. Grupos de aleaciones en el sistema de numeración AISI. Fuente Diseño de elementos de máquinas Robert L. Mott.

2.1.1.-ACEROS 1010

Es un acero al carbono con un 10% de este mismo. Se seleccionan en piezas cuyo requisito primario es el conformado en frío. Los aceros no calmados se utilizan para embutidos profundos por sus buenas cualidades de deformación y terminación superficial. Los calmados son más utilizados cuando se necesita forjarlos o llevan tratamientos térmicos. Son adecuados para soldadura y para brazing. Su maquinabilidad se mejora mediante el estirado en frío. Son susceptibles al crecimiento del grano, y a fragilidad y rugosidad superficial si después del formado en frío se los calienta por encima de 600°C.

2.1.2.-ACEROS 1018

Es un acero al carbono con un porcentaje de 18% de este último. Este grupo tiene mayor resistencia y dureza, disminuyendo su deformabilidad. Son los comúnmente llamados aceros de cementación. Los calmados se utilizan para forjas. Un acero calmado es aquel que ha sido desoxidado por completo previamente a la colada, por medio de la adición de metales. Es sometido a un tratamiento mediante la adición de manganeso, silicio o aluminio antes de la colada. Esto le permite conseguir piezas perfectas pues no produce gases durante la solidificación, de modo que tal adición impide la formación de sopladuras. Su respuesta al temple depende del % de C y Mn; los de mayor contenido tienen mayor respuesta de núcleo. Los de más alto % de Mn, se endurecen más convenientemente en el núcleo y en la capa. Son aptos para soldadura y brazing. La maquinabilidad de estos aceros mejora con el forjado o normalizado, y disminuye con el recocido.

2.2.-PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL

Es importante revisar cuales son las propiedades mecánicas de los materiales; ya que estas determinan su comportamiento cuando se les sujeta a esfuerzos mecánicos. Estas propiedades incluyen el módulo de elasticidad, ductilidad, dureza y varias medidas de resistencia. Las propiedades mecánicas son importantes en el diseño, porque el funcionamiento y desempeño de los productos dependen de su capacidad para resistir deformaciones bajo los esfuerzos que enfrentan en el servicio. En diseño, el objetivo general para el producto es resistir esos esfuerzos sin un cambio significativo en su geometría. Esta capacidad depende de las propiedades como el módulo de elasticidad y la resistencia a la fluencia. Las propiedades mecánicas que son deseables para el diseñador, tal como una alta resistencia, hacen generalmente más fácil la manufactura del producto.

Todo cuerpo se deforma bajo la acción de las fuerzas aplicadas, y al cesar estas, el cuerpo tiende a recuperar su forma primitiva. Esta tendencia que, en mayor o menor grado, tienen todos los cuerpos se denomina elasticidad. En realidad, los cuerpos no son ni perfectamente elásticos ni perfectamente inelásticos. Las deformaciones que en ellos se producen constan de una parte de deformación elástica, que desaparece al cesar las fuerzas aplicadas, y una parte de deformación permanente, que se mantiene posteriormente. En un elevado número de cuerpos, si las fuerzas no sobrepasan determinados valores, las deformaciones permanentes son muy pequeñas, y en consecuencia, dichos cuerpos pueden considerarse elásticos.

De todas las propiedades mecánicas de los materiales que se mencionaron anteriormente, en el presente trabajo solamente nos basaremos en el módulo de Young y una característica que nos proporciona el ensayo de tensión que es la carga máxima.

2.2.1. MODULO DE YOUNG

El módulo de elasticidad E , también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente en la zona de comportamiento elástico de dicho material entre los incrementos de tensión aplicados en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación relativa producidos.

En muchos casos el módulo de elasticidad es constante durante la zona elástica del material, indicando un comportamiento lineal del mismo (ley de Hooke). Equivale a la tangente en cada punto de la zona elástica en la gráfica tensión-deformación obtenida del ensayo de tracción, el módulo de elasticidad indica la rigidez de un material, cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad. Para un material elástico lineal, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero, si se tracciona una barra, aumenta de longitud, no disminuye.

Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales, el módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede calcularse empíricamente en base al ensayo de tracción del material.

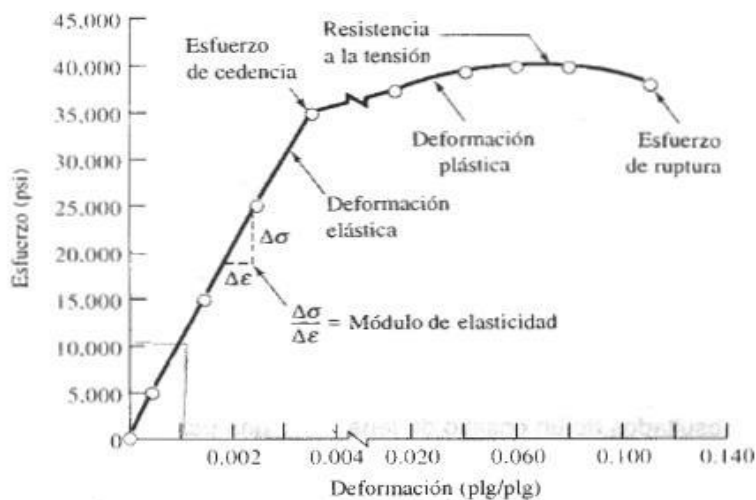


Figura 2. Representación de módulo elástico.

En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión y la deformación en la región elástica en un diagrama tensión-deformación que se describe mediante la ley de Hooke. El módulo de elasticidad resulta ser igual, pues, a la tangente de la recta de la gráfica en su zona de proporcionalidad. Vemos que en esa región del diagrama tensión-deformación el módulo de elasticidad no cambia al aumentar la tensión. El módulo de Young tiene una íntima relación con la fuerza de enlace entre los átomos en un material. Los materiales con un módulo elástico alto son relativamente rígidos y no se deforman fácilmente. Así, de dos piezas con la misma geometría, sometidas a la misma sollicitación mecánica que se hayan fabricado con distintos materiales, trabajando dentro del campo elástico, aquella con mayor módulo elástico será la que presente menores deformaciones.

Los materiales difieren unos de otros en su elasticidad, y, por esta razón, la propiedad conocida como módulo de elasticidad, que es una medida de la rigidez del material, es interesante en ingeniería. En el ensayo de tracción, esta propiedad se determina dividiendo la carga que actúa sobre la probeta en cualquier instante por el alargamiento total

correspondiente a esa carga, supuesto que esta sea lo suficientemente pequeña, para que al dejar de actuar, la probeta vuelva a sus dimensiones primitivas.

El módulo de elasticidad es simplemente la constante de proporcionalidad entre esfuerzo y deformación, cuando el material exhibe un verdadero límite de proporcionalidad, y se puede obtener a partir de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación dentro de la zona elástica. Es el módulo tangente de elasticidad.

El módulo de elasticidad tiene una importancia práctica cuando se utiliza asociado con una carga o alargamiento determinados. Este módulo sirve para predecir el alargamiento de un segmento sometido a una carga bajo tensión axial, y se puede utilizar para calcular las desviaciones que sufre una viga y la carga que puede soportar una delgada columna. La desviación de una viga es inversamente proporcional al módulo de elasticidad, en tanto que el pandeo de una columna esbelta es directamente proporcional al mismo.

2.2.2 CARGA MAXIMA

La carga máxima nos representa la mayor carga que puede soportar el material, para los materiales frágiles al aplicar una carga mayor a la carga máxima, estos inmediatamente sufrirán fractura. En los materiales dúctiles, esta carga determina el inicio del encuellamiento, hasta llegar a la carga en la ruptura.

La resistencia de los materiales permite calcular la tensión máxima en una sección cualquiera de un elemento de la estructura. Si se considera la fibra del metal sometida a esta tensión máxima de tracción como una probeta del ensayo de tracción, se puede decir que el conjunto de la pieza queda en fase de deformaciones elásticas, en tanto que la tensión máxima no supere el límite elástico. El acero, material prácticamente homogéneo o isótropo, la tensión admisible de compresión es la misma que la de tracción, en ausencia de fenómenos de inestabilidad.

El coeficiente de seguridad para determinar las tensiones admisibles consta de dos factores. El primero relativo al material. El segundo factor se refiere a una generalización de las cargas características, y adopta dos valores diferentes, según el tipo de sollicitación. Para un estado de carga I el coeficiente de seguridad es 1.5 y para un estado de carga II su coeficiente de seguridad es 1.33. En el estado de carga I se presentan cargas permanentes, sobrecargas de explotación, sobrecargas de nieve, efectos producidos por asientos o posibles movimientos de sustentaciones y sobrecargas de ejecución. En el estado de carga II, además de las anteriores, también se presenta la acción del viento, efectos térmicos, efectos del frenado y empuje lateral de los puentes grúas y efectos sísmicos. Después de iniciarse la deformación plástica, la tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo, punto *M*, Resistencia a tracción (*RT* ó *TS*), y después disminuye hasta que finalmente se produce la fractura.

La resistencia a tracción es la tensión en el máximo del diagrama tensión-deformación nominales. Esto corresponde a la máxima tensión que puede ser soportada por una estructura a tracción; si esta tensión es aplicada y mantenida, se producirá la rotura. Hasta llegar a este punto, toda la deformación es uniforme en la región estrecha de la probeta. Sin embargo,

cuando se alcanza la tensión máxima, se empieza a formar una disminución localizada en el área de la sección transversal en algún punto de la probeta, lo cual se denomina estricción, y toda la deformación subsiguiente está confinada en la estricción. La fractura ocurre en la estricción. La tensión de fractura o bien de rotura corresponde a la tensión en la fractura.

En el caso del ensayo de tracción, la fuerza se aplica en dirección del eje de ella y por eso se denomina axial, la probeta se alargara en dirección de su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular. Aunque el esfuerzo y la deformación ocurren simultáneamente en el ensayo, los dos conceptos son completamente distintos. Para la mayoría de los materiales metálicos, la deformación elástica únicamente persiste hasta deformaciones de alrededor de 0.005. A medida que el material se deforma más allá de este punto, la tensión deja de ser proporcional a la deformación y ocurre deformación plástica, la cual es permanente, es decir no recuperable.

Para conocer el nivel de tensiones para el cual empieza la deformación elástica, o sea, cuando ocurre el fenómeno de fluencia, tenemos que tener en cuenta dos tipos de transición-elastoplástica:

1.- Los metales que experimentan esta transición de forma gradual. El punto de fluencia puede determinarse como la desviación inicial de la linealidad de la curva tensión-deformación. En tales casos, la posición de este punto no puede ser determinada con precisión, por este motivo se ha establecido una convención por la cual se traza una línea recta paralela a la línea recta paralela a la línea elástica del diagrama de la tensión-deformación desplazada por una determinada deformación, usualmente 0.002. La tensión correspondiente a la intersección de esta línea con el diagrama tensión-deformación cuando éste se curva se denomina límite elástico, σ_y

2.- Para aquellos materiales que tienen una región elástica no lineal, la utilización del método anterior no es posible, y la práctica usual es definir el límite elástico como la tensión necesaria para producir una determinada deformación plástica. La transición elastoplástica está muy bien definida y ocurre de forma abrupta y se denomina fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia.

En el límite de fluencia superior, la deformación plástica se inicia con una disminución de la tensión. La deformación prosigue bajo una tensión que fluctúa ligeramente alrededor de un valor constante, denominado punto de fluencia inferior. En los metales en que ocurre este fenómeno, el límite elástico se toma como el promedio de la tensión asociada con el límite de fluencia inferior, ya que está bien definido y es poco sensible al procedimiento seguido en el ensayo. Mientras la tensión aplicada es menor a σ_{max} , la deformación es uniforme, pero al alcanzar esta tensión comienza a desarrollarse un cuello en la probeta (estricción). La reducción localizada de sección hace que la tensión que actúa en esa sección crezca localmente provocando un nuevo aumento del alargamiento en la zona del cuello con la consiguiente caída de la tensión nominal. Este proceso continúa hasta que la sección no es capaz de seguir deformándose y se produce la fractura.

La carga de rotura es una propiedad que también se puede utilizar para el cálculo de piezas que trabajan sometidas a esfuerzos aunque, en la actualidad, se tiende a emplear preferentemente el límite elástico. La resistencia máxima a la tensión de un material se determina trazando una línea horizontal tangente a la gráfica del ensayo. La tensión a la que la línea intercepta al eje de tensión se denomina resistencia máxima a la tensión, o a veces simplemente resistencia a la tensión o tensión de fractura. Este valor es mayor que la tensión de rotura, debido al fenómeno de estricción, ya que, como la sección se estrangula en la zona de rotura y el cálculo de tensión se realiza con la sección inicial, se está tomando una sección mayor que la real.

Cuanto más dúctil sea el metal, mayor será el decrecimiento en la tensión en la curva. Al principio del ensayo, el alargamiento crece proporcionalmente con el esfuerzo, y el diagrama es perfectamente lineal. Si se suprime la carga en cualquier momento de esta fase, la probeta recupera exactamente su longitud inicial, este comportamiento se llama elástico.

A partir de una tensión F_e (límite elástico), las deformaciones crecen bruscamente. Después, rápidamente y no linealmente con la carga hasta una tensión máxima F_m . A partir de un punto, la tensión disminuye, mientras que el alargamiento continua aumentando, y se alcanza el punto de ruptura de la probeta. En esta fase se observa una disminución rápida de la sección de la probeta en la zona de ruptura.

2.3. CORROSION

Se denomina corrosión al ataque destructivo que sufre un material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con su medio, ya que la corrosión afecta de manera directa al material, en este caso a los aceros, revisaremos los conceptos básicos de la corrosión.

El termino corrosión suele referirse normalmente al ataque de los materiales, aunque otros materiales no metálicos, como los cerámicos y los polímeros, también pueden ser deteriorados por ataques químicos directos. La corrosión es todo proceso mediante el cual los elementos pasan del estado metálico al estado iónico.

La reacción que se produce en el fenómeno de la corrosión depende de la naturaleza química del entorno y de la concentración efectiva de las especies reactivas. El efecto de la corrosión es una alteración de las propiedades de los materiales afectados, que puede venir acompañada de una pérdida de material. Esta circunstancia hace aconsejable, adoptar ciertas medidas de protección para prevenir sus efectos sobre el material, así como realizar ensayos de los que se puede obtener información acerca de la evolución de su estado. En los materiales metálicos el proceso de corrosión es normalmente electroquímico, es decir, una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones.

La energía necesaria para arrancar un electrón de un metal varía mucho en los diferentes casos. Si dos metales se ponen en contacto, uno de ellos tendera a aceptar electrones del otro hasta que la diferencia de potencial establecida por la transferencia sea suficiente para oponerse a un nuevo paso de electrones a través de la superficie de contacto. Si estos dos

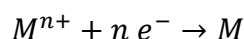
metales se unen por medio de una solución salina puede generarse una corriente eléctrica, siendo suministrada la energía por cambios químicos.

Al disolver una sal en agua, se produce su disociación instantánea, quedando electrolíticamente disociada en iones portadores de cargas eléctricas denominados:

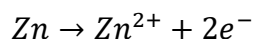
Cationes: Iones con carga positiva.

Aniones: Iones con carga negativa.

Una vez disociada la sal, si se tiene una fuente de electrones, pueden reducirse los cationes a metal.



Esta reacción de reducción se produce en el cátodo, mientras en el ánodo se produce una reacción de oxidación. Ejemplo:



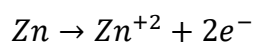
Los electrones van a través del hilo conductor del ánodo al cátodo. Estos son suministrados por en ánodo en la reacción de oxidación y consumidos en el cátodo en la reacción de reducción. El transporte de electricidad a través del electrolito es realizado por los iones desde la superficie de los electrodos, pudiendo ir acompañado de reacciones químicas.

Michael Faraday a principios del siglo XIX, anuncio las siguientes leyes:

1. La cantidad de un elemento que se libera en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la disolución.
2. Si la cantidad de electricidad es constante, el peso de distintos elementos liberados es proporcional a sus equivalentes electroquímicos.

La corrosión electroquímica es un fenómeno asociado con el flujo de corriente eléctrica. Para que la corrosión electroquímica se lleve a cabo, deberán existir los elementos que a continuación se mencionan. La eliminación de cualquiera de ellos es el fundamento básico de la protección anticorrosiva. El metal o área que se corroe, llamado ánodo o área anódica. El metal o área que no se corroe, llamado cátodo o área catódica. La conexión iónica (electrolito). Todos estos elementos forman la llamada celda de corrosión.

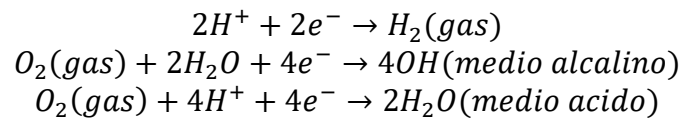
El término ánodo se emplea para describir aquella porción de una superficie metálica en la que tiene lugar la corrosión (disolución) y en la cual se liberan electrones como consecuencia del paso del metal al electrolito en forma de iones. La reacción que sucede en el ánodo, por ejemplo para el caso del zinc, es:



Es decir, una reacción de oxidación.

Como los electrones, en un conductor metálico, se mueven en sentido opuesto al convencional, en el ánodo la corriente eléctrica sale del metal para entrar a la solución (figura3).

El término cátodo se aplica a la porción de una superficie metálica en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito. Las reacciones catódicas más comunes en presencia de agua son:



Como se observa son reacciones de reducción.

En el cátodo, la corriente eléctrica sale del electrolito para entrar al metal (figura 3), cerrándose el circuito eléctrico a través de un conductor metálico externo.

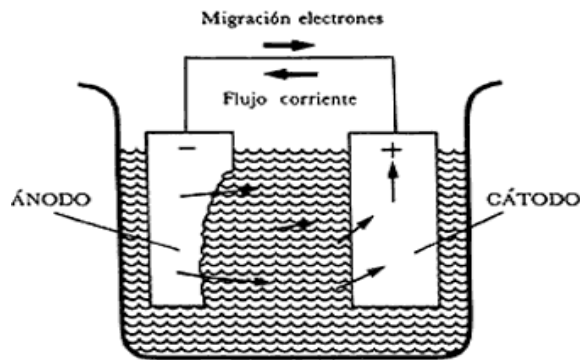


Figura 3. Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión.

Los componentes esenciales se presentan en la figura 3. Las flechas representan corrientes eléctricas (no electrones) fluyendo a la solución desde el ánodo (-) al cátodo (+) y regresando desde el cátodo al ánodo a través de un hilo metálico conductor (cobre por ejemplo).

La corrosión más frecuente es de naturaleza electroquímica y es consecuencia de la formación de multitud de zonas anódicas y catódicas sobre la superficie metálica, siendo el electrolito, en el caso de que el metal no este sumergido o enterrado, el agua de condensación de la atmósfera, para lo cual se necesita que la humedad relativa del aire sea del orden del 70% o mayor.

El proceso de disolución de un metal en un ácido (por ejemplo, cinc en ácido clorhídrico) es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica corresponden a la formación de hidrógeno H_2 gaseoso, poniendo de manifiesto la existencia de infinitos cátodos, mientras en los ánodos se va disolviendo el metal.

Al cambiar continuamente de posición estas zonas anódicas y catódicas, forman una capa uniforme de productos de corrosión sobre la superficie del metal. Un electrolito capaz de formar un ambiente corrosivo puede ser, en principio, cualquier solución, lluvia o incluso la humedad condensada del aire. Puede abarcar desde el agua dura o salada hasta los ácidos y álcalis fuertes.

Los ánodos y cátodos involucrados en un proceso de corrosión se conocen como electrodos. Los electrodos pueden consistir en dos diferentes tipos de metal. En el electrodo negativo (ánodo) es donde tiene lugar la corrosión. Para que exista corrosión deben cumplirse unas ciertas condiciones mínimas. Éstas son:

1. Debe haber un ánodo y un cátodo.
2. Debe existir un potencial eléctrico entre los dos electrodos (ánodo y cátodo).
3. Debe haber un conductor metálico que conecte eléctricamente el ánodo y el cátodo.
4. Tanto el ánodo como el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito conductor de la electricidad, el cual está ionizado.

Una vez cumplidas estas condiciones, puede circular una corriente eléctrica dando lugar a un consumo de metal (corrosión) en el ánodo. La diferencia de potencial creada entre el ánodo y el cátodo provoca una migración de electrones desde el ánodo al cátodo a lo largo del conductor metálico externo, un alambre de cobre por ejemplo, como se indica en la figura 4.

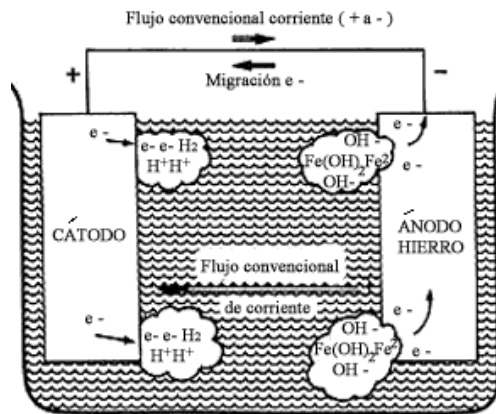


Figura 4. Sentido del flujo de electrones y del flujo convencional de la corriente eléctrica en una celda de corrosión.

En el ánodo, al perder electrones, quedan iones hierro cargados positivamente, Fe^{+2} , los cuales pueden combinarse con iones cargados negativamente, OH^- , que se encuentran en las inmediaciones del ánodo, pudiéndose formar ocasionalmente hidróxido ferroso, $Fe(OH)_2$, el cual puede reaccionar con posterioridad para formar hidróxido férrico, $Fe(OH)_3$, la familiar y conocida herrumbre. En el cátodo y procedentes del ánodo van llegando, a través del conductor metálico externo, electrones. Estos electrones cargados negativamente, al llegar a la interface cátodo-solución, se combinan con los iones hidrógeno cargados positivamente, H^+ para formar hidrógeno gas, H_2 . Cuando los iones hidrógeno se convierten en hidrógeno gaseoso, al combinarse con los electrones procedentes del ánodo, se crea un

exceso de iones OH^- en las inmediaciones del cátodo. Este exceso de iones OH^- hace que aumente la alcalinidad y, por tanto, el pH del electrolito adyacente al cátodo.

Desde un punto de vista conceptual, hay algunos puntos de importancia que conviene aclarar por lo que respecta al flujo de la corriente eléctrica. El concepto convencional de corriente supone un flujo desde un potencial positivo (+) a un potencial negativo (-). Esto puede llevar a una cierta confusión, ya que la representación convencional del flujo de la corriente eléctrica es precisamente en la dirección opuesta al flujo de los electrones, como se indica en la figura 4.

Conviene recordar los siguientes puntos, en los términos del flujo de corrientes convencionales:

- 1) La corriente eléctrica, de acuerdo con la convención, circula desde el polo positivo (+) al negativo (-) en un circuito eléctrico. Esto indica que en nuestro caso la corriente circulará del cátodo hacia el ánodo, a través del conductor metálico.
- 2) En el electrolito, el transporte de la corriente eléctrica tendrá lugar entonces del ánodo al cátodo.
- 3) Habrá un consumo y por tanto la consiguiente pérdida de metal, en aquellos lugares del ánodo en que la corriente abandone el electrodo para pasar al electrolito.

Ya que la corrosión es un fenómeno en que interviene una reacción anódica y una catódica, en el momento en que se produce la corrosión la velocidad de oxidación anódica ha de ser igual a la velocidad de reducción catódica. Por tanto la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica nos dará el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión, que será proporcional a la velocidad de corrosión. Hemos de resaltar que el grado de polarización depende no solamente de la naturaleza del metal y del electrolito, sino también del área real del electrodo. Por ello la relación área ánodo/cátodo es también un factor importante para medir la velocidad de corrosión, de aquí que en las gráficas se representa densidad de corriente y no intensidad total.

La polarización reduce por tanto la velocidad de corrosión y su disminución será, por tanto, perjudicial. Esta disminución puede afectar la reacción catódica, la anódica o ambas. El potencial del metal en contacto con una determinada disolución, además de poderse modificar en función del tiempo, cambia, de la misma forma, en función de la densidad de corriente que se aplique, porque se hace actuar de electrodo en una celda electroquímica. El cambio de potencial a partir del estado de equilibrio, como resultado del flujo de corriente, se conoce como polarización, y la expresión gráfica de la función potencial/densidad de corriente se conoce como curva de polarización.

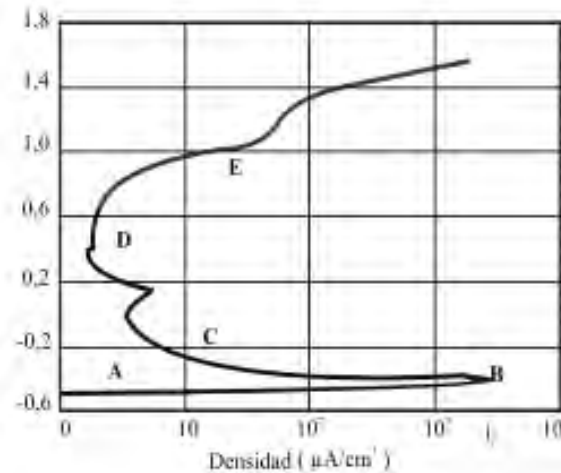


Figura 5. Curva de polarización.

Las curvas nos dan información muy interesante sobre las zonas de pasivación y activación, formación y destrucción de películas protectoras sobre metales, en diferentes electrolitos de poder oxidante variable. Para la obtención experimental de las curvas de polarización hay dos posibilidades: controlar la corriente y medir el potencial resultante, lo que da lugar a dos técnicas: potenciostática y galvanostática.

La región *A* es activa, el metal sufre corrosión, el potencial aplicado se hace más positivo. En *B* acaba el aumento de corrosión y empieza la pasivación. La pérdida de reactividad química bajo ciertas condiciones ambientales es debida probablemente a la formación de una película sobre la superficie del metal. Este punto se caracteriza por dos valores: el potencial pasivo y la densidad de corriente crítica. En la zona *C* la corriente disminuye rápidamente por formarse la película pasivante. Se observa a continuación un pequeño pico secundario seguido por la región *D*, en la que hay una pequeña variación en la corriente cuando el potencial aumenta.

La película pasivante tiene tendencia a destruirse en la región *E*, que recibe el nombre de transpasiva. Un diagrama potenciodinámico de polarización anódica puede suministrar información sobre:

- a) la posibilidad de que un material se pase espontáneamente en un medio determinado.
- b) la región de potencial en la que la especie permanece pasiva.
- c) la velocidad de corrosión de la zona pasiva.

Las curvas corriente-potenciales pueden ser simplificadas mostrando solo la parte lineal, a estos diagramas se les llama de Tafel, por ser el primero que propuso este tipo de simplificación y son diagramas donde se representa el potencial en función del logaritmo de la densidad de corriente neta o total. Estos diagramas pueden ser utilizados para el cálculo de la intensidad de corrosión. La Figura. 6 muestra un diagrama para la corrosión de Hierro en medio ácido.

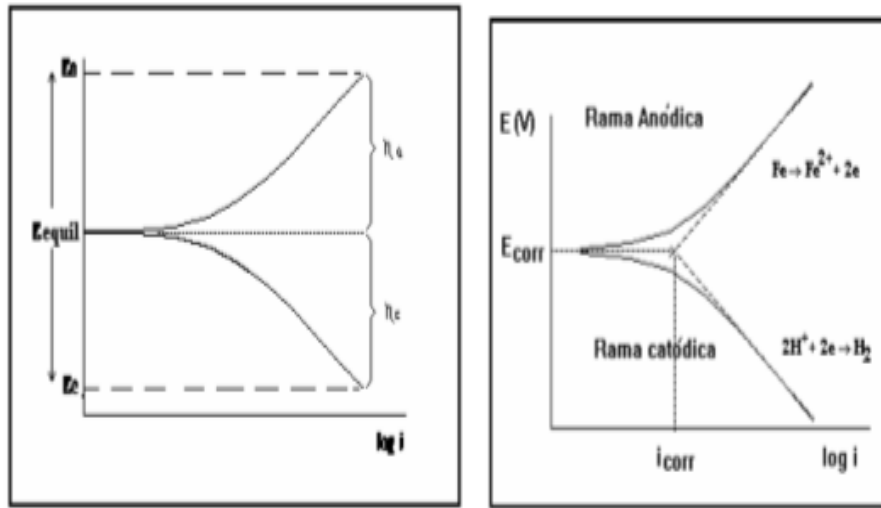


Figura 6. Diagrama de corrosión de hierro en medio ácido.

2.4. RECUBRIMIENTOS METALICOS

Como también se vio en la introducción en este trabajo a las probetas de acero 1010 y 1018 se les aplico un recubrimiento, por lo cual revisaremos algunos de los tipos de recubrimientos que existen en la actualidad.

La pulverización térmica es un conjunto de procesos que un material de carga de alimentación se calienta y se propulsará como partículas individuales o gotas sobre una superficie. La pistola de pulverización térmica genera el calor necesario mediante el uso de gases combustibles o un arco eléctrico. A medida que los materiales se calientan, se cambian a un estado plástico o fundido y están confinados y acelerados por una corriente de gas comprimido al sustrato. Las partículas golpean el sustrato, se aplanan, y forman plaquetas delgadas (splats) que conforman y se adhieren a las irregularidades de la superficie preparada. Como las partículas pulverizadas inciden sobre la superficie, se enfrían y se acumulan, por splat, en una estructura laminar que forma el recubrimiento por pulverización térmica.

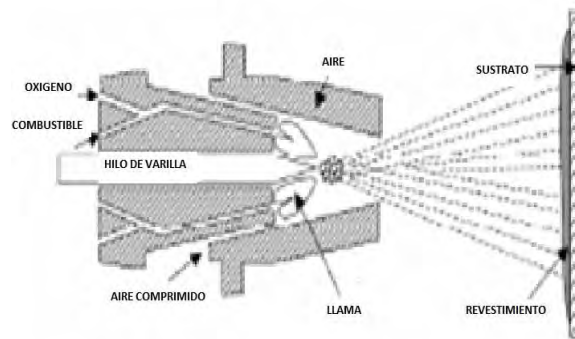


Figura 7.-proceso de rociado por llama alambre.

El revestimiento que se forma no es homogéneo y por lo general contiene un cierto grado de porosidad, y, en el caso de los metales pulverizados, el recubrimiento contendrá óxidos de metal. El material como materia prima puede ser cualquier sustancia que pueda ser fundido, incluyendo metales, compuestos metálicos, cementos, óxidos, vidrios, y polímeros. Materiales de alimentación pueden ser pulverizados en forma de polvos, alambres o varillas. El enlace entre el sustrato y el recubrimiento puede ser mecánica, química o metalúrgica o una combinación de éstas. Las propiedades del recubrimiento aplicado dependen del material como materia prima, el proceso de pulverización térmica y parámetros de la aplicación, y después del tratamiento del revestimiento aplicado.



Figura 8. Proceso de deformación de un recubrimiento.

2.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS REVESTIMIENTOS PROYECCIÓN TÉRMICA

Dureza, densidad y porosidad. Recubrimientos por pulverización térmica se utilizan a menudo debido a su alto grado de dureza relativa a pintar recubrimientos. Su dureza y resistencia a la erosión hacen especialmente valioso en aplicaciones de alto desgaste. La dureza y la densidad de los revestimientos de pulverización térmica son generalmente más bajos que para el material de materia prima de la que se formaron los revestimientos. En el caso de recubrimientos metálicos de pulverización térmica, la dureza y la densidad del

recubrimiento dependen del material de pulverización térmica, el tipo de equipo de pulverización térmica, y los parámetros de pulverización. En general, cuanto mayor sea la velocidad de las partículas, más difícil y más denso es el recubrimiento. La porosidad del recubrimiento depende también del proceso de pulverización térmica, parámetros de aplicación, y el material de pulverización térmica.

