



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN.

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

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

IVÁN SALGADO VALLE.

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.



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

F. E. S. C.
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

**ATN: LA. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautilán.**

EXÁMENES PROFESIONALES

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 ZINC EN ACERO 1010 Y ACERO 1018"

Que presenta el pasante: **IVÁN SALGADO VALLE**

Con número de cuenta: **41002132-5** 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"

Cuautilán Izcalli, Méx. a 14 de noviembre de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna	
VOCAL	Dr. Armando Aguilar Márquez	
SECRETARIO	M. en I. Miguel de Nazareth Pineda Becerra	
1er SUPLENTE	M. en I. Ramón Osorio Galicia	
2do SUPLENTE	Dr. Rojando Cortés Montes De Oca	

NOTA: Los sinodales 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)

LMCF/ntm*

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres (Bernardo Salgado y Bellarmina Valle).

Por estar conmigo a lo largo de toda mi vida dándome buenos consejos, brindarme su apoyo para superarme en la vida, así como también les agradezco por darme la oportunidad de tener una educación universitaria.

A dios.

Por acompañarme a lo largo de mi vida y permitirme concluir mis estudios con buenos resultados.

A mis hermanos.

Por su apoyo incondicional y sus buenos consejos.

A mis tíos y primos.

Por permitirme vivir con ellos, mientras estudiaba mi carrera universitaria, así como también su apoyo incondicional.

A el M.en I. Miguel de Nazareth Pineda Becerril.

Por su apoyo a lo largo de mi carrera universitaria, por su disposición y asesoramiento, así como facilitarme fuentes de investigación y equipo eléctrico y mecánico para realizar mi trabajo de titulación.

Al maestro Noé Alberto Cortes Guerrero

Por su disposición y apoyo para la utilización del equipo mecánico y software para la realización de pruebas y con ello llegar a la conclusión de mi trabajo de tesis.

Al maestro Juan José García Ruiz.

Por su disposición y apoyo para la utilización del software y equipo mecánico para la realización de pruebas para llegar a la conclusión de mi trabajo de tesis.

A la UNAM y FESC.

Por una buena enseñanza en la ingeniería.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
2. ANTECEDENTES.....	8
2.1 ACEROS SIMPLES.....	8
2.2. ACERO 1010 ROLADO EN CALIENTE.....	9
2.3 ACERO 1018 ROLADO EN FRIO.	10
2.3.2 EFECTOS DE VARIOS ELEMENTOS EN LOS ACEROS.	11
2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS.	12
2.4.1 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE INGENIERÍA.....	12
2.4.2. RIGIDEZ, MÓDULO DE YOUNG.....	15
2.4.3 CARGA MÁXIMA.....	15
2.5 APLICACIONES DE RECUBRIMIENTO TERMO- SPRAY.....	17
2.5.1 PROCESO DE LLAMA/ALAMBRE.....	20
2.5.2 PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN.....	21
2.5.3 DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR (CVP).	21
2.5.4 DEPOSICIÓN FÍSICA DE VAPOR (PVD).	22
2.5.5 DEPOSICIÓN POR PULSOS LASER (PLD).....	23
2.5.6 RANGO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LOS PROCESOS DE ROCIADO.23	
2.5.7 DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE RECUBRIMIENTO POR PULVERIZACIÓN TÉRMICA O TERMO SPRAY.	25
2.5.8 PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	27
2.5.9 AVANCES TECNOLOGICOS DEL PROCESO DE TERMO SPRAY.....	28
2.5.10 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DEL PROCESO DE TERMO SPRAY.	29
2.6 CORROSIÓN.....	30
2.6.1 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.	30
2.6.2 TIPOS DE CORROSIÓN.	33
2.6.3 POLARIZACIÓN.	35
2.6.4 TEORÍA DE LA PELÍCULA DE ÓXIDO Y TEORÍA DE LA ADSORCIÓN.....	36
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	38
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	38
3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	38
3.3. PISTOLA FLAMESPRAY MK 61.....	42
3.4 PRUEBA O ENSAYO DE TENSIÓN.....	44

3.4.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES INSTRON 600 DX.....	45
3.4.2. CARGA MÁXIMA.....	51
3.4.3. MODULO DE YOUNG.....	52
3.5 CORROSION (MÉTODO TAFEL).....	52
3.6 RUGOSIDAD.	60
3.6.1 PRUEBA DE RUGOSIDAD.	63
3.7 ESPESORES.	70
3.8 ADHERENCIA.	71
4. EXPERIMENTACIÓN.....	75
4.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	75
4.2 PRUEBA DE RUGOSIDAD.	80
4.3 RECUBRIMIENTO.....	81
4.4 PRUEBA DE ESPESORES.....	82
4.5 PRUEBA DE TENSIÓN.....	83
4.6 PRUEBA DE ADHERENCIA.....	85
5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	88
5.1 ENSAYO DE TENSIÓN.	88
5.2 MÓDULO DE YOUNG.....	89
5.3 CARGA MÁXIMA.....	90
5.4 PRUEBA DE RUGOSIDAD.	94
5.5 PRUEBA DE ADHERENCIA.....	97
5.6 PRUEBA DE ESPESORES.....	97
6. CONCLUSIONES.	99
7. BIBLIOGRAFÍA	102

OBJETIVO GENERAL

Proporcionar una mejora en las propiedades mecánicas y una protección anticorrosiva al material mediante la aplicación de un termorociado.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar la aplicación del recubrimiento metálico de zinc en el acero 1010 rolado en caliente.
- Mostrar la aplicación del recubrimiento metálico de zinc en el acero 1018 rolado en frío.
- Examinar las propiedades del recubrimiento metálico a base de zinc cuando es sometido a líquidos corrosivos en el acero 1010 rolado en caliente.
- Examinar las propiedades del recubrimiento metálico a base de zinc cuando es sometido a líquidos corrosivos en el acero 1018 rolado en frío.
- Comprobar si al aplicar un recubrimiento metálico de zinc aumenta las propiedades mecánicas en el acero 1010 rolado en caliente.
- Comprobar si al aplicar un recubrimiento metálico de zinc aumenta las propiedades mecánicas en el acero 1018 rolado en frío.

1. INTRODUCCIÓN

El hombre, en su afán de lograr mejores condiciones de vida, ha usado constantemente su ingenio durante su larga historia. Para lograr tal objetivo, mucho lo ha debido al uso del acero que ahora forman parte de nuestra vida cotidiana y, casi sin quererlo, hemos creado una dependencia tal que sería imposible hablar del desarrollo y avance de la civilización moderna sin el uso de metales y aleaciones.

Sin embargo, nosotros sabemos por experiencia que las cosas no son así. Los aceros se degradan inexorablemente con el tiempo de muy diversas formas, dejan de ser funcionales, perdiendo sus propiedades decorativas o mecánicas. Algunos simplemente se disuelven en su totalidad en el medio que los envuelve. De lo que muy poco nos percatamos es que el hombre desarrolla un esfuerzo grandioso para evitar que los metales de uso industrial básico para la sociedad se deterioren y vuelvan a su estado original (es decir, de metal combinado con algunos otros elementos activos tales como el oxígeno, azufre y cloro). La mayoría de ellos son inestables en muchos de los ambientes encontrados en la Tierra. La misma atmósfera, el agua del mar, salmueras, las soluciones ácidas, neutras o alcalinas y cientos de otros ambientes causan el retorno del metal hacia una forma más estable, similar a la de los minerales.

Industrialmente lo que hacemos hoy en día es suministrar al mineral o mena una cantidad de energía equivalente a la que la reacción cedió a través de mucho tiempo para pasar a la forma combinada. Al obtener un metal en forma libre volvemos al estado inicial. El metal libre, poseyendo una energía elevada y con fuertes tendencias a bajarla, tenderá a estabilizarse, reaccionando con el medio ambiente y volviendo a su forma de mineral original. El cobre, el zinc, el níquel, el cromo, el hierro, el aluminio, el plomo, el estaño y la mayoría de los metales ingenieriles que usamos, sufren esa tendencia después de ser obtenidos en su forma libre. Se puede decir, como una aceptable generalización, que cuanto mayor haya sido la cantidad de energía invertida en la obtención de un metal a partir de su mineral (térmica, eléctrica o de otro tipo), mayor será su tendencia a volver a combinarse para estabilizarse. Figura 1.

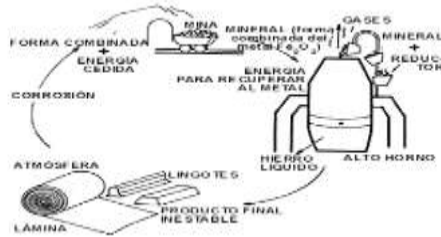


Figura 1. Diagrama del proceso de la obtención del acero.

Es interesante el pensar que un pedazo de metal puede permanecer estable por un período indefinido, si es que se le mantiene en el vacío, es decir, en donde el metal no entre en contacto con ningún medio o sustancia, incluyendo al aire por supuesto. Asimismo, los metales, bajo ciertas condiciones, pueden formar grietas y romperse catastrófica y súbitamente al estar sujetos simultáneamente a un medio agresivo y a un esfuerzo mecánico moderado (corrosión bajo tensión). También pueden ser atacados muy específicamente en forma de pequeños agujeros profundos que avanzan rápidamente, llegando a perforar gruesas secciones de estructuras metálicas, haciendo a éstas deficientes en sus propiedades mecánicas e inutilizándolas por completo (corrosión por picaduras). Los metales también pueden sufrir de fatiga con la consecuente pérdida de resistencia cuando son sometidos a esfuerzos periódicos (corrosión, fatiga) o fragilizarse súbitamente y ser inoperativos (fragilidad por hidrógeno). Es entonces precisamente cuando todos los conocimientos que se tienen de la lucha contra la corrosión deben de ser aplicados para que un metal o aleación perdure más años en servicio, sin transformarse rápidamente en formas combinadas (óxidos, sulfuros, etc.) o en sistemas degradados específicamente que no cumplan con los requisitos exigidos a los metales o aleaciones originales, tales como resistencia, dureza, lustre, apariencia, etc.

Para tal fin se emplean diversas técnicas de protección tales como la alteración superficial de los metales, consistente en crear o provocar una barrera protectora producto del mismo metal, como es el caso del anodizado. En este proceso el metal puesto a proteger se oxida electrolíticamente, es decir, se le somete a condiciones tales que produce una película superficial de óxido del mismo metal, óxido que por lo general es de apariencia agradable, transparente, duro y muy protector; ejemplo, el aluminio anodizado. Asimismo, un metal dado puede combinarse o alearse con otros metales, no tanto con el fin de conseguir una alteración

benéfica en sus propiedades mecánicas, sino para mejorar su resistencia a algún tipo de corrosión. Un ejemplo típico lo constituye el acero inoxidable, en donde el hierro se combina con elementos tales como el cromo, níquel, molibdeno, etc., los cuales incrementan notablemente la resistencia de esa aleación a degradarse químicamente.

Para tal fin se emplean diversas técnicas de protección tales como la alteración superficial de los metales, consistente en crear o provocar una barrera protectora producto del mismo metal, como es el caso del anodizado. En este proceso el metal puesto a proteger se oxida electrolíticamente, es decir, se le somete a condiciones tales que produce una película superficial de óxido del mismo metal, óxido que por lo general es de apariencia agradable, transparente, duro y muy protector; ejemplo, el zinc anodizado y el aluminio anodizado por mencionar algunos. Asimismo, un metal dado puede combinarse o alearse con otros metales, no tanto con el fin de conseguir una alteración benéfica en sus propiedades mecánicas, sino para mejorar su resistencia a algún tipo de corrosión. Un ejemplo típico lo constituye el acero inoxidable, en donde el hierro se combina con elementos tales como el cromo, níquel, molibdeno, etc., los cuales incrementan notablemente la resistencia de esa aleación a degradarse químicamente.

Para este estudio se aplicara un recubrimiento metálico de Zinc ya que este es un método de protección metálico se les conoce como protección catódica y anódica para esto se utilizara el proceso de termo rociado, para comprobar que tan eficiente es el proceso se utilizara el método Tafel. Este método nos ayudara a medir la velocidad de corrosión y así corroborar la efectividad del recubrimiento de zinc aplicado con el termo rociado. Sin embargo en el afán evitar la corrosión mediante algún tipo de método como por ejemplo el termo rociado, ya que al aplicarle calor a un acero se pueden modificar las propiedades mecánicas como el módulo de Young, límite elástico, carga máxima y dureza por mencionar algunas. Estas propiedades se pueden verificar mediante un ensayo de tensión el cual nos mostrara si las propiedades mecánicas del metal se vieron afectadas por el proceso de termo rociado.

2. ANTECEDENTES

Como se describe anteriormente en la introducción para la realización de este trabajo se utilizaran los aceros 1010 y 1018, así como también un recubrimiento a base de zinc. A continuación se describirán las propiedades de cada uno de estos aceros y del recubrimiento a utilizar.

2.1 ACEROS SIMPLES

Los aceros simples se pueden definir así.- Aleación hierro con carbono con un contenido de éste 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. Los aceros simples se clasifican de acuerdo a su contenido de carbono en:

- Aceros de bajo carbono
- Aceros de medio carbono
- Aceros de alto carbono

Cada uno de los grupos anteriores tiene características bien definidas como se muestra a continuación:

Aceros de bajo carbono ($0.02 < \%C < 0.03$)

- Son dúctiles
- Soldables
- No se pueden tratar térmicamente
- Poseen una resistencia mecánica moderada
- Maquinables
- -Baratos

Aceros de medio carbono ($0.2 < \%C < 0.65$)

- Son templeables (Se pueden someter a temple y revenido)
- Poseen buena resistencia mecánica
- Ductilidad moderada
- Baratos

Aceros de alto carbono (%C > 0.8)

- Son templables
- Duros y resistentes al desgaste
- Dificiles de soldar
- Poco tenaces
- Baratos

Entre las principales aplicaciones de los aceros simples se pueden mencionar a las siguientes:

- Estructuras.
- Elementos de máquinas (Ejes, resortes, engranes, etc.)
- Tornillos - Herramientas de mano.

Para designar a los aceros simples y aleados se utiliza un sistema de identificación de 4 dígitos desarrollado por AISI (American Iron and Steel Institute) y SAE (Society of Automotive Engineers) y que en México fue adoptado por NOM (Norma Oficial Mexicana). Póngase por ejemplo al acero NOM - 1010; el primer dígito indica cual es el principal de aleación (carbono en este caso); el segundo dígito, la modificación del acero original y los dos últimos dígitos cual es el porcentaje de carbono en centésimas de punto, esto es, en el ejemplo el contenido de carbono es de 0.10%. En la Tabla 1 se muestra cual es principal elemento de aleación dependiendo de cuál es el valor del primer dígito.

Familia	Principal elemento de aleación
1xxx	Carbono
2xxx	Níquel
3xxx	Níquel- cromo
4xxx	Cromo-molibdeno
5xxx	Cromo
6xxx	Cromo-vanadio
8xxx	Cromo-níquel-molibdeno
9xxx	Cromo-silicio

Tabla 1. Designación AISI-SAE-NOM para aceros simples y aleados.

2.2. ACERO 1010 ROLADO EN CALIENTE.

Como el acero 1010 es un acero con un bajo contenido de carbono (0.10 %C) es aquel que tiene menos de 0.30 %C. Este tipo de aceros no tienen muchos elementos importantes de aleación, excepto de carbono y manganeso; menos de 1.0% de manganeso. Este acero tiene una resistencia relativamente baja pero puede ser templado y revenido para aumentar la fuerza. El manganeso mejora la templabilidad, la resistencia mecánica, la resistencia a la abrasión y la maquinabilidad; desoxida el acero fundido y reduce fragilidad en caliente, así como reduce la soldabilidad. Estos aceros tienen relativamente baja resistencia, pero buena capacidad para darles forma. En aplicaciones a elementos de máquinas, cuando no se requiera alta resistencia, se especifican con frecuencia aceros al bajo carbono. 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 la resistencia y ductilidad. Algunas de las aplicaciones del acero 1010 son tornillería grado 1 y 2, espárragos, pernos, pernos en U o grapas, tuercas, remaches, accesorios para motos, accesorios para el sector automotriz, carros para autoservicios, elementos decorativos, exhibidores, bujes, bridas, bulones, chavetas, elementos roscados, etc., pasadores, clavos para ferrocarril, arcos para candado, etc. La siguiente tabla muestra la composición química del acero al carbono AISI 1010.

Elemento	Contenido (%)
Hierro, Fe	99.18 a 9.62%
El manganeso, Mn	Desde 0.30 hasta 0.60%
El azufre, S	≤0.050%
El fósforo, P	≤0.040%
Carbon, C	0,080 a 0,13%

Tabla 2. Composición del lacero al carbono AISI 1010.

Las propiedades físicas del acero 1010 según la norma AISI tiene una densidad de 7.87 g/cm^3 . Las propiedades mecánicas del acero AISI 1010 rolado en caliente del acero al carbono se tabulan a continuación.

AISI N°	Procesamiento	Resistencia última (Mpa)	Resistencia de fluencia (Mpa)	Enlongacion 2 In %	Reduccion de area en %	Dureza Brinell
1010	Rolado en caliente	320	180	28	50	95

Tabla 3. Propiedades mecánicas acero AISI 1010 rolado en caliente.

Algunos tratamientos termicos que se le dan al acero 1010 según la norma AISI se utiliza sobre todo en la condición de recocido o endurecido. Sin embargo, también se puede tratar de calor, templado y revenido pero el costo para la realización de estos procesos son muy altos. El forjado que se le debe dar a un acero 1010 basados en la norma AISI 1010 se encuentra entre los 1.260 y $982 \text{ }^\circ\text{C}$ (2300 y $1800 \text{ }^\circ\text{F}$). La capacidad de trabajo en caliente de acero al carbono AISI 1010 es entre los rangos de 482 a $93 \text{ }^\circ\text{C}$ (900 a $200 \text{ }^\circ\text{F}$).

2.3 ACERO 1018 ROLADO EN FRIO.

Este acero de bajo-medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Entre los aceros de bajo carbono, el 1018 es el más versátil por sus características; análisis controlado, mejores propiedades mecánicas que otros aceros del mismo tipo por su alto contenido de manganeso, buena soldabilidad, buena maquinabilidad. Cuando se requiere una superficie muy dura pero un centro tenaz, este acero cementado cumple perfectamente. Estirado en frío mejora sus valores de resistencia mecánica y su maquinabilidad, haciéndose muy popular para un sin número de aplicaciones. Se utiliza en la fabricación de partes para maquinaria; automotriz, línea blanca, equipo de proceso, etc.; que no estén sujetas a grandes esfuerzos. Por su ductilidad es ideal para procesos de transformación en frío como doblar, estampar, recalcar, etc. Sus usos típicos son flechas, tornillos, pernos, sujetadores, etc., ya cementado en engranes, piñones, etc. Algunas propiedades del acero 1018 rolado en frío se mencionan en la siguiente tabla.

Dureza	126 HB (71 HRb)
Esfuerzo de fluencia	370 MPa (53700 PSI)
Esfuerzo máximo	440 MPa (63800 PSI)
Elongación máxima	15% (en 50 mm)
Reducción de área	40%
Módulo de elasticidad	205 GPa (29700 KSI)
Maquinabilidad	76%

Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero 1018.

Otro tipo de propiedades del acero 1018 son las propiedades físicas como es la densidad la cual de 7.87 g/cm^3 esto es que tiene la misma densidad del acero 1010 a pesar de tener diferente composición química. Las propiedades químicas del acero 1018 se muestran en la siguiente tabla.

Carbono	0.15 – 0.20 %
Magnesio	0.60 – 0.90 %
Fosforo máx.	0.04 %
Azufre máx.	0.05 %

Tabla 5. Composición química del acero 1018.

Forjado	Normalizado	Recocido		Templado	Revenido	Puntos críticos aprox.	
		Ablandamiento	Regeneración			Ac 1	Ac 3
1100-1250	870-900	650-700 Enfriar al aire	850-890 Enfriar en horno	Cementar 925	150-250	724	840

Tabla 6. Tratamientos térmicos recomendados (valores en °C).

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción			Límite de fluencia			Alargamiento en 2" %	Reducción de área %	Dureza Brinell
	MPa	Kgf/mm ²	ksi	MPa	Kgf/mm ²	ksi			
Caliente y maquinado	400	41	58	220	22	32	25	50	116
Estirado en frío	440	45	64	370	38	54	15	40	126

Tabla 7. Propiedades mecánicas mínimas estimadas según SAE J1397.

2.3.2 EFECTOS DE VARIOS ELEMENTOS EN LOS ACEROS.

A los aceros se les agrega varios elementos, a fin de impartirles las propiedades de templabilidad, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, capacidad de trabajo, soldabilidad y maquinabilidad. Estos elementos se listan a continuación, de sus efectos tanto benéficos como perjudiciales. En general, mientras más elevados sean los porcentajes de estos elementos en los aceros, mayores serán las propiedades particulares que imparten; por ejemplo, mientras más elevado sea el contenido de carbono, mayor será la templabilidad del acero y más elevada será su resistencia, dureza y resistencia al desgaste. Por otra parte, la ductilidad, la soldabilidad y tenacidad se ven reducidas con mayor contenido de carbono.

Boro.- mejora la templabilidad, sin pérdida (o incluso con una mejoría en) la maquinabilidad y conformabilidad.

Calcio.- desoxida los aceros, mejora la tenacidad y puede mejorar la conformabilidad y la maquinabilidad.

Carbono.- mejora la templabilidad la resistencia mecánica, la dureza y la resistencia al desgaste; reduce la ductilidad, la soldabilidad y la tenacidad.

Cerio.- controla la forma de las inclusiones y mejora la tenacidad en los aceros de alta resistencia de baja aleación; desoxida los aceros.

Cromo.- mejora la tenacidad, la templabilidad, la resistencia al desgaste, a la corrosión y la resistencia a altas temperaturas; mejora la profundidad de la penetración del endurecimiento, resultado de un tratamiento térmico al promover la carburización.

Cobalto.- mejora la resistencia y la dureza a temperaturas elevadas.

Cobre.- mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y en un mejor grado, incrementa la resistencia mecánica con muy poca pérdida de ductilidad; afecta de manera adversa las características de trabajo en caliente y la calidad superficial.

Producto	Acero
Forjas, tubos y acoplamientos para aeronaves	4140,8740
Carrocerías automotrices	1010,1018
Ejes	1040,4140
Pernos	1035,4042,4815
Arboles de leva	1020,1040
Engranajes diferenciales	4023
Engranajes (automotrices y camiones)	4027,4032
Tren de aterrizaje	4140,4340,8740
Arandelas de seguridad	1060,1018
Tuercas	3130
Rieles y ruedas de ferrocarril	1080
Resortes (espiral)	1095,4063,6150
Muelle (hoja)	1085, 4063,9260,6150
Tubería	1040
Alambre	1045, 1055
Alambre música	1085

Tabla 8. Selección de aceros al carbono y de aleación para varias aplicaciones.

2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS.

Cuando a los aceros de bajo carbono se les aplica calor muchas veces sin llegar a altas temperaturas cambia sus propiedades mecánicas en mucha o poca medida, ya que se aplicara un recubrimiento metálico a base de termo- spray. Para comprobar las características del material incluiremos el ensayo de tensión. El ensayo de tensión nos proporciona gran parte de las propiedades del material como son: resistencia a la tensión, modulo de Young, carga en la ruptura, esfuerzo máximo y esfuerzo de cedencia. El proposito fundamental del presente trabajo es verificar si al aplicarse un recubrimiento metalico (zinc) a base de termo- spray al material cambien sus propiedades mecánicas.

2.4.1 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE INGENIERÍA.

La figura 2 representa en una gráfica, una curva típica esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de ingeniería para un acero de bajo carbono; En el diagrama, P es llamado límite de Proporcionalidad, E Limite Elástico, Y punto de Fluencia Superior, L punto de Fluencia Inferior, U Resistencia máxima y R Resistencia a la Fractura”. Se observa la región elástica en la cual se cumple la Ley de Hooke denotada por la ecuación la deformación es proporcional al esfuerzo, hasta un valor de σ_E llamado “límite elástico”, a partir del cual empieza una deformación no recuperable, es decir, se entra a la región de deformación plástica, en la que ya no existe una relación directa entre esfuerzo y deformación.

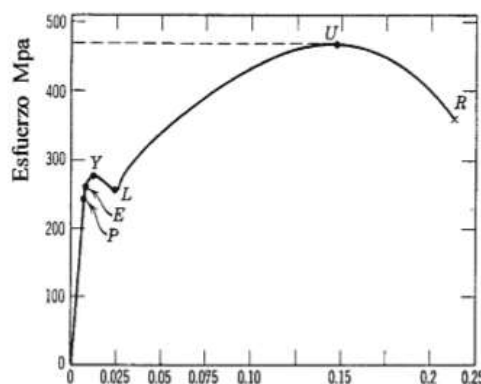


Figura 2. “Diagrama esfuerzo-deformación para un acero de bajo contenido de carbono.

El límite elástico de los materiales es un dato de suma importancia para el diseño, ya que el rebasar este valor conduciría a una deformación plástica, con pérdida de tolerancia y otros problemas. Uno de los principales

objetivos de los tratamientos térmicos es precisamente la elevación del límite elástico, lo que implica un aumento de la resistencia del material a la deformación plástica; esto es lo que se entiende por “aumentar la dureza” de un material. También, a partir de dicho diagrama se pueden obtener las siguientes propiedades:

- Límite proporcional: Es el mayor esfuerzo para el cual puede aplicarse la ley de Hooke. En otras palabras, es el esfuerzo en el extremo de la porción recta de la curva esfuerzo-deformación.
- Resistencia Máxima: Es el mayor esfuerzo, basado en la sección original, que puede soportar un material. También conocida como resistencia última.
- Resistencia a la ruptura: Es el esfuerzo en un material, basado en la sección transversal original en el instante en que se rompe. También conocido como resistencia a la fractura.
- Elasticidad: Se refiere a la habilidad de un material para deformarse bajo una carga o esfuerzo y recuperar sus dimensiones originales cuando el esfuerzo se retira.
- Plasticidad: Es la cualidad de un material para deformarse bajo un esfuerzo o carga y retener esta deformación después de retirar la carga o esfuerzo.
- Resistencia a la cedencia o a la fluencia: Es aquel esfuerzo que causará en el material una cierta cantidad específica de deformación plástica. Usualmente se determina por el método de la mínima deformación permanente. La resistencia a la cedencia es el esfuerzo en donde se intersectan la línea curva y la línea recta en el diagrama de esfuerzo-deformación.
- Porcentaje de alargamiento: Se obtiene comparando el alargamiento total en la fractura, con la longitud calibrada de la probeta.

Las dos partes de la fractura se acoplan adecuadamente, y se mide la distancia entre las marcas de comparaciones; el alargamiento total es esta distancia menos la longitud inicial. Matemáticamente se define así:

$$\% \varepsilon = \frac{L_f - l}{l} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

dónde:

- L_f = Longitud Final
- l = Longitud Inicial
- ε = Elongación.

Porcentaje de reducción de área: Cuando un material dúctil se esfuerza más allá de su resistencia máxima, su área transversal, decrece apreciablemente hasta que sucede la fractura. Este decremento del área es conocido como estrangulación y se obtiene comparando la reducción del área en la sección más pequeña de la probeta fracturada con el área de la sección transversal original, figura 3.

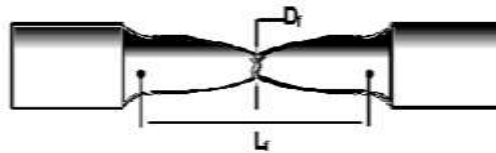


Figura 3. Probeta después de la fractura.

En forma de ecuación queda así:

$$\% \text{REDUCCIÓN DE ÁREA} = \frac{A - A_f}{A} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

dónde:

- A = Área original de la sección transversal.
- A_f = Área final de la sección transversal.

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. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes entre los diagramas esfuerzo-deformación de varios grupos de materiales y dividirlos en dos amplias categorías sobre la base de estas características; a saber: Materiales Dúctiles y Materiales Frágiles. El comportamiento típico de estos se observa en la figura 4.

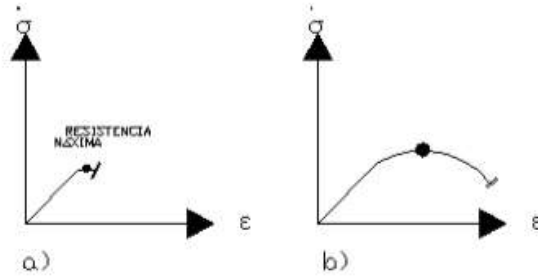


Figura 4. Diagramas esfuerzo-deformación: a) Materiales frágiles b) Materiales dúctiles

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.

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. Para la realización de esta prueba se utilizan máquinas universales como la que se observa en la figura 5.



Figura 5. Máquina universal para pruebas de tensión.

No importando de que material éste hecho un componente, obviamente se puede hacer más resistente si se incrementan sus dimensiones. El problema con este tipo de solución es que la pieza al mismo tiempo se vuelve más pesada y en muchas máquinas, por ejemplo, aviones ó automóviles es el enemigo a vencer. La condición ideal buscada es la máxima resistencia con el menor peso posible. Por lo tanto, una de las cuestiones que más interesan al ingeniero mecánico es la relación resistencia-peso, que en ingeniería recibe el nombre de resistencia específica del material.

Matemáticamente esto es: Resistencia específica = Resistencia a la fluencia / densidad

Haciendo una comparación sobre esta base los materiales modernos compuestos figuran en los primeros lugares en comparación con otros materiales que son insignificantes en este aspecto, por ejemplo la resistencia específica para el acero NOM- 1010 es de 200, mientras que para la fibra de carbono es de 4600.

2.4.2. RIGIDEZ, MÓDULO DE YOUNG.

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 deformará un material bajo la acción de una determinada carga, es decir, ¿qué tan elástico es un material?

El número que representa la rigidez es llamado “módulo de elasticidad ó módulo de Young” y es representado por la letra E en los manuales de materiales. El módulo de Young es el esfuerzo que sería requerido para deformar al doble la longitud de un espécimen, si esto fuera posible.

Al comparar la rigidez de diferentes materiales, la tabla 9 revela que existe una gran separación entre los valores y no existe un patrón común. La separación entre materiales compuestos y metales ha desaparecido. De hecho el acero presenta muy buenas propiedades comparadas con las de las fibras. Los metales más ligeros que el acero, como el titanio, el aluminio y el magnesio, el aramid y la fibra de vidrio presentan bajas propiedades mientras que la madera prácticamente nada.

Material	E (MSI)	D	E/D
Madera	1.4	0.02	70
Titanio-6ai-4v	16	0.17	94
Acero sac-1010	30	0.3	100
Acero sac-4340	30	0.3	100
Aluminio 2024	10.6	0.1	106
Magnesio az31b	6.5	0.06	108
Super aleaciones de níquel	33.6	0.3	112
Fibra de vidrio e10.5		0.09	117
Fibra de vidrio s-2	12.5	0.09	139
Fibra aramid	16.3	0.05	326
Fibra de carbono hs	32	0.07	157
Fibra de carbono hm	100	0.07	1429

Tabla 9. Módulo de elasticidad y rigidez de varios materiales.

Desde el punto de vista matemático el módulo de Young es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación en la región elástica.

2.4.3 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.

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 asentos 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 continúa 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.

2.5 APLICACIONES DE RECUBRIMIENTO TERMO- SPRAY.

La invención de la técnica del Thermal Spray (TS) data desde 1912 y la primera proyección de metal sobre un sustrato para formar un recubrimiento es de 1942. El desarrollo de otras variantes de proyección es ulterior a estas fechas y se expandirá oportunamente. Se designa TS un grupo de procesos para conseguir recubrimientos de materiales metálicos o no metálicos sobre un sustrato. Entendiendo por recubrimiento a toda modificación a la física o química de una superficie sobre el cual se deposita el primero. El material de aporte es finamente dividido desde su forma original (alambre, electrodo, polvo, etc.) y es depositado en una variedad de condiciones sobre el material base. Los recubrimientos están formados por materiales fundidos o semifundidos en forma de finas partículas que son aceleradas en forma de gotas. Las gotas golpean al sustrato y se expande para formar una partícula chata de material solidificado o “splat”. Las gotas subsiguientes impactan e interactúan con las adyacentes proyectadas formando una capa continua de material o recubrimiento. Los nuevos avances en la tecnología del TS han provisto de recubrimientos resistentes al calor para aplicaciones sobre superficies de cilindros en motores construidos con aluminio y/o magnesio destinados a aplicaciones automotrices. Distintas pruebas sobre motores diésel, a gasolina y en piezas de transmisión de potencia, que necesitan bajos coeficientes de rozamiento, han validado su uso en la industria automotriz. El hierro con grafito laminar ha sido el material más usado en bloques de motores debido a su bajo costo, buenas propiedades tribológicas y excelentes propiedades mecánicas.

Variantes de la técnica thermal spray.- Las variantes de esta familia de procesos de TS, están determinadas por las fuentes de energía utilizadas para conformar el recubrimiento como producto final. La siguiente Tabla muestra la clasificación referida:

Tipo	Energía Cinética	Combustión	Plasma	Arco eléctrico
Baja Velocidad		Llama/ Alambre	V.P.S. (Vacuum Plasma Spray) o	En Atmosfera Controlada.
			L.P.P.S (Low Pressure Plasma Spray).	
		Llama/ Polvo		En Atmosfera Inerte.
Alta Velocidad	Cold Spray	H.V.O.F. (High Velocity Oxy-Fuel Spray).	A.P.S. (Air Plasma Spray)	
		D.G.S.(Detonation-Gun Spray)	C.A.P.S. (Controlled-Atmosphere Plasma Spray)	

Tabla 10.- Distintas técnicas de TS agrupadas de acuerdo al tipo de fuente de energía empleado.

El concepto básico que abarca a esta familia de procesos es el rociado de partículas del recubrimiento (por flama, plasma o arco eléctrico) a través de una boquilla especialmente diseñada para cada técnica. Y obtener con esto un acabado superficial óptimo según el requerimiento. La Figura 6 esquematiza este proceso: el material del recubrimiento es inyectando (antes o después de la salida de los gases en la boquilla del equipo), se funde total o parcialmente, y las partículas producidas son proyectadas hacia la superficie de la pieza a

recubrir. También estos procesos se pueden realizar en condiciones de atmósfera controlada y/o en vacío, dando como resultado recubrimientos de características superiores a las obtenidas por rociado en aire. Estas condiciones controladas se emplean para mantener la pureza de materiales de recubrimiento que son altamente reactivos o para proteger las piezas que se oxidan o contaminan con facilidad. 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.

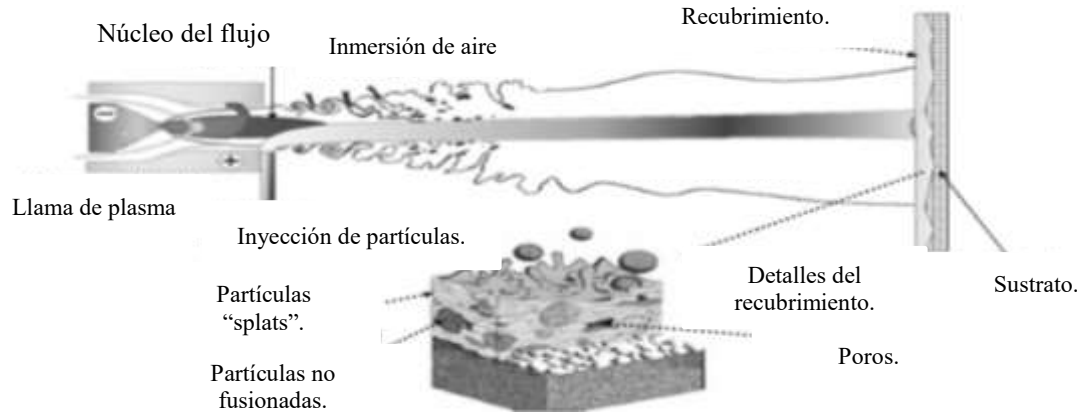


Figura 6. Esquema básico del proceso de TS.

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. Luego del impacto sobre el material base, la microestructura del recubrimiento dependerá de factores más complejos, pero su forma será siempre orientada en laminillas que se encuentran paralelas al sustrato (Figura 7). 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.