Resistencia a la corrosión. Revestimientos de pulverización térmica metálicos pueden ser o bien catódica o anódica al sustrato metálico subyacente. Debido a que la corrosión se produce en el ánodo, recubrimientos anódicos se corroen en ambientes corrosivos y el cátodo no. Sistemas de recubrimiento anticorrosivo se diseñan generalmente de tal manera que el material de revestimiento es anódico al metal sustrato. Recubrimientos anódicos se corroen o se sacrifican para proteger el sustrato. En algunos casos, la resistencia a la corrosión del material de pulverización térmica en sí es importante. Para aplicaciones de muy alta temperatura y por la exposición a químicos, el revestimiento de pulverización térmica debe ser muy resistente a la corrosión. Para tales aplicaciones, el revestimiento proporciona una barrera resistente a la corrosión para proteger el sustrato.

Adhesión. Recubrimientos de proyección térmica pueden tener muy alta adherencia. Recubrimientos especiales, utilizados para la resistencia al desgaste, que se aplican por procesos de pulverización térmica con una velocidad muy alta de partículas pueden tener adhesiones a la tracción de 34.000 *kPa* mayor que (5000 *psi*), medida por ASTM C633 "Método de prueba estándar para la adhesión o fuerza de cohesión de llama Revestimientos pulverizadas. "La mayoría de los recubrimientos utilizados para aplicaciones de infraestructura tienen valores de adhesión comparable a pintar los revestimientos. Zinc, aluminio y zinc-aluminio revestimientos de aleación de campo y en taller aplicado típicos tendrán adherencia que van desde 5440 a 13600 *kPa* (800 a 2000 *psi*), medido por ASTM D4541 "Método de prueba estándar para resistencia al desprendimiento de recubrimientos mediante el uso portátil Adhesión Testers".

2.4.2. PROCESOS DE PULVERIZACIÓN TÉRMICA.

La pulverización de llama. La forma más antigua de pulverización térmica, pulverización de llama, puede ser utilizado para aplicar una amplia variedad de materiales de alimentación, incluyendo cables de metal, varillas de cerámica y metálicos y polvos no metálicos. En la pulverización de la llama, el material como materia prima se alimenta continuamente a la punta de la pistola de pulverización donde se funde en una llama de gas combustible y propulsado al sustrato en una corriente de atomización de gas. Los gases combustibles comunes son acetileno, propano, acetileno y metil-propadieno. El aire se usa generalmente como el gas de atomización. Llamas de oxiacetileno se utilizan extensivamente para la llama alambre de pulverización debido al grado de control y las altas temperaturas ofrecidos por estos gases. Por medir su aparición, la llama se puede ajustar fácilmente para ser un oxidante, neutra o llama reductora. La llama de propano a una temperatura más baja se puede utilizar para los metales de fusión más bajos, tales como aluminio y zinc, así como las materias primas poliméricas. Los componentes básicos de un sistema de pulverización de llama incluyen la pistola de pulverización a la llama, material como materia prima y el mecanismo de alimentación, oxígeno y gases combustibles con medidores de flujo y reguladores de presión, y un compresor de aire y el regulador.

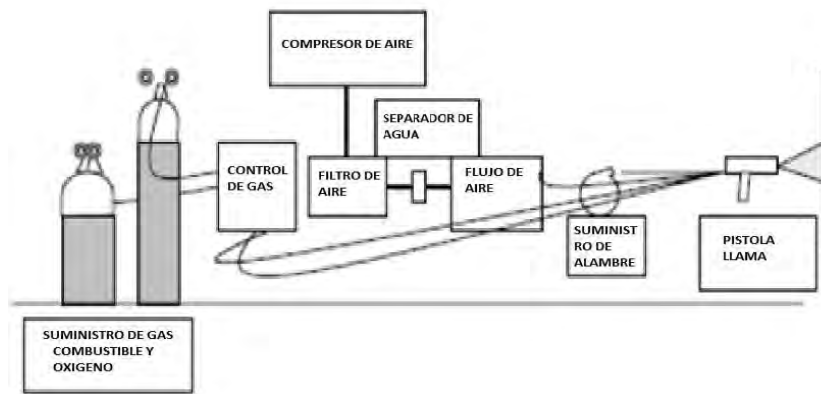


Figura 9. Sistema de pulverización de llama.

La pulverización de llama. Pulverización a la llama de cables es el proceso llama de mayor interés para el Cuerpo de Ingenieros. CEGS-09971 permite la aplicación de recubrimientos de aleación de aluminio, zinc, y zinc / aluminio utilizando el método de pulverización a la llama. La pistola de pulverización a la llama de alambre se compone de una unidad de accionamiento con un motor de accionamiento y rodillos para la alimentación de alambre y una cabeza de gas con válvulas, la boquilla de gas, y el cabezal de aire que controlan el aire de la llama y la atomización. En comparación con arco de pulverización, la pulverización de llama alambre es generalmente más lento y más costoso debido al relativamente alto costo de la mezcla de gas de oxígeno-combustible en comparación con el coste de la electricidad. Los Sistemas de pulverización a la llama son de campo portátil y se pueden usar para aplicar revestimientos de metal de calidad para protección contra la corrosión.

Los recubrimientos de proyección térmica requieren una superficie muy limpia y libre de aceite, grasa, suciedad y sales solubles. Contaminantes de la superficie deben ser limpiados con solventes antes de la eliminación de la cascarilla de laminación, productos de corrosión, y la pintura vieja mediante chorreado abrasivo.

- a. Preparación de la superficie es el factor más importante para determinar el éxito del sistema de recubrimiento por pulverización térmica de protección contra la corrosión. Chorreado abrasivo o limpieza abrasiva se combina con otras técnicas de preparación de superficie se utiliza para crear el necesario grado de limpieza de la superficie y la rugosidad.
- b. El objetivo principal de la preparación de la superficie es lograr una adhesión adecuada del revestimiento por pulverización térmica para el sustrato de acero. La adhesión es la clave para el éxito del recubrimiento de pulverización térmica.
- c. El propósito de preparación de la superficie es que sea rugosa la superficie, creando una mayor área de superficie para la unión mecánica del revestimiento por pulverización térmica para el sustrato de acero. La rugosidad se refiere típicamente como el patrón de anclaje o perfil. El perfil es un patrón de picos y valles que se graba sobre el acero cuando alta velocidad partículas abrasivas hornos inciden sobre la superficie.

- d. Limpieza de la superficie es esencial para la adecuada adhesión del revestimiento de pulverización térmica al sustrato. Recubrimientos de proyección térmica aplicada sobre el óxido, suciedad, grasa o aceite tendrán una mala adherencia. El fallo prematuro del revestimiento de pulverización térmica puede resultar de aplicación a los sustratos contaminados.

El disolvente de limpieza (SSPC-SP 1) es un procedimiento para la eliminación de contaminantes de la superficie, incluyendo el aceite, grasa, suciedad, el dibujo y corte compuestos, y sales solubles, de las superficies de acero por medio de disolventes, agua, detergentes, agentes emulsionantes, y de vapor. Estos métodos no están diseñados para eliminar las escamas de laminación, óxido o recubrimientos viejos. El uso ineficiente de la técnica de limpieza disolvente puede propagar o incompletamente eliminar contaminantes de la superficie. Tres métodos comunes de limpieza con disolventes son el lavado con agua, limpieza a vapor, y la limpieza con disolventes de hidrocarburos.

El chorro abrasivo se lleva a cabo en preparación para pulverización térmica después de la eliminación de los contaminantes de la superficie de limpieza por disolvente. El chorro abrasivo se lleva a cabo para eliminar la cascarilla de laminación, óxido y revestimientos antiguos, así como para proporcionar el perfil de la superficie necesaria para una buena adherencia del recubrimiento de pulverización térmica al sustrato. Limpieza con chorro abrasivo convencional se lleva a cabo a través de la alta velocidad (724 km / h (450 mph)) de propulsión de un medio de explosión en una corriente de aire comprimido (620 a 698 kPa (90 a 100 psi)) contra el sustrato. La masa de las partículas y la alta velocidad se combinan para producir energía cinética suficiente para eliminar el óxido, escamas de laminación y recubrimientos viejos del sustrato mientras que produce simultáneamente una superficie rugosa. La Sociedad para Protective Coatings (SSPC) y la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE) han publicado normas para la limpieza de la superficie.

2.5 ROCIADO

Como se mencionó en la introducción el rociado o spray térmico es un grupo de procesos en donde un material de alimentación se calienta y se proyecta como partículas individuales o gotas sobre una superficie. La pistola de rociado térmico genera el calor necesario mediante el uso de gases combustibles o mediante un arco eléctrico. A medida que los materiales se calientan, se transforman a un estado plástico o fundido y están confinados y acelerados mediante un flujo de gas comprimido que se proyecta al sustrato. Las partículas golpean el sustrato, se aplanan, y forman placas delgadas (splats) que conforman y se adhieren a las irregularidades de la superficie preparada y también se adhieren entre sí. A medida que las partículas rociadas inciden sobre la superficie, se enfrían y se acumulan, placa por placa, en una estructura laminar que forma el recubrimiento por rociado térmico.

La figura 10 ilustra una típica sección transversal del recubrimiento de una estructura laminar de óxidos e inclusiones. El recubrimiento que se forma no es homogéneo y por lo general contiene un cierto grado de porosidad, y, en el caso de los metales rociados, el recubrimiento contendrá óxidos del metal. El material de alimentación puede ser cualquier sustancia que

pueda ser fundida, incluyendo metales, compuestos metálicos, cements, óxidos, vidrios, y polímeros. Los materiales de alimentación pueden ser rociados en forma de polvos, alambres o varillas. El enlace entre el sustrato y el recubrimiento puede ser mecánico, químico o metalúrgico o una combinación de éstos. Las propiedades del recubrimiento aplicado dependen del material de alimentación, el proceso de rociado térmico, los parámetros de aplicación, y el tratamiento posterior.

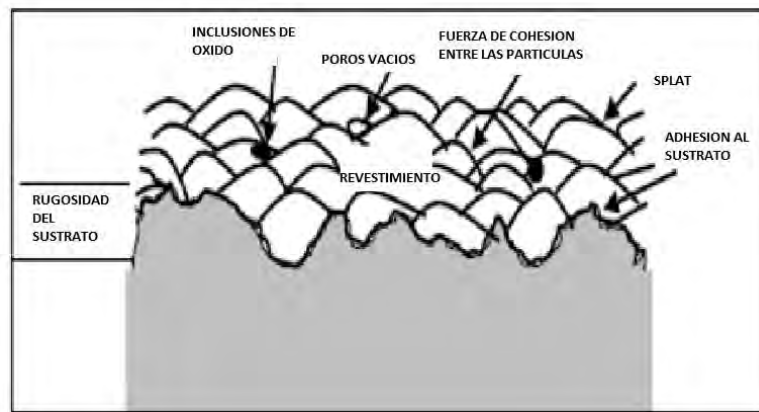


Figura 10. Sección transversal típica de un recubrimiento de pulverización térmica.

2.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO

Dureza, densidad y porosidad. Los recubrimientos por rociado térmico por lo general se usan debido a su alto grado de dureza en comparación a las superficies recubiertas con pinturas. Su dureza y resistencia a la erosión hacen al recubrimiento por rociado térmico un recubrimiento valioso en aplicaciones de alto desgaste. La dureza y la densidad de los recubrimientos de rociado térmico son generalmente más bajos en relación a la dureza y densidad de la materia prima a partir de la cual se formaron estos. En el caso de los recubrimientos metálicos por rociado térmico, la dureza y la densidad del recubrimiento dependen del material de rociado térmico, el tipo de equipo, y los parámetros del rociado. En general, cuanto mayor sea la velocidad de las partículas, el recubrimiento tendrá mayor densidad y dureza. Las velocidades de las partículas para diferentes procesos de rociado térmico en orden descendente son detonación, flama de oxígeno a alta velocidad (HVOF), temperatura y el tipo de gas de atomización utilizado. La porosidad del recubrimiento depende también del proceso, de los parámetros de aplicación, y del material utilizado para el rociado térmico.

Resistencia a la corrosión. Los recubrimientos de rociado térmico metálicos pueden ser catódicos o anódicos con respecto al sustrato metálico subyacente. Debido a que la corrosión se produce en el ánodo, los recubrimientos anódicos se corroen en ambientes corrosivos y el cátodo no. Los sistemas de recubrimiento anticorrosivos se diseñan generalmente de tal manera que el material de recubrimiento es anódico con respecto al metal que conforma al sustrato. Los recubrimientos anódicos se corroen o se sacrifican para proteger el sustrato. En algunos casos la resistencia a la corrosión del material de rociado térmico por sí misma es

importante. Para aplicaciones a muy alta temperatura y para la exposición a químicos, el recubrimiento de rociado térmico debe ser muy resistente a la corrosión. Para tales aplicaciones, el recubrimiento proporciona una barrera resistente a la corrosión para proteger el sustrato. Más adelante se discutirá a mayor detalle los conceptos de la teoría de la corrosión.

Adhesión. Los recubrimientos de rociado térmico pueden tener muy alta adherencia. Recubrimientos especiales usados para la resistencia al desgaste, son aplicados mediante procesos de rociado térmico, con velocidades muy altas de partícula que pueden tener adhesiones a la tensión de más de 34.000 *kPa* (5000 *psi*), medida de acuerdo a la norma ASTM C633 "Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings". La mayoría de los recubrimientos utilizados para aplicaciones de infraestructura tienen valores de adhesión comparable a los recubrimientos por pintura. Con recubrimientos de zinc, aluminio y aleaciones de zinc-aluminio se puede alcanzar una adherencia en el rango de 5440 a 13600 *kPa* (800 a 2000 *psi*), medida de acuerdo a la norma ASTM D4541 "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers".

2.5.2 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO

Resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc, aluminio, y aleación de zinc-aluminio. Los recubrimientos de zinc, aluminio, y zinc-aluminio son recubrimientos anticorrosivos importantes porque son anódicos con respecto al acero. En otras palabras, tienen mayor tendencia a corroerse que el acero, actuando como recubrimientos de sacrificio que impiden la corrosión del sustrato de acero subyacente. El zinc es un metal mucho más activo que el aluminio. Por otro lado, los recubrimientos de aluminio son más duros, tienen mejor adherencia, y forman una capa de óxido protectora que evita la auto-corrosión. Las aleaciones de dos metales tienen propiedades en algún punto intermedio, dependiendo de la relación de zinc / aluminio. Un 85-15 (porcentaje en peso) de aleación de zinc y aluminio es un material de recubrimiento por rociado térmico ampliamente utilizado debido a que se cree tiene la mejor combinación de los atributos de ambos metales.

Recubrimientos poliméricos. Se han desarrollado recubrimientos de polímeros o plásticos por rociado térmico para aplicaciones de infraestructura. Los polímeros de rociado térmico son polvos termoplásticos aplicados por flama o por plasma. El polímero debe tener una temperatura de fusión que sea propicia para el rociado térmico. Además, el polímero no debe polimerizarse, degradarse, o carbonizarse en la flama. Los plásticos de rociado térmico no deben de contener compuestos orgánicos volátiles y por lo tanto son compatibles para su uso en áreas con regulaciones de la contaminación del aire. Los recubrimientos de polímero por rociado térmico se han utilizado para el recubrimiento del acero en condiciones atmosféricas muy frías cuando la pintura no es práctica. Se han realizado investigaciones sobre el uso de plásticos reciclados para el rociado por flama de polímero, y estos productos muestran algún potencial. Parece que hay un interés creciente en el rociado por flama de polímero para aplicaciones de infraestructura.

Otros recubrimientos por rociado térmico. Otros materiales de recubrimiento por rociado térmico se utilizan para aplicaciones especiales. Recubrimientos especiales de aleaciones metálicas son de uso general para componentes tales como las superficies de desgaste de

equipos agrícolas, componentes de motores a reacción, y las máquinas-herramientas. Las aleaciones de metales ferrosos se utilizan a menudo para la restauración o redimensionamiento de equipo gastado. Las aleaciones ferrosas especiales se utilizan a veces para la resistencia a la corrosión a alta temperatura. Los recubrimientos cerámicos inertes se han utilizado en las prótesis e implantes médicos. Los recubrimientos metálicos conductores se utilizan para proteger los equipos electrónicos sensibles a los campos eléctricos y magnéticos. Estas y otras aplicaciones hacen de los recubrimientos por rociado térmico una industria en crecimiento.

2.5.3. PROCESOS POR ROCIADO TÉRMICO

Los procesos por rociado térmico se pueden clasificar como procesos de combustión o como procesos eléctricos. Los procesos de combustión incluyen el rociado por flama, rociado HVOC y el rociado por flama por detonación. Los procesos eléctricos incluyen el rociado por arco eléctrico y el rociado por plasma.

PROCESOS DE COMBUSTIÓN.

Rociado por flama. El primer método utilizado de rociado térmico fue el rociado por flama, el cual puede ser utilizado para aplicar una amplia variedad de materiales de alimentación, incluyendo alambres de metal, varillas de cerámica y polvos metálicos y no metálicos. En el rociado por flama, el material se alimenta continuamente a la punta de la pistola de rociado donde se funde en una flama de gas combustible y se proyecta al substrato en una corriente de gas atomizado. Los gases combustibles comunes que se utilizan son acetileno, propano y metil acetileno -propadieno. Se usa generalmente aire como gas de atomización. Las flamas de oxiacetileno se utilizan extensivamente para el rociado por flama de alambre debido al grado de control y las altas temperaturas alcanzadas por este gas. Para medir su aparición, la flama se puede ajustar fácilmente para ser flama oxidante, neutra o flama reductora. La flama de propano de temperatura más baja se puede utilizar para los metales de fusión más bajos, tales como aluminio y zinc, así como para polímeros. Los componentes básicos de un sistema de rociado de flama incluyen la pistola de rociado, el material de recubrimiento y el mecanismo de alimentación, oxígeno y gases combustibles con medidores de flujo y reguladores de presión, y un compresor de aire con su regulador.

El rociado por flama de alambre. La figura 11 muestra un esquema típico de un sistema de rociado por flama, mientras que en la figura 12 se muestra un esquema de una pistola de rociado por flama de alambre. La pistola de rociado por flama de alambre se compone de una unidad de accionamiento con un motor, rodillos para la alimentación de alambre, una cabeza de gas con válvulas, una boquilla de gas, el cabezal de aire que controla la flama y la atomización del aire. En comparación con un rociado por arco, el rociado por flama de alambre es generalmente más lento y más costoso debido al costo relativamente alto de la mezcla gaseosa de oxígeno-combustible comparado con el costo de la electricidad. Sin embargo, los sistemas de rociado por flama, representan de una tercera parte a la mitad del costo de los sistemas de rociado de arco de alambre, por lo que son significativamente más baratos. Los sistemas de rociado por flama son de campo portátiles y se pueden usar para aplicar recubrimientos de metal de calidad para la protección contra la corrosión.

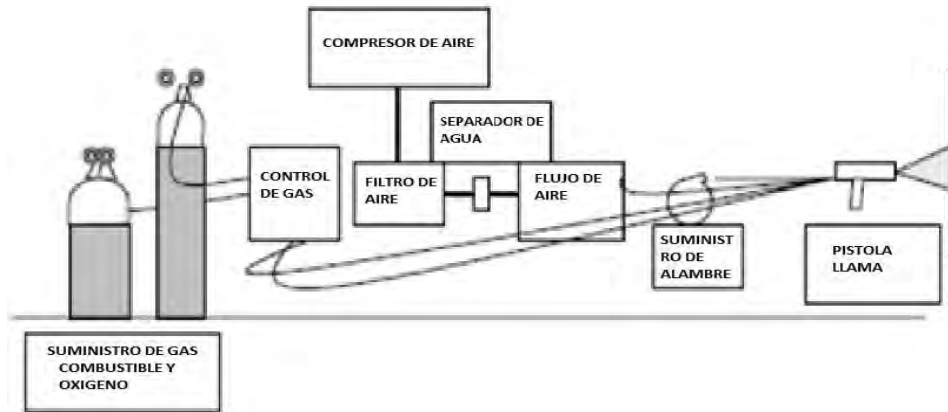


Figura 11. Sistema de aspersión por llama Típica.

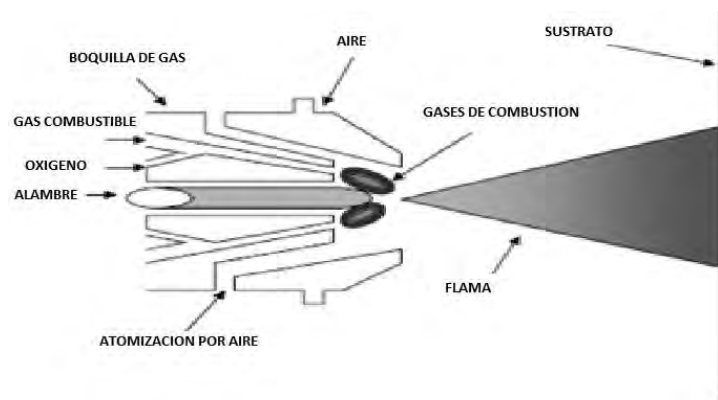


Figura 12. Pistola de pulverización a la llama Típica.

Rociado de polvos por flama. La operación de flama por polvos opera de la misma manera que el rociado por flama de alambre, excepto que el material de alimentación en polvo se utiliza en lugar del alambre y no hay corriente de aire atomizada. El material de recubrimiento fundido se atomiza y se proyecta a la superficie en la corriente de la combustión del gas. El polvo se almacena en una tolva ya sea de tipo de gravedad unida a la parte superior de la pistola de rociado o un volumen mayor de aire o de gas inerte arrastra el polvo de la tolva. Las pistolas de rociado por flama en polvo son más ligeras y más pequeñas que otros tipos de pistolas de rociado térmico. Las tasas de producción por rociado por flama de polvos son generalmente menores en comparación al rociado por flama de alambre o rociado mediante arco. Las velocidades de las partículas son menores para el rociado por flama, y los recubrimientos aplicados son generalmente menos densos y no tan adherentes como los obtenidos por otros métodos de rociado térmico. El rociado térmico de polvos se recomienda para la reparación de áreas pequeñas de recubrimientos previamente aplicados por rociado térmico y galvanizados. La figura 13 muestra una típica instalación para pistola de polvos, y la figura 14 muestra una sección transversal de dicha pistola.

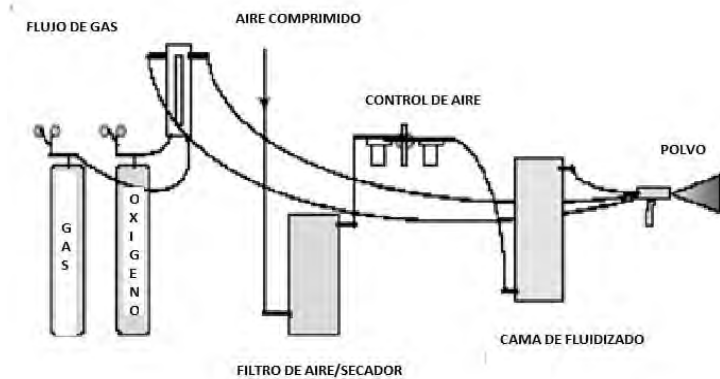


Figura 13. Instalación pistola de combustión típica.

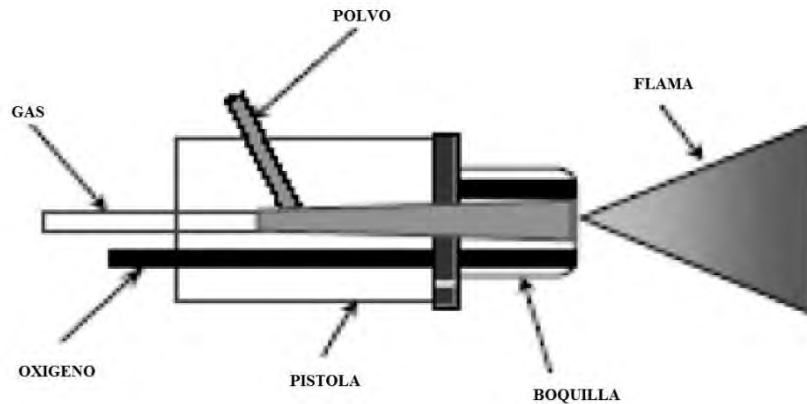


Figura 14. Sección transversal arma Polvo.

Rociado HVOF. Uno de los métodos modernos de rociado térmico, HVOF, utiliza oxígeno y un gas combustible a alta presión. Los gases combustibles comúnmente usados son propano, propileno, e hidrógeno. La mezcla de gases que se quema se acelera a velocidades supersónicas, y la materia prima en polvo se inyecta dentro de la flama. El proceso minimiza la entrada térmica y maximiza la energía cinética de las partículas para producir recubrimientos muy densos, con baja porosidad y alta fuerza de adherencia. Los sistemas HVOF se han utilizado ampliamente para obtener recubrimientos resistentes al desgaste, en aplicaciones tales como los componentes de motores a reacción. Los sistemas HVOF pueden ser portátiles pero se usan primordialmente en plantas o talleres.

Rociado por flama por detonación. En el rociado por flama por detonación, una mezcla de oxígeno, acetileno, y la materia prima en polvo se detona mediante chispas en la cámara de una pistola varias veces por segundo. El material de recubrimiento se deposita a velocidades muy altas para producir recubrimientos muy densos. Las aplicaciones típicas incluyen recubrimientos cerámicos resistentes para uso a altas temperaturas. Este sistema se utiliza únicamente a nivel de plantas o talleres.

PROCESOS ELÉCTRICOS.

Rociado por arco. El rociado por arco es por lo general el método de rociado térmico más económico en la aplicación de recubrimientos metálicos resistentes a la corrosión, incluyendo zinc, aluminio y sus aleaciones. Los costos de energía son más bajos y las tasas de producción son más altas en comparación con otros métodos, como por ejemplo el rociado de alambre por flama. El rociado por arco se puede usar para aplicar materiales eléctricamente conductores, incluyendo metales, aleaciones, y mezclas de metal-óxido del metal. En el rociado por arco, un arco entre dos alambres se utiliza para fundir el material de recubrimiento. Un gas comprimido, normalmente aire, se utiliza para atomizar y proyectar el material fundido al sustrato. Los dos alambres se alimentan continuamente a una pistola a una velocidad uniforme. Se utiliza una fuente de alimentación de corriente continua a un voltaje bajo (18 a 40 voltios), con un alambre que funciona como cátodo y el otro como ánodo.

La figura 15 muestra un sistema típico de rociado por arco compuesto por una fuente de alimentación de corriente continua, con cables de aislamiento del oxígeno y del gas de combustión, un sistema de alimentación del alambre, un suministro de aire comprimido, controles, y una pistola de rociado por arco. La figura 16 muestra los componentes de una pistola típica de rociado por arco, incluyendo las guías de alambre, la cámara de la pistola, y la boquilla de gas. La calidad y las propiedades del recubrimiento se pueden controlar variando la presión de atomización, la forma de la boquilla del aire, la potencia, la velocidad de alimentación del alambre, la velocidad de desplazamiento, y la distancia de separación. Los recubrimientos por rociado por arco muestran una excelente fuerza adhesiva y cohesiva.



Figura 15. Sistema de pulverización de arco de dos hilos Típica.

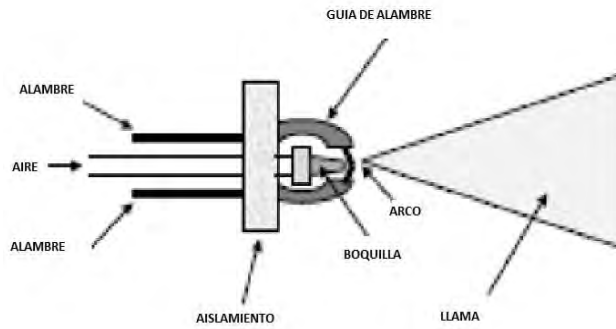


Figura 16. Pistola de pulverización de arco de dos hilos Típica.

ROCIADO POR PLASMA.

El rociado por plasma se utiliza para aplicar materiales de recubrimiento que se funden a temperaturas muy altas. Un arco se forma entre un electrodo y la boquilla de rociado, que actúa como el segundo electrodo. Un gas inerte a presión se pasa entre los electrodos donde se calienta a temperaturas muy altas para formar plasma. El material de alimentación en polvo se introduce en el gas caliente donde se funde y se proyecta al sustrato a alta velocidad. Un sistema de rociado por plasma se compone de una fuente de alimentación, una fuente de gas, una pistola, y el mecanismo de alimentación del polvo. Este proceso se puede usar en la aplicación de materiales en la barrera térmica, tales como zirconia y alúmina, y en recubrimientos resistentes al desgaste tales como óxido de cromo.

3.-MATERIAL Y METODOS METODOLOGÍA

3.1.-DISEÑO EXPERIMENTAL

DISEÑO FACTORIAL 2X2.

El diseño factorial es un diseño de los tratamientos que se caracteriza por utilizar como tratamientos a todas las combinaciones posibles de las diferentes modalidades (conocidas como niveles) de cada uno de dos o más variables (conocidas como factores) que posiblemente afectan a la variable de respuesta X en un experimento. Es decir, en un experimento en el que se interesa estudiar dos factores A y B con a niveles y b niveles, respectivamente, se ensayaran todos las $a \cdot b$ posibles combinaciones de niveles, como tratamientos.

El diseño factorial de los tratamientos se puede utilizar con cualquier diseño experimental de las unidades experimentales, por ejemplo, con el diseño completamente al azar, o con el diseño en bloques aleatorios, etc.

3.2.-ANALISIS ESTADISTICO

Se tienen $4r$ observaciones de la variable de respuesta X que se pueden arreglar de la siguiente manera:

		FACTOR B	
		b_1	b_2
FACTOR A	a_1	X_{111} X_{112} \cdot \cdot \cdot X_{11r}	X_{121} X_{122} \cdot \cdot \cdot X_{12r}
	a_2	X_{211} X_{212} \cdot \cdot \cdot X_{21r}	X_{221} X_{222} \cdot \cdot \cdot X_{22r}

Según el diseño experimental utilizado, se calcula la tabla de ANOVA. Sin embargo, la suma de cuadrados de los tratamientos ($SCTR$) se acostumbra desglosar en tres sumas de cuadrados: SC_A asociada con el efecto principal del factor A , SC_B que se asocia con el efecto principal del factor B , y SC_{AxB} que se asocia con el efecto de la interacción de A y B . cada $S.C.$ tiene 1 *g.l.* en el caso de un experimento factorial 2×2 .

Una manera de calcular cada efecto y $S.C.$ en un diseño 2x2 es subdividir la $SCTR$, utilizando los siguientes 3 contrastes ortogonales:

EFFECTO FACTORIAL (CONTRASTE LINEAL)	MULTIPLICADOR λ PARA LOS TOTALES DEL TRATAMIENTO: $a_1b_1 \cdot a_2b_1 \cdot a_1b_2 \cdot a_2b_2$	TOTAL PARA EL EFECTO FACTORIAL
A	-1 1 -1 1	$[A] = -a_1b_1 + a_2b_1 - a_1b_2 + a_2b_2$
B	-1 -1 1 1	$[B] = -a_1b_1 - a_2b_1 + a_1b_2 + a_2b_2$
AxB	1 -1 -1 1	$[AxB] = a_1b_1 - a_2b_1 - a_1b_2 + a_2b_2$

El efecto principal para cada factor se calcula dividiendo el total para el efecto factorial entre $2r$; por ejemplo para A :

$$\text{Efecto principal de } A = [A]/2r$$

La contribución a la SC_{TR} se calcula dividiendo el cuadrado de cada total para el efecto factorial entre $4r$;

$$SC_A = [A]^2/4r$$

$$SC_B = [B]^2/4r$$

$$SC_{AxB} = [AxB]^2/4r$$

Y la tabla de ANOVA queda como sigue (para un diseño experimental con r bloques aleatorios):

<i>F.V.</i>	<i>g.l.</i>	<i>S.C.</i>	<i>C.M.</i>	<i>F</i>
TRATAMIENTOS	3	$SCTR$	$CMTR$	$CMTR/CMER$
A	1	SC_A	CM_A	$CM_A/CMER = F_A$
B	1	SC_B	CM_B	$CM_B/CMER = F_B$
INTERACCION De AxB	1	SC_{AxB}	CM_{AxB}	$CM_{AxB}/CMER = F_{AxB}$
Bloques	$r - 1$	$SCBL$	$CMBL$	
Error	$3(r - 1)$	$SCER$	$CMER$	
Total	$4r - 1$	$SCTL$		

Tabla 2. Tabla ANOVA.