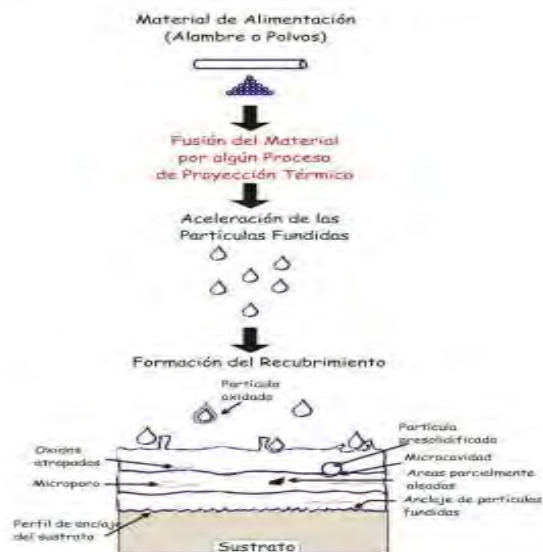


Figura 7. Proceso de formación de un recubrimiento.

La textura y rugosidad final determinan la capacidad al desgaste que tendrá el recubrimiento, y depende del tipo de proceso, del tamaño de partícula proyectada y de la alimentación del material en el diseño de la boquilla.

La pulverización térmica o termo spray es un término genérico para un grupo de procesos de recubrimiento, donde el recubrimiento se deposita sobre un sustrato preparado mediante la aplicación de una corriente de partículas, metálico o no metálico, los cuales se aplanan formando así un tipo de plaqueta con varias capas de splats que forman el recubrimiento. Al momento del impacto se forma un enlace con la superficie, las partículas posteriores causan una acumulación de revestimiento para llegar a su espesor final. Los procesos de proyección alternativas emplean inyección de polvo, ya sea axial o radial en con un alto flujo de energía el cual es el resultante de la combustión o de corrientes de gas de alta velocidad (spray frío). Los espesores de este recubrimiento son entre 50 μm y unos pocos mm.

El proceso consiste en la generación de un flujo energético de gas (gases calientes o fríos) con un soplete o pistola (descrito en detalle más adelante) apropiada, por lo general este tipo de corriente fluye tanto en el medio ambiente, aire libre y a veces en una atmósfera controlada. Sopletes de pulverización térmica o pistolas de termo spray son dispositivos para la alimentación, la aceleración y el calentamiento y dirigen el flujo de un material de pulverización térmica hacia el sustrato. El material de alimentación se introduce en forma de polvo, alambre, varilla o alambre. Los alambres, varillas siguen continuamente actualizándose (en la mayoría de los casos axial) para llegar a una velocidad que permita a la pistola para fundir las puntas del materia a depositar. El material fundido se atomiza y generalmente es acelerado por un gas auxiliar alimentado a la pistola de pulverización, y sólo las partículas fundidas se aceleran hacia el sustrato. Este no es el caso cuando se utilizan polvos como material de alimentación. Los polvos se introducen en el flujo de gases a altas temperaturas, los polvos se aceleran pero no necesariamente tienen que estar fundidos antes de impactar sobre el sustrato (dependiendo de su tamaño y de las trayectorias). Cuando se aplica termo spray con un gas frío, partículas dúctiles se adhieren al sustrato y luego a la capa depositada previamente si su velocidad está por encima de una velocidad crítica, que algunas veces no puede ser alcanzado por todas las partículas de un polvo con una distribución de tamaño dado. El tiempo de permanencia de las partículas en el gas del aerosol con temperaturas que está por debajo de 600 °C, son muy cortos (unas pocas decenas a unos pocos cientos de μm), el contenido de óxido de estos recubrimientos es casi parecida a la de las partículas pulverizadas.

La mayoría de los procesos de pulverización o termo spray operan en el aire como la atmósfera circundante, que resulta en cierta oxidación de recubrimiento, que está aumentando dramáticamente con la temperatura de las partículas pulverizadas. Esta oxidación se puede suprimir, o al menos reducir significativamente, si la pulverización se lleva a cabo en una atmósfera controlada, un vacío suave o se puede lograr con el proceso de pulverización en frío. Por otra parte, para los recubrimientos de plasma pulverizado de metales o aleaciones, con vacío suave permite mantener el sustrato a una temperatura alta para promover la buena adherencia mediante unión por difusión, siempre que el sustrato se ha limpiado de su capa de óxido, por ejemplo, por un arco inverso. Sin embargo, el costo de la atmósfera controlada o equipo de vacío suave es significativamente más alto en comparación con el equipo diseñado para pulverizar en un ambiente al aire libre. Además del aumento de los costos, el volumen finito de contención del recipiente de contención limita el tamaño de las piezas que se pueden pulverizar. La entalpía del flujo de gas caliente se puede ajustar para la pulverización de metales, aleaciones, cerámica sinterizada o cerámica. Cualquiera que sea proceso pulverización tendrá un buen recubrimiento en toda la línea de visión del proceso. Así únicas partes que la pistola o soplete pueden "ver" serán recubiertas. Por ejemplo, es imposible para recubrir pequeñas cavidades profundas en las que la pistola no puede encajar.

Recientemente nuevos procesos basados en la inyección de un líquido en el proceso de termo spray a chorro se han sido desarrollados. El líquido es o bien una solución de diferentes precursores (mezcla de nitratos en el agua / etanol, mezclas de nitratos y de metal-orgánicos en isopropanol, citrato de mezclado / disolución de nitrato, etc.), o una suspensión de partículas nanométricas o submicrométricas. Finamente los recubrimientos estructurados o nanoestructurados se obtienen con espesores entre 5 y 100 μm , reduciendo la brecha entre la pulverización convencional ($> 50 \mu\text{m}$) y procesos de PVD ($< \text{pocas } \mu\text{m}$). En la siguiente Tabla se resumen las diferentes propiedades de los principales métodos de recubrimiento, los cuales complementarios y no son competitivos.

Características	Electro/recubrimiento electrolítico.	CVD	PVD	Termo spray.
Costo del equipo	Bajo	Moderado	Moderadamente alto	Moderadamente alto
Costo de operación	Bajo	Moderadamente bajo	Moderadamente alto	Alto o bajo
Entorno del proceso	Soluciones acuosas	Atmosfera media o al vacío	Alto vacío	Atmosfera para un medio vacío
Geometría del revestimiento	omnidireccional	Omnidireccional	Line a de visión	Line a de visión
Espesor del revestimiento	Espesor moderado $10 \mu m - mm$	Delgado a grueso $10 \mu m - mm$	Muy delgado o moderadamente delgado	Espesores de $50 \mu m - cm$
Temperatura del Sustrato	Bajo	Moderadamente alto	Bajo	Moderadamente bajo
Adherencia	Unión mecánica moderada a muy buena unión química.	Muy buena unión química a excelente unión por difusión	Moderada unión mecánica a buena unión química.	Buena unión mecánica.
Acabado de la superficie	Moderadamente áspero a pulido	Liso a pulido	Liso a altamente pulido	Grueso a liso
Materiales para recubrimiento	Metales	Metales, cerámicos y polímeros	Metales, cerámicos y polímeros	Metales, cerámicos, cerámicos sinterizados y polímeros

Tabla 11. Características generales de los principales métodos de recubrimiento.

2.5.1 PROCESO DE LLAMA/ALAMBRE.

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 (Figura 8). Las tasas de proyectado están en el rango de $0.5 - 9 \text{ kg/h}$ para el acero inoxidable. Los materiales de bajo punto de fusión poseen una mayor tasa de deposición (el zinc y aleaciones de estaño). Las temperaturas de los sustratos están en el orden de los 95 a 205 °C.

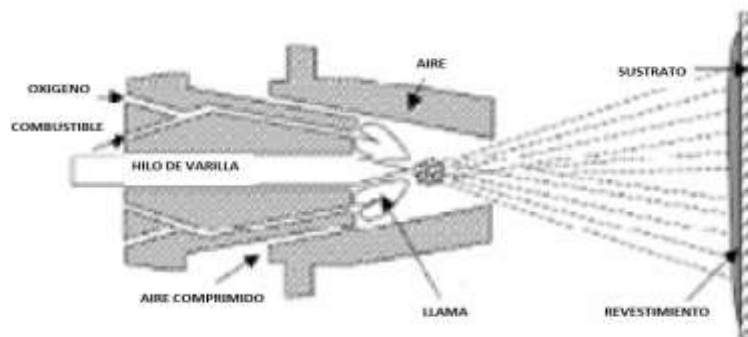


Figura 8. Proceso de rociado por llama- alambre.

2.5.2 PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN.

Tratamientos electroquímicos como por ejemplo en la galvanoplastia un revestimiento se electrodeposita sobre un electrodo (la parte a recubrir), que generalmente es el cátodo. Los metales y aleaciones se depositan de esa manera, excepto aluminio y titanio. En el chapado de cepillo, se utiliza en este tipo de proceso electroquímico. Para el aluminio anodizado y sus aleaciones, en donde una capa de óxido se desarrolla en su superficie, los materiales son los ánodos en una solución electrolítica acuosa.

Los tratamientos químicos: En la electrodeposición el material es depositado este se reduce a partir de su estado iónico en solución por medio de un agente químico reductor, en lugar de la corriente eléctrica. En fosfato, una superficie de metal reacciona con una solución acuosa de una sal de metal pesado, principalmente fosfato, más ácido fosfórico libre, para producir una capa adherente de fosfatos complejos insolubles. En los recubrimientos por inmersión en caliente las piezas a revestir se sumergen en un baño fundido de material de revestimiento. Los metales utilizados, son generalmente para proteger aceros de la corrosión y que tienen bajo punto de fusión, tales como zinc, aleaciones de zinc, aluminio, aleaciones de aluminio, y aleaciones de plomo-estaño. El zinc es el material más utilizado en una operación llamada galvanización. Los revestimientos metálicos obtenidos con estas técnicas tienen espesores de entre aproximadamente 10 μm y 1 mm. Sus ventajas son que son omnidireccionales (todas las superficies expuestas al líquido se recubren, incluyendo agujeros ciegos donde el líquido puede penetrar) el sustrato se mantiene a una temperatura relativamente baja y su coste de equipo y de funcionamiento es baja.

2.5.3 DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR (CVP).

Los revestimientos se obtienen desde el estado gaseoso o de vapor. Los resultados de estos revestimientos se deben a la descomposición de cloruros, fluoruros, bromuros, yoduros, hidrocarburos, fósforo, y complejos de amoníaco. El precursor gaseoso se descompone térmicamente para producir el recubrimiento sobre la superficie del componente, que debe ser a altas temperaturas (800 -1,100 °C), lo que limita la elección del material de sustrato. Cuando se producen reacciones químicas exotérmicas a temperaturas inferiores a la temperatura de cambio de fase de la superficie, la temperatura de la superficie del sustrato se reduce correspondientemente. El proceso, que trabaja a presiones entre 13 y 100 kPa, y es omnidireccional la mezcla gaseosa puede penetrar fácilmente en los agujeros ciegos y depositar el recubrimiento, incluso en las superficies internas de cuerpos porosos. Al utilizar precursores organometálicos la temperatura de la pieza se baja (400-600 °C) y el intervalo de presión varía de 0.13 y 10⁵ Pa. Con la deposición química de vapor (CVD), metales, aleaciones, intermetálicos, silicio de boro, boruros, siliciuros, carburos, óxidos y sulfuros se depositan. El control de la microestructura de recubrimiento depende de la temperatura y la sobresaturación (relación de la concentración local y efectiva del material depositado a su concentración de equilibrio). Con la alta temperatura del sustrato, la difusión entre el recubrimiento y el sustrato se produce fácilmente resultando en una buena unión por difusión. Para pequeñas partes la capa es aproximadamente de 3 μm a 3 mm y se utiliza el fluidizado para estas capas. La densidad aparente de la capa se puede variar entre 1,800 y 19,000 kg/m^3 y se puede ajustar fácilmente a la de las piezas a tratar los gases reactivos circulan en la capa y se mantiene en un horno a la temperatura adecuada para la CVD produzca la reacción. Para trabajar a temperaturas más bajas (25-400 °C), la descomposición sustrato se consigue con plasma (Plasma mejorada-deposición de vapor químico PECVD o asistida por plasma de deposición de vapor químico PECVD [9, 10]. Permite el uso de todos los tipos de sustratos, incluyendo polímeros y las tasas de deposición son más altas que los de CVD térmico. La energía necesaria para la activación del gas se suministra por medio de plasmas es producido por cualquiera tipo de descargas luminiscentes (voltaje de CC, tensión de corriente continua pulsada, radiofrecuencia o microondas). Por ejemplo, es posible conseguir recubrimientos duros de carbono amorfo (DLC: recubrimientos de tipo diamante) a temperaturas inferiores a 200 °C con descargas de impulsos o de RF donde se introduce acetileno. Por desgracia, la presión está en el rango de 0.13 Pa y 13 kPa, reduciendo así drásticamente la velocidad de deposición y restringir el uso de películas delgadas (por debajo de 50 μm). Además, el proceso se convierte en monodireccional. Este proceso permite la consecución de revestimientos con arquitecturas bastante complejas. Incluso si es posible lograr recubrimientos con un grosor bastante considerable, generalmente espesores de recubrimiento CVD están por debajo de 50 μm .

2.5.4 DEPOSICIÓN FÍSICA DE VAPOR (PVD).

Deposición física de vapor incluye la evaporación, pulverización y recubrimiento iónico. Prácticamente cualquier material sólido (excepto ciertos polímeros) se puede depositar sobre cualquier material sólido. Es un método el cual procesos se operan a presiones más bajas (1.3×10^{-6} a 13 Pa), lo que implica que se depositan recubrimientos delgados (típicamente por debajo de 1 μm) con una bastante baja tasa de deposición. Este procedimiento comprende lo siguiente:

En la evaporación, donde los vapores producidos para el calentamiento de un sólido por diferentes medios (resistencia directa, sólo para metales, láser, haz de electrones, para los metales y materiales cerámicos, descarga de arco para metales) se condensa casi después de la colisión en la superficie del sustrato pero no en la línea de transportación. Principalmente metales o aleaciones se evaporan pero gases reactivos en la atmósfera circundante permiten la producción de carburos, nitruros y óxidos. El recubrimiento formado sobre una superficie plana tiene un espesor no homogéneo debido a la fracción de la masa total depositada depende de radio y los ángulos de la localización de la superficie (ley del coseno). Para lograr el espesor homogéneo varias fuentes deben utilizarse o el sustrato sometido a un movimiento oscilatorio. La energía cinética de las partículas que impactan el sustrato y después en el recubrimiento es baja (0.1-0.5 eV) dando como resultado relativamente una pobre adherencia del recubrimiento. Estos recubrimientos se utilizan principalmente por sus propiedades ópticas y para la decoración. La pulverización catódica maneja presiones entre 0.13 y 13 Pa donde la energía de las partículas expulsadas hacia el objetivo e impactando el sustrato puede llegar a cientos de eV o hasta 1,000 eV lo que provoca la creación de revestimientos adherentes y densos. La pulverización catódica con plasma se consigue con moléculas excitadas o átomos o iones. Con el proceso de diodo, los iones de un gas pesado e inerte como el argón, tienen un impacto con energías de hasta 1,000 eV sobre el sustrato. El material pulverizado depósitos de reflujo sobre el sustrato, el cual está conectado o no a la terminal positiva. Los materiales no conductores, tales como carburos refractarios, nitruros y óxidos no pueden ser depositados por pulverización catódica al utilizar corriente directa (CD). Utilizando pulverización catódica con corriente directa (CD) o la radio frecuencia (rf) pulverización catódica deben utilizarse para recubrimientos no conductores.

La densidad de los depósitos de la pulverización depende de la temperatura del sustrato y la velocidad de deposición. La velocidad de deposición es más bien baja. La introducción de un campo magnético por bajo del objetivo intensifica bombardeo iónico mediante el aumento de la densidad de electrones y por lo tanto que de los iones del campo magnético es paralelo al área de la superficie del sustrato: pulverización catódica con magnetron. PVD también se puede utilizar cuando se pulveriza el objetivo de metal y las partículas resultantes reacciona con el gas correspondiente para formar la cerámica (por ejemplo, partículas de Aluminio provenientes de la pulverización catódica reaccionar con el oxígeno). Para mejorar la reacción, una bobina de RF se coloca cerca para la reacción de los gases de reacción a la inyección hacia el sustrato. Sin embargo frecuencias de colisión deben aumentarse para promover reacciones y para eso hay que aumentar la presión de la cámara (0.1-1 Pa). Para aumentar la velocidad de deposición se utilizan arcos eléctricos. Un arco de interrupción, un flash láser o una alta tensión de arco de ignición inicia el arco catódico (PVD) entre el cátodo (el material a evaporar) y el ánodo (la pared de la cámara en muchos casos). Una corriente de electrones (unas pocas decenas a cientos de amperes) y se generan electricidad a través del cátodo lo que provoca el derretimiento de numerosas partículas del cátodo sobre la superficie catódica. El proceso PVD por arco catódico se utiliza para la evaporación de metales tales como el Ti, Al, Cr y sus aleaciones, sino también de carbono para recubrimientos de DLC duras. La adición de gases reactivos permite la deposición de nitruros, carburos. Esta técnica es cada vez más utilizados en la industria para cubrir todo tipo de herramientas, de componentes de automóviles como los motores, componentes hidráulicos, para herramientas, instrumentos médicos, de álabes de la turbina.

El recubrimiento iónico consta de una fuente de iones con un sistema de extracción y aceleración de los iones. Los iones se extraen del plasma por rejillas de un extractor mientras que en las redes del supresor impiden electrones escapen. Los iones extraídos que se encuentran a la deriva de la fuente de plasma a través de un espacio libre para llegar al sustrato. El flujo de partículas de alta intensidad eléctrica produce cambios en la región interracial las propiedades interfaciales, en comparación con la deposición no bombardeada. La presión de trabajo es de alrededor de 1 Pa, la atmósfera circundante es generalmente de argón, y el potencial negativo de 2-5 kV es aplicado a la pieza de trabajo que se convierte en el cátodo de una descarga luminiscente

formado entre ellas y las partes puestas a tierra de la instalación. El bombardeo de iones de argón limpia inicialmente la superficie y continúa limpiando, mientras que el material de revestimiento se evapora en el plasma y se deposita sobre el sustrato. En comparación con pulverización catódica este bombardeo continuo aumenta la nucleación y mejora la adherencia. Espesor de revestimiento de PVD suele ser inferior a $5 \mu m$.

2.5.5 DEPOSICIÓN POR PULSOS LASER (PLD).

La deposición por pulsos laser (PLD) utiliza un rayo láser de alta potencia (en su mayoría un láser excimer $200 < \lambda < 400 \text{ nm}$) enfocado periódicamente sobre un material. Los pulsos de láser consiste de unas pocas decenas de ns y frecuencias de unas pocas decenas de Hz. Localmente el material se calienta por la energía láser absorbida que se evapora o sublima si el láser flujo es suficiente, el gas se transforma en un plasma denso dentro de una columna de gas de material evaporado. El resultado de esto son átomos, electrones e iones, estos son conducidos lejos del objetivo a altas velocidades en vacío en condiciones controladas estos golpean la superficie del sustrato lo cual da paso a la nucleación y crecimiento de películas delgadas con la misma composición química que el material evaporado. Además, los gases pueden ser introducidos dentro de la cámara de reacción para reaccionar con los átomos o moléculas dentro de la columna de gas y así modificar la composición química del material depositado sobre la superficie del sustrato. Como ya se ha señalado para el PVD el aumento de la presión de deposición con fines para expansión de la columna permitiendo así una deposición homogénea sobre varios cm^2 en la superficie del sustrato. Esta línea de proceso tiene un ángulo de cono aproximadamente 10° por encima del punto del impacto del láser. Así, el proceso no está bien adaptado para grandes superficies y se limita a la electrónica o aplicaciones ópticas con espesores por debajo de unas pocas μm .

2.5.6 RANGO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LOS PROCESOS DE ROCIADO.

El gráfico de la Figura 9 muestra que los procesos por arco (ARC) y los de rociado por flama (FS) imprimen velocidades bajas a las partículas proyectadas a temperaturas medias entre $2000 - 4000^\circ C$. En tanto las técnicas de temperatura más alta alcanzada ($8000 - 15000^\circ C$) son los que provocan el estado de la materia denominado plasma, ya sea en aire (APS) como en vacío (VPS), imprimiendo velocidades medias en el orden de $200 - 600 \text{ m/s}$.

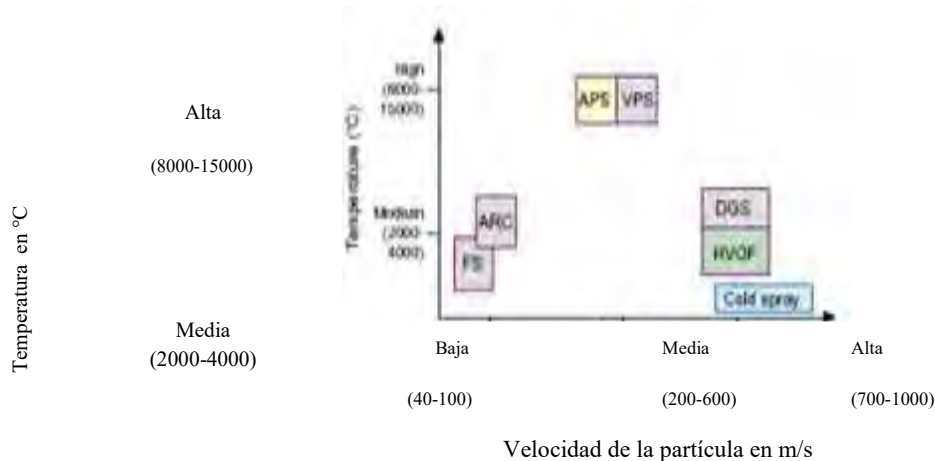


Figura 9. Tipo de rangos de temperatura y velocidad de los procesos de TS.

Existen distintos tipos de porosidad en los recubrimientos de acuerdo a su origen como se muestra en la figura 10.

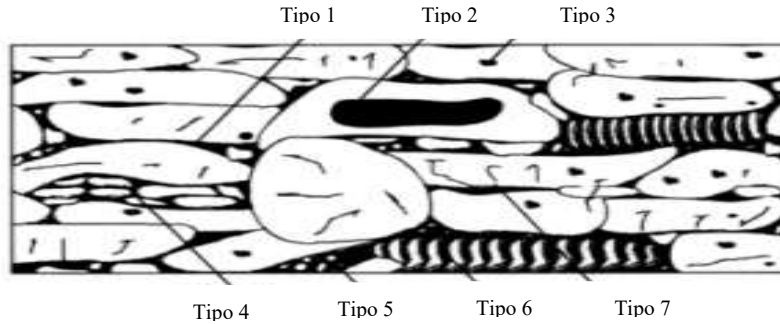


Figura 10. Tipos de porosidad de acuerdo a su origen.

La porosidad Tipo 1 es originada por apilamiento entre las laminillas y depende del tamaño de las partículas rociadas y de la distribución de rociado. La Tipo 2 también es entre laminillas pero en este caso es originada por gas atrapado entre ellas y depende de la turbulencia del flujo de rociado. El poro Tipo 3 está ubicado dentro del splat y es debido a disolución de gases en el metal de aporte fundido durante el proceso de enfriamiento. La gran velocidad de la partícula provoca a veces una fragmentación o desintegración en el instante del impacto, esto origina el Tipo 4 de porosidad, y no alcanza a formarse la típica hojuela característica del proceso de rociado. Las altas temperaturas involucradas en los procesos expuestos al aire, originan en las partículas procesos de evaporación y súbita condensación al impactar sobre la superficie fría del sustrato esto hace que se forme un poro del Tipo 5, con polvos residuales de distintos orígenes. El enfriamiento durante la solidificación de la partícula del revestimiento, después del proceso de condensación, provoca el Tipo 6 de porosidad. Por último, las tensiones, de tracción o de compresión en el film pueden originar microgrietas que dan origen a la especie de porosidad Tipo 7, que ocurre en recubrimientos compuestos.

El primer tipo de falla es mostrado en la figura 11 y ocurre por un desprendimiento del recubrimiento, situación que no sucede con los otros tipos de fallas, en los cuales existen rupturas de recubrimiento o sustrato. La adherencia no es solo de índole mecánica sino química, razón por la cual es fundamental la limpieza superficial del material a recubrir de acuerdo a distintos métodos de preparación el control de las distancias y ángulo de rociado. Los principales organismos internacionales que han generado normas o procedimientos para llevar a adelante tales procesos son: el Steel Structures Painting Council (SSPC); y la National Association of Corrosion Engineers (NACE).

Tipo de falla	Esquema
Falla de Adhesión	
Falla Cohesiva	
Falla del Sustrato	

Figura 11. Tipos de falla de un recubrimiento.

En particular la adhesión de los recubrimientos por TS deben ser evaluados de acuerdo con la especificación ASTM D 4541 con un total de tres pruebas dentro de un área de 100 cm² (cuando el tamaño de la pieza lo permita) y el resultado promedio de las tres mediciones debe ser reportado

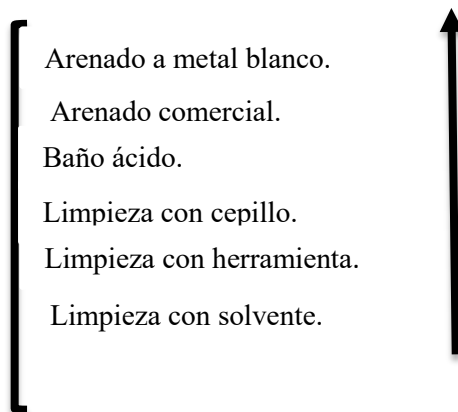


Figura 12. Métodos de preparación superficial para los procesos de TS.

2.5.7 DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE RECUBRIMIENTO POR PULVERIZACIÓN TÉRMICA O TERMO SPRAY.

La pulverización térmica se divide primero de acuerdo con la forma en que la energía o calor se proporciona para fundir el material o darle suficiente plasticidad para permitir la formación del recubrimiento, es decir, la parte "térmica" de pulverización térmica. Esta energía o calor es proporcionado por la combustión, por la disipación de plasma la creación de energía eléctrica, o en el caso de pulverización en frío por los gases de alta presión. Un segundo nivel para dividir los procesos es de acuerdo a la forma en la que se introduce el material de revestimiento, en forma de polvo, alambres o varillas. Los procesos se pueden dividir de acuerdo con el consumo de energía y la velocidad de deposición. La Figura 13 ofrece una visión general de los diferentes procesos de proyección térmica, sin incluir aerosol frío. Los procedimientos de pulverización de combustión son: La llama pulverización de polvos, alambres o varillas.

1. La alta velocidad de oxi-combustible (HVOF) o el combustible de aire de alta velocidad (HVAF) el cual trabaja con mayores presiones y altas corrientes y una boquilla tipo soplete permitiendo el logro de velocidades supersónicas, utilizando la mayoría de los polvos.
2. El proceso de proyección por detonación donde una mezcla explosiva se enciende con corrientes muy altas de una boquilla tipo soplete para crear una detonación con la alta presión y temperatura para la calefacción y la aceleración de los polvos.

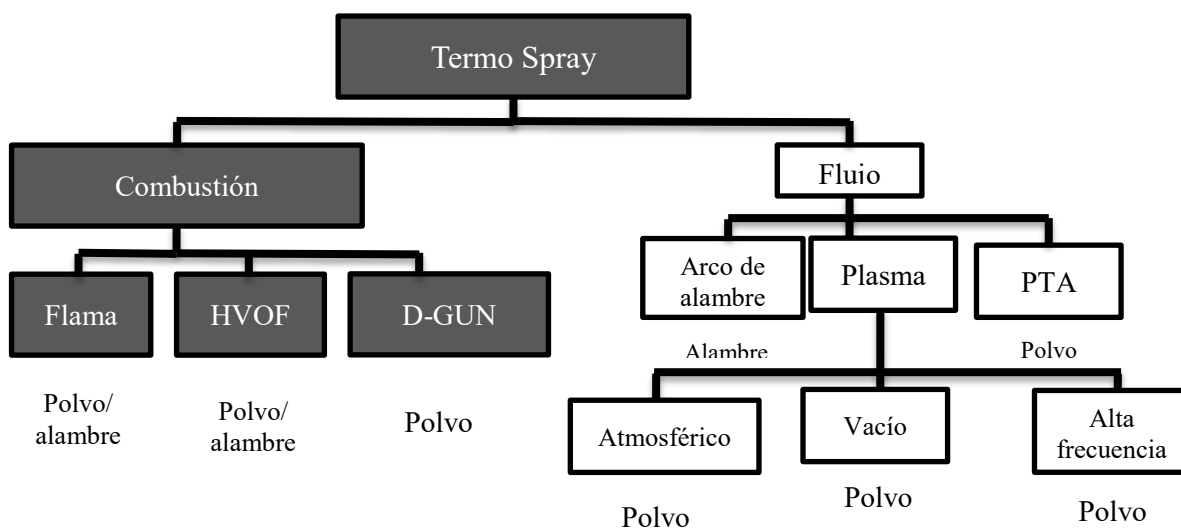


Figura 13. Clasificación de las tecnologías del termo spray.

Los inconvenientes de cualquier proceso de combustión de pulverización son que la temperatura más alta de gas para fundir el material de pulverización está dada por la temperatura de la llama adiabática de la mezcla de gas de combustión, reduciendo su valor para la pulverización de cerámica de alta temperatura. También, el medio ambiente de los productos del proceso de combustión puede conducir a reacciones químicas del material pulverizado con estos gases. Aun así, la pulverización de llama es el proceso de revestimiento por pulverización más utilizado debido a su economía.

En los procesos basados en plasma el gas se calienta por una descarga eléctrica, es decir, una descarga de arco o una descarga de radiofrecuencia. Los procesos basados en plasma son la pulverización por plasma, pulverización de arco de alambre, y el plasma de arco transferido por deposición (PTA), el último proceso siendo también parte de la familia de recubrimiento con soldadura de los procesos de recubrimiento. El uso de alambre se enumera por separado como un proceso diferente porque el material de fusión se lleva a cabo directamente por un arco en lugar de en el chorro de plasma. La pulverización de plasma es probablemente el más versátil de todos los procesos de proyección térmica porque hay pocas limitaciones en los materiales que se pueden pulverizar y pocas limitaciones en el material, el tamaño y forma del sustrato.

La calidad del recubrimiento es, en general, mayor que el obtenido con la llama de pulverización. Mientras que la mayoría de los procesos de pulverización por plasma agota el chorro de plasma en el medio ambiente es decir al aire libre (pulverización de plasma a presión atmosférica o APS), la calidad del recubrimiento, es decir, la densidad, uniformidad y reproducibilidad se puede mejorar mediante la pulverización en un ambiente controlado, es decir, una cámara de atmósfera controlada o en un entorno de baja presión (presión baja proyección de plasma o de vacío pulverización de plasma, LPPS o VPS), haciendo que el proceso significativamente más caro. En la pulverización de arco de alambre, un arco eléctrico se encuentra entre dos alambres los cuales se está derritiendo las puntas y una corriente de gas a alta velocidad está impulsando las gotas hacia el sustrato. Este proceso es más económico debido a la utilización de alambres en lugar de polvos, pero la elección de los materiales es limitada porque los alambres tienen que ser eléctricamente conductor y dúctil. Los recubrimientos por lo general tienen una mayor porosidad que los de los otros procesos basados en plasma. Los recubrimientos por lo general tienen una mayor porosidad que los de los otros procesos basados en plasma. Una variante del proceso de pulverización de plasma es el de alta frecuencia o de radio frecuencia (RF), el proceso de pulverización de plasma, en donde la descarga eléctrica no es un arco de corriente continua, pero una alta frecuencia (> 400 kHz) de descarga, ofrece un volumen de plasma más grande y tiempos de estancia más largos de las partículas en el plasma adecuados para la fusión de partículas de tamaño más grande. El proceso de deposición PTA es diferente de los otros procesos de proyección térmica debido a que el sustrato sirve como un electrodo, generalmente el ánodo, del arco que calienta los gases de proceso y el material de pulverización. Esta característica permite la obtención de una excelente adherencia entre el sustrato y el recubrimiento y densidades muy altas de galvanoplastia. La deposición de arco transferido también puede utilizar alambre como el material de partida; Sin embargo, en este caso el proceso es esencialmente un proceso de superposición de soldadura. Las propiedades de revestimiento se determinan por el material de revestimiento y la forma en la que se proporciona y por un gran número de parámetros de proceso. Además de los parámetros que caracterizan la condición del sustrato, son los parámetros que controlan la partícula como la temperatura y velocidad en el impacto que generalmente tiene un impacto más fuerte sobre las características del revestimiento. Estas características de las partículas dependen principalmente de las temperaturas de los gases y velocidades. Figura 14 muestra un diagrama velocidad-temperatura de una gama de valores que uno puede esperar de los gases calentados por los diferentes procesos de proyección térmica. Uno tiene que tener en cuenta que (1) materiales diferentes requieren diferentes condiciones de deposición, (2) las propiedades de revestimiento específico (de alta densidad o porosidad deseada) puede requerir características específicas de velocidad de partículas-temperatura, (3) los flujos de calor al sustrato varía para los diferentes métodos de recubrimiento y para algunos sustratos el flujo de calor tiene que ser minimizados, (4) durante el precalentamiento y control de la temperatura durante la pulverización sustrato influye fuertemente en las propiedades del revestimiento, en particular, las tensiones residuales, y (5) con frecuencia existe una compensación entre la calidad de recubrimiento y la economía del proceso.

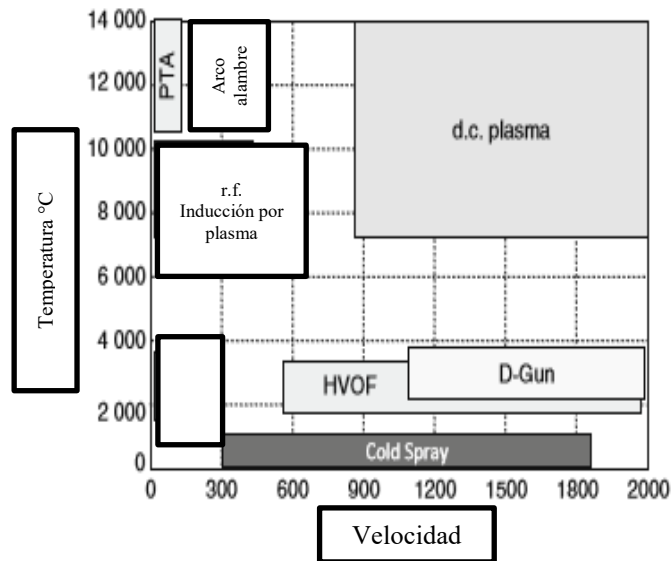


Figura 14. Obtención de las temperaturas de los gases y velocidades con diferentes sistemas de termo spray.

2.5.8 PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS.

La motivación de piezas revestimientos estructurales se puede resumir en las siguientes necesidades:

1. Mejorar el rendimiento funcional mediante, por ejemplo, permitiendo la exposición de temperatura superior a través de la utilización de revestimientos de barrera térmica,
2. Mejorar la vida de los componentes, reduciendo el desgaste debido a la abrasión, erosión y corrosión,
3. Extender la vida de los componentes mediante la reconstrucción de la parte desgastada a sus dimensiones originales evitando la necesidad de sustituir todo el componente, por ejemplo, un eje o eje.
4. Reducir el coste de los componentes mediante la mejora de la funcionalidad de un material de bajo coste con un recubrimiento caro.

En cada uno de estos usos de tecnologías de recubrimiento no debe haber ningún mecanizado o mínima requerida de la parte recubierta.

Las tecnologías de recubrimiento se pueden dividir a grandes rasgos en la deposición de películas delgadas y deposición de películas gruesas. Películas delgadas con un grosor inferior a $20 \mu m$ ofrecen una excelente mejora de las propiedades de la superficie.

Deposición química de vapor (CVD) o deposición física de vapor (PVD) pueden proporcionar superficies con dureza sin igual y resistencia a la corrosión. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías de película delgada requieren un entorno de presión reducida y, por lo tanto, son más caros e imponen un límite en el tamaño y la forma del sustrato. Las excepciones son las películas de modificación de superficie súper delgadas de grandes láminas de polímero utilizando presión atmosférica descargas de no equilibrio. Las películas gruesas tienen un espesor $> 30 \mu m$, hasta varios milímetros. Ellos se requieren cuando el rendimiento funcional depende del espesor de capa, por ejemplo, en revestimientos de barrera térmica, cuando fuertes condiciones de erosión y corrosión resultan en desgaste y la vida de los componentes depende del espesor de la capa, o cuando se están restaurando las dimensiones originales de las piezas desgastadas.

Los métodos de deposición de película gruesas incluyen chapado electroquímico, soldadura, recubrimientos de soldadura y proyección térmica. Cada uno de estos métodos ofrece ciertas ventajas y tiene ciertas

limitaciones. Los métodos químicos húmedos sufren de riesgos ambientales; de soldadura fuerte y soldadura superposiciones tienen limitaciones con respecto a los materiales que pueden ser depositados y con respecto a la forma del sustrato, y pulverización térmica pueden requerir un tratamiento después de alcanzar la densidad completa o eliminar toda la porosidad abierta.