INTERPRETACION DE LOS EFECTOS PRINCIPALES Y DE LA INTERACCION

El efecto simple de cuando B toma nivel $b_1=(A)_{b_1}$ es igual al cambio en la variable de respuesta X cuando se cambia del tratamiento a_1b_1 al tratamiento a_2b_1 .

El efecto simple de A cuando B toma nivel de $b_2=(A)_{b_2}$ es igual al cambio en X cuando se cambia del tratamiento a_1b_2 al tratamiento a_2b_2 .

El efecto principal de A es el promedio de los dos efectos simples de A .

El efecto principal de B se define de manera similar.

La interacción de A y B es igual a la diferencia del efecto simple de A cuando B toma nivel b_2 menos el efecto simple de A cuando B toma nivel $b_1 = (A)_{b_2} - (A)_{b_1}$.

Es decir, si el efecto sobre X de cambiar del nivel a_1 al nivel a_2 del factor A es igual para los 2 niveles de B , entonces la interacción es cero (“no hay interacción” o “los factores operan independientemente”).

Si el efecto simple de A depende del nivel de B entonces hay interacción. Dependiendo del signo de la interacción, esta se conoce como “un efecto sinergizante” o “potencialización” (signo positivo) y como “efecto antagónico” o interferencia (signo negativo). También se puede detectar e interpretar la interacción de manera gráfica.

LAS HIPOTESIS QUE SE PRUEBAN

Las pruebas F de la tabla ANOVA corresponden a las siguientes hipótesis:

F_A	H_0 : El efecto principal de $A = 0$
	H_1 : El efecto principal de $A \neq 0$
F_B	H_0 : El efecto principal de $B = 0$
	H_1 : El efecto principal de $B \neq 0$
$F_{A \times B}$	H_0 : No hay interacción
	H_1 : Hay interacción

En el caso de no-interacción habrá paralelismo entre las dos líneas de la gráfica, y en el caso en el que hay interacción habrá un no-paralelismo “significativo”.

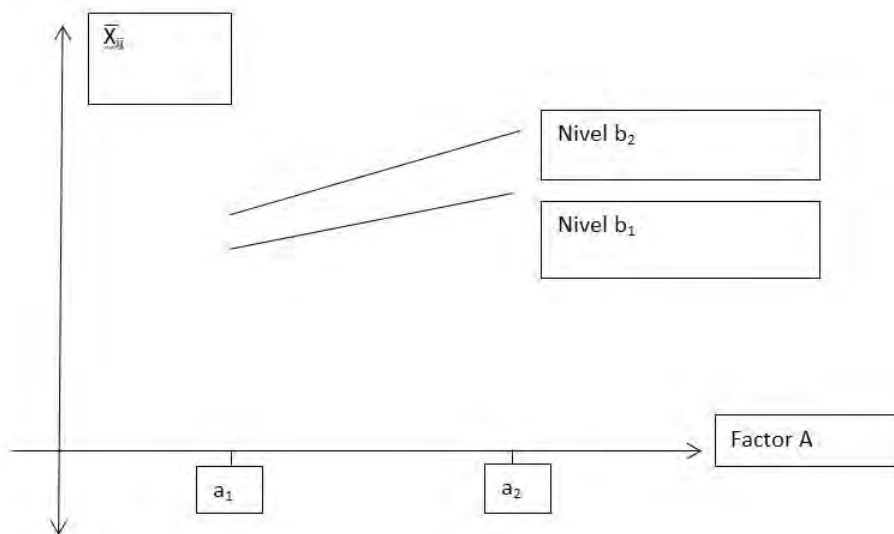


Figura 17. Grafica de interacción.

En este trabajo se utilizó un diseño factorial 2 x 2 en el cual se consideraron dos factores uno que fue el tipo de acero (acero 1010 y acero 1018) y el otro factor fue el recubrimiento (aluminio y sin recubrimiento). Para cada tratamiento se realizaron 6 repeticiones con lo cual se fabricaron 24 probetas de acuerdo a la norma ASTM E8. En la tabla xxx se muestra como quedo el diseño para este trabajo:

		RECUBRIMIENTO	
		ALUMINIO	SIN RECUBRIMIENTO
TIPO DE ACERO	ACERO 1010	X_{111}	X_{121}
		X_{112}	X_{122}
		X_{113}	X_{123}
		X_{114}	X_{124}
		X_{115}	X_{125}
		X_{116}	X_{126}
ACERO 1018		X_{211}	X_{221}
		X_{212}	X_{222}
		X_{213}	X_{223}
		X_{214}	X_{224}
		X_{215}	X_{225}
		X_{216}	X_{226}

La metodología que se utilizó en el presente trabajo para medir las variables de respuesta fueron las siguientes:

3.3.-PRUEBA DE TENSION

Cuando un material se somete a una carga o fuerza externa, sufrirá inicialmente una deformación de tipo elástica; si la carga sigue aumentando, la deformación pasara a ser de tipo plástica. Básicamente, se puede diferenciar la deformación elástica de la plástica, por el hecho de que la primera desaparece cuando deja de actuar la carga que la produjo, recuperando el metal sus dimensiones originales. Por otra parte, la deformación plástica es una deformación permanente, es decir, aun cuando se retire la carga que la produjo, el metal no recuperara sus dimensiones originales.

En fisica el término elasticidad designa la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan. La plasticidad es la

propiedad mecánica de un material de deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico, es decir, por encima de su límite elástico. En los metales, la plasticidad se explica en términos de desplazamientos irreversibles de dislocaciones. La ley de Hooke habla de la elasticidad. La teoría de la elasticidad establece que un cuerpo elástico se estira proporcionalmente a la fuerza que actúa sobre él.

El módulo de elasticidad representa la resistencia del metal contra la deformación elástica. Para deformar elásticamente un material con un alto modulo elástico se requiere un esfuerzo alto, mientras que un esfuerzo menor será suficiente para deformar elásticamente un material con modulo elástico bajo.

No es posible modificar en forma apreciable el módulo de elasticidad de un material dado, ya que el módulo de elasticidad solo varia sensiblemente en presencia de texturas (orientación preferencial de granos) o modificando apreciablemente la composición. Por esta razón en el caso de los aceros, por ejemplo, el módulo de Young será el mismo así se trate de un acero aleado o un acero al carbono. Sin embargo, se conoce que ciertos procesos que se llevan a cabo dentro del material, pueden disminuir el valor del módulo elástico.

Debe mencionarse que los diagramas esfuerzo-deformación para diferentes materiales, varían considerablemente, y diferentes pruebas de tensión del mismo material pueden producir resultados diferentes, dependiendo de la temperatura de la muestra y la rapidez en la aplicación de la carga.

Los materiales dúctiles, que comprenden el acero estructural y muchas otras aleaciones, se caracterizan por su capacidad para fluir a temperaturas normales. Cuando se somete la probeta a una carga creciente, su longitud aumenta, primero linealmente a una velocidad muy baja; pero después que alcanza un valor crítico de esfuerzo, la probeta sufre grandes deformaciones con un pequeño aumento en la carga aplicada. Esta deformación ocurre por deslizamiento del material en planos oblicuos y se debe a la presencia de esfuerzos cortantes.

El ensayo comienza aplicando gradualmente la fuerza de tracción a la probeta, lo cual provoca que el recorrido inicial en la gráfica discorra por la línea recta que une el origen de coordenadas con el punto A. Hasta llegar al punto A se conserva una proporcionalidad entre la tensión alcanzada y el alargamiento unitario producido en la pieza. Es lo que se conoce como Ley de Hooke, que relaciona linealmente tensiones con las deformaciones a través del módulo de elasticidad E , constante para cada material que en el caso de los aceros y fundiciones vale aproximadamente $2.100.000 \text{ Kg/mm}^2$.

Otra particularidad de este tramo es que al cesar la sollicitación sobre la pieza, ésta recupera su longitud inicial. Es decir, se comporta de manera elástica, y el punto A se denomina Límite de Proporcionalidad. Pasado el punto A y hasta llegar al punto B, los alargamientos producidos incluso crecen de manera más rápida con la tensión, y se cumple que al cesar la carga, la pieza recupera de nuevo su geometría inicial, es decir, se sigue comportando elásticamente. El punto B marca el límite a este comportamiento, y por ello al punto B se le denomina Límite Elástico.

Tras pasado el punto *B* el material pasa a comportarse de manera plástica, es decir, que no recupera su longitud inicial, quedando una deformación remanente al cesar la carga. De esta manera, el proceso de descarga se realiza siguiendo la trayectoria según la línea punteada mostrada del diagrama tensión-deformación, que como se ve, corta al eje de deformaciones, $\Delta L/L_0$, a una cierta distancia del origen, que se corresponde con la deformación remanente que queda. Concretamente, el punto *B* o Límite Elástico es aquel que le corresponde una deformación remanente del 0.2%.

Si se sigue aplicando carga se llega al punto identificado en la gráfica como *C*, donde a partir de aquí y hasta el punto *D*, las deformaciones crecen de manera rápida mientras que la carga fluctúa entre dos valores, llamados límites de fluencia, superior e inferior. Este nuevo estadio, denominado de fluencia, es característico exclusivamente de los aceros dúctiles, no apareciendo en los aceros endurecidos.

Más allá del punto de fluencia *D* es necesario seguir aplicando un aumento de la carga para conseguir un pronunciado aumento del alargamiento. Entramos ya en la zona de las grandes deformaciones plásticas hasta alcanzar el punto *F*, donde la carga alcanza su valor máximo, lo que dividida por el área inicial de la probeta proporciona la tensión máxima de rotura o resistencia a la tracción.

A partir del punto *E* tiene lugar el fenómeno de estricción de la probeta, consistente en una reducción de la sección en la zona de la rotura, y el responsable del periodo de bajada del diagrama, dado que al reducirse el valor de la sección real, el valor de la carga aplicado a partir del punto *E* también se va reduciendo hasta alcanzar el punto *F* de rotura.

Los materiales frágiles como el hierro fundido, cristal y piedra se caracterizan porque la ruptura ocurre sin que se presente antes, un cambio importante en la velocidad de alargamiento. Así para materiales frágiles no hay diferencia entre resistencia última y resistencia a la ruptura. También, la deformación en el momento de la ruptura es mucho más pequeña para materiales frágiles que para materiales dúctiles.

La resistencia mecánica y la relación resistencia-peso no son las únicas propiedades que se toman en cuenta para la elección de un material para la fabricación de un elemento o estructura mecánica. Existe otro factor importante, la rigidez, retomando la definición de resistencia, que es una medida de la cantidad de fuerza requerida para romper una muestra de material: la rigidez es una propiedad que muestra que tanto se deformara un material bajo la acción de un determinada carga, es decir, ¿qué tan elástico es un material?

El número que representa la rigidez es llamado módulo de elasticidad o módulo de Young y es representado por la letra *E*. el módulo de Young es el esfuerzo que sería requerido para deformar al doble la longitud de un espécimen, si esto fuera posible. El Módulo de Elasticidad o Módulo de Young, para el cálculo y diseño de estructuras de acero en el rango elástico, toma convencionalmente el siguiente valor:

$$E = 210.000 \text{ N/mm}^2$$

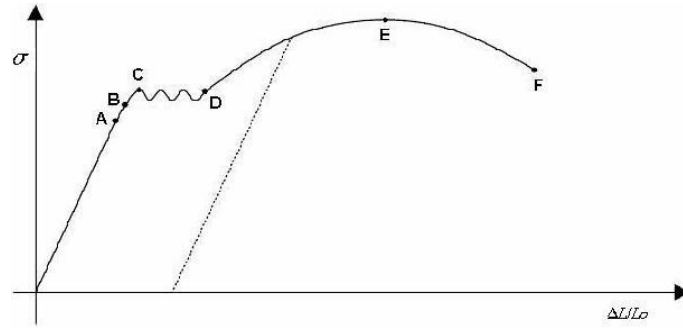


Figura 18. Gráfica del comportamiento del metal en la prueba de tensión.

Para realizar las pruebas de tensión en el presente trabajo, se utilizó una máquina de ensayos universales Instron 600 Dx, la cual describiremos a continuación:

MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES INSTRON 600 DX



Figura 19. Máquina de ensayos universales INSTRON 600 DX

La prueba de tracción consiste en someter probetas de unas dimensiones determinadas especificadas por las normas ASTM E- 8 a un estiramiento, manteniendo la velocidad constante en el movimiento del puente.

Las probetas se sujetan mediante unas mordazas al puente superior en el cual está fijada la célula de carga y por la otra parte la sujeción es al puente, el cual se puede desplazar a la velocidad deseada hasta la rotura de la probeta. Mediante la célula de carga se determinan los incrementos de carga y mediante la determinación de los incrementos en la longitud de la probeta se determina el alargamiento. Estos datos pasan al ordenador, donde una aplicación informática procesa la información y suministra toda una serie de cálculos adicionales como resistencia a la tracción, alargamiento, límite elástico, módulos, energías, etc.

Carga máxima.- Es la carga máxima alcanzada por la curva en su desarrollo.

Carga de rotura.- Es la carga leída en el momento de la rotura de la probeta.

Resistencia a la tracción en el máximo.- Es la carga máxima dividida entre la sección inicial de la probeta.

Resistencia a la tracción en la rotura.- Es la carga leída en el momento de la rotura, dividida entre la sección inicial de la probeta.

Alargamiento en el máximo.- Es el incremento en % de la longitud inicial de la probeta, leída en el momento de la máxima carga.

Alargamiento en la rotura.- Es el incremento en % de la longitud inicial de la probeta, leída en el momento de la rotura de la probeta.

Límite elástico.- Es la carga unitaria leída en el % del “OFFSET” especificado, respecto a la recta que se traza sobre la zona elástica o región inicial de la curva. El “OFFSET” suele ser habitualmente 0,1 % ó 0.2 % de la longitud inicial de la probeta.

Módulo de Young.- Es la carga unitaria dividida entre el % de alargamiento correspondiente, leído en la región inicial de la curva (Normalmente la zona elástica) y es calculada automáticamente por el ordenador.

Energía al límite elástico.- Es el “Área” interior de la curva desarrollada hasta el “OFFSET” especificado.

Energía a la rotura.- Es el “Area” interior de la curva desarrollada hasta que se produce la rotura.

Energía al límite elástico.- Es el “Area” interior de la curva desarrollada hasta el “OFFSET” especificado.

ESPACIO DE ENSAYO:

El bastidor figura 21 aplica la carga de ensayo a la probeta. El bastidor de la maquina DX está formado por 2 unidades distintas: una unidad de carga y una unidad fija ver figura. 20. La unidad de carga está conformada por los componentes que aplican la carga de ensayo y están acoplados al pistón en la base del bastidor de ensayo, Los componentes de la unidad de carga son: una cruceta de tracción, dos columnas entalladas, un tablero de compresión, el cilindro y el pistón. La unidad fija está sujeta al bastidor de la máquina y permanece fija durante el ensayo los componentes de la unidad fija son: una cruceta ajustable, 2 columnas ajustables y la base. La altura de la unidad fija se puede ajustar entre ensayos para adaptarla a las diferentes longitudes de probetas y a diversas cadenas de carga.

La carga de las probetas se efectúa del modo siguiente. La unidad de bombeo suministra líquido hidráulico a presión al conjunto del cilindro y pistón situado en el interior de la base del bastidor. Esta presión impulsa hacia arriba el pistón y la unidad de carga, que sale del cilindro. La cruceta ajustable actúa como una barra rígida para aplicar fuerza contraria. Cuando se realiza un ensayo, se aplica una fuerza de tracción a la probeta montada entre la cruceta de tracción y la cruceta ajustable y el tablero de compresión.

Un motor hidráulico situado en la base del bastidor permite al operador ajustar la altura de la cruceta ajustable entre ensayos. De este modo, el operador puede variar los espacios de tracción y compresión (2 y 6 figura 21). La unidad fija se apoya en la base mediante un conjunto supresor de contra presión que ejerce una fuerza suficiente para soportar el peso estático de los componentes y evitar que se produzca contrapresión en la carga de ensayo.

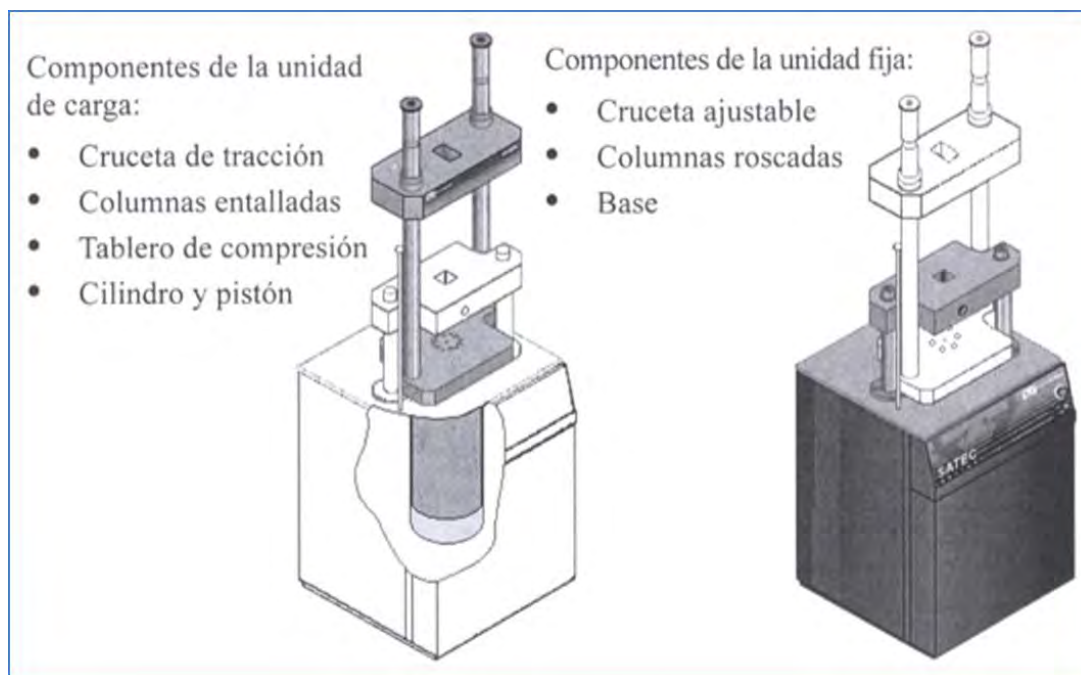


Figura 20. Separación de la unidad de carga de la unidad fija.

CRUCETA DE TRACCIÓN

La cruceta de tracción (10, Figura 21) está montada en 2 columnas (5) mediante anillos partidos de retención (8 y 10). La cruceta reposa sobre el anillo (11) montado en la entalladura de la columna, justo debajo de la cruceta, cuyo movimiento ascendente se ve impedido por un segundo anillo (8) y un separador (9) montados en la entalladura por encima de la cruceta. La cruceta de tracción puede ajustarse entre ensayos a lo largo de las columnas si es necesario cambiar el tamaño del espacio del ensayo. El ajuste solo se realiza entre los ensayos, nunca durante los mismos.

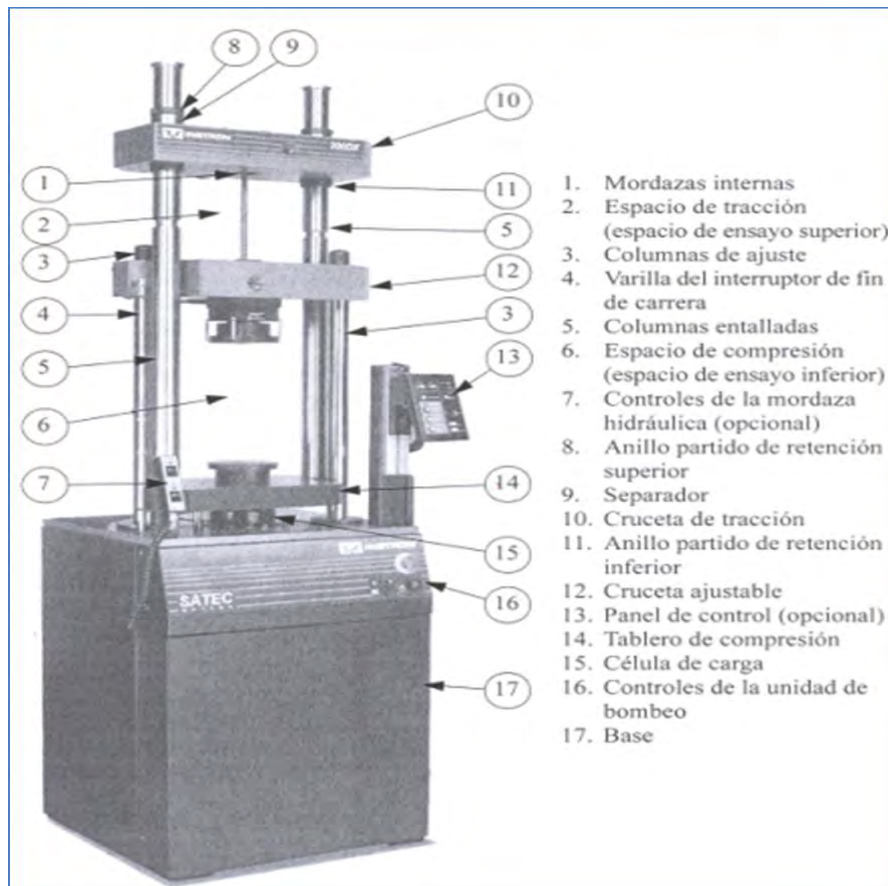


Figura 21. Bastidor y componentes del sistema.

CONJUNTO DEL INTERRUPTOR DE FIN DE CARRERA:

El conjunto de interruptor de fin de carrera (13 – Figura 22) está montado en la base del bastidor. El conjunto del interruptor de fin de carrera tiene la función de impedir que la cruceta ajustable y el pistón sobrepasen su recorrido. Este conjunto de interruptor de fin de carrera desde uno de los 3 topes (3, 7 y 9) montados en una varilla (5) que se prolonga desde la placa base (12) del bastidor. Los topes superior (3) e inferior (7) impiden que la cruceta ajustable sobrepase su recorrido. El tope superior impide que la cruceta sobrepase su recorrido en sentido ascendente, a fin de que no se extienda más allá del cilindro.

Los topes de fin de carrera de la cruceta salen de fábrica ajustados para proteger el bastidor sin ningún porta piezas instalado. Es decir para proteger el bastidor cuando no está instalado ningún porta piezas y los espacios de tracción y de compresión son máximos. Cuando se instalan porta piezas, los espacios de tracción y compresión se reducen hasta el punto de que la sección de carga del bastidor (pistón tablero de compresión y cruceta de tracción) puede tocar la cruceta ajustable sin que se dispare ninguno de los topes de fin de carrera de la cruceta, con el siguiente riesgo de que se produzcan daños graves en el bastidor o los porta piezas.

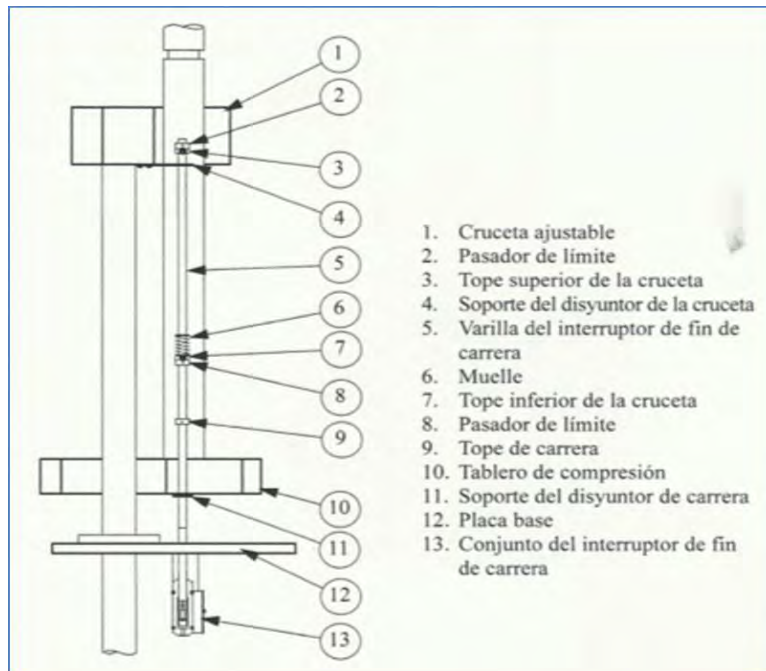


Figura 22. Conjunto de interruptor de fin de carrera standar

UNIDAD DE BOMBEO HIDRÁULICA

La unidad de bombeo suministra energía hidráulica para las distintas funciones del bastidor esto incluye el accionamiento de la unidad de carga (cilindro pistón), el motor de las crucetas y los actuadores hidráulicos opcionales de las mordazas (cuando se han suministrado) la unidad de bombeo se encuentra en la parte posterior del bastidor. Los principales componentes de la unidad de bombeo son: 1 depósito, 1 bomba, 1 motor eléctrico, 1 refrigerador de aceite, 1 colector del servo, un colector del motor de la cruceta y el líquido hidráulico. Si el sistema se ha comprado con la opción de control manual o servo/manual, se incluye así mismo un colector de control manual.

La bomba accionada por un motor eléctrico de 2 *hp*, envía el aceite al depósito a través de los tubos hidráulicos de alta presión, al cilindro situado en la base del bastidor. Cuando el controlador envía al bastidor la señal de aplicar una carga a una probeta, la unidad de bombeo genera presión en el sistema y el pistón se extiende desde el cilindro.

El aceite hidráulico debe trabajar a una temperatura máxima por debajo de 60 °C y nunca deberá exceder de los 80 °C para tal efecto el sistema cuenta con un intercambiador térmico de aire-aceite antes de regresar al depósito. Un ventilador introduce aire frío del exterior en la base del bastidor a través de un protector situado en el panel posterior de la base si la temperatura sobrepasa los calores máximos un interruptor actuará para proteger el sistema.

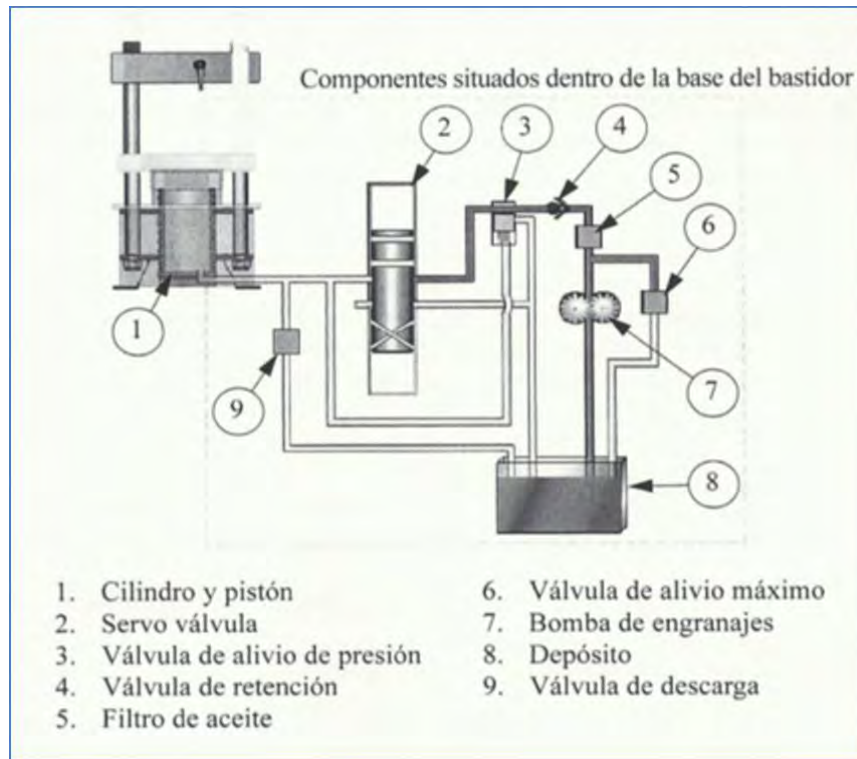


Figura 23. Flujo y componentes hidráulicos.

Los sistemas con servocontrol o control servo/manual están provistos de una servo válvula (2 –figura 23) que viene determinada por los parámetros que el operador introduce en el software de control define el modo en que funcionará el cilindro y el pistón. Cerrará el flujo de aceite al cilindro para mantener el pistón estacionario, permitirá el paso de aceite al cilindro para extender el pistón, o permitirá que el aceite regrese al depósito para que el pistón se retraiga.

La válvula (9 –figura 23) de descarga cuando se descarga el bastidor, la servo válvula cambia de posición para que el aceite pueda volver al depósito a través del sistema. Así mismo, la válvula de descarga puede abrirse para que el aceite regrese directamente al depósito y aumentar así la velocidad de descarga. La válvula de descarga, de hecho, actúa para mantener la señal de error dentro de los límites prescritos. Ello genera unas pulsaciones sonoras cuando el bastidor se está descargando.

CODIFICADOR DE POSICIÓN

Para determinar la posición de la unidad de carga se utiliza un codificador de posición magnetostrictivos se montan en la parte inferior del cilindro hidráulico. La varilla del codificador se extiende a través del cilindro y la parte inferior del pistón, donde se monta el imán para que la varilla pase a través de él. En todos los tipos de codificadores, la posición absoluta de la unidad de carga se mide en relación con una barra estacionaria del bastidor, la placa base o el cilindro.

CÉLULA DE CARGA

Una célula de carga calibrada (15 – figura 21) y fig. 22 montada en la parte inferior del tablero de compresión mide la fuerza aplicada a la probeta de ensayo. Esta configuración permite medir la carga independientemente del sistema hidráulico. Esto significa que la fuerza medida por la célula de carga está exenta de interferencias producidas por la fricción de los pistones y la histéresis: es una medición de fuerza directa.

Estas células de carga son transductores de alta precisión que permiten conocer mediante galgas extenso-métricas el valor de la fuerza aplicada que genera la carga en el sistema de tracción o compresión, cuando un esfuerzo mecánico se presenta sobre la célula de carga ésta cambia el valor de la resistencia de la galga produciendo un cambio en la señal de salida. Esta señal es acondicionada por un sistema electrónico a un display cumpliendo las especificaciones normas correspondientes. El uso de las células de carga reduce considerablemente los errores por esfuerzos axiales y laterales que pueden ser transferidos a la probeta hasta su ruptura.

Las células de carga están perfectamente diseñadas para permitir el desarrollo de ensayos de tracción y compresión puesto que los esfuerzos actúan de la misma manera sobre la galga extensométrica figura 24 y así no es necesario estar intercambiando las células de carga para ensayos de tracción o compresión.



Figura 24. Célula de carga de equipos Instron.

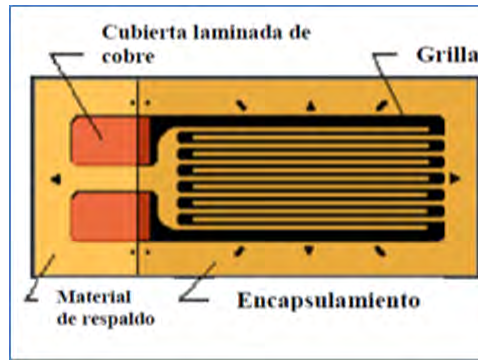


Figura 25. Strain gage.