Un sistema de proyección térmica puede ser entendido como un conjunto de cinco subsistemas:

1. La alta energía, la generación de chorro de alta velocidad, incluyendo la flama, fuente de alimentación, suministro de gas, y por supuesto los controles asociados.
2. La preparación de material de recubrimiento, es decir, la distribución del tamaño de polvo y de su morfología, su inyección en la corriente de gas de alta energía, y su transformación en una corriente de gotas de recubrimiento fundidas.
3. La atmósfera circundante, es decir, el aire atmosférico, atmósfera controlada (incluyendo control de la humedad), de baja presión, etc.
4. El material de sustrato y la preparación de la superficie de sustrato.
5. El equipo mecánico para controlar el movimiento de la antorcha y el sustrato respecto a la otra. Es la comprensión y el control de la interacción entre estos subsistemas que son necesarios para la implementación de procesos de recubrimiento fiables.

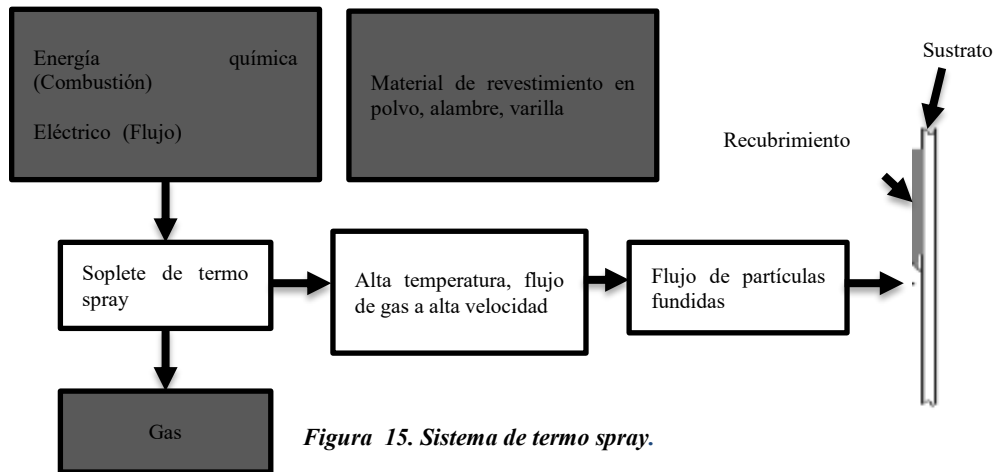


Figura 15. Sistema de termo spray.

2.5.9 AVANCES TECNOLOGICOS DEL PROCESO DE TERMO SPRAY.

Los requisitos para los nuevos materiales en las industrias aeronáutica y espacial dieron lugar a un rápido desarrollo de la tecnología de proyección térmica en la década de 1960. Desde entonces se ha producido una aceleración del ritmo de la evolución de los dispositivos de revestimiento por pulverización térmica, procesos, materiales, el diagnóstico de procesos, controles, y nuevas aplicaciones. La década de 1970 se vio el desarrollo de baja presión de pulverización de plasma y de proyección de plasma de inducción, de HVOF, y de muchas mejoras en los procesos. Se ha adoptado una tendencia a ampliar las condiciones de proceso a altas velocidades de las partículas y las temperaturas más bajas de partículas, a través de la introducción de HVAC y, finalmente, la de pulverización en frío. El uso de revestimientos se extendió a más y más industrias, y el aumento de los requisitos para la mejora de la fiabilidad del proceso dio lugar a un aumento de las actividades de investigación y desarrollo.

Tecnología de proyección térmica se convirtió en un campo verdaderamente interdisciplinario, con la investigación en el diagnóstico del plasma, el modelado de dinámica de fluidos, los nuevos desarrollos en la descripción de la transferencia calor del plasma, el conocimiento de los fenómenos transitorios (inestabilidades), diagnósticos para la descripción de las propiedades en el vuelo de las partículas individuales, y por último la descripción de la formación de recubrimiento. Esta investigación estimuló el desarrollo de sopletes más fuertes, así como sensores, que son capaces de caracterizar propiedades de las

partículas y del sustrato. Estos sensores no sólo permite la recolección de información sin precedentes sobre la influencia de los parámetros del proceso en los estados de las partículas, sino que también crean el marco para el desarrollo de sistemas eficaces de control en línea. Entre los nuevos desarrollos de sopletes se encuentran: los sopletes con múltiples cátodos o múltiples ánodos deben ser mencionados, así como la inyección de una flama. Al mismo tiempo, la tecnología de pulverización fría se convirtió en parte de la familia de tecnologías de recubrimiento industrial aceptados.

2.5.10 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DEL PROCESO DE TERMO SPRAY.

En la figura 16 muestra una visión general de las aplicaciones en Europa en 2002. Esta muestra que el dominio anterior era en aplicaciones aeroespaciales (alrededor de 50% hace 10 años) se ha reducido en un uso creciente en las industrias de proceso de automotriz y química, una extensión de productos de alto valor a los elementos de producción de alto volumen añadido, lo que indica una madurez del proceso. Este aumento de la madurez y la fiabilidad del proceso se están abriendo continuamente nuevos mercados. Si bien existe diversidad es probable que aumenten las aplicaciones, los principales usuarios del uso del termo spray siguen siendo la industria aeroespacial, automotriz, alimentos, y las industrias químicas, y la tecnología de proyección térmica tendrán que seguir ajustando para responder a las necesidades de estas industrias. Uno no podría imaginar motores de aviones modernos sin recubrimientos de proyección térmica de pulverización de gas de alta eficiencia, las termo spray-turbinas de gas es una tecnología verdaderamente muy propicia. Tecnología de proyección térmica hace que en muchas aplicaciones de sustitución de acero con materiales de menor peso como el Aluminio o Magnesio son razonablemente más económicos. El uso de bloques de aluminio en el motor de los automóviles para reducir el peso es un ejemplo de cómo la tecnología de pulverización térmica puede responder a una necesidad industrial y social. Los sopletes de pulverización se han desarrollado para revestir las paredes interiores de los bloques de cilindros de aleación de Aluminio con materiales que pueden soportar las altas temperaturas y el ambiente corrosivo de la cámara de combustión interna. En motores es muy importante la expansión de la tecnología de proyección térmica ya que es una necesidad de reemplazo de recubrimientos de cromo duro resistentes al desgaste. los recubrimientos de proyección térmica (1) reducen los problemas ambientales asociados con la exposición al cromo hexavalente, (2) permiten la deposición de recubrimientos más gruesos, (3) Ofrece una mejorada resistencia a la corrosión y una mayor resistencia a la fatiga, y (4) el ahorro de costes debido a que ofrece velocidades más altas en el proceso, y una amplia gama de materiales que se puede depositar, al no tener limitaciones en el tamaño de la pieza a recubrir, y proporcionando una vida más larga de la parte recubierta. Una comparación de la resistencia al desgaste de las superficies cromadas contra superficies de recubrimiento por pulverización de plasma HVOF han demostrado las ventajas de los revestimientos pulverizados térmicamente en aplicaciones en las industrias papelera y textil. Sin embargo, es la gran variedad de materiales que se pueden elegir para los recubrimientos que son responsables de la continua diversificación del mercado de pulverización térmica. Los revestimientos de cerámicos pueden ofrecer además de buena resistencia al desgaste, buenas propiedades tribológicas al reducir la fricción, o pueden tener una alta aceptación para prensas de impresión de tinta a color. Los implantes Cadera, rodilla o dentales se basan en recubrimientos biocompatibles o bioactivos que aumentan la velocidad de la conexión con el tejido óseo.

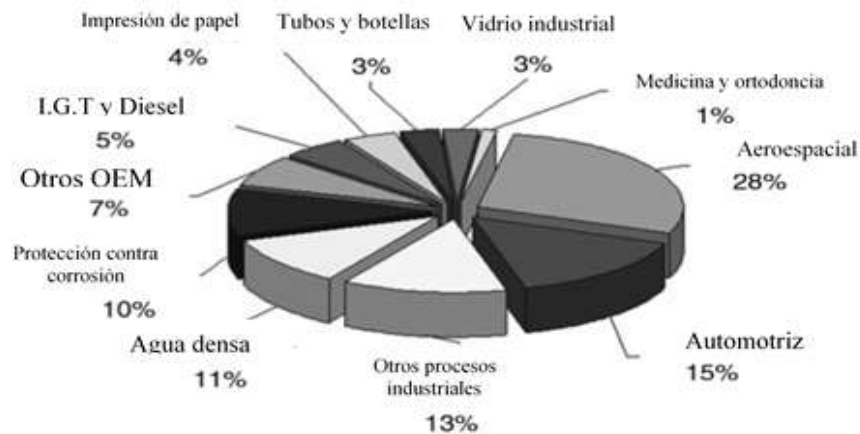


Figura 16. Aplicación del termo spray en la industria.

2.6 CORROSIÓN

La corrosión es el deterioro que sufre un metal al exponerse a un medio específico.

Algunos factores que modifican la velocidad a la que se corroe un metal son: --Factores metalúrgicos: Trabajo en frío, segundas fases, etc. -Condiciones de operación: temperatura, velocidad, concentración, etc.

Clasificación.

Se puede clasificar el deterioro del metal de acuerdo al mecanismo mediante el cual se lleva a cabo, tal y como se describe a continuación.

- Corrosión química.-Se presenta por el efecto de gases y de no electrólitos sobre el metal.
- Corrosión electroquímica.-Tiene lugar por la acción de electrólitos, ya sean ácidos, alcalinos o sales; perteneciendo a ésta forma de corrosión, la atmosférica y en el suelo.
- Oxidación.-Se presenta cuando un metal se expone a altas temperaturas, caracterizándose por la formación de una cascarilla.

2.6.1 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.

En presencia de un medio acuoso, la corrosión es de naturaleza electroquímica.

Condiciones mínimas para que se de la corrosion electroquimica deben ser:

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 al 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.

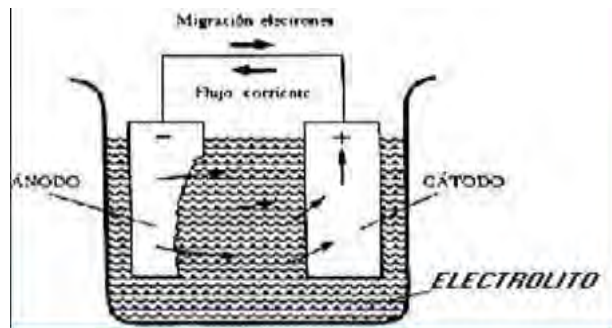
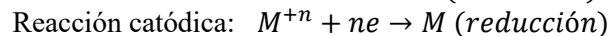
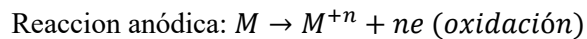


Figura 17. Corrosión electroquímica.



Cada metal tiene una tendencia distinta a sufrir corrosión y una forma de medirla es comparando su potencial con respecto a un electrodo estándar, usándose al hidrógeno a nivel laboratorio, por medio del dispositivo ilustrado en la figura 18.

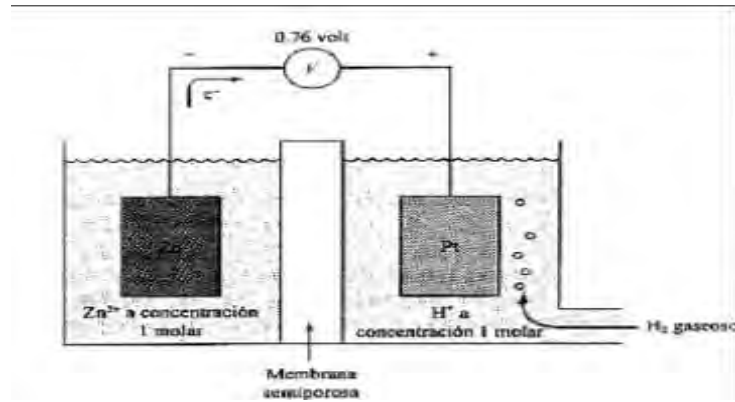
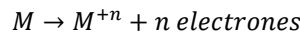


Figura 18. Dispositivo para comparar el potencial de los metales (Semipila).

Para la corrosión de electrodos sencillos.

La reacción anódica que se lleva a cabo en el metal:



Las reacciones catódicas más comunes en presencia de un electrolito son:

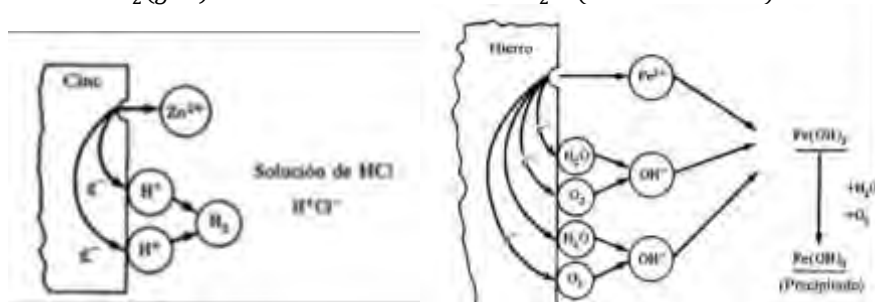
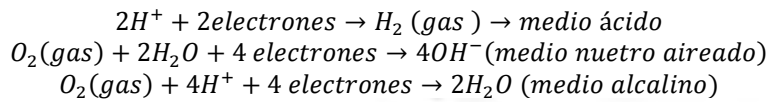
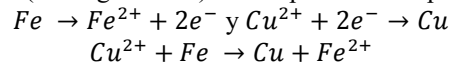


Figura 19. Corrosión de electrodos sencillos.

Las reacciones de las dos semipilas (celda galvánica) están representadas por las reacciones siguientes:



La fuerza electromotriz generada en la pila electroquímica se puede calcular así:

$$f.e.m = E_0 \text{ ánodo} - E_0 \text{ cátodo} \dots \dots (3)$$

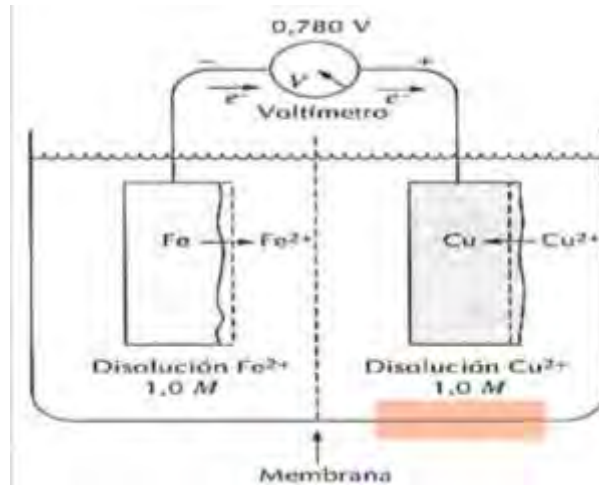


Figura 20. Fuerza electromotriz generada en una pila electroquímica.

La mayoría de los electrolitos de las pilas galvánicas de corrosión no son 1M mas bien se trata de soluciones diluidas por lo tanto si la concentración de iones del electrolito que rodea al ánodo es menor que 1M la fuerza conductora de la reacción para corroer o disolver el ánodo es mayor, ya que existe una concentración de iones para provocar una reacción opuesta.

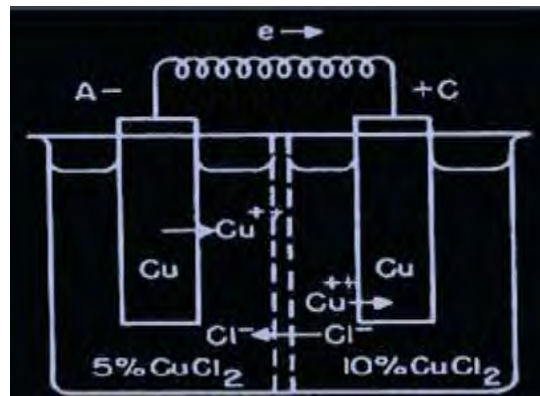


Figura 21. Celda de concentración iónica.

Para que esta celda funcione, se consideran las diferencias en la concentración de oxígeno disuelto que las diferencias de concentración de iones metálicos. En estas celdas, la zona de baja concentración de oxígeno se hace anódica; mientras que la de alta concentración de oxígeno se vuelve catódica.

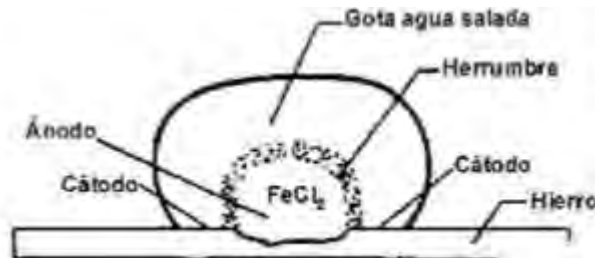


Figura 22. Celda de concentración de oxígeno.

2.6.2 TIPOS DE CORROSIÓN.

De acuerdo a la apariencia del metal corroído se tienen ocho formas básicas de corrosión, a saber: Corrosión uniforme, Corrosión galvánica, Corrosión en hendiduras o grietas, Corrosión por picadura, Corrosión intergranular, Corrosión-erosión, Disolución selectiva, Corrosión bajo esfuerzo.

1.- Corrosión uniforme.

Es la forma más común de corrosión, la cual actúa sobre la totalidad de la pieza expuesta o sobre una gran área, el metal se disuelve poco a poco y eventualmente falla. No es la más insidiosa ya que es relativamente fácil predecir la vida útil de un elemento.



Figura 23. Corrosión uniforme.

2.- Corrosión galvánica.

Se produce cuando dos metales distintos se unen en presencia de un medio corrosivo, ya que habrá un flujo de electrones del elemento más anódico al más catódico.



Figura 24. Corrosión galvánica.

Tomando en cuenta que los metales más utilizados en la ingeniería forman películas pasivadoras protectoras. Su comportamiento no es siempre el que debiera esperarse a la serie electromotriz, así para aplicaciones prácticas donde la resistencia a la corrosión es un factor importante se ha desarrollado las llamadas series galvánicas que nos dicen cuál va a ser el comportamiento del material en un elemento específico.

3.- Corrosión en hendiduras o grietas.

Es una forma localizada de corrosión que se puede presentar en hendiduras y bajo superficies protegidas, donde se pueden estancar pequeñas cantidades de solución, por ejemplo, bajo juntas, cabezas de tornillos y remaches, entre válvulas y sus asientos, etc.



Figura 25. Corrosión en hendiduras o grietas.