El parámetro strain puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión). Si bien es adimensional, en muchos casos se suele expresar en unidades de mm/mm. En la práctica, la magnitud de medida de strain es muy pequeña por lo que usualmente se expresa como microstrain ($\mu\epsilon$), que es $\epsilon \times 10^{-6}$. Cuando una barra es tensionada por una fuerza uniaxial, un fenómeno conocido como esfuerzo de Poisson causa que la circunferencia de la barra se contraiga en la dirección transversal o perpendicular. La magnitud de esta contracción transversal es una propiedad del material indicado por su coeficiente de Poisson.

La relación de Poisson ν del material es definido como el radio negativo del esfuerzo en la dirección transversal (perpendicular a la fuerza) al esfuerzo en la dirección axial (paralelo a la fuerza) o $\nu = \epsilon_T/\epsilon$. El radio de Poisson para el acero, por ejemplo, va de 0.25 a 0.3.

Se conocen varios métodos para medir esfuerzo, pero el más utilizado es mediante un strain gage, dispositivo cuya resistencia eléctrica varía de forma proporcional al esfuerzo a que éste es sometido. El strain gage más ampliamente utilizado es el confinado en papel metálico o "bonded metallic" strain gage. El strain gage metálico consiste en un cable muy fino o papel aluminio dispuesto en forma de grilla. Esta grilla, maximiza la cantidad de metal sujeto al esfuerzo ver la figura 25.

SOFTWARE PARTNER

Partner es un paquete de software que convierte en un proceso fácil y rápido la creación y la ejecución de procedimientos de ensayo de materiales. El programa aprovecha la ventaja de los procesadores informáticos de última generación y del sistema operativo Windows. Parther interactúa con los controladores 3300, 5500, 5800, y 8800 de Instron, así como con el antiguo controlador SATEC Mats II. Cuando está conectado a un indicador digital Marrk III, prtner puede utilizarse para la captura de datos y realización de cálculos.

Así utilizando la versión de 8.0a de Partner como interfaz de comunicación con la Maquina de Ensayos Universales Instron podemos obtener un gran cantidad de resultados de manera organizada y presentable mediante un reporte gráfico final así como también poder conservar en un historial de datos todas las actividades que la maquina desarrolle desde su inicio de operación.

La comunicación se efectúa mediante el controlador 5500. El controlador recibe mensajes del ordenador y los envía al sistema de ensayo para que realice la función solicitada, durante el ensayo el controlador recibe datos de los transductores de carga y posición y los envía al ordenador. Dentro de la base del bastidor hay una placa de interfaz para el intercambio de señales entre el controlador y los componentes del sistema

Estos datos obtenidos son el resultado de los ensayos compresión y tracción realizados bajo el control y la programación del software mismo que nos permite personalizar los detalles de los ensayos o bien seguir el procedimiento ya establecidos por las normas ASTM que se encuentran cargados en el propio sistema y solo hay que seleccionarlo para ejecutarlo, finalmente los valores obtenidos serán confiables siempre y cuando la máquina de ensayos se encuentre en buen estado de uso y calibrado.



Figura 26. Ejecución del software Partner para La obtención de datos del ensayo de tracción.

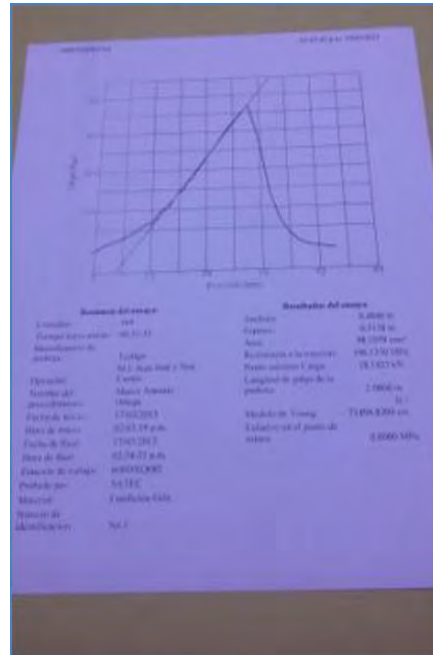


Figura 27. Hoja de resultados del ensayo.

Los resultados obtenidos del ensayo son procesados por medio del software partner y son almacenados en las bases de datos que el mismo sistema ofrece para su futuro análisis, este programa nos da la opción de personalizar la hoja de resultados figura 27 que incluye una gráfica esfuerzo – posición ó carga – posición y los valores determinantes y seleccionados de la prueba tales como: Carga máxima, Carga de rotura, Resistencia a la tracción en el máximo, Resistencia a la tracción en la rotura, Alargamiento en el máximo, Alargamiento en la rotura, Límite elástico, Módulo de Young, Energía al límite elástico, Energía a la rotura, Energía al límite elástico entre otros datos de etiquetados describen el desarrollo de la prueba.

3.3.1.-MÓDULO DE YOUNG O MODULO DE ELASTICIDAD

Según la ley de Hooke las deformaciones unitarias son proporcionales a los esfuerzos normales, es decir:

$$\sigma \cong \varepsilon$$

Cuando se encuentra en ciertos límites de esfuerzo, esta relación es lineal y puede ser expresada:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde E es un coeficiente que depende de las propiedades del material y se denomina módulo de elasticidad (módulo de Young) longitudinal. Este coeficiente caracteriza la rigidez del material, es decir su capacidad de resistir las deformaciones.

Puesto que ε es una magnitud adimensional, se deduce que E se mide en las mismas unidades que σ , es decir Kfg/cm^2 o Pa . El módulo de elasticidad es muy útil para la determinación de las deformaciones que sufre el cuerpo cuando es sometido a una carga.

La fórmula:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Puede ser interpretada como la ecuación de la recta ($y = ax + b$), entonces basta con determinar la relación entre los esfuerzos que surgen en una probeta (σ), y las deformaciones unitarias causadas (ε), expresar dicha relación en forma de gráfica $\varepsilon - \sigma$ (para un rango de deformaciones elásticas), y determinar por medio de métodos gráficos (por ejemplo), la pendiente de la recta obtenida, este mismo dato será entonces el módulo de elasticidad que se pretende determinar experimentalmente.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Para obtener el módulo de elasticidad de los materiales metálicos se debe someter las probetas a tracción axial, medir las variables fuerza F y alargamiento (Δl o δ), a incrementos conocidos de fuerza.

3.3.2. CARGA MÁXIMA

La carga máxima nos representa la mayor carga que puede soportar el material, para los materiales frágiles al aplicar una carga mayor a la carga máxima, estos inmediatamente sufrirán fractura. En los materiales dúctiles, esta carga determina el inicio del encuellamiento, hasta llegar a la carga en la ruptura.

Para realizar el recubrimiento metálico en las probetas del acero 1010 y 1018 se utilizó una pistola de flama MK61, la cual describiremos a continuación:

3.4. PISTOLA FLAMESPRAY MK 61.

La pistola de rociado por flama de alambre se compone de una unidad de accionamiento con un motor, rodillos para la alimentación de alambre, una cabeza de gas con válvulas, una boquilla de gas, el cabezal de aire que controla la flama y la atomización del aire. En comparación con un rociado por arco, el rociado por flama de alambre es generalmente más lento y más costoso debido al costo relativamente alto de la mezcla gaseosa de oxígeno-combustible comparado con el costo de la electricidad. Sin embargo, los sistemas de rociado por flama, representan de una tercera parte a la mitad del costo de los sistemas de rociado por arco de alambre, por lo que son significativamente más baratos. Los sistemas de rociado por flama son de campo portátiles y se pueden usar para aplicar recubrimientos de metal de calidad para la protección contra la corrosión.

La función primaria de la llama en este proceso es fundir el material de aporte provisto en forma de alambre. Luego una corriente de aire atomiza el material fundido y es proyectado hacia la pieza base. Las tasas de proyectado están en el rango de 0.5 - 9 Kg/h para el acero inoxidable. Los materiales de bajo punto de fusión poseen una mayor tasa de deposición (el cinc y aleaciones de estaño). Las temperaturas de los sustratos están en el orden de los 95 a 205°C.

La densidad del recubrimiento obedece a la velocidad de proyección de las partículas sobre el sustrato, que puede variar desde 24 hasta 15000 m/s , dependiendo de la técnica de rociado. La temperatura de la flama varía desde 2200°C hasta 17000°C para los procesos de combustión y plasma respectivamente. La forma de las partículas puede variar dependiendo de las condiciones de rociado, tipo de material a depositar, la alimentación, el estado de la partícula (fundida o no), o de la aceleración de la misma antes del impacto. Durante el impacto, algunas gotas pueden estar sin fundir y dar origen luego a heterogeneidades, porosidad o sufrir cierto grado de oxidación.

La adherencia del recubrimiento depende de la microrugosidad superficial, y juega un papel importante en su formación inicial. La cobertura sobre el material base se desprenderá y/o será ineficiente debido a un pobre anclaje en la capa inicial de rociado. Existen diversas normas de limpieza superficial que aseguran una buena adherencia, definiendo las condiciones de decapado, flameado, cepillado, granallado, etc. Todas estas normas tienden a aumentar el área superficial de contacto inicial, a quitar costras y óxidos que impidan la formación de los revestimientos.





Figura 28. Pistola MK 61

La pistola MK 61 está diseñada para tener una operación manual y producir recubrimientos de alambre. Los calibres de alambre que se pueden usar en esta pistola incluyen de 1.6 mm, 2.0 mm, 1/8", 11g B&S y 3/16".

La alimentación del alambre en la pistola se realiza mediante un motor de aire de desplazamiento positivo con alto torque ubicado en el mango de la pistola. El control para la variación de velocidad lo proporciona una válvula de presión compensadora construida dentro del puerto de escape que se ajusta dependiendo del punto de fusión del alambre usado. La operación mediante el uso de los dedos de una válvula activadora ubicada en la admisión del motor asegura el control de paro/arranque instantáneo de la alimentación del alambre.

La pistola flama spray MK 61 está provista de una protección de chorro de aire en la boquilla que impide automáticamente el regreso del alambre fundido y se suelda a la boquilla cuando se detiene la alimentación del alambre.

La boquilla de la pistola MK 61 está diseñada para asegurar la alineación axial exacta de sus partes componentes; las superficies de acoplamiento están provistas de un arreglo doble de sellos de gas para un ensamble a pruebas de fugas. Se cuenta con excelente estabilidad de flama y fácil encendido concedido por un nipple de aire de autoajuste neumático. Un esparcidor ajustable provee un amplio patrón de atomización. Se cuenta con un cabezal de gas del tipo multidiafragma para la válvula principal de suministro de aire, el gas combustible y el oxígeno, en el cual los diafragmas sellados se operan conjuntamente mediante una leva preajustada. La fuga interna y combinación entre los puertos del gas combustible y el oxígeno dentro del cabezal, así mismo el desfase en la secuencia en la que los gases son liberados es imposible por el mecanismo de levas usado. La pistola tiene incorporada una válvula piloto de fácil operación que permite el encendido mediante el uso de un dispositivo de chispa, cerrillo, cigarro, etc.

La pistola tiene una construcción resistente cuyo diseño reúne todos los requerimientos de un atomizador de metal práctico. La pistola MK 61 está diseñada para atomizar todos los materiales mediante el uso de acetileno. Esta pistola emplea una válvula principal para

suministrar el acetileno (ver 31) para proporcionar la cantidad recomendada en la fundición de los alambres mencionados.

MONTAJE DE LA BOQUILLA

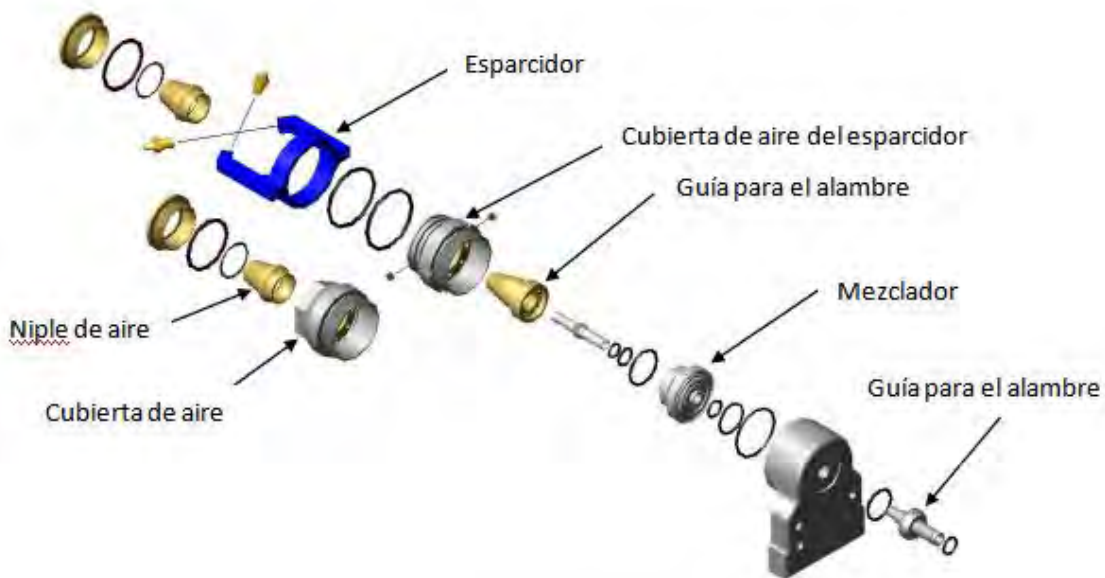


Figura 29. Vista extendida del montaje de la boquilla.

Los sellos dobles de gas en las superficies de acoplamiento expuestos a la mezcla de gases consisten en uniones metálicas escalonadas reforzadas por sellos O-Ring.

La guía para el alambre tiene tres usos. Previene el desgaste en el mezclador, proporciona un tubo que refuerza al mezclador y conduce un suministro de aire al centro de la boquilla para formar un escudo de calor cuando la alimentación del alambre se detiene. El mezclador asegura la correcta mezcla de los suministros de gas combustible y oxígeno en las proporciones adecuadas para una combustión completa. La boquilla está perfectamente perfilada y recubierta con acero endurecido termoestable. La cubierta de aire además de conducir el aire comprimido del cabezal de gas al niple de aire, asegura la boquilla y el mezclador al cabezal de gas y afianza a la rondana del niple de aire y soporta el accesorio del atomizador.

El niple de aire direcciona al aire comprimido a lo largo de la punta del alambre en el ángulo y velocidad requerida para acelerar los gases de combustión y eliminar gotas de metal fundido del alambre y de esta manera formar el flujo de spray. El atomizador (opcional) dirige un chorro de aire en el flujo de spray para proporcionarle un patrón más amplio.

EL CABEZAL DE GAS Y LA VÁLVULA

EL CABEZAL DE GAS

El gas combustible, el oxígeno y el aire comprimido son transportados a través del cabezal de gas desde la válvula principal a la boquilla. Se cuenta con filtros antiretorno de llama colocados en los puertos de oxígeno y gas combustible tanto para minimizar el retorno de la llama como para evitar la entrada de materias extrañas.



Figura 30. Cabezal de gas.

LA VÁLVULA PRINCIPAL

Esta es una válvula diafragma la cual controla el paso de los gases al cabezal de gas. El husillo de levas esta maquinado tanto para suministrar los gases en la secuencia correcta como puesto a tiempo para un fácil encendido. Un émbolo de gas del piloto y una ranura de piloto sobre el perno permiten que una pequeña filtración de gas combustible pase cuando se selecciona la posición del piloto. Cuando enciende este suministro de gas provee una flama piloto de la cual se puede encender la flama principal.

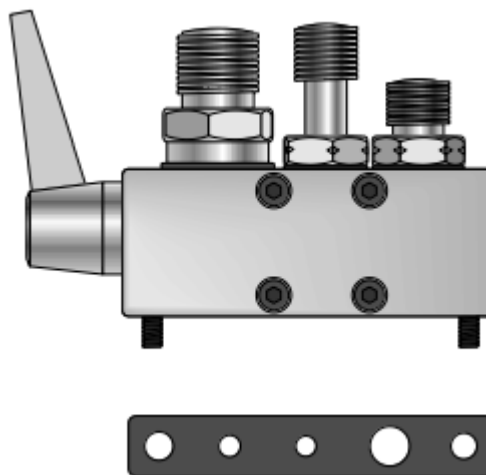


Figura 31. Válvula principal.

UNIDAD DE SUMINISTRO DE ALAMBRE

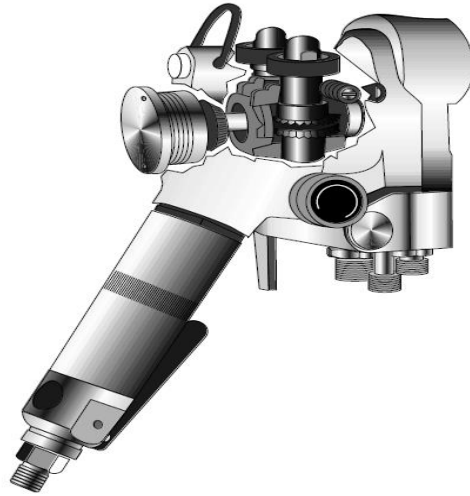


Figura 32. Unidad de suministro de alambre.

La unidad de suministro de aire está diseñada con cojinetes de proporciones adecuadas, un hilador sin fin con biselado de alta precisión y engranajes helicoidales. El montaje es de auto centrado lo que elimina completamente la desalineación y el arrastre del alambre.

La tensión del rodillo sobre el alambre es infinitamente ajustable para ajustarlo al rango completo de tipos y tamaños de alambres metálicos para spray. La unidad de suministro de alambre está energizada mediante un motor de aire de desplazamiento positivo de alto torque. Se tiene disponibilidad de una gama de estos motores equipados con un control de disparo lo que permite el uso de alambres de diámetros y puntos de fusión muy diferentes para ser rociados sin problema.

ESCUDO TERMICO - INICIO/PARO DEL ALAMBRE

La pistola MK 61 ofrece un sistema de escudo térmico que mejora la habilidad para el inicio y paro del equipo y además proporciona mayor tiempo de vida a la boquilla.

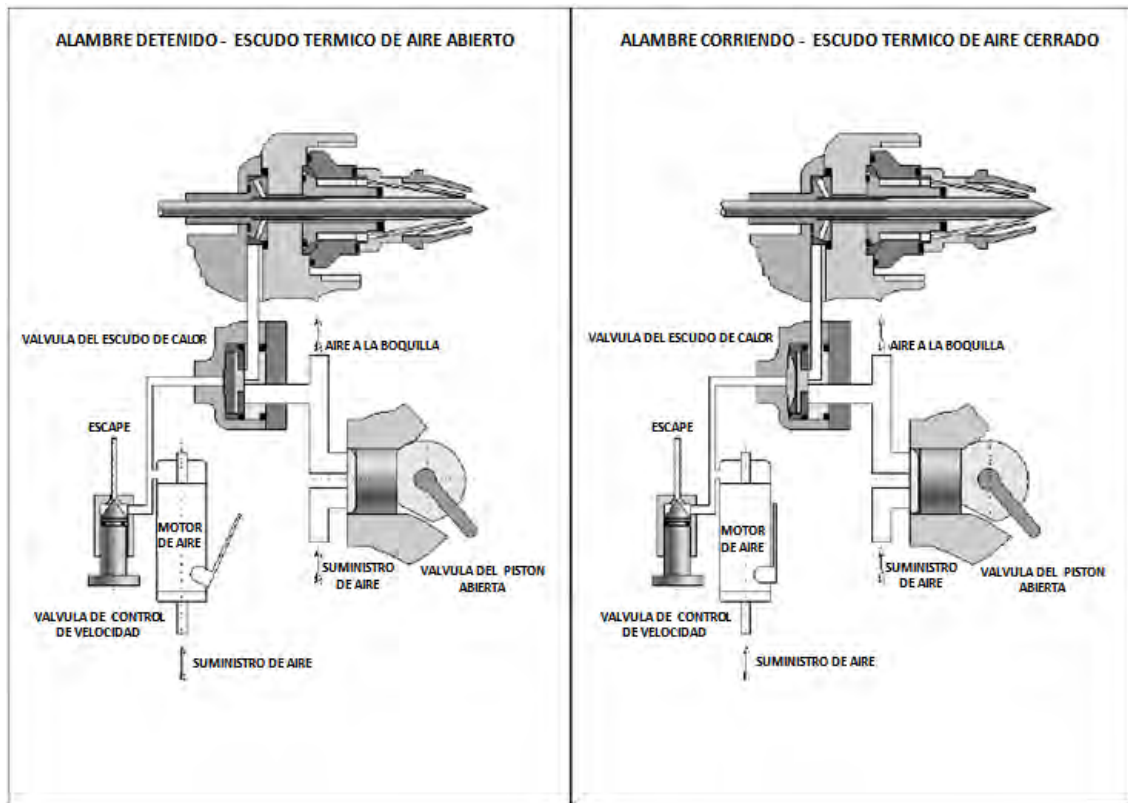


Figura 33. Sistema del escudo térmico.

Cuando se interrumpe la fuente de aire al motor y se detiene el suministro de alambre, la válvula del escudo térmico se abre lo que permite un flujo de aire que enfría desde la válvula de la pistola hasta el espacio entre el alambre y la boquilla. Lo anterior produce un flujo de aire en el frente de la boquilla y forma una capa envolvente que protege la punta del alambre de la flama.

Cuando se hace pasar el aire comprimido a través del motor (para impulsar al alambre) el escape se usa para incrementar la presión en la cavidad de la válvula del escudo térmico. Esta presión incrementada fuerza al diafragma hacia delante, empujando al émbolo contra su asiento lo que corta el suministro de aire al escudo térmico. Esta característica no se emplea en el modo de spray continuo de alto rendimiento.

REGULADORES DE PRESIÓN Y SUPRESORES DE RETORNO RÁPIDO.

La pistola debe usarse con dos reguladores de etapa (Metallisation) que son suministrados con los accesorios correctos para la conexión al equipo MK 61.



Figura 34. a). Regulador de oxígeno con supresión de retorno rápido ajustado. b). Regulador de gas combustible con supresión de retorno rápido ajustado.

Es imperativo que estos reguladores sean adecuados para los supresores de retorno rápido, los cuales protegerán las fuentes de oxígeno y gas combustible en el caso de un retorno de la flama (flama viajando de regreso a la manguera). Los supresores de retorno rápido de Metallisation son los recomendados para este equipo. Todos los ajustes de presión y medición de flujo que se proporcionan en este manual solo son correctos para este tipo de equipo.

MEDIDORES DE FLUJO Y MANGUERAS.



Figura 35. Medidores de flujo montados.

Los medidores de flujo indican el flujo relativo de gas combustible y oxígeno y permiten los parámetros correctos de rocío lo que es esencial para la alta eficiencia y calidad de los recubrimientos lo que sería más complicado y menos fiable si solo se usan los reguladores. Son invaluable instrumentos de ayuda para encontrar fallas y evitar tiempos de inactividad.

Estos instrumentos son montados sobre un panel de acero robusto que permite a la unidad ser instalada sobre la pared. Las conexiones de rosca izquierda tanto para la manguera del gas combustible como para la manguera del oxígeno son estándares por lo que no puede haber errores de conexión.

Las mangueras cortas (3 metros aprox. de longitud) se proveen para la conexión entre la base de conexiones sobre el medidor de flujo y el regulador de presión multi etapa.

Las mangueras estándares de 5 metros son provistas para la conexión entre los medidores de flujo y la pistola así como para la conexión entre la unidad de regulación y filtración de aire (RFA) y la pistola.

Rojo	acetileno	BS5120 1975
Azul	oxigeno	BS5120
negro	aire	BS5118 1975

Tabla 3.-especificacion del equipo.

UNIDAD DE REGULACIÓN Y FILTRACIÓN DE AIRE (RFA).



Figura 36. Unidad de regulación y filtración de aire.

Cuando se conecta a una fuente de aire adecuada esta unidad provee aire filtrado al sistema de la boquilla y aire filtrado y lubricado a la unidad de poder de la pistola. La presión se ajusta mediante el regulador integrado.

Una mirilla ubicada en la parte alta de la unidad permite observar la tasa de aceite suministrado. La alimentación del aceite se ajusta con el control de lubricación que está en

la parte alta el cual varía la tasa de alimentación del aceite mediante una válvula de aguja. El aceite lubricante que se usa en esta unidad debe ser de alta calidad y alta lubricación.

Esta unidad está conformada con base a la norma BS6005 : 1981.

ESPECIFICACIONES.

CIFRAS DE RENDIMIENTO TÍPICAS.

Material	Diametro lbs./hr.	Tasa de Spray	
		Kg/hr.	
01E Aluminio	2mm	4.5	2.1
	3.17mm	7.0	3.2
	4.76mm	15.0	6.9
02E Zinc	2mm	13.0	5.9
	3.17mm	35.0	15.9
	4.76mm	50.0	22.7
10E,15E Bronce	2mm	9.0	4.1
	3.17mm	13.5	6.0
05E Copper	2mm	8.0	3.6
	3.17mm	13.0	5.9
30E,35E,45E,55 E, 57E,60E,65E,80 E &85E Steels and Nichrome	2mm	6.0	2.7
	3.17mm	9.5	4.3
99E Molibdeno	2mm	2.25	1.02
	3.17mm	1.5-4.5	0.7-2.0

--	--	--	--

Tabla 4. Especificaciones.

DIMENSIONES.

Las dimensiones son considerando el esparcidor los que proporciona las dimensiones más grandes.

LONGITUD	25.7 cm (10.125")
ALTURA	28.6 cm (11.250")
ANCHO	9.5 cm (3.750")

Tabla 5.-dimensiones del equipo.

SERVICIOS REQUERIDOS.

AIRE COMPRIMIDO	30 cfm a 80 psi	50 m ³ /h a 5.5 bar
OXIGENO	48-65 cfh a 22-32 psi	1.37-1.84 m ³ /h a 1.5-2.2 bar
ACETILENO	26-35 cfh a 15 psi	.74-.99 m ³ /h a 1.03 bar

Tabla 6.-servicios requeridos.

Nota: Las cifras de presión y consumo del gas combustible y del oxígeno antes mencionadas cubren el rango completo de conjuntos de boquillas que pueden usarse. Estos van desde el spray fino de 2.0 mm con el menor consumo hasta el rendimiento alto de 3/16" con el consumo y presión más altos.

SUPRESORES DE RETORNO RÁPIDO

Part No	Gas	Conexiones Inlet/Outlet	Max. presión de entrada (Bar)
21122A	Acetileno	9/16" BSP LH	5
21123	Oxigeno	9/16" BSP RH	10

Tabla 7. Supresores de retorno rápido.

La conexión de la entrada de aire comprimido es de 3/8" BSP (British Standard Pipe).

MEDIDAS DE SEGURIDAD.

Siempre que el equipo sea instalado apropiadamente, se le proporcione mantenimiento con regularidad y se use correctamente, la aspersión metálica no representa ningún peligro. Sin embargo, como la mayoría de procesos industriales, las prácticas inapropiadas y procedimientos descuidados pueden crear riesgos para el personal y daños al equipo.

El equipo descrito en este manual probablemente producirá niveles de ruido y polvo que requerirán tomar medidas de seguridad mientras se use el equipo. Este equipo usará gases presurizados y también inflamables. La ubicación del equipo es una consideración de cuidado que debe ser tomada en cuenta.

Es responsabilidad del usuario que todas las medidas de seguridad apropiadas de operación estén presentes antes de usar el equipo.

Para medir la corrosión en las probetas con recubrimiento y sin recubrimiento de los aceros 1010 y 1018 se realizó a partir de método de curvas de Tafel utilizando un potencióstato el cual se describe en seguida.

3.5. CORROSIÓN

Como en cualquier proceso electroquímico, la velocidad de corrosión viene dada por la corriente. Sin embargo, muchas veces nos referimos a la velocidad de corrosión en unidades de masa por unidad de área por unidad de tiempo. Para dar una idea, una corriente de corrosión de $8 \mu A cm^{-2}$ en el acero, equivale a $20 mg dm^{-2} día^{-1}$. Es fácil la interconversión si se conoce la densidad del material. Ahora vamos a definir el llamado potencial de corrosión. Para hacerlo, debemos darnos cuenta de que la ddp entre los puntos anódico y catódico puede ser virtualmente cero. Así, el voltaje de la celda es cero, pero el metal puede haber adquirido un potencial que se podría medir frente a un electrodo de referencia externo. Este es el potencial que se conoce como potencial de corrosión.

En cuanto a la corriente de corrosión, estará limitada por el paso más lento de toda la secuencia de etapas que tienen lugar. Las posibilidades son: la transferencia electrónica en el ánodo. El transporte de especies a través del electrolito. La transferencia electrónica en el cátodo. En el caso de la corrosión, el área disponible es fundamental. Hay que entender que la corriente neta es cero. Pero se define la corriente de corrosión como la corriente cuando se alcanza un estado estacionario.

Las curvas corriente-potenciales pueden ser simplificadas mostrando solo la parte lineal, a estos diagramas se les llama de Tafel, por ser el primero que propuso este tipo de simplificación y son diagramas donde se representa el potencial en función del logaritmo de la densidad de corriente neta o total. Estos diagramas pueden ser utilizados para el cálculo de la intensidad de corrosión. Para determinar la velocidad de corrosión por este método hay que someter al material en estudio a un ataque del agente corrosivo durante un periodo de

tiempo bastante largo. Una vez finalizado el ataque se determina el cambio de peso que el material experimenta con el fin de obtener la velocidad de corrosión en *m. d. d.* es decir miligramos de material perdido por día transcurrido y dm^2 de área de material expuesto.

La corriente de corrosión se puede obtener directamente de las gráficas de Tafel por intersección de ambas ramas como se observa en la Fig. 37. Conocida la I_{corr} se puede calcular la velocidad de corrosión en *m. d. d.* usando para la conversión las leyes de Faraday.

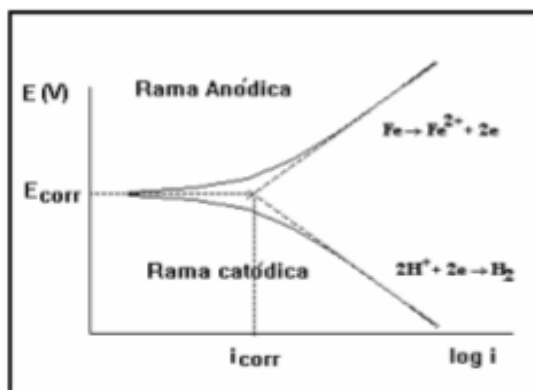


Figura 37. Grafica de tafel por intersección de ramas catódica y anódica.

Para obtener las velocidades de corrosión se utilizó un potenciostato GAMRY PCI4/300 que es un instrumento electroquímico de grado de investigación. Está diseñado para ajustarse en el interior de una computadora personal. Aunque su uso regular es como potenciostato es posible configurarlo para usarlo como galvanostato.

Este instrumento es controlado por computadora y se apega a las normas ASTM G3-89 (Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing) y ASTM G5-94 (Standard Referente Test Method for Making Potenciostatic and Potenciodynamic Anodic Polarization Measurements), que hace referencia a la evaluación y convenciones de la polarización anódica, tanto de forma potenciostática como potenciodinámica.

La función principal del potenciostato es la de controlar y medir diferencias de potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. Así como controlar y medir las corrientes eléctricas que fluyen entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar de un arreglo electro-analítico.

El potenciostato realiza la medición de la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia sin polarizar a este último, y para igualar la diferencia de potencial con un voltaje preseleccionado, el potenciostato impulsa una corriente a través del electrodo auxiliar hacia el electrodo de trabajo con el propósito de contrarrestar la diferencia entre el voltaje preseleccionado y el potencial existente en el electrodo de trabajo, ver figura 37.