4.- Corrosión por picadura.

Es una forma de ataque extremo y da como resultado agujeros en el metal, los cuales pueden ser grandes o pequeños en relación a su diámetro; pueden estar alejados o cercanos entre sí, tanto que pueden dar la impresión de una superficie rugosa. Es muy insidiosa, ya que un equipo puede fallar con sólo un porcentaje muy pequeño de pérdida en peso de la estructura total.



Figura 26. Corrosión por picadura.

5.- Corrosión Intergranular.

Es un deterioro por corrosión localizada y/o adyacente a los límites de grano de una aleación, ya que bajo ciertas condiciones el límite de grano puede ser mucho más reactivo dando como resultado una pérdida de resistencia de la aleación e incluso la desaparición total del límite de grano. Por ejemplo, la sensibilización del acero inoxidable, o el efecto que tiene en el acero la presencia de pequeñas cantidades de aluminio.

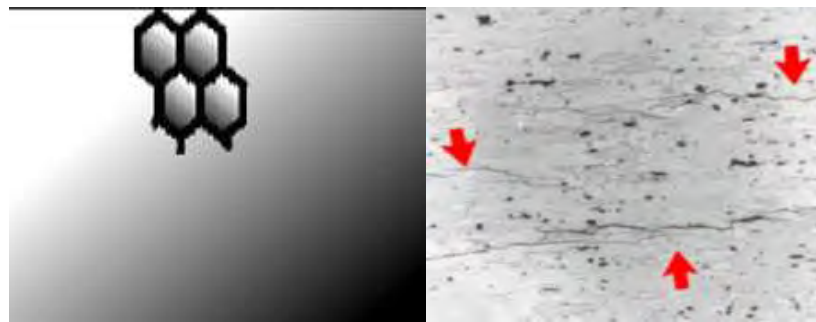


Figura 27. Corrosión Intergranular.

6.- Corrosión-Erosión.

Es la aceleración o incremento de la velocidad de corrosión debido al movimiento relativo entre un fluido corrosivo y una superficie metálica, interviniendo de manera adicional factores como: Cavitación, presencia de partículas abrasivas, etc.



Figura 28. Corrosión-Erosión.

7.- Disolución Selectiva.

La disolución selectiva es la remoción selectiva de un elemento de una aleación mediante un proceso de corrosión. Siendo un ejemplo común la remoción del cinc de los latones amarillos, dando como resultado una estructura porosa y débil.



Figura 29. Disolución Selectiva.

8.- Corrosión bajo Esfuerzo.

Es la falla producida por la influencia combinada de un esfuerzo y un medio corrosivo. El esfuerzo puede ser directamente aplicado o puede ser en forma de esfuerzo residual como se muestra en la siguiente figura.



Figura 30. Corrosión bajo Esfuerzo.

2.6.3 POLARIZACIÓN.

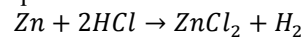
Es el retraso que ocurre en la reacción electroquímica y existen dos formas de ella.

- Polarización por activación: (baja velocidad).
- Polarización por concentración: (está limitada por la difusión en la disolución).

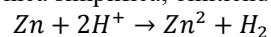


Figura 31. Zinc reaccionando con HCl diluido para producir hidrógeno gas.

El zinc se disuelve o se corroe en el ácido y se produce cloruro de zinc e hidrogeno que se desprende en forma de gas, como indica la siguiente reacción química.



Esta reacción puede escribirse en forma iónica simplificada, omitiendo los iones cloruros, como:



Migración de los iones hidrógeno a la superficie del zinc. Flujo de electrones hacia los iones hidrógeno. Formación de hidrógeno atómico. Formación de moléculas diatómicas de hidrógeno. Formación de desprendimiento de moléculas de gas hidrógeno.

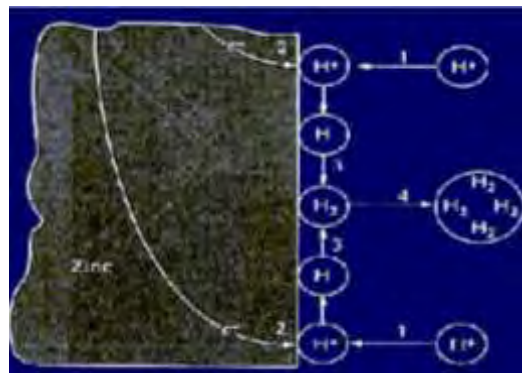


Figura 32. Polarización por Activación.



Figura 33. Polarización por Concentración.

La pasividad es la pérdida de reactividad química que sufren algunos metales al exponerse a un medio específico algunos ejemplos son el hierro, el níquel, el aluminio y el cromo. Dos teorías tratan de explicar este comportamiento a saber.

2.6.4 TEORÍA DE LA PELÍCULA DE ÓXIDO Y TEORÍA DE LA ADSORCIÓN.

La primera teoría trata de explicar en base a la formación de una película de óxido compleja que se adhiere firmemente a la superficie del metal base protegiendo de una corrosión posterior.

Si se grafica el poder oxidante de una solución contra la velocidad de la corrosión se puede observar que en forma inicial la relación es lineal esto es, aumenta el poder oxidante y aumenta la velocidad de corrosión. Sin embargo al llegar a cierta concentración la velocidad de ataque o corrosión se hace prácticamente cero y se dice entonces que metal sea pasivo.

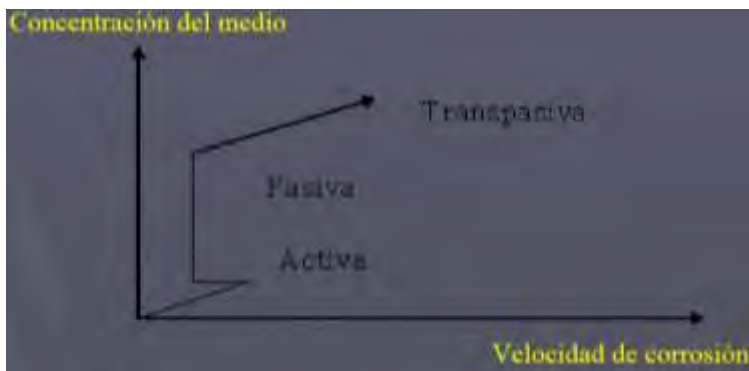


Figura 34. Poder oxidante de una solución contra la velocidad de corrosión.

Ecuación de Faraday: la cantidad de metal uniformemente corroído o depositado electroquímicamente sobre un durante cierto tiempo se puede calcular aplicando la ecuación de Faraday que establece lo siguiente.

$$W = I \cdot T \cdot M / n \cdot F \dots\dots (4)$$

dónde:

W = La cantidad de metal que se ha corroído o depositado.

I = Corriente (A) T = tiempo que dura el proceso (s.).

F = Constante de Faraday= 96500 A.s/mol.

M = Masa atómica del metal.

n = La valencia del metal.

En el trabajo experimental la velocidad de corrosión en un ambiente específico se puede hacer de varias formas tal y como se menciona a continuación:

- Midiendo el peso perdido de una muestra durante un cierto periodo de tiempo teniendo como unidades (g/h).
- También se puede medir como el peso perdido en miligramos /decímetro cuadrado por día.
- Por último se puede expresar la velocidad de corrosión en términos de la pérdida de espesor del material por unidad de tiempo. En la práctica se manejan dos unidades.

$$mpy = \frac{534 W}{D A T} \dots\dots (5) S. I$$

Dónde:

D = Densidad del material.

A = Área.

T = Tiempo.

W = Pérdida de peso de la muestra.

$$mmpa = \frac{8760 W}{D A T} \dots\dots (6) S.INTERNACIONAL$$

Resistencia relativa a la corrosión	mm/año	nm/hr
Sobresaliente	< 0.02	< 2
Muy buena	0.02-0.1	2-10
Buena	0.1-0.5	10-50
Regular	0.5-1	50-150
Mala	1-5	150-500
inaceptable	> 5	> 500

Tabla 12. Tabla de la Resistencia relativa a la corrosión.

3. MATERIAL Y MÉTODOS.

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.

Diseño factorial 2x2.

El diseño factorial es un diseño de los tratamientos que se caracterizan 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 pueden 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.

En general se puede utilizar cualquier número de factores en un arreglo factorial, pero para nuestro estudio solo se verá el caso más común de dos factores A y B . en esta técnica se verá el caso más sencillo, en el cual cada uno de estos dos factores tienen dos niveles. Este caso se denomina como el diseño factorial 2x2 o 2^2 . En general se verán dos factores con a y b niveles respectivamente, el diseño factorial axb.

3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

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

		<i>Factor B</i>	
		b_1	b_2
<i>Factor A</i>	a_1	X_{111} X_{112} \vdots X_{11r}	X_{121} X_{122} \vdots X_{12r}
	a_2	X_{211} X_{212} \vdots X_{21r}	X_{221} X_{222} \vdots X_{22r}

Tabla 13. Observaciones de la variable de respuesta X .

Según el diseño experimental utilizado, se calcula la tabla ANOVA como de costumbre. Sin embargo, la suma de los 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 2x2.

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

Efecto factorial (contraste lineal)	Multiplicador λ para los totales del tratamiento:				Total para el efecto factorial
	a_1b_1	a_2b_1	a_1b_2	a_2b_2	
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	$[AxB] = -a_1b_1 - a_2b_1 - a_1b_2 + a_2b_2$

Tabla 14. Cálculo cada efecto de S.C. en un diseño 2x2

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

Efecto principal de A = $[A] / 2r$

La contribución a la SCTR se calcula dividiendo el cuadrado de cada total para el efecto factorial entre 4r;

$$SCA = [A]^2 / 4r \dots (7) \quad SCB = [B]^2 / 4r \dots (8)$$

$$SCAXB = [AxB]^2 / 4r \dots (9)$$

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

F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	
Tratamientos	3	SCTR	CMTR	$CMTR/CMER$	
A		1	SC_A	CM_A	$CM_A/CMER = F_A$
B		1	SC_B	CM_B	$CM_B/CMER = F_{BFB}$
INTERACCIÓN de AxB		1	SC_{AXB}	CM_{AXB}	$CM_{AXB}/CMER = F_{AXB}$
Bloques	r-1		SC_{BL}	CM_{BL}	
Error	3(r-1)		SC_{ER}	CM_{ER}	
Total	4r-1		$SCTL$		

Tabla 15. Tabla ANOVA para el diseño experimental con r bloques aleatorios.

Interpretación de los efectos Principales y de la Interacción.

El efecto simple de A 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 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, ésta 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 como se verá más adelante.

Las pruebas F de la tabla de ANOVA correspondiente 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_{AxB}	H_0 =No hay interacción H_1 :Hay interacción

La presentación de Resultados se muestra a continuación el cual consta de cuatro pasos:

1.- formar la tabla ANOVA como se mostró anterior mente, indicando cuales resultados son estadísticamente significativos y a qué nivel.

2.- Presentar una tabla de Medias y Errores estándar.

		Factor B			
		b_1	b_2	Efecto simple	Efecto principal
	$(B)_{a1} =$	\bar{x}_{12}	$-\bar{x}_{11}$		
	$(B)_{a2} =$	\bar{x}_{22}	$-\bar{x}_{21}$		$((B)a_1 + (B)a_2) / 2 \pm S/\sqrt{r}$
	$(A)_{b1}(A)_{b2}$				

Factor A

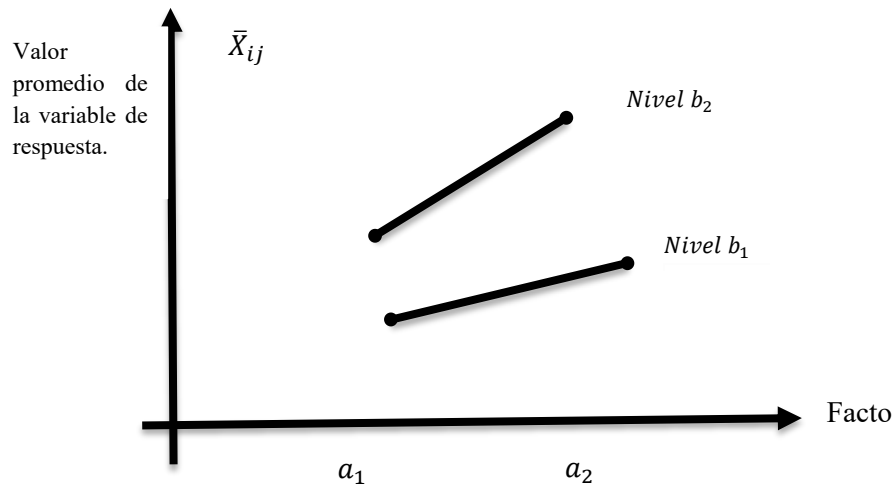
Efecto simple $= \bar{x}_{21} - \bar{x}_{11} \quad \bar{x}_{22} - \bar{x}_{12}$

Efecto principal $((A)_{b1} + (A)_{b2}) / 2 \pm S/\sqrt{r}$

Interacción de AxB $((A)_{b1} - (A)_{b2}) / 2 \pm S/\sqrt{r}$

Donde $s = \sqrt{CMER}$

3.- Dibujar la gráfica correspondiente.



Como se mencionó anteriormente en el caso de no-interacción habrá paralelismo (esencialmente) entre las 2 líneas en esta gráfica, y en el caso en el que hay interacción habrá un no-paralelismo “significativo”.

Como en todo método estadístico existen ventajas y desventajas las cuales se mencionaran a continuación:

Ventajas.

- Permite detectar interacción entre los factores si existe.
- Ahorro de recursos sobre experimentos aislados.

Desventajas.

- Si el número de factores y/o niveles es grande, cada replicación implica unidades experimentales que pueden no estar fácilmente disponibles o resultan ser muy heterogéneas. Para la realización del siguiente trabajo se utilizó un diseño factorial 2x2 considerando dos variables el acero (acero 1010 y acero 1018) y el recubrimiento (probetas con recubrimiento y probetas sin recubrimiento). Para cada proceso se utilizaron 6 probetas, lo cual nos da un total de 24 probetas con base en la norma ASTM-E8. Para representar lo anterior mencionado la tabla siguiente nos muestra el diseño factorial tomando en cuenta nuestras variables.

		RECUBRIMIENTO	
		ZINC	SIN RECUBRIMIENTO
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}

Tabla 16. Representación del diseño factorial 2x2.

3.3. 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 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.

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 zinc 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 35. Equipo de Metallisation MK61.

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".



Figura 36. Pistola MK 61

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 flamespray MK 61 está provista de un protección de chorro de aire en la boquilla que impide automáticamente el regreso del alambre fundido y se suelde 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 para proporcionar la cantidad recomendada en la fundición de los alambres mencionados.

3.4 PRUEBA O ENSAYO DE TENSIÓN.

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 pasará 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 recuperará sus dimensiones originales. Para poder analizar dicho comportamiento y al mismo tiempo obtener las principales propiedades mecánicas de un material se aplica la prueba de tensión, la cual consiste en aplicar a una probeta de sección uniforme plana o de circular, una carga de tensión que se va incrementando gradualmente hasta que ocurre la falla, como se ve en la figura 37.

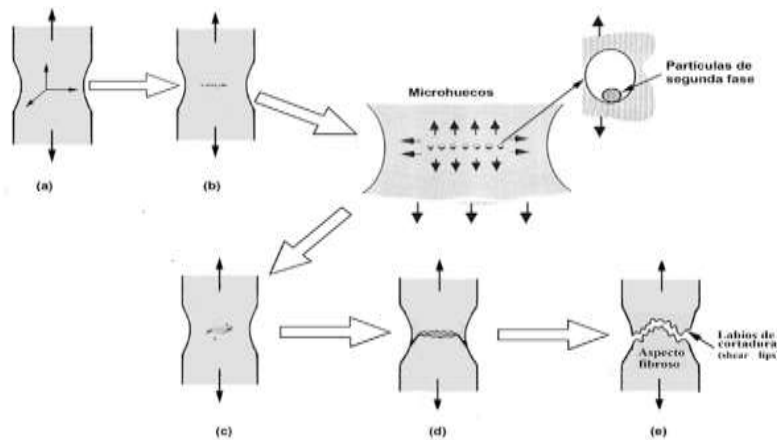


Figura 37. Fases de la prueba de tensión.

Dentro del rango de deformación elástica, existe una relación directa entre el esfuerzo y la deformación. El esfuerzo está dado por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (10)$$

dónde:

σ = Esfuerzo expresado en N/mm^2 , (psi)

F = La carga aplicada en N , (lb)

A = Al área de la sección transversal de la probeta en mm^2 , (pulg²)

Y la deformación producida por éste esfuerzo está dada por la relación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L_0} = \frac{L_i - L}{L} \dots\dots\dots (11)$$

Dónde:

L = Longitud inicial de la probeta en mm (pulg.)

L_i = Longitud de la probeta deformada elásticamente en mm (pulg.)

De aquí, se puede expresar la relación entre esfuerzo y deformación por medio de la ley de Hooke*:

$$\sigma = E \varepsilon \dots\dots\dots (12)$$

* La ley de Hooke Habla de la elasticidad (física). La teoría de la elasticidad (Ley de Hooke) establece que un cuerpo elástico se estira proporcionalmente a la fuerza que actúa sobre él.

Donde:

E = Módulo de elasticidad o módulo de Young, dado en N/mm^2 o Psi.

3.4.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES INSTRON 600 DX.



Figura 38. Máquina de ensayos universales INSTRON 600 DX

Principios y Definiciones.

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 porcentaje 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 “Área” interior de la curva desarrollada hasta que se produce la rotura.

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

El módulo de Young también se conoce como módulo de elasticidad en tensión, para diferenciarlo del módulo de compresión (K) y del módulo de elasticidad al corte (G). El módulo de elasticidad representa la resistencia del metal contra la deformación “elástica”. Para deformar elásticamente un material con alto módulo elástico se requiere un esfuerzo alto, mientras que un esfuerzo menor será suficiente para deformar elásticamente un material con módulo elástico bajo. No es posible modificar en forma apreciable el módulo de elasticidad de un material dado, ya que E sólo varía sensiblemente en presencia de texturas (orientación preferencial de granos) o modificando apreciablemente la composición. Por ésta 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 de E; entre estos se puede mencionar: el endurecimiento por precipitación, descomposición eutectoide, deformación en frío, aumento de la temperatura de trabajo, etc.

Espacio de ensayo:

El bastidor figura. 40 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. 39. 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. 40). 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.