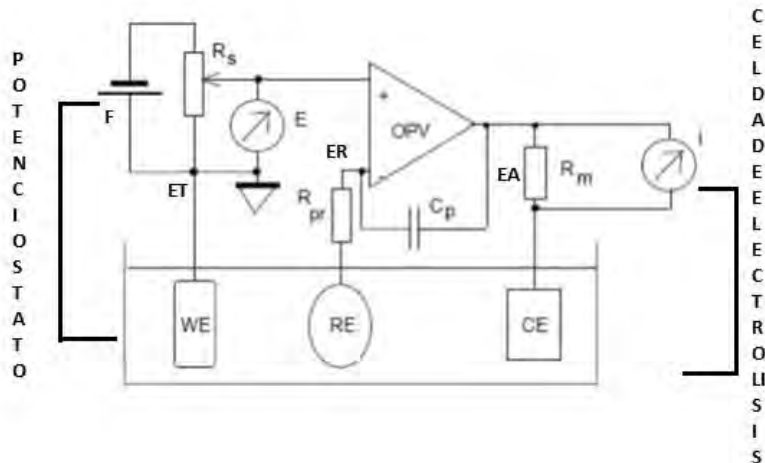


Figura 38. Esquema básico de la instrumentación para el electroanálisis del sistema metal-pintura.

El esquema anterior muestra la polarización del electrodo de trabajo (ET), por medio de una fuente variable de voltaje, conformada por una señal de alimentación (F), una resistencia variable (R_s) y un voltímetro (E). La corriente que fluye por el electrodo auxiliar (EA), es medida por un amperímetro conformado por una resistencia R_m y un inversor de voltaje a corriente (I). Se nota la adición de una resistencia de protección (R_{pr}) para evitar la polarización del electrodo de referencia (ER) y un capacitor de corrección de fase (C_p) para mejorar la estabilidad en el ancho de banda del amplificador operacional ($AmOp$).

Como la corriente I fluye por el electrodo auxiliar, esta se mide a través de una resistencia R_m usando un instrumento de tierra flotante, es decir un instrumento aislado de la tierra física por medio de resistencias, opto-acopladores y transformadores.

Las principales variables electroquímicas presentes en un sistema de corrosión son cantidades analógicas (o continuas), por ello se debe tener un circuito que controle y mida tensiones, además de corrientes en el dominio analógico. Por lo anterior los dispositivos mejor preparados para realizar este trabajo son los amplificadores operacionales.

Los amplificadores operacionales son los componentes críticos que constituyen al potencióstato. Estos limitan el rango de funcionamiento del potencióstato y para reducir estas limitaciones es necesario que los amplificadores operacionales cumplan con los siguientes requisitos: baja corriente de polarización, alta impedancia de entrada y baja tensión de offset.

El siguiente esquema, figura 39, nos permite entender el funcionamiento del potencióstato y cada módulo que lo constituye:

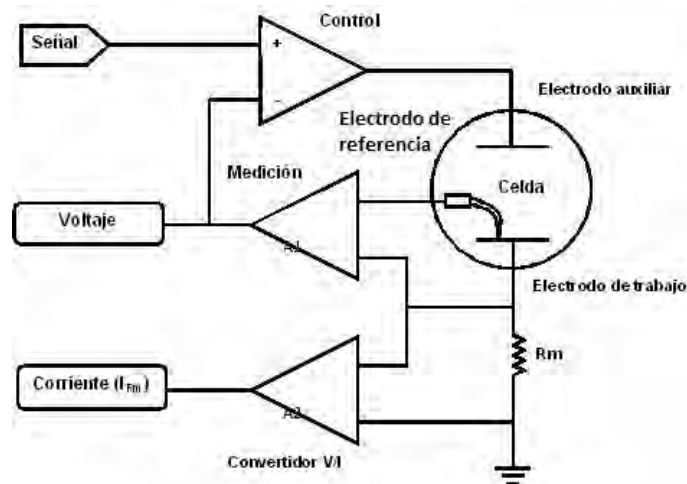


Figura 39. Esquema simplificado del potenciostato.

A continuación se realiza la descripción de las principales etapas que conforman al circuito del potenciostato:

Señal de perturbación.

La conexión “Señal” del circuito (figura 39) se refiere a la señal de perturbación del sistema, generada por una fuente de alimentación simétrica. A partir de ésta y con ayuda de un seguidor de voltaje, se obtiene la tensión deseada para polarizar al electrodo de trabajo. El seguidor de voltaje requiere tensiones de entrada despreciables y además ofrece una elevada impedancia de entrada y baja impedancia de salida. Esto le permite aceptar la señal de entrada de un dispositivo que no puede proporcionar mucha corriente y le permite ofrecer la misma tensión a la salida aumentando la corriente al valor solicitado por la carga. Por lo tanto, es un intermediario que permite la medida de una tensión sin perturbarla significativamente.

El sistema empleado contiene un módulo de generación de señales de síntesis directa digital senoidal DDS con un rango de frecuencias de 50KHz a 0.5Hz. El módulo DDS se acopla con dos convertidores AD7846KP digital-analógicos de 16 bits para los voltajes generados por la computadora. Estos voltajes son configurados por software e introducidos por convertidores digital-analógicos. Cuando se usan estos convertidores la señal generada es una aproximación digital de su equivalente señal analógica. La calidad de la señal analógica generada depende de la resolución de los convertidores digitales-analógicos y de su velocidad.

Etapas de control.

La parte principal del sistema electrónico es la etapa que cumple las funciones de control. Esta etapa trata de mantener constante la tensión entre los electrodos de referencia y trabajo a pesar de las variaciones de la resistencia entre estos dos puntos. Esta tensión será igual a la

tensión de entrada (señal), que se irá incrementándose de acuerdo a la configuración del ensayo en el software de control.

El amplificador de control compara el voltaje medido de la celda con el voltaje deseado (Señal) e impulsa una corriente dentro de la celda para forzar los voltajes a ser iguales. Tan pronto como la corriente comienza a circular, ésta podría hacerlo también a través del electrodo de referencia polarizándose y evitando que se mantenga estable el potencial entre los puntos deseados. Esto se evita, gracias a uno de los parámetros más característicos de los amplificadores operacionales, que es su elevada impedancia de entrada y que tiene como resultado una corriente despreciable en la entrada no inversora de la etapa A1, figura 49. El voltaje medido va a la entrada inversora del amplificador de control, lo que implica que una perturbación positiva en el voltaje medido, generará una salida negativa del amplificador. Esta salida negativa contrarrestará la perturbación inicial.

Etapa de medición (A1).

El circuito del potenciómetro A1 mide la diferencia de voltaje entre el electrodo de referencia y el de trabajo. Su salida tiene dos principales funciones: la de realimentar el voltaje al circuito de control del potenciómetro y medir el voltaje de la celda cuando sea necesario. En el esquema esta etapa lo representa un amplificador diferencial con ganancia unitaria. El voltaje de salida de este circuito es la diferencia entre sus dos entradas.

Etapa convertidor corriente-voltaje I-V (A2).

El convertidor a corriente - voltaje (I/V) de la figura 39, mide la corriente de la celda. Este hace pasar el flujo de corriente de la celda a través de una resistencia conocida (R_m), permitiendo su transformación en un valor de voltaje amplificado que nos va permitir su medición y su representación gráfica. La caída de voltaje a través de la resistencia R_m es un dato para la medida de la corriente de la celda. Dependiendo de las características de la celda de electroanálisis (o corrosión), la corriente de la celda puede tener altas variaciones en magnitud, por ello el potenciómetro puede conmutar entre diferentes valores de resistencia R_m .

El amplificador utilizado tiene una impedancia de entrada muy elevada y una corriente de polarización muy baja, ya que esta última es parte de la corriente que polariza al electrodo y podría proporcionarnos medidas falsas. Asimismo, deberá ser capaz de soportar las corrientes que va a generar el amplificador de la etapa de control, cuando la resistencia de la disolución, se mueva por valores de unas pocas centenas de ohmios.

Bloques Voltaje y Corriente I_{R_m} .

Los bloques Voltaje y Corriente de la figura 39, son las señales de voltaje y corriente que serán enviados al sistema para su digitalización a través de un convertidor analógico – digital de 16 bits basado en el método de aproximaciones sucesivas. El método de aproximaciones sucesivas está basado en un convertidor DA que genera voltajes analógicos sucesivos, que va comparando con la tensión de entrada, el resultado de cada comparación se usa para

generar el próximo valor analógico, el cual se aproxima cada vez más a la tensión de salida. A continuación se muestra el diagrama de bloques de dicha estructura, figura 40:

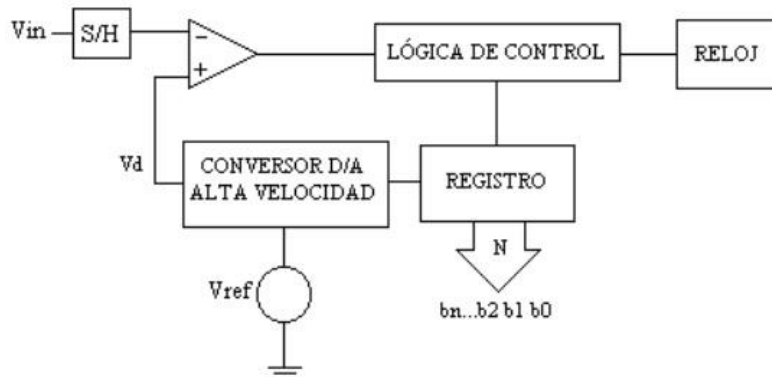


Figura 40. Convertidor de aproximaciones sucesivas.

El registro de aproximaciones sucesivas, también llamado SAR, genera la secuencia de valores digitales a partir de los cuales, el convertidor DA genera el valor analógico que se comparará con la tensión de entrada. En cada ciclo se realizará la conversión de un bit hasta llegar a la del bit N, después de la cual, el valor de salida del registro será el valor definitivo de la conversión. En las figuras 41 y 42 se puede apreciar los diagramas de flujo del algoritmo de aproximaciones sucesivas cuando se realiza una conversión bipolar y una unipolar.

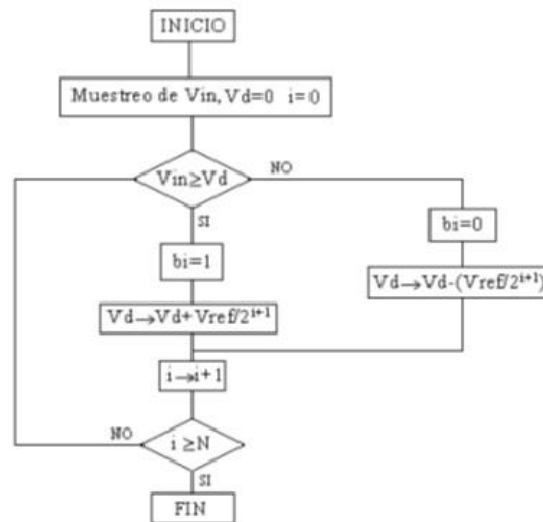


Figura 41. Diagrama de flujo del algoritmo de aproximaciones sucesivas bipolar

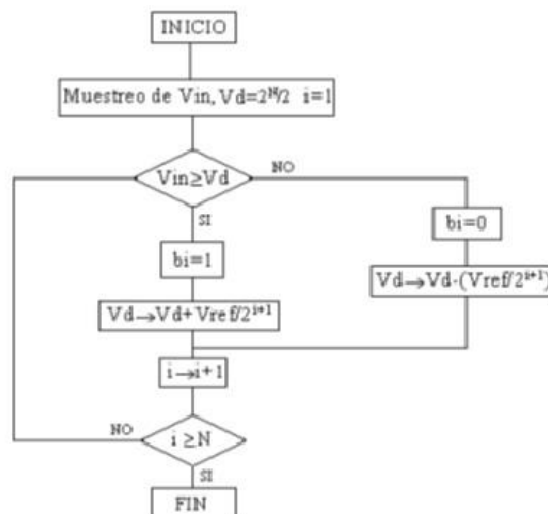


Figura 42. Diagrama de flujo del algoritmo de aproximaciones sucesivas unipolar.

Interfase PCI.

Un Peripheral Component Interconnect (PCI, "Interconexión de Componentes Periféricos") consiste en un bus de ordenador estándar para conectar dispositivos periféricos directamente a su placa base. El bus PCI permite la configuración dinámica de un dispositivo periférico, esto es que en el tiempo de arranque del sistema, las tarjetas PCI y el BIOS interactúan y negocian los recursos solicitados por la tarjeta PCI. Esto permite asignación de IRQs y direcciones del puerto por medio de un proceso dinámico. La versión original del bus PCI es de 32 bits de ancho y su velocidad de reloj es de 33 MHz, lo que en teoría permite un rendimiento de 132 Mb/s a 32 bits. En las arquitecturas de 64 bits, el bus funciona a 64 bits y su rendimiento teórico es de 264 Mb/s. El voltaje de operación de esta interfase es de 3.3 o 5 Volts.

La interacción del potencióstato con el software se realiza a través de la tarjeta PCI, ver figura 43. Esta interacción nos permite configurar al potencióstato, monitorear y registrar los datos del ensayo en archivos para procesarlos, realizar cálculos y generar gráficas de los valores controlados de sobretensión, aplicados entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo, versus la corriente que fluye entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar.

Sistema de instrumentación actual.

El equipo empleado para la realización de los ensayos electroquímicos es el PC14/300 (Gamry Instruments). Su generador de señales permite su uso para mediciones a frecuencias mayores de 300 kHz. El sistema del potencióstato está constituido por dos tarjetas electrónicas PCI. Una de ellas, figura 43, contiene los componentes asociados a las etapas de control, medición, inversor corriente – voltaje y control que constituyen al potencióstato.



Figura 43. Tarjeta del potencióstato

La segunda tarjeta, figura 44 contiene la interfase PCI, el generador de señales DDS y una fuente de poder aislada. La interfase PCI se comunica con las tarjetas por medio de líneas seriales de opto-acopladores.



Figura 44. Tarjeta de control para el potencióstato

Cada tarjeta contiene convertidores de CD/CD para suministrar los voltajes necesarios para su funcionamiento. Los voltajes y corrientes son tomados directamente de la fuente de la computadora y no de la interfase PCI. El rango de alimentación para las tarjetas del potencióstato es de $\pm 3\text{nA}$ a $\pm 300\text{mA}$ y $\pm 5\text{V}$ y $\pm 12\text{V}$.

El potencióstato se conecta a la celda de electroanálisis por medio de una sonda, figura 45, conectada a una conexión DB-9 cuya configuración se indica en la tabla 7.

Pin	Nombre	Color	Uso
1	Sensor de Electrodo de Trabajo (ST)	Azul	Conexión para estabilidad de la medición en el electrodo de trabajo
2	Malla de ST	s/c	Control de escudo para el ST
3	Electrodo de Trabajo (ET)	Verde	Es la entrada de la medición sobre la muestra de trabajo
4	Malla de ET	s/c	Control de escudo para el ET
5	Tierra	Negro	Tierra Flotante
6	Electrodo de Referencia (ER)	Blanco	Entrada del voltaje de referencia
7	Malla de ER	s/c	Control de escudo para el ER
8	Sensor de EA	Naranja	Entrada al seguidor de voltaje
9	Electrodo Auxiliar (AE)	Rojo	Salida del amplificador de control

Tabla 8. Configuración de la conexión DB-9 para la conexión de la celda al potencióstato.



Figura 45. Sonda para conexión .

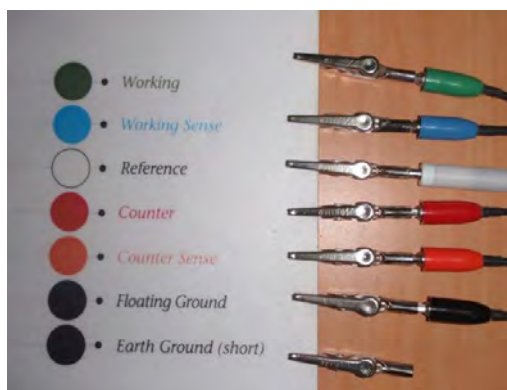


Figura 46. Sonda para la conexión de la celda de electroanálisis y colores de identificación.

Las características de funcionamiento del equipo están contenidas en la tabla 8. La figura 47 muestra la colocación de las tarjetas del potencióstato y la conexión de la sonda en la computadora.

Máxima Corriente	$\pm 300\text{mA}$	Convertidor Analógico Digital	16 bits
Rangos de lectura de Corriente	3nA-300mA	Datos por ensayo	262,143
Resolución Voltaje	de $1\mu\text{V}$	Máxima Amplitud CA	3600 mV rms
Resolución Corriente	de 1 fA	Mínima amplitud AC	55 μV rms
Potencial aplicado	$\pm 11\text{V}$	Rango Frecuencia	de 10 μHz – 300 kHz

Tabla 9. Características del equipo.

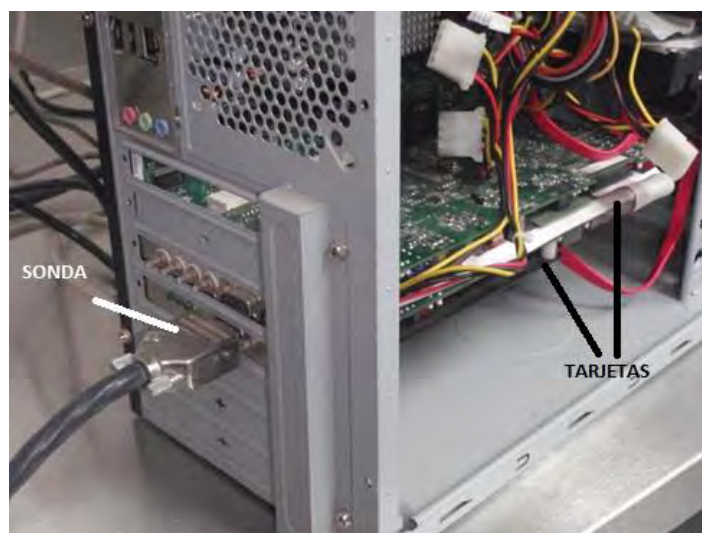


Figura 47. Tarjetas del potencióstato y conexión de sonda.

La instrumentación final de los ensayos para el análisis del sistema electroquímico o de corrosión se realiza como se muestra en la figura 48, donde se muestra al potencióstato y sus conexiones con la celda de electroanálisis.

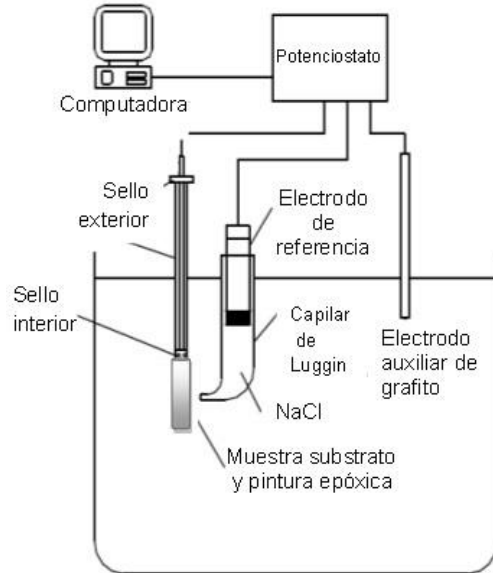


Figura 48. Instrumentación y conexiones para el electroanálisis.

El potenciostato es configurado y controlado en gran medida por una computadora mediante el software Gamry Framework el cual se describe a continuación:

Software de configuración y control de ensayos.

El software Gamry Framework versión 4.35, figura 49, permite configurar, operar y controlar las funciones del potenciostato. Este software nos permite realizar ensayos de los siguientes tipos: Open Circuit Potential, Cyclic Voltammetry, EIS (Impedance), Chrono Amperometry, Chrono Coulometry, Chrono Potentiometry, Pitting corrosion, Polarization Resistance, Potentiostatic Pause, Cyclic Voltammetry $E = f(i)$.

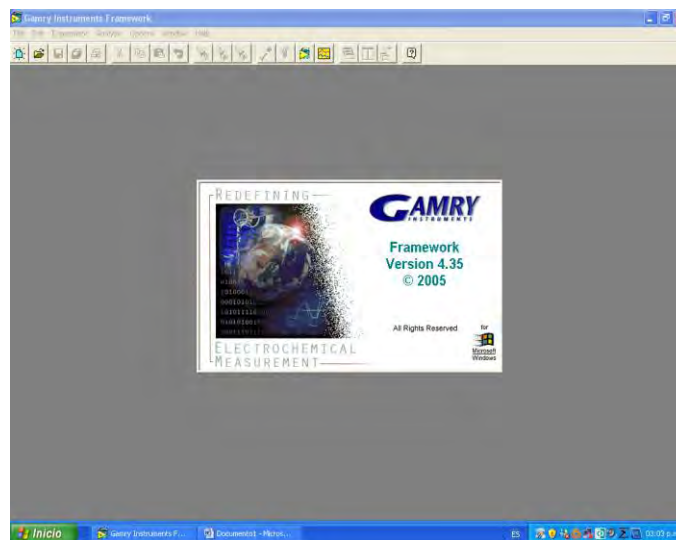


Figura 49. Software de control y configuración.

Este software se encarga de controlar el potenciostato bajo los parámetros de configuración (figura 50) y adquirir los datos medidos por éste para concentrarlos en una hoja de cálculo. Por otro lado permite visualizar los valores de las mediciones durante el ensayo, y provee de elementos básicos para el análisis de las mismas.

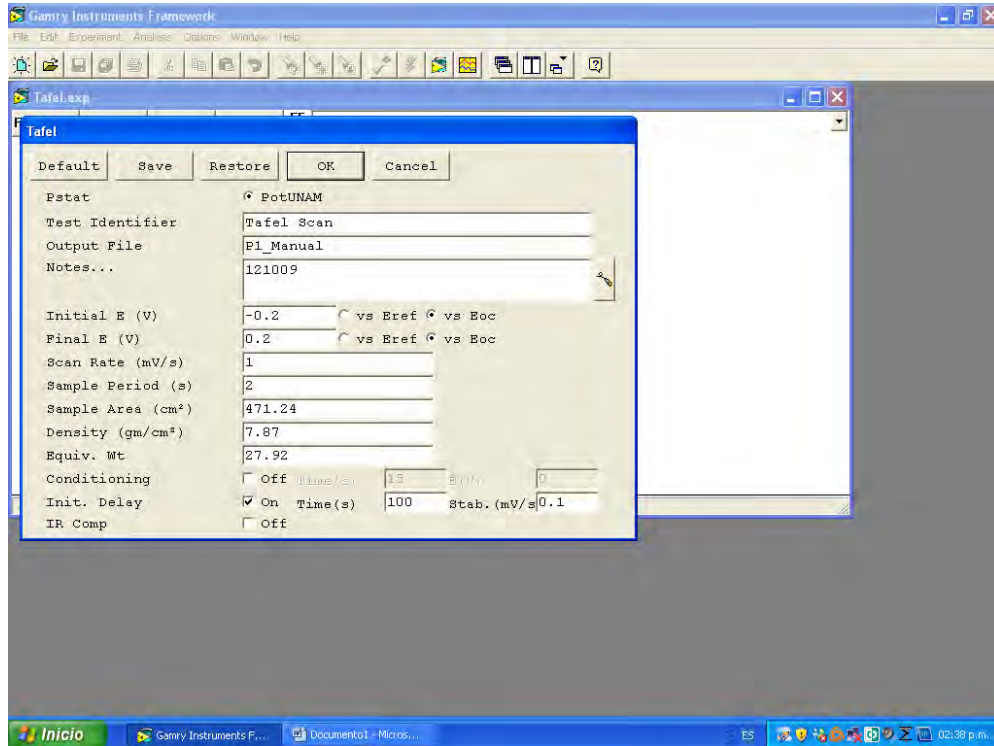


Figura 50. Configuración de parámetros del ensayo.

Los datos necesarios para la configuración, figura 50, son el potencial inicial, potencial final, ambos en unidades Volts. Estos valores son con respecto al potencial de circuito abierto de la celda de electroanálisis. La tasa de variación del potencial en mV/s , lo que nos indica la velocidad del incremento en el potencial. Periodo de muestreo en segundos. Área de la muestra en cm^2 , esto con la finalidad de calcular la densidad de corriente. La densidad en g/cm^3 y el peso equivalente. Estos últimos datos permiten realizar el cálculo de la velocidad de degradación del material como se hace en el siguiente ejemplo para el hierro:

A una densidad de corriente de $1A/cm^2$ se tiene (equivalente gramo del Fe= $27.8g$).

$$\begin{aligned} \frac{1A}{cm^2} &= \frac{1coulombio}{cm^2s} = \frac{1}{96500} = \frac{equiv. gr. de Fe}{cm^2s} = \frac{27.8}{96500} \frac{gr. de Fe}{cm^2s} \\ &= 2.88 \times 10^{-4} \frac{g}{cm^2s} = 2.49 \frac{kg}{dm^2dia} \end{aligned}$$

densidad del Fe = $7.86 g/cm^3$

$$\frac{1A}{cm^2} = \frac{27.8}{96500 \times 7.86} = 3.66 \times 10^{-5} \frac{cm \text{ de Fe}}{s} = \frac{31.7 mm}{dia}$$

Una forma muy común de expresar la velocidad de degradación es en milésima de pulgada por año, (*mpy*):

$$C.R. (cm/s) = \frac{i \cdot EW}{dfA}$$

$$C.R. (mpy) = \frac{0.13i_{CORR}EW}{d}$$

donde:

C.R.: Velocidad de degradación

i/A: Densidad de corriente = i_{CORR} [*mA/cm²*]

d: densidad del material [*g/cm³*]

EW: peso equivalente [*g*]

f: Un Faraday = 96 487 *Coulombs*

Métodos electroanalíticos.

Con el objeto de analizar la degradación de materiales y la cinética de este proceso en la interfase metal-solución, se realizan principalmente los ensayos de extrapolación de las pendientes de Tafel, Resistencia a la polarización e Impedancia Electroquímica. Sin embargo y dependiendo el objetivo del análisis es posible realizar otras técnicas de análisis.

El procedimiento inicial para la realización estos ensayos es el siguiente:

- a) Limpieza, desengrasado y aislamiento de la superficie a analizar de la muestra.
- b) Preparación de la solución de interés donde será inmersa la probeta.
- c) Limpieza de la celda electroquímica mediante agua destilada.
- d) Limpieza del electrodo auxiliar (grafito).
- e) Montaje de la muestra en la celda.
- f) Llenado de la celda con la solución corroborando que no quedaron burbujas en el Luggin.
- g) Conexión de los electrodos de la celda y posterior espera de una hora a que se establezca el potencial de corrosión, para realizar la variación del mismo mediante sistema de control y adquisición de datos.

Extrapolación de las pendientes de Tafel.

Los parámetros de experimentación, para los ensayos de extrapolación de las pendientes Tafel, se pueden fijar inicialmente en los siguientes valores:

- a) Barrido de potenciales de $\pm 150 mV$ respecto del potencial de corrosión,
- b) Velocidad de barrido de $1 mV/s$
- c) Periodo de muestreo de $2 seg.$
- d) Análisis de los datos mediante Echem Analysis.

Con base a los resultados obtenidos pueden ajustarse nuevamente los parámetros para correr el experimento bajo valores más convenientes ya que dependiendo del sistema o celda electroquímica de estudio, las zonas de trabajo pueden variar con tendencias más anódicas o catódicas.

Aquí se propone un procedimiento adicional para este ensayo:

1. Se realiza una gráfica de densidad de corriente vs. potencial en un gráfico semilogarítmico.
2. Se trazan las pendientes anódica y catódica de Tafel.
3. Se mide el valor de dicha pendiente.
4. Se observa el punto correspondiente a la intersección de la recta de Tafel y una recta horizontal a partir del potencial de corrosión, y se toma nota del valor de la densidad de corriente correspondiente a dicho punto.

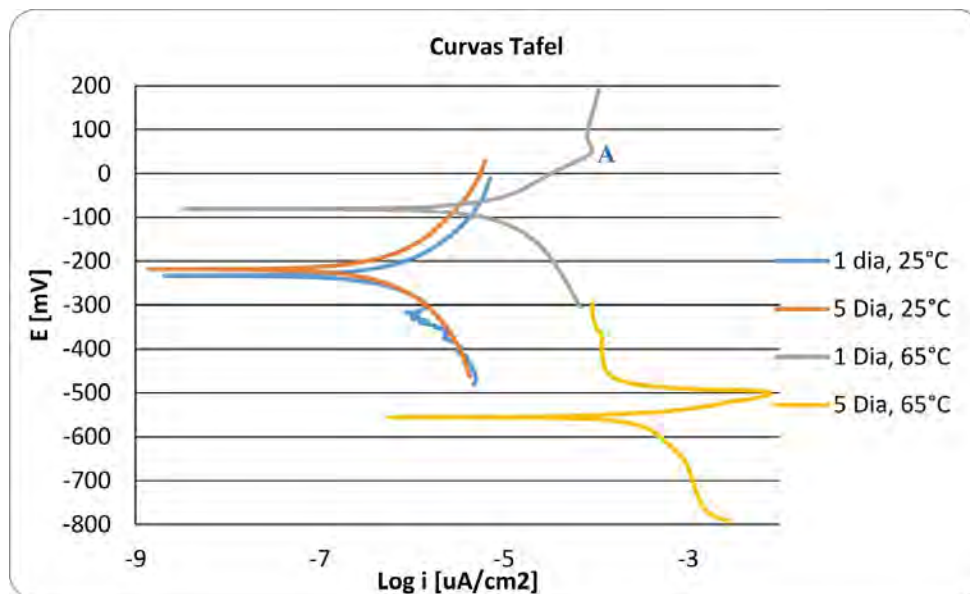


Figura 51. Pendientes de Tafel.

Método de la resistencia de polarización.

Los parámetros de experimentación, para los ensayos de resistencia a la polarización, se pueden fijar inicialmente en los siguientes valores:

- a) Barrido de potenciales de $\pm 150 \text{ mV}$ respecto del potencial de corrosión,
- b) Velocidad de barrido de $1 \text{ mV}/\text{s}$
- c) Periodo de muestreo de 2 seg .
- d) Análisis de los datos mediante Echem Analysis.

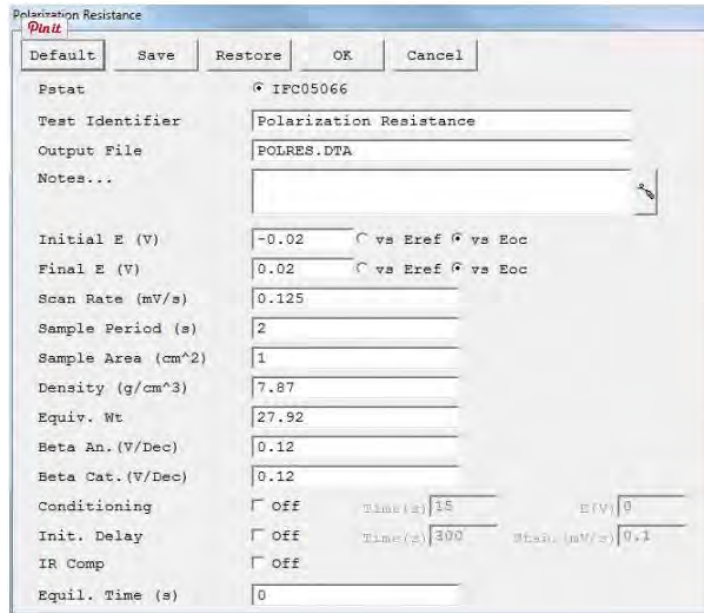


Figura 52. Configuración de datos del ensayo.

El procedimiento adicional para esta técnica:

1. Se realiza un gráfico de potencial vs. densidad de corriente.
2. Se realiza una regresión mediante un polinomio de grado seis de dicha curva (el grado seis es lo corresponde al mejor).
3. Se obtiene el valor de la resistencia de polarización de la fórmula del polinomio, como el coeficiente de grado 1.
4. Se calcula el valor de densidad de corriente dividiendo una Cte., de un valor de $B = 52 \text{ mV}$, respecto de la resistencia de polarización.

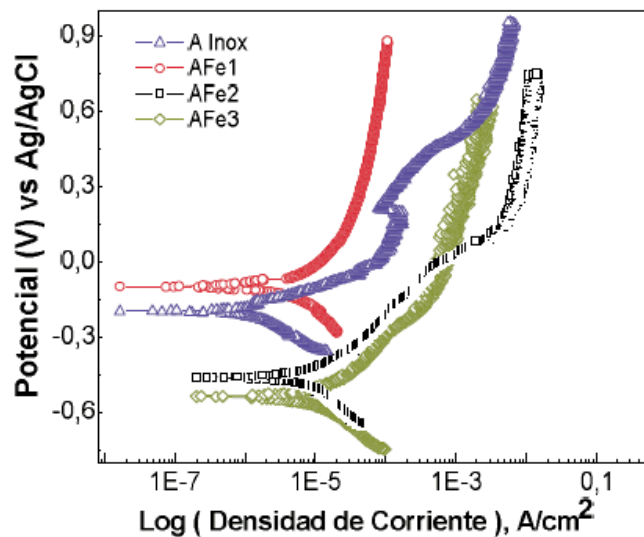


Figura 53. Resistencia a la polarización.

Método de la impedancia electroquímica.

Los parámetros de experimentación, para los ensayos de impedancia electroquímica, se pueden fijar en los siguientes valores:

- a) Potencial de la perturbación de 10 mV rms ,
- b) Frecuencia inicial de $100 \cdot 10^3\text{ Hz}$.
- c) Frecuencia final de $.01\text{ Hz}$.
- d) Puntos por década 10
- e) Análisis de los datos mediante Echem Analysis.

El procedimiento para la realización este experimento fue el siguiente:

1. Se realiza un gráfico de frecuencia vs. Impedancia (diagrama de Bode).
2. Se propone un modelo capacitivo - resistivo del sistema
3. Se obtiene las gráficas de impedancia real vs. Impedancia imaginaria (diagrama de Nyquist).
4. Se calcula el valor de la resistencia del sistema y su componente de resistencia por transferencia de carga.
5. Se calcula el valor capacitivo de la doble capa eléctrica.

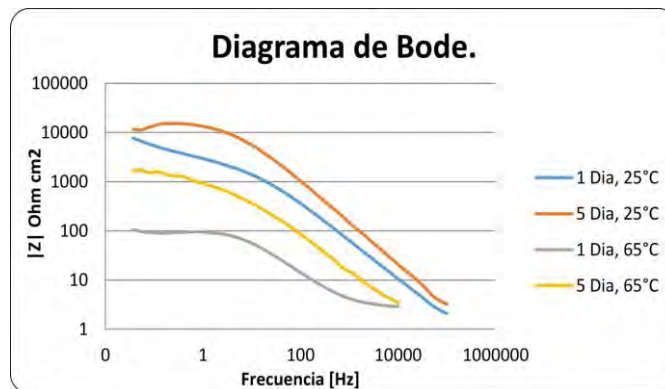


Figura 54. Análisis de Impedancia Electroquímica (Bode).

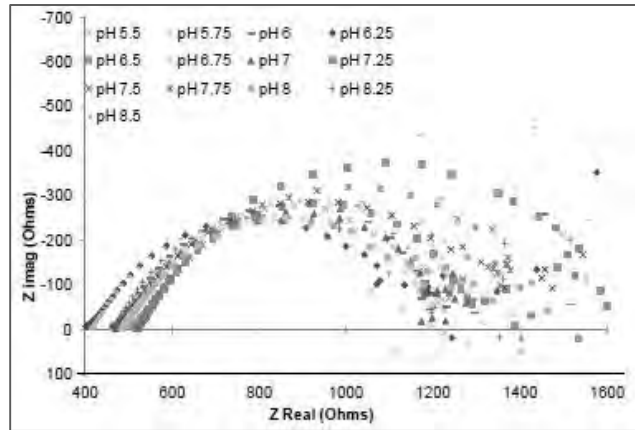


Figura 55. Análisis de Impedancia Electroquímica (Nyquist).

Para medir la adherencia la adherencia del recubrimiento metálico de aluminio se utilizó el medidor de adherencia POSITEST AT-M, que a continuación se describe.

3.6.-ADHERENCIA

La adherencia de un sistema de recubrimiento unicapa o multicapa de pintura, barniz o productos similares, se determina midiendo la mínima tensión o fuerza necesaria para desenganchar o romper el recubrimiento en dirección perpendicular al sustrato. Este método maximiza la fuerza en vez de emplear la velocidad, que aplican otros métodos tales como la adherencia al rayado, obteniendo resultados que no son comparativos. El ensayo se realiza pegando una sufridera perpendicularmente a la superficie del recubrimiento. Después que el pegamento se ha secado, el aparato de ensayo se fija y alinea en la sufridera, para aplicar una fuerza perpendicular a la superficie de ensayo. La fuerza aplicada se va incrementando gradualmente hasta que una parte del material se ha desenganchado o se ha alcanzado un valor de fuerza predeterminado. Para realizar la prueba de adherencia en el presente trabajo, se utilizó el medidor de adherencia por tracción de POSITEST AT-M que a continuación se describe:

MEDIDOR DE ADHERENCIA POR TRACCIÓN DE POSITEST AT- M

El medidor de adherencia manual portátil por tracción Positest mide la fuerza necesaria para realizar una tracción de prueba sobre un diámetro específico para separar un revestimiento de su sustrato con presión hidráulica. La presión se muestra en una pantalla LCD digital y representa la fuerza de adhesión del revestimiento a su sustrato. De acuerdo con las normas ASTM D4541, D7234, ISO 4624 y otras, el PosiTest evalúa la adhesión (fuerza de tracción) de un revestimiento determinando la mayor fuerza de tensión por tracción que puede soportar antes de separarse. Los puntos de fractura que se muestran en las superficies se suceden a lo largo del plano más débil del sistema formado por la dolly, las capas de revestimiento y el sustrato. Dolly – elemento metálico de geometría específica que se adhiere al recubrimiento con el fin de despegarla y medir el esfuerzo necesario para separar el recubrimiento del sustrato.



Figura 56. Dolly.

Principio de funcionamiento

El medidor de adherencia está conformado como lo describe la figura 57. La bomba hidráulica manual inyecta aceite mediante un pistón a un sensor de presión (transductor ó célula de carga) que se encuentra interconectado a un sistema electrónico digital; y al mismo tiempo inyecta aceite a un actuador que sujeta la dolly con la finalidad de retraerla figura 56. El display LCD indicara en psi ó Mpa de manera directa la presión ejercida y necesaria para hacer despegar la dolly del sustrato.



Figura 57. Medidor de adherencia

Un transductor de presión convierte la presión en una señal eléctrica analógica. Aunque hay varios tipos de transductores de presión, uno de los más comunes es el transductor extensométrico. La conversión de la presión en una señal eléctrica se consigue mediante la deformación física de los extensómetros que están unidos en el diafragma del transductor de presión figura 58 y cableados en una configuración de puente de Wheatstone. La presión aplicada al sensor produce una deflexión del diafragma, que introduce la deformación a los

medidores. La deformación producirá un cambio de resistencia eléctrica proporcional a la presión.

El principio de medida con sensores resistivos se basa en la medida de la variación de la resistencia inducida por la deformación en función de la presión. La resistencia de un conductor eléctrico está definida por la ecuación:

$$R = p * \frac{l}{A}$$

R= Resistencia eléctrica

p= Resistencia específica

l = Longitud

A= Superficie de sección

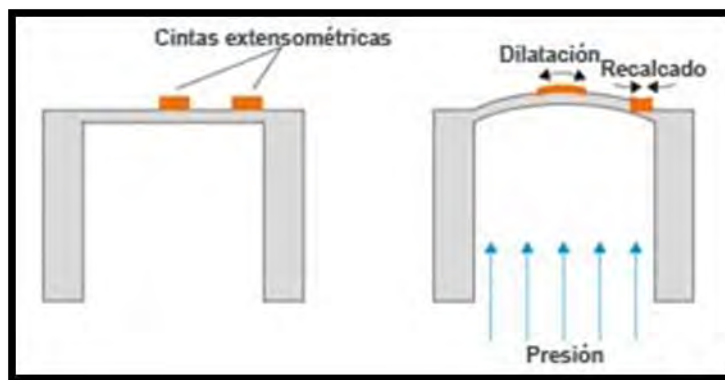


Figura 58. Diafragma de transductor de presión.

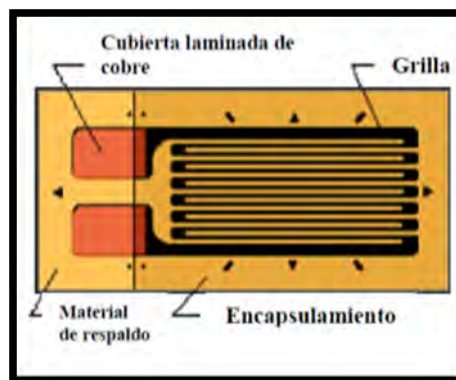


Figura 59. Cinta extensométrica.

Una tracción del conductor aumenta la longitud y reduce la superficie de sección con la consecuencia de un aumento de la resistencia eléctrica, ya que la resistencia específica se mantiene constante. Una deformación provocada por recalado tendría el efecto contrario. Para la realización del principio se utiliza un cuerpo base que se deforma de manera

controlado al someterle a presión. A menudo este cuerpo consiste en una membrana con una parte fina. El valor de la deformación en función de la presión se mide mediante una cinta extensométrica es decir conductores eléctricos metálicos tipo meandro.

Habitualmente se encuentran cuatro cintas extensométricas figura 59 en una membrana de las cuales unas están ubicadas en el área de dilatación, otras en el área del recalcado. La deformación de la membrana provoca la deformación de las cintas con el efecto de un aumento proporcional de la resistencia (dilatación) o de una reducción (recalcado). Para realizar una medición precisa se conecta las cintas a un puente Wheatstone.

Para medir la rugosidad de las probetas antes de ser recubiertas se utilizó el medidor de rugosidad Mitutoyo SJ-301 que se describe a continuación.

3.7. RUGOSIDAD

La mayor o menor rugosidad de una superficie depende de su acabado superficial. Éste, permite definir la microgeometría de las superficies para hacerlas válidas para la función para la que hayan sido realizadas. Es un proceso que, en general, habrá que realizar para corregir los errores de forma y las ondulaciones que pudiesen presentar las distintas superficies durante su proceso de fabricación (fundición, forja, laminación, etc.).

En el Sistema Internacional la unidad de rugosidad es el micrómetro o micra ($1 \text{ micra} = 1 \mu\text{m} = 0,000001 \text{ m} = 0,001 \text{ mm}$), mientras que en el sistema anglosajón se utiliza la micropulgada (μ''). Esta medida se indica en los planos constructivos de las piezas mediante signos y valores numéricos, de acuerdo a las normas de calidad existentes, que varían entre países. Para medir la rugosidad de las piezas se utilizan instrumentos electrónicos llamados rugosímetros, que miden la profundidad de la rugosidad media (Rz) y el valor de la rugosidad media (Ra) expresada en micras y muestran la lectura de la medida en una pantalla o en un documento gráfico.

Para realizar la prueba de rugosidad en el presente trabajo, se utilizó el medidor de rugosidad Mitutoyo SJ-301 que es un instrumento de medición de la textura superficial por medio de la técnica de aguja, la cual cruza las crestas y valles que forman el perfil de la superficie (Figura 60). El movimiento vertical de la aguja se transforma en señales eléctricas por medio de un transductor, las señales eléctricas de salida pueden ser analizadas por medio de técnicas analógicas o digitales. En este equipo como en la mayoría de los medidores de rugosidad la señal de salida se somete a una conversión analógica-digital para su análisis y almacenamiento subsecuente.

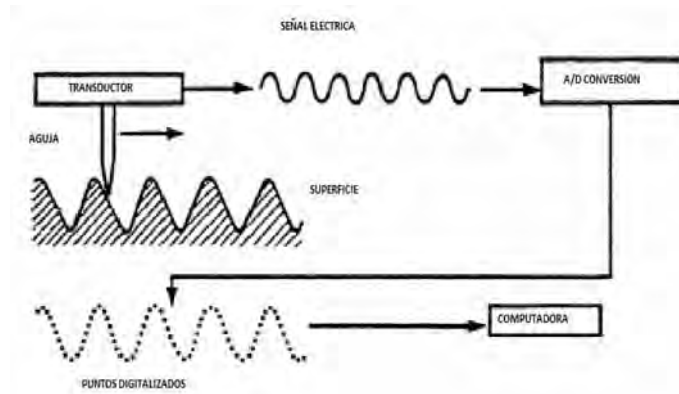


Figura 60. Diagrama esquemático de un medidor de rugosidad.

La Figura 61 muestra un diagrama del transductor de aguja llamado de inductancia variable basado en un sensor inductivo de desplazamiento LVDT (de las siglas en inglés Linear Variable Differential Transformer). Donde la aguja se sujeta a un núcleo de ferrita el cual se posiciona entre dos bobinas y cuyo movimiento cambia el balance del puente de medición.

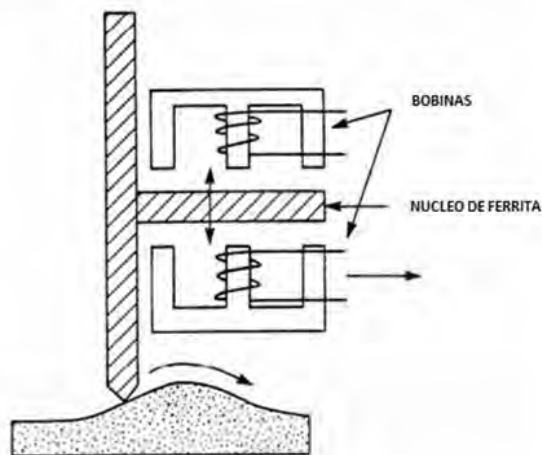


Figura 61. Transductor de inductancia variable.

En este sensor el movimiento vertical de la aguja produce un cambio en la reluctancia de balance, es decir que se produce un aumento en la reluctancia de una bobina mientras se disminuye la reluctancia de la otra. Lo que cambia la fase y la fuerza electromotriz inducida en las bobinas secundarias. Las fems inducidas en las bobinas secundarias son opuestas por lo que cuando el núcleo está en su posición neutra o central las fems serán iguales y el voltaje de salida es igual a cero. Para el análisis matemático los voltajes inducidos en las bobinas secundarias son dependientes de la inductancia mutua entre la bobina primaria y cada una de las bobinas secundarias. Asumiendo que no existe un acoplamiento cruzado entre los secundarios los voltajes inducidos pueden escribirse como:

$$v_1 = M_1 s i_p \quad \text{y} \quad v_2 = M_2 s i_p$$

Donde M_1 y M_2 son las inductancias mutuas entre las bobinas primaria y una secundaria en una posición del núcleo fija; s es el operador de Laplace e i_p es la corriente en el primario.

Para el cálculo del desplazamiento se tiene:

$$\text{Desplazamiento} = G * (v_1 - v_2)$$

Donde G es la ganancia o sensibilidad del sensor.

En condiciones normales la respuesta de este sensor toma la forma de la Figura 62 para un desplazamiento desde un extremo a otro. Cuando el núcleo está en su posición central, el voltaje no pasa por cero, sino por un mínimo. Esto se debe a la presencia de capacidades parásitas entre primario y secundario, así mismo a la falta de simetría de los bobinados y circuitos magnéticos.

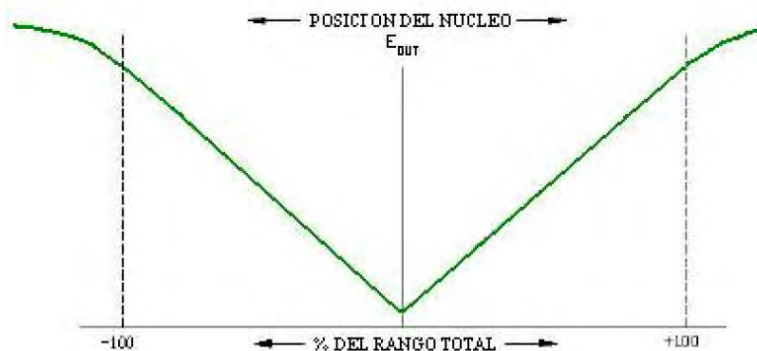


Figura 62. Voltaje de salida del sensor.

Para asegurar que el recubrimiento adquiriera la mejor adherencia en las probetas, se realizó la prueba de rugosidad a estas utilizando un Rugosímetro Mitutoyo Sj-301, el cual se describe a continuación

Operación del Medidor de Rugosidad Mitutoyo Sj-301

La unidad principal del rugosímetro SJ-301 se compone una impresora, una pantalla táctil de 5.7 in y un teclado para las funciones principales. Ver Figura 63.



Figura 63. Funciones principales.

La unidad principal registra los resultados proporcionados por el dispositivo lector que realiza el desplazamiento lineal del sensor o lector de rugosidad estándar.



Figura 64. Unidad principal.

Para iniciar el uso del equipo se debe conectar la fuente de alimentación (parte posterior del equipo) y la unidad lectora (lateral derecho) en los puntos que se indican en las Figuras 65 y 66.



Figura 65. Parte posterior de la unidad principal.



Figura 66. Lateral derecha de la unidad principal.

OPERACIÓN PARA LA MEDICIÓN

1. Conecte la fuente de alimentación.
2. Empleando el cable de conexión (Figura 67) acople la unidad principal y el módulo de lectura.
3. Encienda el equipo con el botón on/off. Véase figura 66.
4. Si es necesario modifique las condiciones de medición.
5. Realice la calibración del equipo.
6. Ejecute la medición de rugosidad mediante el teclado principal.
7. Lectura de los resultados de la medición en pantalla. Véase figura 68.
8. Impresión de resultados. Con la tecla PRINT (figura 69, 70 y 71).

Los pasos 4 y 5 no son necesarios realizar regularmente. El uso habitual se realiza siguiendo el resto de los pasos.



Figura 67. Cable de conexión.



Figura 68. Resultados de la lectura de rugosidad.

Teclado de funciones principales

El teclado de la unidad principal permite realizar funciones de manera directa como se describe a continuación:

START/STOP: Con este botón se inicia o detiene la medición.

DATA: Permite almacenar la adquisición de datos o su lectura de una conexión SPC (*Statistical Process Control*) o tarjeta de memoria.

CONDITION READ: Permite seleccionar configuraciones personalizadas.

FEED: Recorre el papel de la impresora.

PRINT: Permite la impresión de los resultados.



Figura 69. Teclado de la unidad principal.

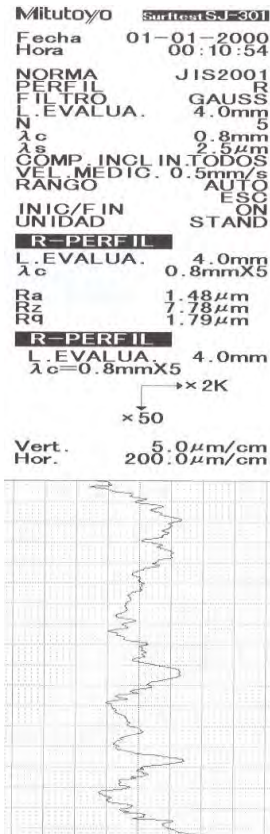


Figura 70. Muestra de una impresión de resultados.

Calibración

El proceso de calibración involucra la medición de una pieza de trabajo de referencia, esto es un espécimen con una rugosidad de precisión conocida (figura 71). Si después de realizar la lectura se encuentra con una diferencia entre el valor medido y el valor de referencia se procede a realizar un ajuste de ganancia del equipo. Este ajuste lo realiza el equipo de forma automática.



Figura 71. Espécimen de calibración.

La calibración es indispensable si el equipo será usado por primera vez, si el lector se reemplaza o se vuelve a montar. Cuando la frecuencia de uso es intensa se recomienda la calibración de forma periódica. Si el equipo no es calibrado en alguno de los casos anteriores podría obtener lecturas incorrectas.

Procedimiento para la calibración.

1. Coloque el espécimen en una superficie plana.
2. Monte el accesorio para anivelar la unidad lectora (ver Figura 72).



Figura 72. Accesorio de nivelación.

3. Acople la unidad lectora con el espécimen de referencia, cuidando que el desplazamiento del lector sea en la dirección perpendicular de las marcas del espécimen. Figura 73.
4. Verifique y corrija la altura de la unidad lectora para tener una posición paralela con la horizontal de la superficie de trabajo. Figura 73.

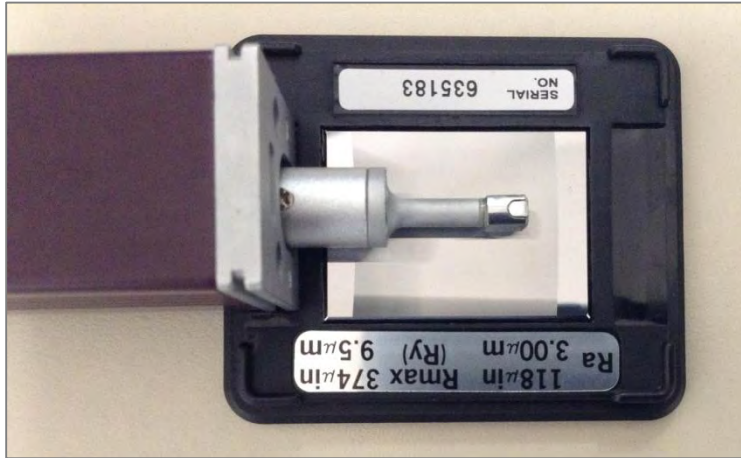


Figura 73. Acoplamiento de la unidad lectora.



Figura 74. Vista frontal del detector.

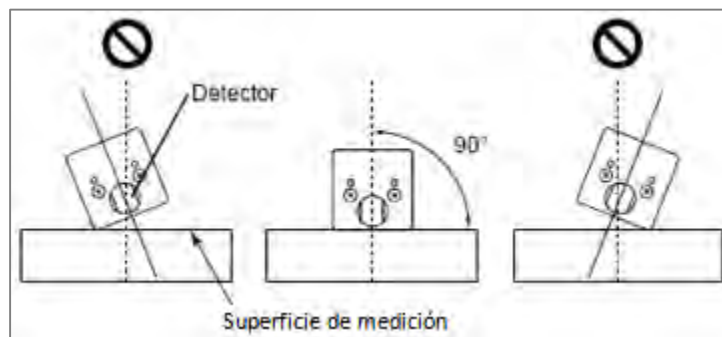


Figura 75. Vista lateral del detector.

Figura 75. Posiciones correctas e incorrectas para la calibración.

5. Verifique que los valores de calibración sean los proporcionados por el fabricante. Compárelos con la tabla 1:

Puntos de configuración para la condición de calibración	Valor de default
Parámetro	Ra
Longitud límite	2.5mm(.1")
Número de longitudes de muestreo	5
Rango de medición	Auto
Perfil/filtro medido	R-perfil/Pc50
Longitud de pre/post trayecto	ON

Tabla 10. Valores de calibración.

6. Presione el botón de CAL en la pantalla inicial: Figura 76.

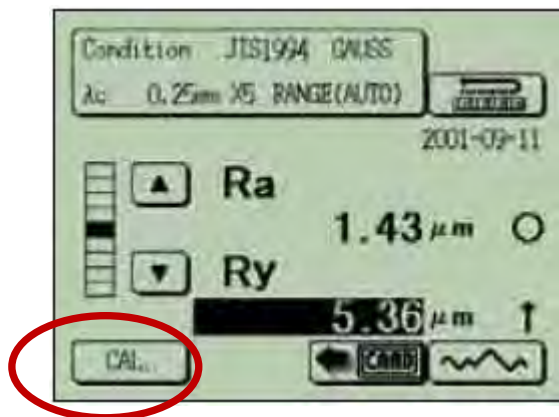


Figura 76. Pantalla inicial.

7. Ajuste el valor de la referencia si este fuera diferente al que muestra la pantalla.
8. Presione en el teclado el botón START.
9. El equipo se auto ajusta si encontrara diferencias entre el valor medido y el de referencia.
10. Para salir de la calibración oprima el botón <enter> ↵. Figura 77.

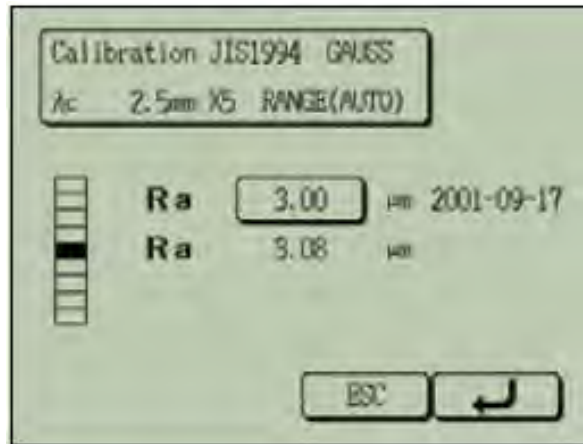


Figura 77. Pantalla del resultado de la calibración.

Para realizar la prueba de medición de espesores se utilizó el aparato positector 6000 que a continuación se describe.

3.8.-ESPESORES

Esta prueba nos permite determinar el espesor de materiales, en este caso el espesor del recubrimiento sobre la probeta de acero, para realizar esto se utilizó el aparato positector 6000 que mide espesores automáticamente registrando el espesor en la pantalla.

Medidor De Espesores Positector 6000 Fn1



PosiTector 6000 FN1

Figura 78. Medidor de espesores POSITECTOR 6000 FN1.

<p>VISTA LATERAL</p>	ALCANCE:	0 - 1500 μm 0 - 60 mils
	EXACTITUD:	$\pm (0.05 \text{ mils} + 1\%)$ 0 - 2 mils $\pm (0.1 \text{ mils} + 1\%)$ > 2 mils $\pm (1 \mu\text{m} + 1\%)$ 0 - 50 μm $\pm (2 \mu\text{m} + 1\%)$ > 50 μm
Las precisiones se indican como un valor fijo más un porcentaje de los medidores de lectura real		

Figura 79. Especificaciones del medidor de espesores POSITECTOR 6000 FN1.

El espesor de un recubrimiento es a menudo crítico para su rendimiento. Para la mayoría de los recubrimientos no ferrosos sobre el acero, el método magnético es fiable para medir el espesor de recubrimiento de forma no destructiva y es adecuado para las pruebas de especificación de aceptación y aplicaciones SPC / SQC. Este método de ensayo no debe ser utilizado para determinar el espesor de los recubrimientos de níquel electrodepositadas sobre el acero. Método de ensayo B530 es adecuado para esa determinación.

Este método de ensayo cubre el uso de instrumentos magnéticos para la medición no destructiva del espesor de los recubrimientos no magnéticos más metales de base magnética ferrosos u otros. Se tiene la intención de complementar las instrucciones del fabricante para el funcionamiento de los instrumentos y no pretende reemplazarlos.

Estos instrumentos miden ya sea la atracción magnética entre un imán y el metal base, como influenciada por la presencia del recubrimiento (clasificada como "magnética pull-off"), o el cambio en la densidad de flujo magnético dentro de la sonda. Estos instrumentos no pueden distinguir el espesor de las capas individuales. Sólo pueden medir el espesor acumulado de todas las capas por debajo de la sonda hasta el metal base. Las mediciones realizadas de acuerdo con este método de prueba estarán en el cumplimiento de los requisitos de la Norma Internacional ISO 2178 como impresa en 1982. Los valores indicados en unidades SI deben ser considerados como el estándar. Los valores entre paréntesis son sólo para información. Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer apropiada.

Una vez que se revisó la teoría de las pruebas a realizar y el funcionamiento de los equipos utilizados en el presente trabajo, se elaboraron las probetas, se realizaron las respectivas pruebas y se obtuvieron los resultados tal como se describe en el siguiente capítulo de este trabajo.

4.- EXPERIMENTACION

4.1.-PREPARACION DE LAS PROBETAS

Para iniciar el experimento se realizaron las probetas de acuerdo a la norma ASTM E81, que describe los métodos de ensayo para determinar la resistencia en el límite elástico, alargamiento al límite elástico, resistencia a la tracción, alargamiento y reducción del área de productos de metal. Se aplica a materiales metálicos en cualquier forma, incluyendo: hoja, placa, alambre, varilla, barra, tubería y tubo. Para cada uno de estos tipos de muestras, la norma define convenientes geometrías y dimensiones, que requieren soluciones específicas de agarre que son esenciales para realizar un ensayo con éxito. Los tipos más comunes de muestras son rectangulares y redondos. En este trabajo se propuso analizar dos tipos de solera una 1018 trabajada en frío y otra solera 1010 trabajada en caliente.

Se cortaron 24 probetas, de las cuales 12 fueron de solera rolada en caliente y 12 fueron de solera rolada en frío, con la finalidad de aplicarles los tratamientos planteados en el diseño del experimento. Se recubrieron 6 probetas de acero 1018 rolado en frío y 6 probetas de acero 1010 rolado en caliente. Para la primera prueba se eligieron 6 probetas de cada tipo de solera ya mencionadas, para utilizarlas como testigos y aplicarles las pruebas de corrosión (Tafel), y tensión.

Para la segunda prueba, se eligieron otras 6 probetas de cada solera ya mencionadas, estas probetas se limpiaron con un proceso llamado sand blast que se encarga de limpiar la superficie por medio de piedritas (arena) que se inyecta por una pistola a presión para que la arena se impacte sobre la superficie y la limpie.

Después de este proceso se aplicó la prueba de rugosidad para determinar el perfil de anclaje, posteriormente a cada probeta se le aplicó un recubrimiento de aluminio por medio de una pistola para metalización, una vez recubiertas se les aplicó las pruebas de corrosión (Tafel), y tensión.

Posteriormente a las probetas 1010 y 1018 recubiertas se les aplicó la prueba de adherencia y la prueba de espesores. Con el fin de que los resultados experimentales sean adecuados, es necesario trabajar conforme a un diseño experimental. El análisis de la varianza parte de los conceptos de regresión lineal. Un análisis de la varianza permite determinar si diferentes tratamientos muestran diferencias significativas o por el contrario puede suponerse que sus medias poblacionales no difieren.

A continuación describiremos la elaboración de estas probetas:

Se comenzó por investigar las medidas de las probetas de acuerdo a la norma ASTM E8 para realizar las pruebas.

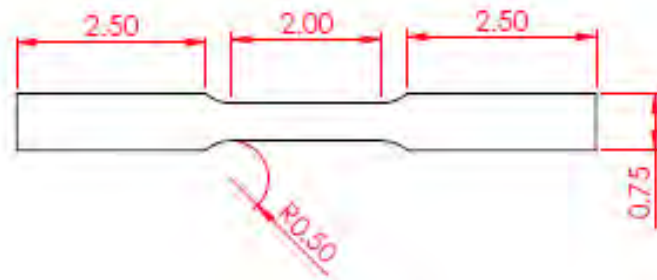


Figura 80. Probeta 1010 rolada en caliente.

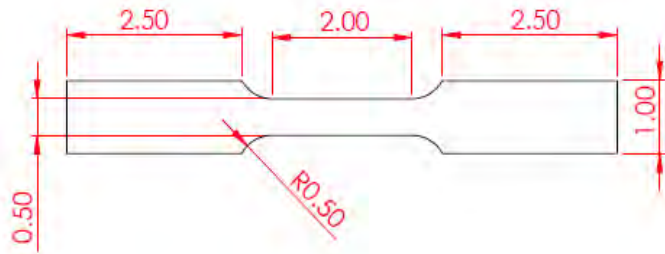


Figura 81. Probeta 1018 rolada en frio.