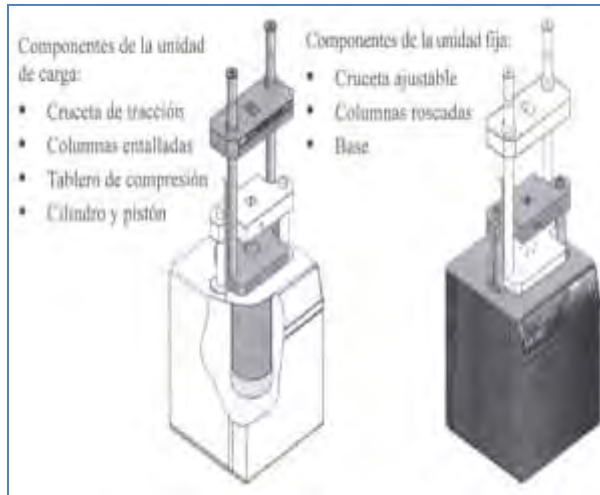


Figura 39. Separación de la unidad de carga de la unidad fija.

Cruceta de tracción

La cruzeta de tracción (10, Figura.40) está montada en 2 columnas (5) mediante anillos partidos de retención (8 y 10). La cruzeta reposa sobre el anillo (11) montado en la entalladura de la columna, justo debajo de la cruzeta, cuyo movimiento ascendente se ve impedido por un segundo anillo (8) y un separador (9) montados en la entalladura por encima de la cruzeta. La cruzeta 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.

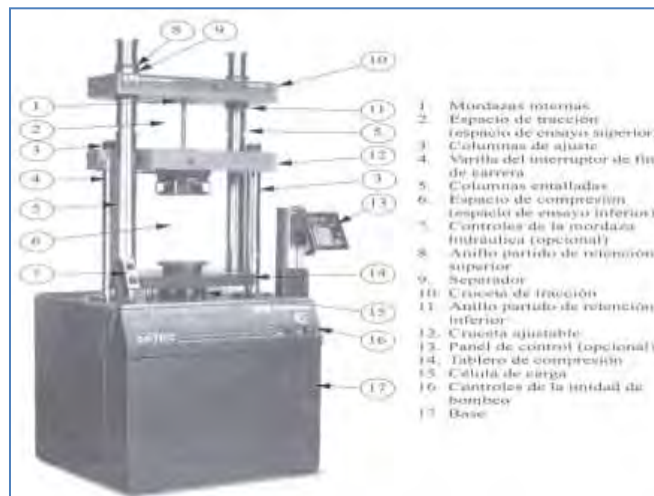


Figura 40. Bastidor y componentes del sistema.

Conjunto del interruptor de fin de carrera:

El conjunto de interruptor de fin de carrera (13 – Figura.41) está montado en la base del bastidor. El conjunto del interruptor de fin de carrera tiene la función de impedir que la cruzeta ajustable y el pistón sobrepasen su recorrido. Este conjunto de interruptor de fin de carrera desde uno de los 3 toques (3, 7 y 9) montados en una varilla (5) que se prolonga desde la placa base (12) del bastidor. Los toques superior (3) e inferior (7) impiden que la cruzeta ajustable sobrepase su recorrido. El tope superior impide que la cruzeta 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 en 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.

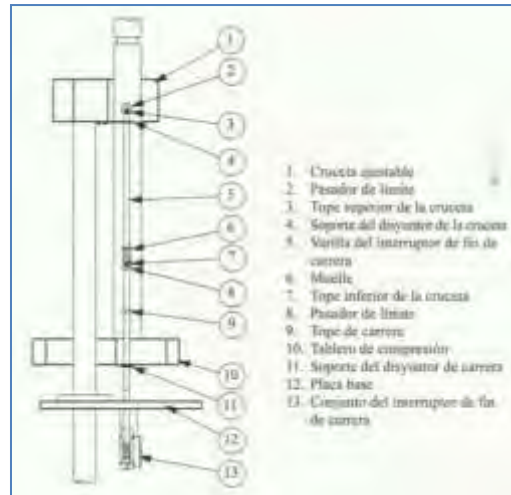


Figura 41. Conjunto de interruptor de fin de carrera standar

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.

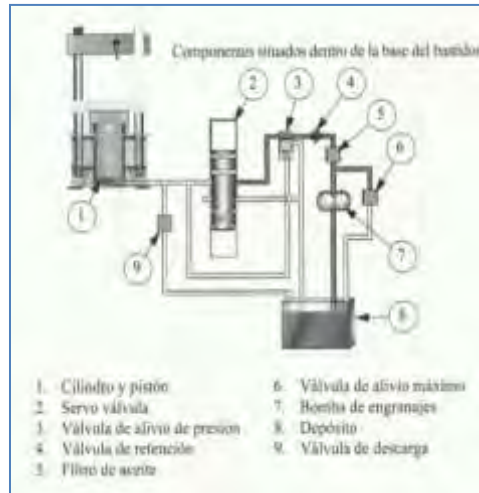


Figura 42. Flujo y componentes hidráulicos.

Los sistemas con servocontrol o control servo/manual están provistos de una servo válvula (2 –figura.42) 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.42) 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.40) y figura. 43 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 extensométricas 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. 44 y así no es necesario estar intercambiando la células de carga para ensayos de tracción ó compresión.



Figura 43. Célula de carga de equipos Instron

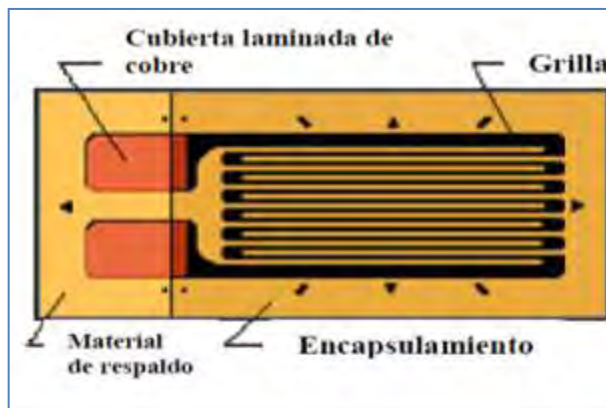


Figura 44. Strain Gage

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. 44.

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. Partner 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 Mark III, Partner 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 Máquina 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 máquina 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 45. Ejecución del software Partner la obtención de datos del ensayo de tracción.

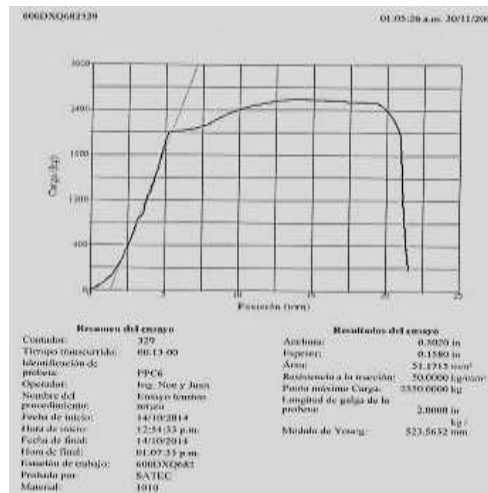


Figura 46. Hoja de resultados del ensayo.

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. 46) 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.

3.4.2. CARGA MÁXIMA.

La carga máxima es el esfuerzo máximo que puede soportar una estructura o una probeta, sometidas a tensión; si este esfuerzo se mantiene, se producirá una fractura. Hasta llegar a este punto, toda la deformación es uniforme en la región estrecha de la probeta. Sin embargo, cuando se aplica el esfuerzo máximo se empieza a formar una estricción o cuello, y toda la deformación subsiguiente está confinada en la estricción. A este fenómeno se le denomina “formación o cuello” o estricción, finalmente la fractura ocurre en la estricción. La resistencia a la fractura corresponde con el esfuerzo a la fractura.

A continuación se describe el procedimiento de recubrimiento metálico, con el proceso de termo spray, con la pistola-llama-alambre MK61 aplicado a las probetas de acero 1010 y 1018.

3.4.3. MODULO DE YOUNG.

El módulo de Young también se conoce como módulo de elasticidad en tensión, para diferenciarlo del módulo de compresión (K) y del módulo de elasticidad al corte (G). El módulo de elasticidad representa la resistencia del metal contra la deformación “elástica”. Para deformar elásticamente un material con alto módulo elástico se requiere un esfuerzo alto, mientras que un esfuerzo menor será suficiente para deformar elásticamente un material con módulo elástico bajo. No es posible modificar en forma apreciable el módulo de elasticidad de un material dado, ya que E sólo varía sensiblemente en presencia de texturas (orientación preferencial de granos) o modificando apreciablemente la composición. Por ésta 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 de E; entre estos se puede mencionar: el endurecimiento por precipitación, descomposición eutectoide, deformación en frío, aumento de la temperatura de trabajo, etc.

Metal o Aleación	Módulo de elasticidad o módulo de Young	
	GPa	10 ⁶ Psi
Acero	207	30
Aluminio	69	10
Zinc (puro)	104.5	15.2
Cobre	110	16
Latón	97	14
Magnesio	45	6.5
Niquel	207	30
Titanio	107	15.5
Tungsteno	407	59

Tabla 17. Módulos de elasticidad a temperatura ambiente

3.5 CORROSION (MÉTODO TAFEL).

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 diferencial de potencial (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. La ecuación que relaciona la corriente eléctrica con cambios en el potencial del metal causados por una fuente externa es la ecuación de Butler-Volmer; cuya forma matemática es:

$$i = i_{corr} \left\{ \exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\beta n F \eta}{RT}\right) \right\} \dots \dots (13)$$

dónde:

$R =$ constante de los gases.

$T =$ temperatura

$n =$ número de electrones en el proceso anódico.

$n' =$ número de electrones en el proceso catódico.

$F =$ constante de Faraday.

$i =$ densidad de corriente que fluye debido a que se aplica un potencial externo.

$i_{corr} =$ densidad de corriente de corrosión.

α y $\beta =$ coeficientes de transferencia.

$\eta =$ sobrepotencial.

El término $-\left(\frac{\beta n' F \eta}{RT}\right)$ corresponde a la corriente catódica y el término $\exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right)$ para la corriente anódica.

Esta ecuación se puede representar como voltaje en función de corriente

La representación para el caso del hierro puede verse en la Figura 47. El potencial a circuito abierto corresponde al corte de ambas curvas, este punto es también donde no fluye corriente neta es decir $i_{neta} = 0$.

La corriente de corrosión se puede estimar según se muestra también en dicha figura.

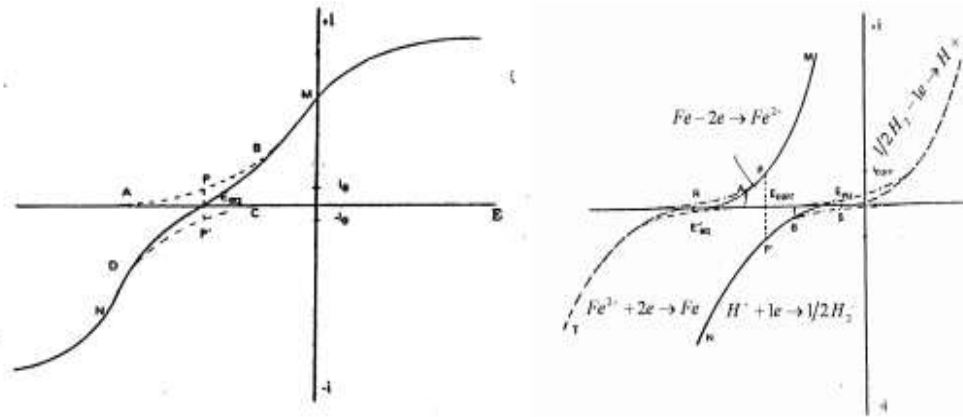


Figura 47. Representación como voltaje en función de corriente.

Las curvas corriente-potencial 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 48 muestra un diagrama para la corrosión del hierro en medio ácido.

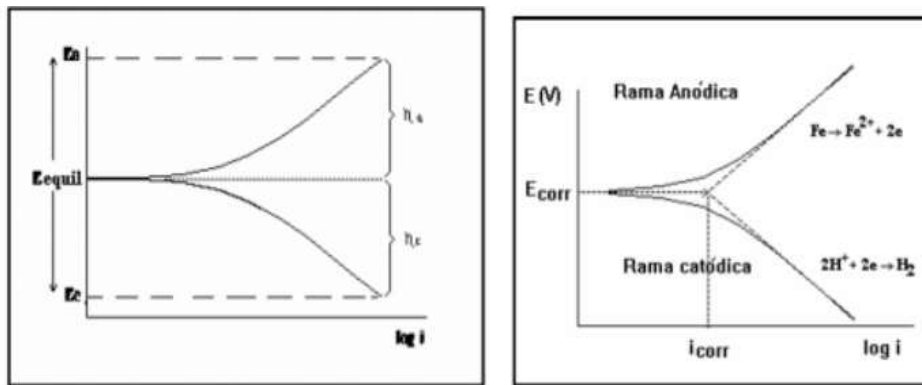


Figura 48. Diagrama para la corrosión de Hierro en medio ácido.

Para la realización de la prueba de Tafel se utilizó el potenciostato GAMRY PCI4/300 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 49.

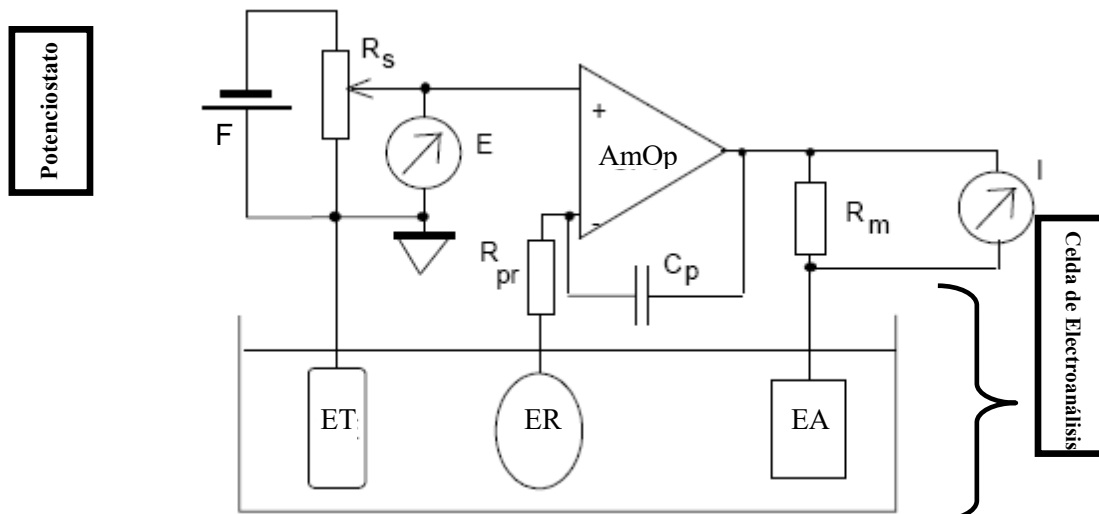


Figura 49. Esquema básico de la instrumentación para el electroanálisis del sistema metal-pintura,

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 potenciostato. Estos limitan el rango de funcionamiento del potenciostato y para reducir estas limitaciones es necesario que los amplificadores operacionales cumplan con los siguientes requisitos:

- Baja corriente de polarización.
- Alta impedancia de entrada
- Baja tensión de offset

El siguiente esquema, (figura 50), nos permite entender el funcionamiento del potenciostato y cada módulo que lo constituye:

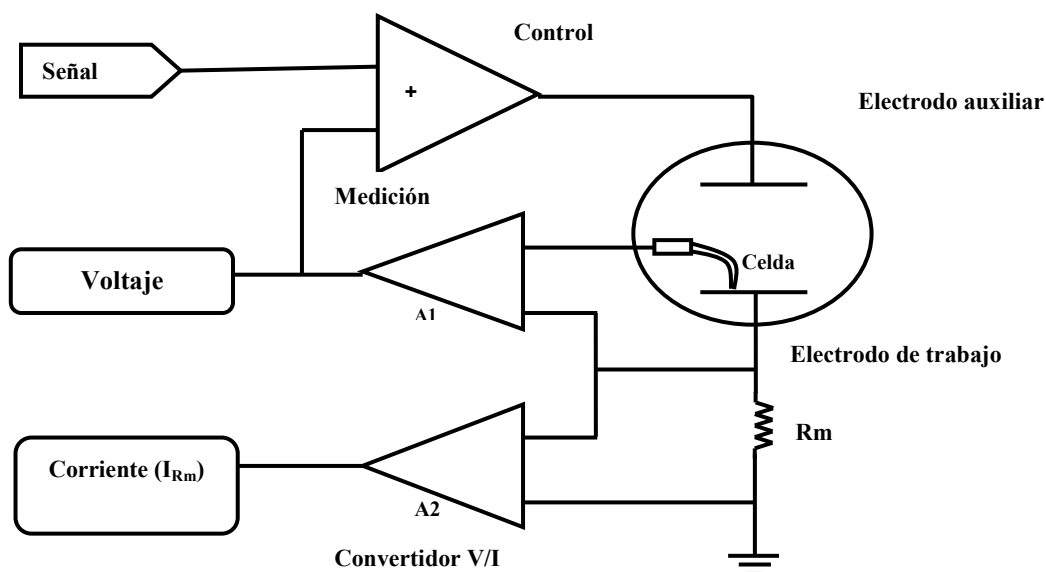


Figura 50. Esquema simplificado del potenciostato

Software de Configuración y Control de Ensayos.

El software Gamry Framework versión 4.35, figura 51, 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 51. Software de control y configuración.

Este software se encarga de controlar el potencióstato bajo los parámetros de configuración (figura 52) 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.

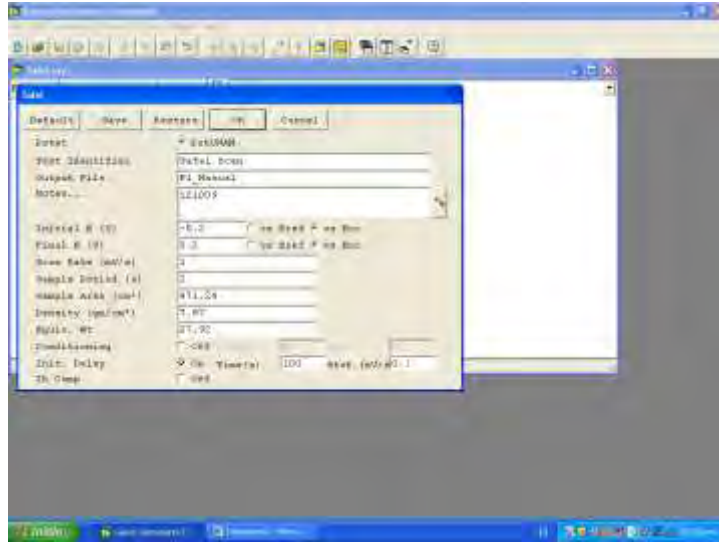


Figura 52. Configuración de parámetros del ensayo.