Después se propuso investigar dos tipos de solera, una trabajada en frio y otra trabajada en caliente para determinar la diferencia que tienen en su resistencia y obtener su módulo de elasticidad, o determinar si no hay variación entre ellas, se maquinaron de esta forma las probetas para que no exista concentración de esfuerzos.



Figura 82. Soleras utilizadas para las probetas.

- 1.- solera de acero 1018 rolada en frio de 1 In por 1/8 In.
- 2.- solera de acero 1010 rolada en caliente de 3/4 In por 1/8 In.

Después de cada tipo de solera cortamos con segueta como se muestra en la figura 83, 12 tramos para realizar las probetas a las cuales se les aplicaron las pruebas de tensión y de corrosión para conocer su comportamiento inicial.



Figura 83. Corte del material.

Posteriormente se maquinaron las probetas como se muestra en la figura.84, en una fresadora universal instalada en el laboratorio CAT de la UNAM y utilizamos un cortador vertical de acero alta velocidad de 1/2" de cuatro gavilanes para dar la forma deseada.



Figura 84. Fresadora universal.

Para comenzar a maquinar primero tuvimos que administrar refrigerante como se muestra en la figura 85, a la fresadora para poder enfriar el material al ir realizando el maquinado de la probeta.



Figura 85. Administración de refrigerante a la fresadora universal.

Se colocaron los tramos de solera para maquinar las probetas en la fresadora universal como se muestra en la figura 86.



Figura 86. Posición de las probetas para maquinar.

En el primer maquinado que se realizó a la probeta tuvo la forma como se indica en la figura 87.



Figura 87. Posición de la probeta para el primer maquinado.

La forma que adquirieron las probetas 1018 roladas en frío en el primer maquinado se muestra en la figura 88.



Figura 88. Probetas 1018 maquinadas.

La forma que tomaron las probetas 1010 roladas en caliente en el primer maquinado se muestra en la figura.89.



Figura 89. Probetas 1010 maquinadas.

Se realizó el segundo maquinado de las probetas en la fresadora universal, que fue el redondeo, se le dio este acabado par que no exista concentración de esfuerzos a la hora de aplicar la prueba de tensión , se maquina como se muestra en la figura 90.



Figura 90. Posición de las probetas para maquinado de redondeo.

La forma de las probetas que describe la norma ASTM E8 se muestra en la figura 91.





Figura 91. Forma de las probetas según la norma ASTM E8.

Para dejar la superficie más lisa donde se realizó el maquinado de las probetas se realizó un limado sobre el tornillo de banco del CAT como se muestra en la figura 92.



Figura 92. Limado de las probetas.

Posteriormente se realizó un cepillado a las probetas para retirar las rebabas que tenían las probetas después de ser limadas como se muestra en la figura 93.



Figura 93. Cepillado de las probetas.

Las probetas maquinadas se limpiaron con gasolina blanca para retirar un poco de óxido que presentaban y un poco de grasa, se limpiaron como se muestra en la figura 94.



Figura 94. Aplicación de gasolina blanca a las probetas.

Las probetas se limpiaron con un proceso llamado sand blast que se encarga de limpiar la superficie por medio de piedritas (arena) que se inyecta por una pistola a presión para que la arena se impacte sobre la superficie y la limpie.

A 12 probetas de cada solera se les aplico sand blast con arena de óxido de aluminio de malla 30 para retirar el óxido que presentaban y para dejar un buen perfil de anclaje para posteriormente recubrirlas con aluminio, se ocupó la máquina de sand blast del laboratorio CAT. Figura 95.



Figura 95. Máquina de sand blast.

Las probetas 1018 rodadas en frío una vez aplicado el sand blast quedaron como se muestra en la figura 96.

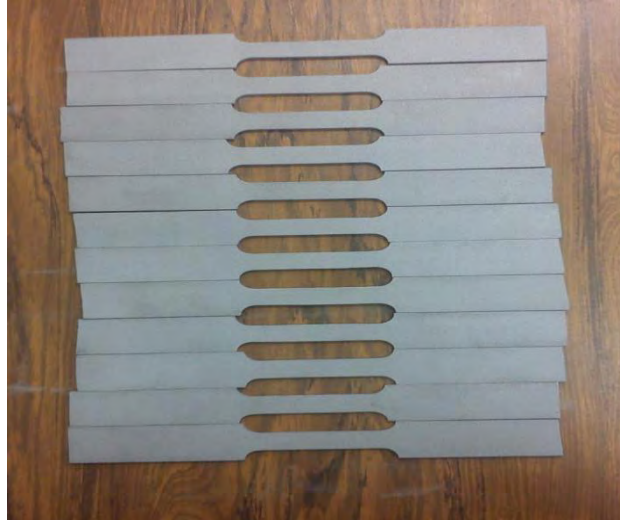


Figura 96. Probetas 1018 sand blasteadas.

Las probetas 1010 rodadas en caliente ya sand blasteadas quedaron como se muestra en la figura 97.



Figura 97. Probetas 1010 sand blasteadas.

Después de este proceso se aplicó la prueba de rugosidad para determinar el perfil de anclaje; con la finalidad de obtener una buena adherencia del recubrimiento.

4.2. PRUEBA DE RUGOSIDAD

En esta prueba se utilizaron 2 probetas 1010 roladas en caliente y 2 probetas 1018 roladas en frío sand blasteadas para determinar la rugosidad de las probetas y observar el perfil de anclaje que tiene cada tipo de probeta para aplicar el recubrimiento metálico, la prueba se realizó como se muestra en la figura 98.



Figura 98. Rugosímetro MITUTOYO.

La prueba se realizó colocando cada una de las probetas en una superficie plana para que la aguja del rugosímetro casi rosara la superficie de la probeta y así poder obtener una lectura correcta.

4.3.-RECUBRIMIENTO METALICO

Para realizar la prueba de recubrimiento metálico se utilizó la pistola Flamespray MK 61 para metalización que se encuentra en el laboratorio CAT, que funciona con gas, oxígeno y aire a presión y se utilizó alambre de aluminio a recubrir las probetas. La máquina que se utilizó se muestra en la figura 99.



Figura 99. Pistola para metalización METALLISATION.

Para realizar el recubrimiento metálico se precalentó la probeta para lograr un buen recubrimiento y no se despegara del material, se realizó como se muestra en la figura 100.



Figura 100. Precalentamiento de la probeta.

El recubrimiento metálico de aluminio que se aplicó a las probetas, se aplicó en forma vertical, como se muestra en la figura 101.



Figura 101. Aplicación del recubrimiento de aluminio.

4.4.-PRUEBA DE ESPESORES

En esta prueba se utilizó un aparato positector 6000 para medir el espesor del recubrimiento metálico (figura.102) en la probeta y determinar que tanto protege el recubrimiento metálico a la probeta de la corrosión.



Figura 102. Medidor digital para medir recubrimientos sobre superficies ferrosas (F) y no-ferrosa POSITECTOR 6000.

La medida de espesores del recubrimiento metálico en la probeta se realizó con ayuda del aparato positector 6000 como se muestra en la figura 103.



Figura 103. Medición de espesores con POSITECTOR 6000.

4.5.-PRUEBA DE TENSIÓN

La prueba de tensión de las probetas 1010 roladas en caliente y las 1018 roladas en frío se realizó mediante la norma ASTM E8 y se utilizó la máquina que se muestra en la figura 104, del laboratorio CAT de la UNAM. Con la maquina universal INSTRON 600DX descrita en la parte anterior.



Figura 104. Máquina de tensión INSTRON 600DX.

Para comenzar la prueba primero se calibro la máquina y se fueron registrando las medidas de cada probeta antes de cada prueba, para realizar la prueba las probetas se colocaron en la maquina como se muestra en la figura 105.



Figura 105. Colocación de las probetas en la máquina de tensión.

Al término de la prueba las probetas se tronaron y quedaron como se muestra en la figura 106.



Figura 106. Probetas tronadas.

4.6.-PRUEBA DE CORROSION

La prueba de corrosión se realizó mediante las normas NORMA D1193-06 Especificación estándar para el Reactivo Agua, NORMA D1654-05 Método de prueba estándar para evaluación de las muestras pintadas o revestidas, NORMA G3-89 Práctica estándar para Convenios aplicables a electroquímicos, Mediciones de Corrosión, NORMA G5-94 Norma de referencia, Método de prueba potenciostática y potenciodinámicas anódicas, Polarización y Mediciones, y se le aplico a las probetas 1010 y 1018, primero se les aplico la prueba a las probetas no recubiertas y tronadas, se les aplico la prueba de corrosión en l cola de la probeta y en la parte de la fractura para observar los cambios, la prueba se realizó como se muestra en la figura 107.

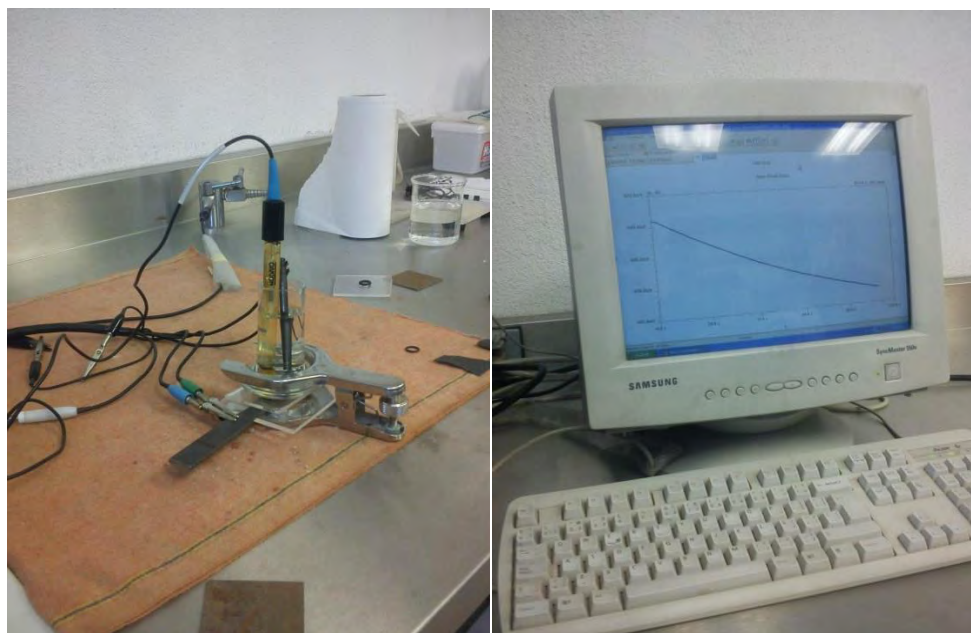


Figura 107. Aplicación de la prueba de corrosión tafel.

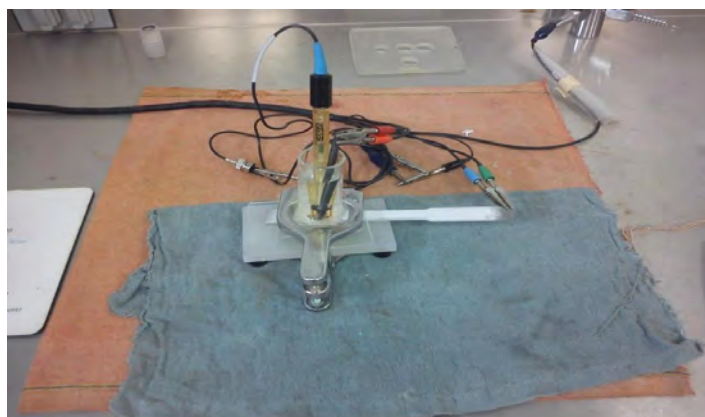


Figura 108. Aplicación de la prueba de corrosión tafel.

La prueba se realizó con el equipo Gamrry que se encuentra en el laboratorio del CAT de la UNAM, como se observa en la figura 108 se utilizaron varios caimanes que son necesarios para realizar la prueba como son electrodo de trabajo, electrodo contador, caimanes para tierra y un calomel que va sumergido en el electrolito, una vez conectado todo, en la computadora se asigna un tiempo aproximado para que la corriente se estabilice y así realizar la prueba de corrosión. La solución que se utilizó fue agua con sal, se utilizó 200 ml de agua destilada del laboratorio CAT figura 109, y 6.8 gr de sal para obtener el electrolito.



Figura 109. Extracción de agua destilada.

La sal se pesó con la balanza SAUTER del laboratorio CAT como se muestra en la figura 110.



Figura 110. Balanza SAUTER.

4.7.-PRUEBA DE ADHERENCIA

La prueba de adherencia se realizó mediante la norma NORMA D4541-02 Método de prueba estándar para Resistencia de Recubrimientos Pull-Off Usando Adhesión portátil y se utilizó la máquina de adherencia que se encuentra en el laboratorio CAT, que se muestra en la figura 111.



Figura 111. Máquina de adherencia POSITEST AT-M.

Para pegar los peones sobre las probetas recubiertas se utilizó el pegamento que se muestra en la figura 112.



Figura 112. RESISTOL pegamento epoxico.

Los peones se colocaron sobre las probetas como se muestra en la figura 113, para poder retirarlos con la máquina y obtener el valor de adherencia del recubrimiento metálico sobre las probetas.



Figura 113. Colocación de los peones sobre las probetas.

Para retirar los peones de las probetas recubiertas, primero se le retiro el exceso de pegamento, para que se apoyara la máquina (figura.114), poder retirar fácil los peones y obtener una lectura correcta.

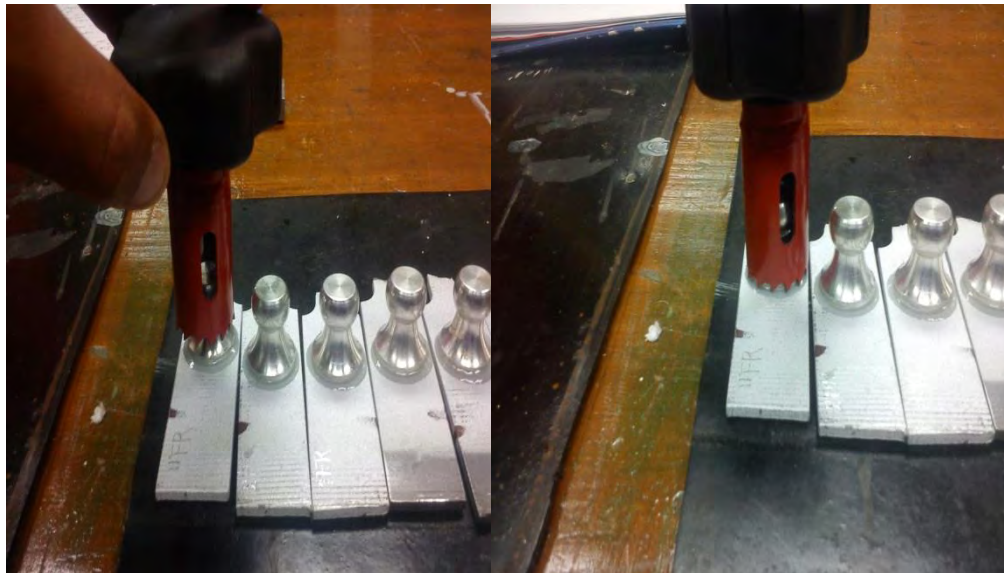


Figura 114. Retirando exceso de pegamento.

5.-ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.1.-ENSAYO DE TENSION.

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de tensión, se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación de cada una de las probetas utilizadas de los dos tipos de acero. Con estas curvas en la máquina de tensión INSTRON 600DX, se determinó el módulo de Young y la carga máxima de cada probeta.

5.1.1.-MODULO DE YOUNG.

Con el valor del módulo de Young calculado para cada una de las probetas, se realizó el análisis de varianza correspondiente a un diseño factorial 2x2, completamente al azar, detectando efectos significativos de tratamiento y material sobre el módulo de Young. En el análisis de varianza se puede observar que existen efectos significativos del material sobre el Modulo de Young ($P < 0.05$). También en el ANOVA para los recubrimientos no se detectaron diferencias significativas ($P > 0.05$). Se encontró que no existe interacción entre los factores

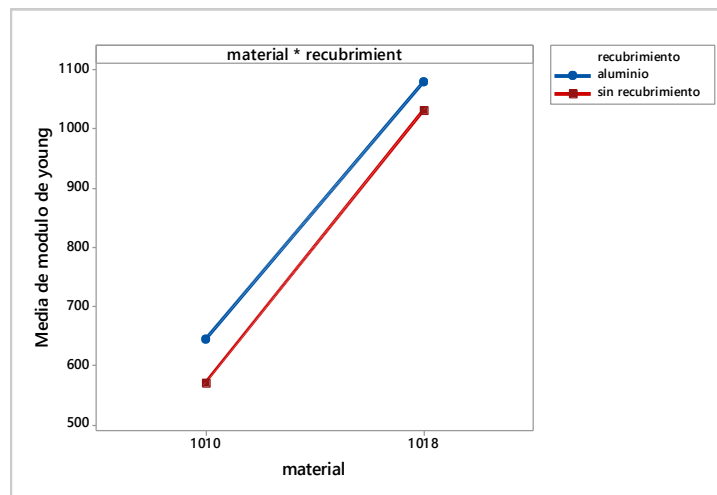


Figura 115. Gráfica de interacción para el módulo de Young.

En la figura 115 se puede observar que el acero 1018 con recubrimiento y sin recubrimiento presentan los valores más altos para el Modulo de Young, con respecto al acero 1010, esto se debe a que el acero 1018 presenta mayor cantidad carbono. Con mayor contenido de carbono los materiales aumentan sus propiedades mecánicas.

Con respecto al recubrimiento de aluminio, se puede ver que para los dos aceros el recubrimiento presenta valores más altos, eso se debe que este recubrimiento mejoró las propiedades mecánicas de los aceros; ya que o debido a que con un tratamiento térmico un acero aumenta sus propiedades mecánicas.

Una de las finalidades de este trabajo es demostrar que el recubrimiento de aluminio mejoraba las características del material y en particular mejorar los valores del módulo de

Young, lo cual se cumple para los dos materiales; ya que con el recubrimiento de aluminio en los dos materiales el módulo de Young es más alto que sin recubrimiento,

Se obtuvo que el acero 1018 presentó un mayor valor respecto al módulo de Young que el acero 1010, ya que este acero cuenta con una mayor cantidad de carbono.

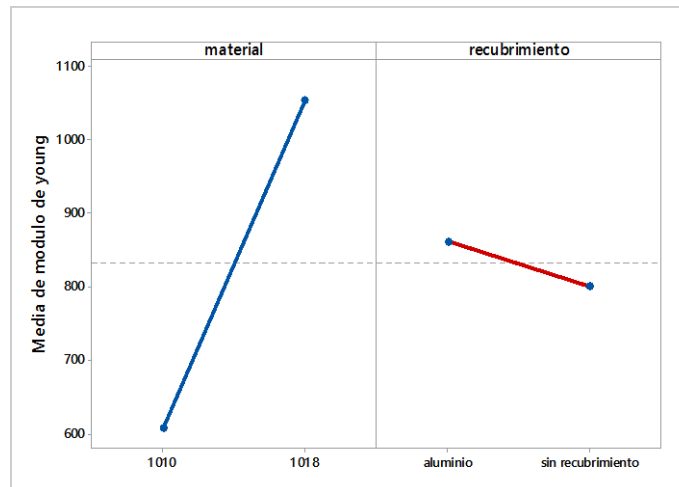


Figura 116. Gráfica de efectos principales del módulo de Young.

En la gráfica de medias de la figura 116, el valor más alto para el módulo de Young lo presenta el acero 1018, y el acero 1010 presenta un módulo de Young menor. Para el recubrimiento se observa que con el aluminio se tiene un módulo de Young superior al material sin recubrimiento, el material por sí solo presenta menor módulo de Young que si se le aplica un recubrimiento de aluminio. Porque al aplicar un recubrimiento metálico primero se debe precalentar la probeta y allí ya se está aplicando un tratamiento térmico que es lo que hace que la probeta presente un módulo de Young mayor.

5.1.2.-CARGA MÁXIMA.

Con el valor de la carga máxima calculada para cada una de las probetas, se realizó el análisis de varianza correspondiente a un diseño factorial 2x2, completamente al azar, detectando efectos significativos de tratamiento y material sobre la carga máxima. En el análisis de varianza se puede observar que existen efectos significativos del material sobre la carga máxima ($P < 0.05$). También se detectaron que para los recubrimientos no se detectaron diferencias significativas ($P > 0.05$). Se encontró que no existe interacción entre los factores.

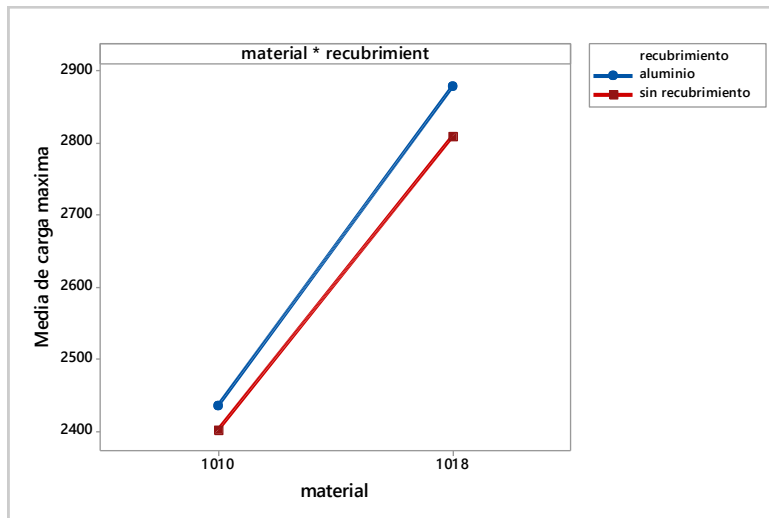


Figura 117. Gráfica de interacción para la carga máxima.

Esta gráfica nos muestra que si se cambia de material, es decir se cambia de un acero 1010 a un acero 1018 la carga máxima aumenta significativamente, también dependiendo como se protege el material puede aumentar su carga máxima.

También se puede observar que con el recubrimiento de aluminio se logra una mayor carga, tanto para el acero 1010 como para el acero 1018, se nota que el recubrimiento si ayuda mucho al material con respecto a la carga máxima. Porque al aplicar el recubrimiento se le a la probeta primero se precalienta y eso hace que haya un tratamiento térmico, y se sabe que los tratamientos térmicos aumentan las propiedades mecánicas es por eso que la probeta con el recubrimiento soporta una mayor carga que sin recubrimiento.

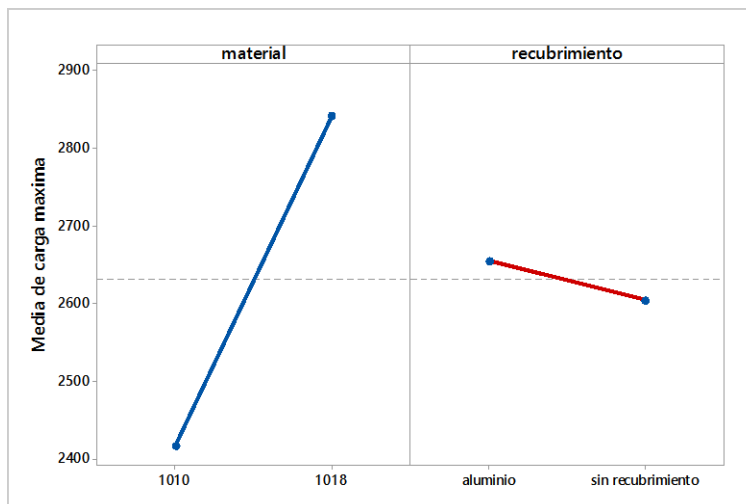


Figura 118. Gráfica de efectos principales de la carga máxima.

La carga mayor la presenta el acero 1018 tal como se muestra en la figura 118, y el acero 1010 presento una carga menor. Para el recubrimiento se observa que el aluminio tiene una carga superior al material sin recubrimiento, aquí se nota la influencia que tiene un recubrimiento de aluminio sobre un material. También tiene mucha importancia la cantidad de carbono en un acero ya que hace que el acero aumente sus propiedades mecánicas.

5.2.-PRUEBA DE CORROSION.

1) CORROSION EN EL PUNTO A (cola de la probeta)

Con el valor de la velocidad de corrosión A calculada para cada una de las probetas, se realizó el análisis de varianza correspondiente a un diseño factorial 2x2, completamente al azar, detectando efectos significativos de tratamiento y material sobre la velocidad de corrosión A. En el análisis de varianza se puede observar que existen efectos significativos del material sobre la velocidad de corrosión A ($P < 0.05$). También en el ANOVA se determina que para los recubrimientos se detectaron diferencias significativas ($P < 0.05$). Además existe una interacción entre el material y el recubrimiento.

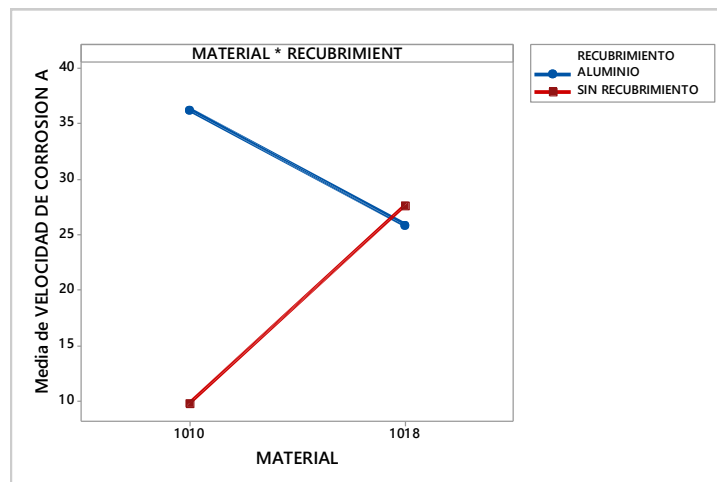


Figura 119. Grafica de interacción para velocidad de corrosión A.

En la figura 119 se puede observar que con un recubrimiento de aluminio en un acero 1010 la velocidad de corrosión en el punto A (cola de la probeta) es mayor que la velocidad de corrosión en un acero 1010 sin recubrimiento de aluminio. En esta gráfica se ve la interacción que existe entre el material y el recubrimiento para los dos tipos de acero.

También se puede observar que en un acero 1010 sin recubrir la velocidad de corrosión es menor que la velocidad de corrosión de un acero 1018 sin recubrir, lo mismo ocurre con el material 1010 y 1018 recubierto. También se observa que un acero 1010 con recubrimiento de aluminio presenta mayor velocidad de corrosión en el punto A que un acero 1018 recubierto de aluminio. Estas diferencias en las velocidades de corrosión se deben a que el aluminio se corroe más rápidamente que el acero en las probetas recubiertas y por esa razón las velocidades de corrosión son mayores que sin recubrimiento.

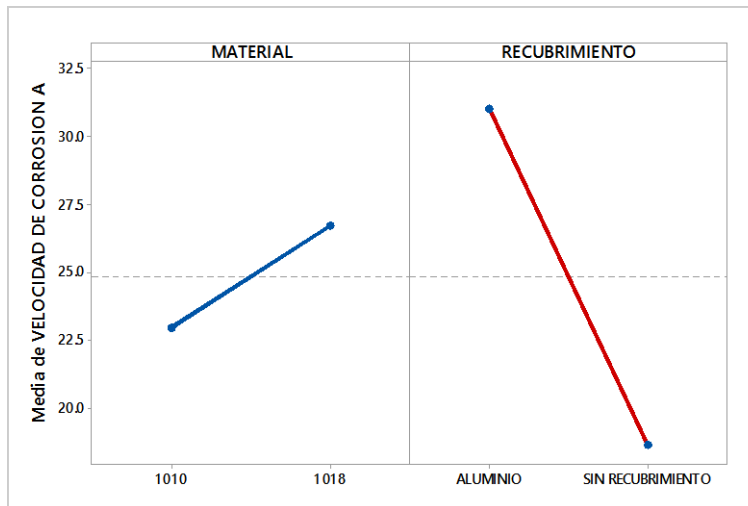


Figura 120. Grafica de efectos principales para velocidad de corrosión A.

En la figura 120 se observa que si se cambia de un acero 1010 a un acero 1018 la velocidad de corrosión aumenta notablemente, aquí vemos que el material que menos se corroe es el acero 1010 y como se explicó en el párrafo anterior las probetas sin recubrimiento presenta una menor velocidad e corrosión.

También se observa que con un recubrimiento de aluminio la velocidad de corrosión es mucho mayor que la velocidad de corrosión de un material sin recubrir; esto se debe a que el aluminio se corroe más rápidamente que el acero, debido a que este se encuentra por arriba del hierro en el potencial eléctrico.

2. CORROSION EN EL PUNTO B (punto de fractura)

Con el valor de la velocidad de corrosión B para cada una de las probetas, se realizó el análisis de varianza correspondiente a un diseño factorial 2x2, completamente al azar, detectando efectos significativos de tratamiento y material sobre la velocidad de corrosión en el punto de fractura llamado punto B. En el análisis de varianza se determinó que existen efectos significativos del material sobre la velocidad de corrosión B ($P < 0.05$). También en la tabla de ANOVA para los recubrimientos se detectaron diferencias significativas ($P < 0.05$). Además se encontró que no existe interacción entre el material y el recubrimiento.

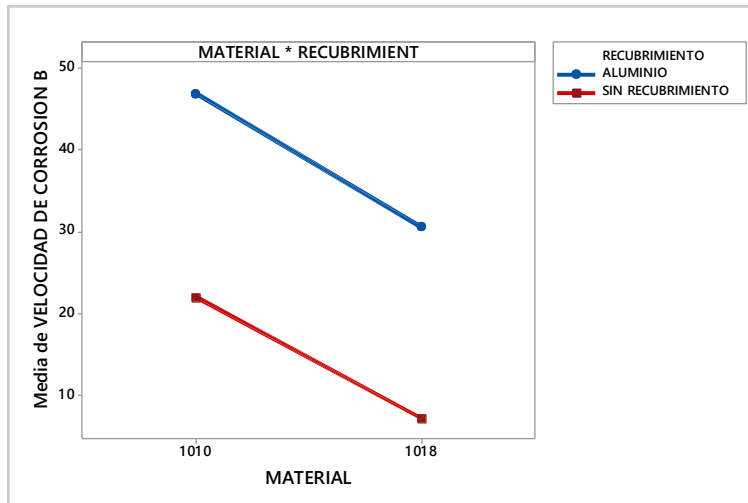


Figura 121. Grafica de interacción para velocidad de corrosión B.

En la figura 121 observamos que la velocidad de corrosión de un acero 1010 recubierto de aluminio es mayor que la velocidad de corrosión de un acero 1018 recubierto de aluminio. Además se denota por las líneas paralelas que no existe interacción entre el material y el recubrimiento.

También se observa que la velocidad de corrosión de un acero 1010 sin recubrir es mayor que la velocidad de corrosión de un acero 1018 sin recubrir y que la velocidad de corrosión del material recubierto es mayor que la del material sin recubrir. Esto se debe a que, al oxidarse, se produce óxido de aluminio, y este se deposita en toda la parte en forma de una capa microscópica. Este óxido es transparente, a diferencia del óxido de hierro que es color rojizo o marrón, por lo cual pareciera que el aluminio nunca se oxida.

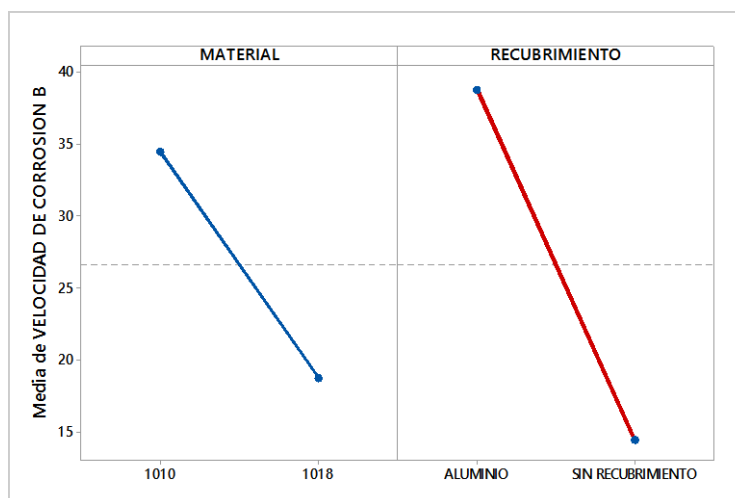


Figura 122. Grafica de efectos principales para velocidad de corrosión B.

La figura 122 nos muestra que la velocidad de corrosión de un acero 1010 es mucho mayor que la velocidad de corrosión de un acero 1018 en el punto de fractura. También se observa que la velocidad de corrosión de un metal recubierto de aluminio es mucho mayor que la velocidad de corrosión de un metal sin recubrir. Esto es porque el proceso de oxidación en el aluminio es rapidísimo, y sucede al momento que el aluminio entra en contacto con el oxígeno en el aire, completando la capa de óxido transparente en segundos. Así que, lo correcto es decir, el aluminio siempre está cubierto de óxido, y no el aluminio no se oxida.

5.3.-PRUEBA DE RUGOSIDAD.

Al realizar la prueba de rugosidad los resultados obtenidos nos muestran que las probetas de acero 1010 rolado en caliente presentan mayor rugosidad que las probetas 1018 roladas en frío, debido a que los procesos en frío son utilizados para obtener productos con una mejor calidad superficial y excelentes tolerancias dimensionales, por lo cual las probetas 1010 presentan un mejor perfil de anclaje lo que hace que tengan una mejor adherencia del recubrimiento de aluminio con respecto al acero 1018 que tiene mayor cantidad de carbono y presenta una mayor dureza. La figura 123 nos muestra los resultados de la prueba de rugosidad para el acero 1010 y la figura 124 para el acero 1018.

010 1CB

Mitutoyo Surftest SJ-301

Fecha 01-01-2000
Hora 00:43:04

NORMA JIS2001
PERFIL R
FILTRO GAUSS
L.EVALUA. 4.0mm
N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
COMP. INCL IN.TODOS
VEL.MEDIC. 0.5mm/s
RANGO AUTO
INIC/FIN ON
UNIDAD STAND

R-PERFIL

L.EVALUA. 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ra 4.17 μ m
Rz 27.13 μ m
Rq 5.32 μ m

R-PERFIL

L.EVALUA. 4.0mm
 $\lambda_c=0.8mmX5$

$\times 500$

$\times 50$

Vert. 20.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm



1010 2CB

Mitutoyo Surftest SJ-301

Fecha 01-01-2000
Hora 00:40:51

NORMA JIS2001
PERFIL R
FILTRO GAUSS
L.EVALUA. 4.0mm
N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
COMP. INCL IN.TODOS
VEL.MEDIC. 0.5mm/s
RANGO AUTO
INIC/FIN ON
UNIDAD STAND

R-PERFIL

L.EVALUA. 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ra 3.85 μ m
Rz 23.97 μ m
Rq 4.81 μ m

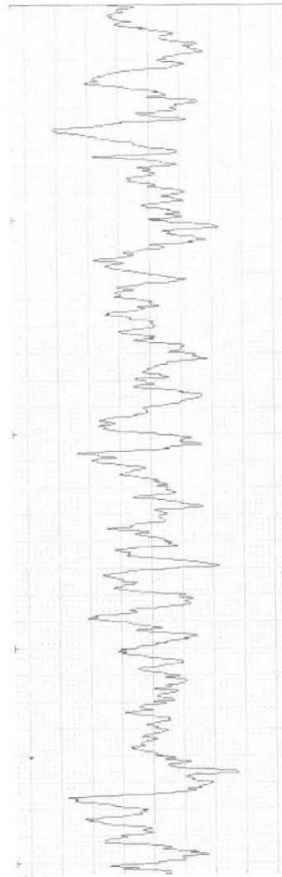
R-PERFIL

L.EVALUA. 4.0mm
 $\lambda_c=0.8mmX5$

$\times 1K$

$\times 50$

Vert. 10.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm



1010 3CB

Mitutoyo Surftest SJ-301

Fecha 01-01-2000
Hora 00:45:05

NORMA JIS2001
PERFIL R
FILTRO GAUSS
L.EVALUA. 4.0mm
N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
COMP. INCL IN.TODOS
VEL.MEDIC. 0.5mm/s
RANGO AUTO
INIC/FIN ON
UNIDAD STAND

R-PERFIL

L.EVALUA. 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ra 4.82 μ m
Rz 27.43 μ m
Rq 5.92 μ m

R-PERFIL

L.EVALUA. 4.0mm
 $\lambda_c=0.8mmX5$

$\times 1K$

$\times 50$

Vert. 10.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm

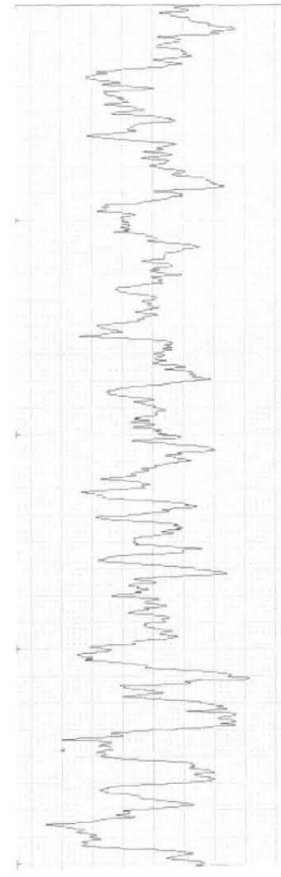
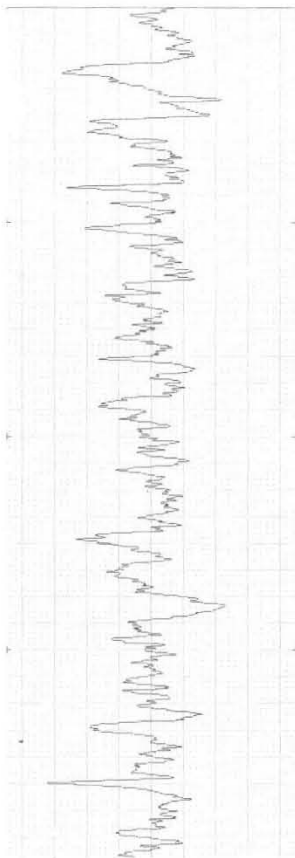


Figura 123. Graficas de rugosidad de las probetas 1010 roladas en caliente.

1018 4FB

Mitutoyo **SurftestSJ-301**
 Fecha 01-01-2000
 Hora 00:31:14
 NORMA JIS2001
 PERFIL R
 FILTRO GAUSS
 L.EVALUA. 4.0mm
 N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
 COMP. INCL IN.TODOS
 VEL.MEDIC. 0.5mm/s
 RANGO AUTO
 INIC/FIN ON
 UNIDAD STAND
R-PERFIL
 L.EVALUA. 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5
 Ra 3.19 μ m
 Rz 21.16 μ m
 Rq 4.04 μ m
R-PERFIL
 L.EVALUA. 4.0mm
 $\lambda_c=0.8mmX5$

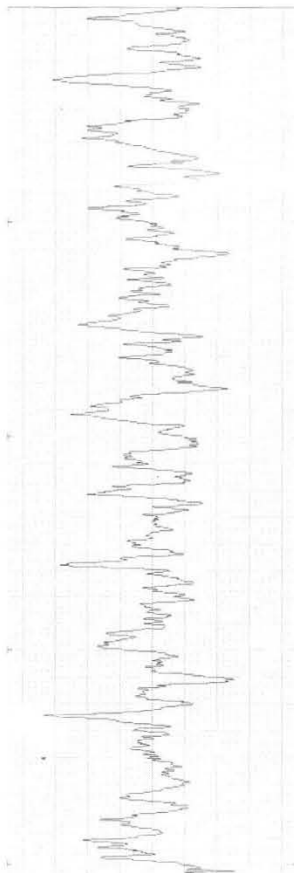
$\times 1K$
 $\times 50$
 Vert. 10.0 μ m/cm
 Hor. 200.0 μ m/cm



1018 5FB

Mitutoyo **SurftestSJ-301**
 Fecha 01-01-2000
 Hora 00:34:42
 NORMA JIS2001
 PERFIL R
 FILTRO GAUSS
 L.EVALUA. 4.0mm
 N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
 COMP. INCL IN.TODOS
 VEL.MEDIC. 0.5mm/s
 RANGO AUTO
 INIC/FIN ON
 UNIDAD STAND
R-PERFIL
 L.EVALUA. 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5
 Ra 3.80 μ m
 Rz 25.84 μ m
 Rq 4.75 μ m
R-PERFIL
 L.EVALUA. 4.0mm
 $\lambda_c=0.8mmX5$

$\times 1K$
 $\times 50$
 Vert. 10.0 μ m/cm
 Hor. 200.0 μ m/cm



1018 6FB

Mitutoyo **SurftestSJ-301**
 Fecha 01-01-2000
 Hora 00:37:07
 NORMA JIS2001
 PERFIL R
 FILTRO GAUSS
 L.EVALUA. 4.0mm
 N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
 COMP. INCL IN.TODOS
 VEL.MEDIC. 0.5mm/s
 RANGO AUTO
 INIC/FIN ON
 UNIDAD STAND
R-PERFIL
 L.EVALUA. 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5
 Ra 3.66 μ m
 Rz 23.52 μ m
 Rq 4.60 μ m
R-PERFIL
 L.EVALUA. 4.0mm
 $\lambda_c=0.8mmX5$

$\times 1K$
 $\times 50$
 Vert. 10.0 μ m/cm
 Hor. 200.0 μ m/cm

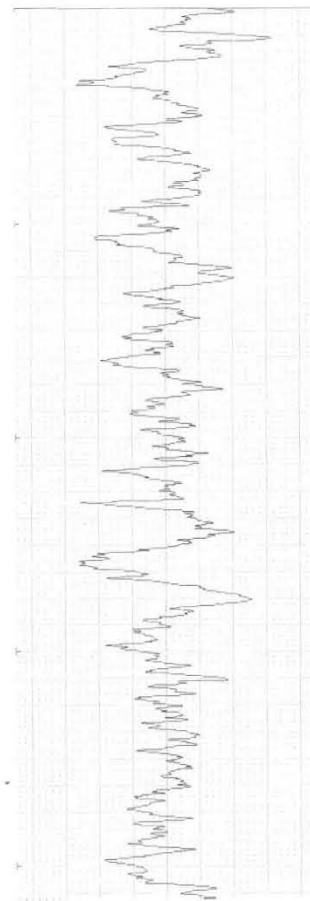


Figura 124. Graficas de rugosidad de las probetas 1018 roladas en frio.

5.4.-PRUEBA DE ADHERENCIA.

Se obtuvieron los valores de 6 probetas recubiertas de aluminio para acero 1010 y 6 para el acero 1018 con la máquina de adherencia descrita anteriormente.

El promedio y la desviación estándar de las 6 probetas de acero 1018 recubiertas de aluminio se muestran en la tabla 11.

PROBETAS	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN
FR	117.8	35.9	30.47%

Tabla11. Datos obtenidos de la prueba de adherencia de las probetas 1018.

El promedio y la desviación estándar de las 6 probetas de acero 1010 recubiertas de aluminio se muestran en la tabla 12.

PROBETAS	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN
CR	135.3	63.5	46.93%

Tabla12. Datos obtenidos de la prueba de adherencia de las probetas 1010.

Se observa en las tablas 11 y 12 de la prueba de adherencia, que las probetas de acero 1010 recubiertas de aluminio presentan mayor adherencia del recubrimiento de aluminio que las probetas de acero 1018 recubiertas, pero a su vez las probetas de acero 1010 presentan una mayor variabilidad como lo indica el coeficiente de variación. Esto se debe a que las probetas 1010 presentaron un mejor perfil de anclaje que el del acero 1018, este se obtuvo cuando se realizó el sand blast; lo que hizo que el recubrimiento de aluminio tuviera una mejor adherencia.

5.5.-PRUEBA DE ESPEORES.

A cada una de las 6 probetas de acero 1018 recubierta de aluminio se realizaron 8 mediciones a lo largo de esta. Los valores de los espesores obtenidos de las probetas recubiertas de aluminio se muestran en la tabla 13 con sus medias y desviaciones estándar

PROBETA	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR
1FR	57.23	7.53
2FR	57.720	.722
3FR	73.090	.709
4FR	107.56	1.04

5FR	118.37	1.01
6FR	92.520	2.111

Tabla13. Medidas obtenidas en la prueba de espesores de las probetas 1018 recubiertas de aluminio.

Es esta tabla observamos que las probetas que obtuvieron un mayor espesor fueron las probetas 4FR 5FR y 6FR, las probetas que se comportaron con un menor espesor fueron las probetas 1FR y 2 FR. La probeta 3FR presentó un espesor intermedio a los demás. También se muestra que la probeta que tiene mayor variabilidad con respecto a las media es la probeta 1FR, las probetas que presentaron una menor variabilidad fueron las probetas 2FR, 3FR, 4FR, 5FR y 6FR.

Los resultados de la prueba de espesores aplicada a cada una de las 4 Probetas 1010 recubiertas de aluminio se realizaron 8 mediciones a lo largo de estas. Los valores de los espesores obtenidos de las probetas recubiertas de aluminio se muestran en la tabla 14 con sus medias y desviaciones estándar.

PROBETA	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR
1CR	88.64	5.28
2CR	66.250	.523
3CR	60.590	.642
4CR	61.460	2.131

Tabla14. Medidas obtenidas en la prueba de espesores de las probetas 1010 recubiertas de aluminio.

En las tablas 13 y 14 de espesores se observa que las probetas de acero 1018 presentan un espesor de recubrimiento de aluminio mayor que el espesor de las probetas de acero 1010 recubiertas de aluminio, debido a que las probetas 1018 no presentan tanta rugosidad que las probetas 1010 y también las probetas 1018 no presentan un buen perfil de anclaje lo que hace que el recubrimiento no se adhiera y quede nada más por encima de la superficie de la probeta.

6.-CONCLUSIONES

La finalidad de este trabajo fue mejorar las propiedades mecánicas a partir de un recubrimiento metálico, al realizar la prueba de tensión y al verificar los resultados obtenidos para el módulo de Young, se pudo observar que las probetas recubiertas con aluminio presentaron un valor más alto que las probetas sin recubrimiento, lo que nos indica que para esta medida si se cumplió uno de los objetivos. Respecto con el tipo de material, las probetas recubiertas de acero 1018 presentaron un valor mayor del módulo de Young que las probetas del acero 1010; esto se debe a que las probetas de acero 1018 presentan un mayor porcentaje de carbono.

Los valores obtenidos de la carga máxima en la prueba de tensión, nos indican que este valor fue mayor para las probetas recubiertas de aluminio que las probetas no recubiertas, lo cual nos demuestra que el recubrimiento si mejoró esta propiedad mecánica de los aceros. El acero recubierto que presento una carga máxima mayor fue el acero 1018, ya que este como se había mencionado, tiene un mayor porcentaje de carbono, lo cual hace que resista más carga.

Los resultados que se lograron en la prueba de corrosión del punto A llamado cola de la probeta, nos indican que las probetas de acero 1010 con recubrimiento aumentan drásticamente la velocidad de corrosión, debido a que el aluminio al entrar en contacto con el oxígeno este rápidamente forma su capa de óxido de aluminio la cual no se nota como en el acero, mientras que en las probetas de acero 1018 el recubrimiento de aluminio si disminuyo su velocidad de corrosión debido a su estructura y tamaño de grano que presentan estos aceros que hacen que dilate un poco más la corrosión y además la parte donde se realizó la prueba de corrosión no presenta esfuerzos.

Las velocidades de corrosión en la prueba de esta, del punto B llamado punto de fractura de la probeta, nos indican que las probetas con recubrimiento metálico de aluminio presentan mayor velocidad de corrosión que las probetas sin recubrimiento de aluminio, lo cual demuestra que el recubrimiento de aluminio no mejora la velocidad de corrosión debido a que este se oxida rápidamente, pero es una alternativa de recubrimiento ya que es muy utilizado el aluminio en la parte de la fabricación de barcos, este al reaccionar rápidamente con el oxígeno no permite que la corrosión se altere, a diferencia del acero que con el tiempo la corrosión se hace más agresiva y se pierde material, otra causa es que la prueba se realizó en el punto de fractura, en donde si existen esfuerzos sobre la probeta.

Los valores que se obtuvieron en la prueba de rugosidad, nos indican que las probetas de acero 1010 sand blasteadas sin recubrir, presentan una mayor rugosidad que las probetas de acero 1018, lo cual demuestra que las probetas de acero 1010 tienen una superficie más burda y un mejor perfil de anclaje debido a la cantidad de carbono y a su microestructura.

En la prueba de adherencia los resultados que se obtuvieron, nos muestran que las probetas de acero 1010 presentaron una mayor adherencia que las probetas de acero 1018 debido a que tienen una mayor rugosidad y por lo tanto un buen perfil de anclaje por su estructura y tamaño de grano debido a su contenido de carbono, lo que hace que para aplicaciones de recubrimientos lo recomendable es que se utilice acero rolado en caliente y de bajo carbono

para obtener mejor adherencia del recubrimiento, mientras que en la prueba de espesores los valores obtenidos nos indican que, las probetas 1018 presentaron un mayor espesor de recubrimiento de aluminio, debido a que como no presentan tanta rugosidad el recubrimiento se deposita sobre la superficie sin tener un buen perfil de anclaje lo que hace que no presente mucha adherencia.

Los recubrimientos aplicados por spray térmico de alambre utilizado en este trabajo es un método de gran utilidad en ingeniería ya que el material con que se recubrió en forma de alambre se deposita en el sustrato por medio de una pistola que funde al alambre por medio de gas, oxígeno y aire comprimido, mejorando sus propiedades anticorrosivas. Otra beneficio de la aplicación de los recubrimientos es, que al ser precalentada la probeta provoca un tratamiento térmico y hace que se modifiquen las propiedades mecánicas.

Todos los resultados de las diferentes pruebas nos indican que en los dos tipos de acero estudiado, si existió una mejora en las propiedades mecánicas; esto se debió al recubrimiento metálico de aluminio que se aplicó. Este recubrimiento se recomienda aplicarlo cuando el acero se encuentre expuesto a tensiones o a cargas.

La velocidad de corrosión del recubrimiento metálico de aluminio aumento en los dos tipos de acero, esto se debe a que el aluminio se corroe muy rápidamente y este protege muy bien al acero en el medio ambiente que se encuentre. También se sabe que el aluminio se encuentra por arriba del hierro en el potencial eléctrico lo que hace que se corroa más rápido.

Se recomienda aplicar el recubrimiento de los aceros cuando se quiera proteger de la corrosión y que estos materiales se encuentren sometidos a una carga o a una tensión, es importante mencionar que se debe hacer un estudio en el cual se determine qué uso se le va a dar al acero y sobre qué condiciones para determinar si es factible aplicar este tratamiento o no.

Para futuras investigaciones se recomienda aplicar un mayor porcentaje de aluminio de recubrimiento siempre y cuando este sea uniforme. Además es importante determinar a qué temperaturas de precalentamiento se obtienen mejores resultados, así como también determinar a qué tamaño de grano se realiza una mayor limpieza del material para obtener una mayor adherencia del recubrimiento.

BIBLIOGRAFIA

- 1.-Askeland R.D., Ciencia e Ingeniería en los Materiales, International Thomson, 3ra. Edición, México 1999.
- 2.-Aluminio. (11 de enero de 2015). Aluminio. Recuperado el 11 de enero de 2015, de sitio web de utp.edu.co: <http://www.utp.edu.co/~publio17/aluminio.htm>
- 3.- Askeland R.D., Ciencia e Ingeniería en los Materiales, International Thomson, 3ra. Edición, México 2003.
- 4.-labcorr.net. (25 de noviembre de 2014). Extrapolación de tafel. Recuperado el 25 de noviembre de 2014, de sitio web de labcorr.net: <http://labcorr.net/libro/Tafel2.pdf>
- 5.-Montgomery D.C., Diseño y Análisis de experimentos, Grupo editorial iberoamericana, México D.F.1991.
- 6.-labcorr.net. (16 de noviembre de 2014). Técnicas electroquímicas para la medición de la velocidad de corrosión. Recuperado el 16 de noviembre de 2014, de sitio web de labcorr.net: <http://labcorr.net/libro/Teoriacorrosion.PDF>
- 7.-Latjin Y., Arzamasov B., Tratamiento químico térmico de los metales, MIR. Moscú, 1977.
- 8.-tesis.uson. (12 de enero de 2015). Teoría de la corrosión de los metales. Recuperado el 12 de enero de 2015, de sitio web de tesis.uson: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/907/Capitulo2.pdf>
- 9.-Singer F., Pytel A., Resistencia de materiales 4ta. Edición: Introducción a la mecánica de sólidos, Oxford University Press México S.A. de C.V.; july, 1987.
- 10.-Bilurbina Luis, Liesa Mestres Francisco, Iribarren Iaco José Ignacio, Corrosión y protección, UPC, 2004.
- 11.-BYK-Gardner Gmb. (15 de enero de 2015). Introducción adherencia. Recuperado el 15 de enero de 2015, de sitio web de byk: http://www.byk.com/fileadmin/byk/support/instruments/theory/physical-properties/es/Intro_Adherencia.pdf
- 12.-Malishev A., Nikolaiev G., Shuvalov Y., Tecnología de los metales, editorial Mir., Moscú, 1988.
- 13.-scribd. (19 de julio de 2011). Rugosidad. Recuperado el 25 de enero de 2015, de sitio web de scribd: http://es.wikipedia.org/wiki/Rugosidad_%28mec%C3%A1nica%29
- 14.-Keyser Carl A., Ciencia de materiales para ingeniería, editorial Limusa, México, 1992.
- 15.-metalsprayperu. (28 de octubre de 2014). Protección anticorrosiva por termorociado. Recuperado el 28 de octubre de 2014, de sitio web de metalsprayperu: http://www.metalsprayperu.com/web/pdf/6_ALUMINIZADO-por-Termorociado.pdf

- 16.-Thornton Peter A., Colangelo Vito J., Ciencia de materiales para ingeniería, Prentice Hall, México, 1987.
- 17.-asteco. (30 de octubre de 2014). Termorociado. Recuperado el 30 de octubre de 2014, de sitio web de asteco: <http://www.asteco.com.co/index.php/termo-rociado>
- 18.-Hibbeler R.C., Mecánica de materiales, Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1998.
- 19.- Mott, r. l. (2006). diseño de elementos de maquinas. mexico: pearson educacion.
- 20.- Groover, m. p. (1997). fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. mexico: prentice hall.
- 21.-Velez moreno, l. m. (s.f.). materiales industriales: teoria y aplicacion. Textos académicos.
- 22.- Gómez de león hijes, f. c., & alcaraz lorente, d. j. (s.f.). Manual básico de corrosión para ingenieros. Universidad de Murcia.
- 23.- Asociados, e. t. (1982). calculos y ensayos. estudio de los proyectos: ii. barcelona: romargraf.
- 24.- Morral, f., jimeno, e., & molera, p. (1985). metalurgia general tommo ii. barcelona: reverté.
- 25.- jmcacer.webs.ull.es/CTMat/Practicas%20Laboratorio_archivos/traccion.pdf. (s.f.). Recuperado el 28 de julio de 2015, de sitio web de ensayos mecanicos II: http://jmcacer.webs.ull.es/CTMat/Practicas%20Laboratorio_archivos/traccion.pdf.
- 26.- [e-educativa.catedu.es](http://educativa.catedu.es). (s.f.). Recuperado el 5 de agosto de 2015, de sitio web de [catedu.es](http://educativa.catedu.es): http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/111_determinacin_de_propiedades.html

Figura 1. Designación de los aceros según la norma AISI.....	5
Figura 2. Representación de modulo elástico.....	8
Figura 3. Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión. ..	13
Figura 4. Sentido del flujo de electrones y del flujo convencional de la corriente eléctrica en una celda de corrosión.	14

Figura 5. Curva de polarización.....	16
Figura 6. Diagrama de corrosión de hierro en medio ácido.....	17
Figura 7.-proceso de rociado por llama alambre.....	17
Figura 8. Proceso de deformación de un recubrimiento.....	18
Figura 9. Sistema de pulverización de llama.....	20
Figura 10. Sección transversal típica de un recubrimiento de pulverización térmica.....	22
Figura 11. Sistema de aspersion por llama Típica.....	25
Figura 12. Pistola de pulverización a la llama Típica.....	25
Figura 13. Instalación pistola de combustión típica.....	26
Figura 14. Sección transversal arma Polvo.....	26
Figura 15. Sistema de pulverización de arco de dos hilos Típica.....	27
Figura 16. Pistola de pulverización de arco de dos hilos Típica.....	28
Figura 17. Grafica de interacción.....	32
Figura 18. Gráfica del comportamiento del metal en la prueba de tensión.....	35
Figura 19. Máquina de ensayos universales INSTRON 600 DX.....	35
Figura 20. Separación de la unidad de carga de la unidad fija.....	37
Figura 21. Bastidor y componentes del sistema.....	38
Figura 22. Conjunto de interruptor de fin de carrera standar.....	39
Figura 23. Flujo y componentes hidráulicos.....	40
Figura 24. Célula de carga de equipos Instron.....	41
Figura 25. Strain gage.....	42
Figura 26. Ejecución del software Partner para La obtención de datos del ensayo de tracción.....	43
Figura 27. Hoja de resultados del ensayo.....	44
Figura 28. Pistola MK 61.....	47
Figura 29. Vista extendida del montaje de la boquilla.....	48
Figura 30. Cabezal de gas.....	49
Figura 31. Válvula principal.....	50
Figura 32. Unidad de suministro de alambre.....	50
Figura 33. Sistema del escudo térmico.....	51
Figura 34. a). Regulador de oxígeno con supresión de retorno rápido ajustado. b). Regulador de gas combustible con supresión de retorno rápido ajustado.....	52
Figura 35. Medidores de flujo montados.....	52
Figura 36. Unidad de regulación y filtración de aire.....	53
Figura 37. Grafica de tafel por intersección de ramas catódica y anódica.....	57
Figura 38. Esquema básico de la instrumentación para el electroanálisis del sistema metal-pintura.....	58
Figura 39. Esquema simplificado del potencióstato.....	59
Figura 40. Convertidor de aproximaciones sucesivas.....	61
Figura 41. Diagrama de flujo del algoritmo de aproximaciones sucesivas bipolar.....	61
Figura 42. Diagrama de flujo del algoritmo de aproximaciones sucesivas unipolar.....	62
Figura 43. Tarjeta del potencióstato.....	63
Figura 44. Tarjeta de control para el potencióstato.....	63

Figura 45. Sonda para conexión	64
Figura 46. Sonda para la conexión de la celda de electroanálisis y colores de identificación.	64
Figura 47. Tarjetas del potencióstato y conexión de sonda.....	65
Figura 48. Instrumentación y conexiones para el electroanálisis.	66
Figura 49. Software de control y configuración.....	66
Figura 50. Configuración de parámetros del ensayo.....	67
Figura 51. Pendientes de Tafel.....	69
Figura 52. Configuración de datos del ensayo.	70
Figura 53. Resistencia a la polarización.....	70
Figura 54. Análisis de Impedancia Electroquímica (Bode).	71
Figura 55. Análisis de Impedancia Electroquímica (Nyquist).	72
Figura 56. Dolly.	73
Figura 57. Medidor de adherencia.....	73
Figura 58. Diafragma de transductor de presión.	74
Figura 59. Cinta extensométrica.....	74
Figura 60. Diagrama esquemático de un medidor de rugosidad.	76
Figura 61. Transductor de inductancia variable.	76
Figura 62. Voltaje de salida del sensor.	77
Figura 63. Funciones principales.	78
Figura 64. Unidad principal.	78
Figura 65. Parte posterior de la unidad principal.	79
Figura 66. Lateral derecha de la unidad principal.	79
Figura 67. Cable de conexión.....	80
Figura 68. Resultados de la lectura de rugosidad.....	80
Figura 69. Teclado de la unidad principal.....	81
Figura 70. Muestra de una impresión de resultados.....	81
Figura 71. Espécimen de calibración.	82
Figura 72. Accesorio de nivelación.....	82
Figura 73. Acoplamiento de la unidad lectora.	83
Figura 74. Vista frontal del detector.....	83
Figura 75. Vista lateral del detector.	83
Figura 76. Pantalla inicial.....	84
Figura 77. Pantalla del resultado de la calibración.....	85
Figura 78. Medidor de espesores POSITECTOR 6000 FN1.	85
Figura 79. Especificaciones del medidor de espesores POSITECTOR 6000 FN1.	86
Figura 80. Probeta 1010 rolada en caliente.	88
Figura 81. Probeta 1018 rolada en frío.....	88
Figura 82. Soleras utilizadas para las probetas.....	88
Figura 83. Corte del material.....	89
Figura 84. Fresadora universal.	89
Figura 85. Administración de refrigerante a la fresadora universal.	90
Figura 86. Posición de las probetas para maquinar.	90

Figura 87. Posición de la probeta para el primer maquinado.....	91
Figura 88. Probetas 1018 maquinadas.....	91
Figura 89. Probetas 1010 maquinadas.....	92
Figura 90. Posición de las probetas para maquinado de redondeo.....	92
Figura 91. Forma de las probetas según la norma ASTM E8.	93
Figura 92. Limado de las probetas.	93
Figura 93. Cepillado de las probetas.	93
Figura 94. Aplicación de gasolina blanca a las probetas.....	94
Figura 95. Máquina de sand blast.....	95
Figura 96. Probetas 1018 sand blasteadas.....	95
Figura 97. Probetas 1010 sand blasteadas.....	95
Figura 98. Rugosímetro MITUTOYO.	96
Figura 99. Pistola para metalización METALLISATION.	97
Figura 100. Precalentamiento de la probeta.	97
Figura 101. Aplicación del recubrimiento de aluminio.....	98
Figura 102. Medidor digital para medir recubrimientos sobre superficies ferrosas (F) y no-ferrosa POSITECTOR 6000.....	98
Figura 103. Medición de espesores con POSITECTOR 6000.	99
Figura 104. Máquina de tensión INSTRON 600DX.....	99
Figura 105. Colocación de las probetas en la máquina de tensión.....	100
Figura 106. Probetas tronadas.	100
Figura 107. Aplicación de la prueba de corrosión tafel.	101
Figura 108. Aplicación de la prueba de corrosión tafel.	101
Figura 109. Extracción de agua destilada.....	102
Figura 110. Balanza SAUTER.....	102
Figura 111. Máquina de adherencia POSITEST AT-M.....	103
Figura 112. RESISTOL pegamento epoxico.....	103
Figura 113. Colocación de los peones sobre las probetas.	104
Figura 114. Retirando exceso de pegamento.....	104
Figura 115. Gráfica de interacción para el módulo de Young.	105
Figura 116. Gráfica de efectos principales del módulo de Young.	106
Figura 117. Gráfica de interacción para la carga máxima.....	107
Figura 118. Gráfica de efectos principales de la carga máxima.....	107
Figura 119. Grafica de interacción para velocidad de corrosión A.....	108
Figura 120. Grafica de efectos principales para velocidad de corrosión A.....	109
Figura 121. Grafica de interacción para velocidad de corrosión B.....	110
Figura 122. Grafica de efectos principales para velocidad de corrosión B.....	110
Figura 123. Graficas de rugosidad de las probetas 1010 roladas en caliente.....	112
Figura 124. Graficas de rugosidad de las probetas 1018 roladas en frio.....	113