Los datos necesarios para la configuración, figura 52, 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 $\frac{mV}{s}$, 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 $\frac{1A}{cm^2}$ se tiene (equivalente gramo del $Fe = 27.8g$).

$$\frac{1A}{cm^2} = \frac{1 \text{ coulombio}}{cm^2s} = \frac{1}{96500} = \frac{\text{equiv.gr.de Fe}}{cm^2} = \frac{27.8 \text{ gr.deFe}}{96500 \text{ cm}^2s} = 2.88 \times 10^{-4} \frac{g}{cm^2s} = 2.49 \frac{kg}{dm^2 \text{ dia}} \dots (14)$$

Densidad del $Fe = 7.86 \text{ g/cm}^3$

$$\frac{1A}{cm^2} = \frac{27.8}{96500 \times 7.86} = 3.66 \times 10^{-5} \frac{cm \text{ de Fe}}{s} = \frac{31.7 \text{ mm}}{\text{dia}} \dots (15)$$

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

$$C.R. (cm/s) = \frac{i \cdot EW}{d \cdot fA} \dots (16)$$

$$C.R.(mpy) = \frac{0.13 i_{corr} \cdot EW}{d} \dots (17)$$

dónde:

$C.R.$ = Velocidad de degradación

i/A : Densidad de corriente = $i_{corr} [mA/cm^2]$

d : densidad del material [g/cm^3]

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 $\pm 150 \text{ mV}$ 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.

NOTA: El software Echem Analysis automatiza el procedimiento anterior y proporciona las gráficas y cálculos para su trazo. Echem Analysis es posible usarlo para todas las técnicas.

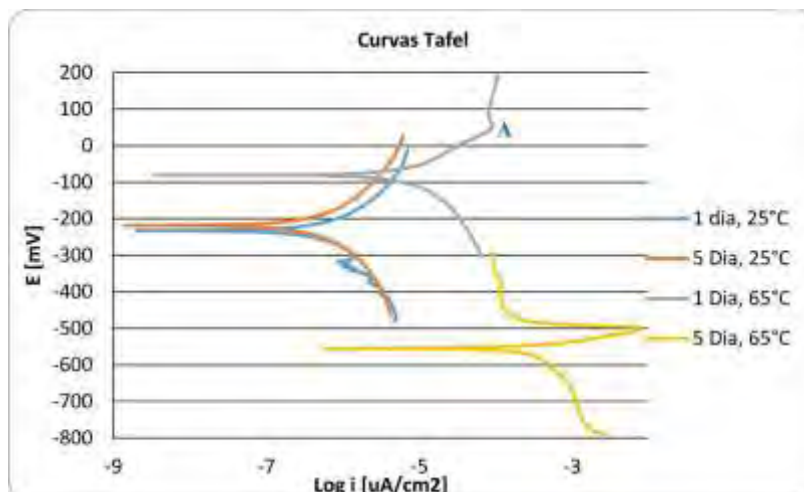


Figura 53. Pendientes de Tafel.

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:

- Barrido de potenciales de ± 150 mV respecto del potencial de corrosión,
- Velocidad de barrido de 1 mV/s
- Periodo de muestreo de 2 seg.
- Análisis de los datos mediante Echem Analysis.

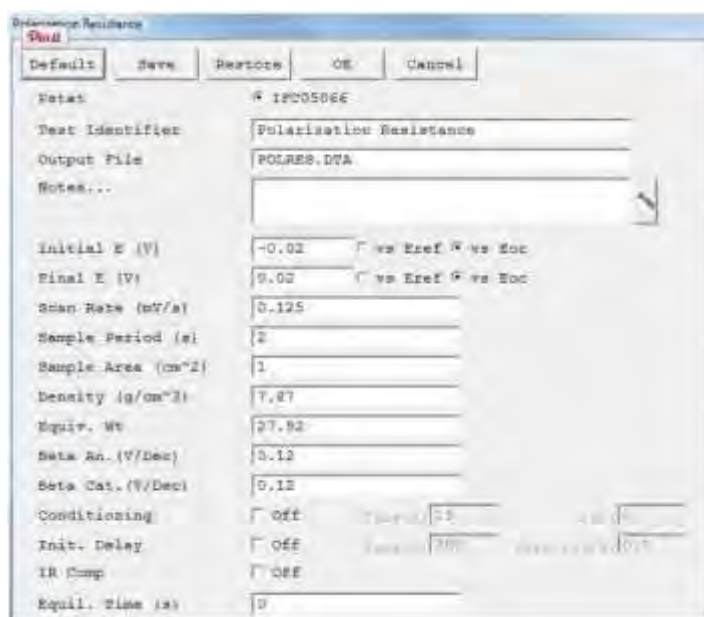


Figura 54. Configuración de parámetros para el ensayo

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.

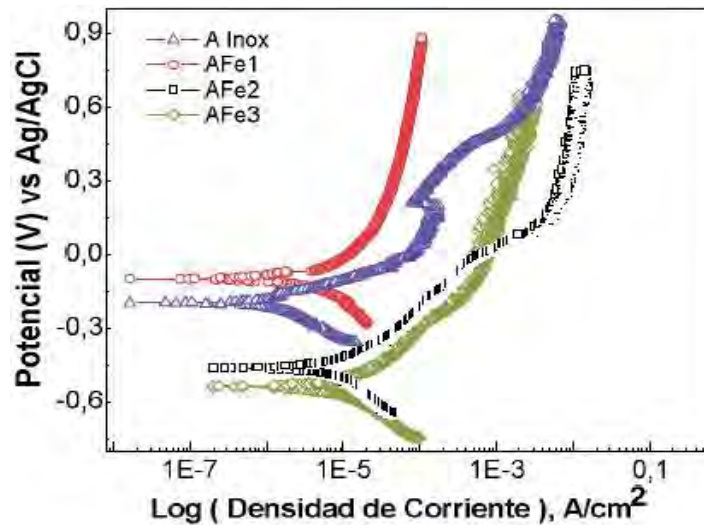


Figura 55. Resistencia a la polarización.

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.

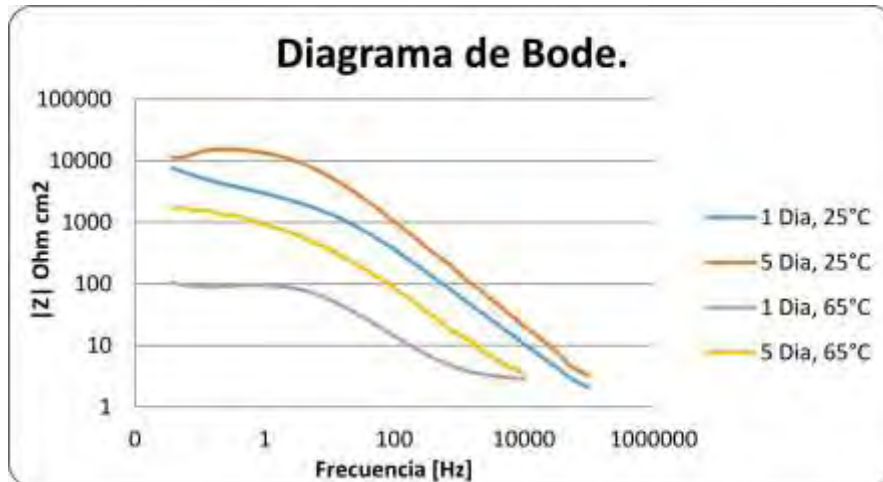


Figura 56. Análisis de Impedancia Electroquímica (Bode).

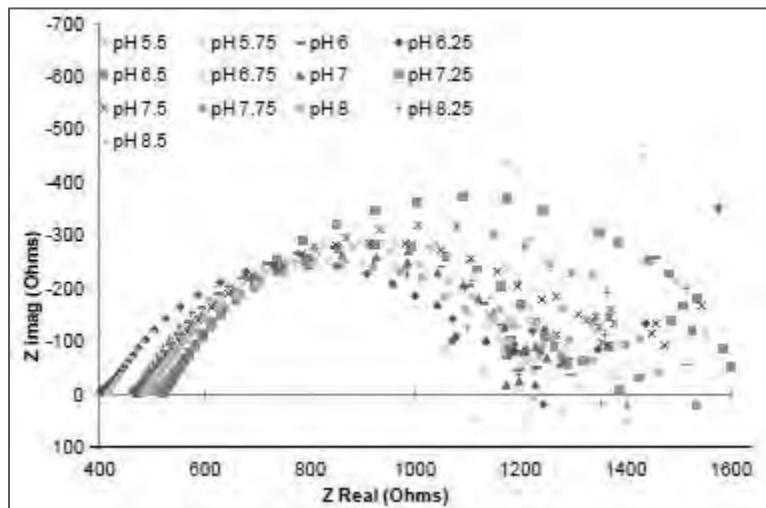


Figura 57. Análisis de Impedancia Electroquímica (Nyquist).

3.6 RUGOSIDAD.

Se usan diversos métodos para valorar la rugosidad superficial. Los dividimos en tres categorías: 1) comparación subjetiva con superficies de prueba estándar, 2) técnicas ópticas y 3) instrumentos electrónicos de aguja. Superficies de prueba estándar.- Existen bloques de acabado de superficies, producidos para valores de rugosidad especificados. Estos bloques tienen superficies con valores de rugosidad de 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 μpulg . Para estimar la rugosidad de un espécimen de prueba determinado, superficie se compara con el estándar tanto en forma visual como mediante la “prueba de uña”. En esta prueba, el usuario rasca suavemente las superficies del espécimen y el estándar, y determina qué estándar se acerca más al espécimen. Las superficies de prueba estándar son una forma conveniente para que un operador de máquinas obtenga un estimado de la rugosidad de una superficie. También son útiles para los ingenieros de diseño, con el propósito de juzgar qué valor de rugosidad de superficie debe especificar en el dibujo de una parte.

Técnicas ópticas.- la mayoría de los otros instrumentos de medición de superficies emplean técnicas ópticas para valorar la rugosidad. Estas técnicas se basan en la reflexión de la luz desde la superficie, la dispersión o

difusión de la luz y la tecnología láser. Son útiles en aplicaciones donde no es conveniente el contacto del punzón con la superficie. Algunas de las técnicas permiten una alta velocidad de operación por lo que posibilitan una inspección al 100%. Sin embargo, las técnicas ópticas producen valores que no siempre se correlacionan bien con las mediciones de aspereza hechas con instrumentos tipo punzón.

Instrumentos electrónicos de aguja (o de punzón).- la desventaja de la prueba de uña es su subjetividad. Existen a la venta otros instrumentos tipo punzón para medir la rugosidad superficial similares a la prueba de uña, pero más científico. Un ejemplo es el perfilómetro. En estos dispositivos electrónicos, se mueve un punzón de diamante cónico de cono, cuyo radio de punta mide alrededor de 0.0002 pulg (0.005 mm) y el ángulo en la punta es de 90°, a través de la superficie de prueba a una velocidad lenta constante. La operación se muestra en la figura 58. Conforme la cabeza del punzón se mueva en forma horizontal, también se desplaza en forma vertical para seguir las desviaciones de la superficie. El movimiento vertical se convierte en una señal electrónica que representa la topografía de la superficie.

Esto se despliega ya sea como: 1) un perfil de la superficie real o 2) un valor de rugosidad promedio. Los dispositivos para perfilar usan como plano separado como la referencia contra la cual se miden las desviaciones. El resultado es una retícula del contorno de la superficie a lo largo de la línea que recorre el punzón. Este tipo de sistema identifica tanto la aspereza como la ondulación en la superficie de prueba. Los dispositivos para promediar reducen las desviaciones de rugosidad a un valor único Ra. Usan movimientos de correderas sobre la superficie real para establecer el plano de referencia nominal. Las correderas funcionan como un filtro mecánico para reducir el efecto de la ondulación en la superficie. Para este estudio se utilizara este tipo de dispositivos por su efectividad y para observar que perfil de anclaje se tiene en el material antes de aplicar un recubrimiento metálico.

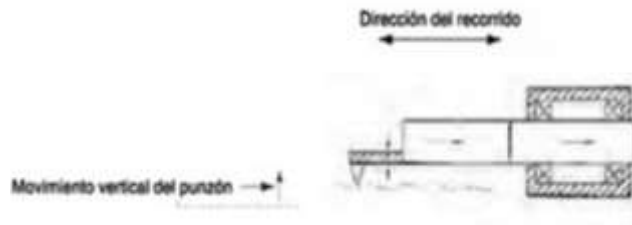


Figura 58. Operación de un instrumento tipo aguja.

Para este estudio se utilizo un medidor de rugosidad Mitutoyo SJ-301 el cual 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 59). 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.

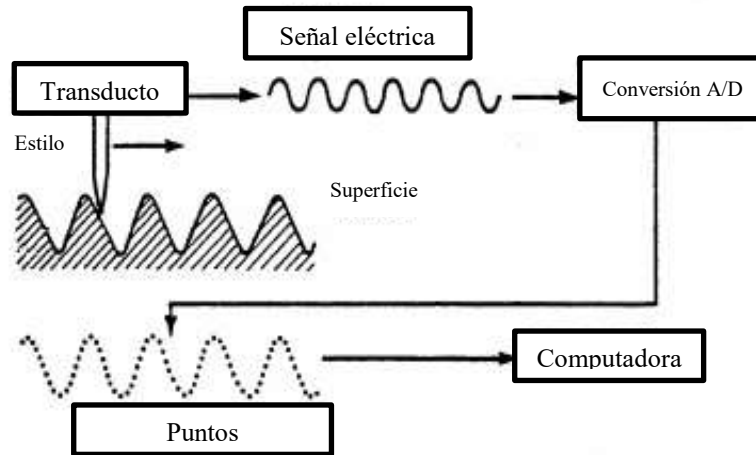


Figura 59. Diagrama esquemático de un medidor de rugosidad.

La Figura 60 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.

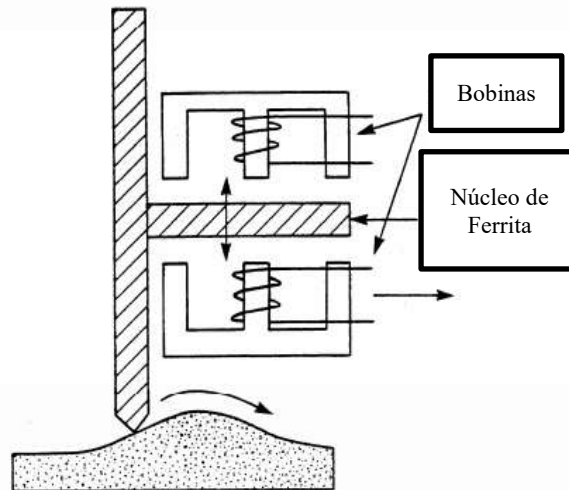


Figura 60. Transductor de inductancia variable.

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 las bobinas secundarias. Asumiendo que no existe un acoplamiento cruzado entre los secundarios los voltajes inducidos pueden escribirse como:

$$v_1 = M_1 \dot{i}_p \text{ y } v_2 = M_2 \dot{i}_p \dots (18)$$

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:

$$\text{Desplazamiento} = G * (v_1 - v_2) \dots (19)$$

Donde G es la ganancia o sensibilidad del sensor.

En condiciones normales la respuesta de este sensor toma la forma de la Figura 61 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.

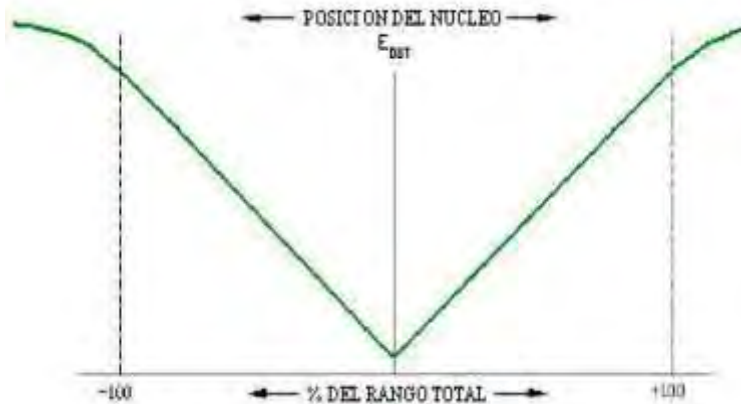


Figura 61. Voltaje de salida del sensor.

A continuación se describirán a detalle los componentes de la prueba de rugosidad, así como también los pasos a seguir para realizar la prueba de rugosidad.

3.6.1 PRUEBA DE RUGOSIDAD.

En la prueba de rugosidad comprobaremos que 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.) o en este caso después de la aplicación del sand blast. Para nuestro estudio se realizara esta la prueba de rugosidad para tener un promedio del perfil de anclaje al aplicar el termo spray con el alambre de zinc. Para esto se utilizar el dispositivo MITUTOYO SJ-301 (fig. 62).



Figura 62. Dispositivo para pruebas de rugosidad MITUTOYO SJ-301.

En la figura 63 nos mostrara como se debe colocar la probeta con respecto al sensor de rugosidad la distancia de la punta del sensor con la probeta debe de ser la mínima es decir que la probeta apenas toque la superficie de la probeta; esto es para que nuestra lectura sea la más exacta posible.



Figura 63. Prueba de rugosidad.

A continuación se mencionara el manejo del dispositivo de rugosidad Mitutoyo SJ-301, así como también se mencionaran los elementos que componen dicho dispositivo. 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 64



Figura 64. Componentes del Rugosímetro SJ-301

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



Figura 65. Lector de rugosidad.

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 66. Parte posterior de la unidad principal.



Figura 67. Lateral derecha de la unidad principal.

Para la correcta operación de la medición se deben seguir los siguientes pasos.

1. Conecte la fuente de alimentación.
2. Empleando el cable de conexión (Figura 68) acople la unidad principal y el módulo de lectura.
3. Encienda el equipo con el botón on/off. Véase figura 67.
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 69
8. Impresión de resultados. Con la tecla PRINT (figura 70 y 71).



Figura 68. Cable de conexión.

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



Figura 69. Resultados de la lectura de rugosidad.

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 70. Teclado de la unidad principal.

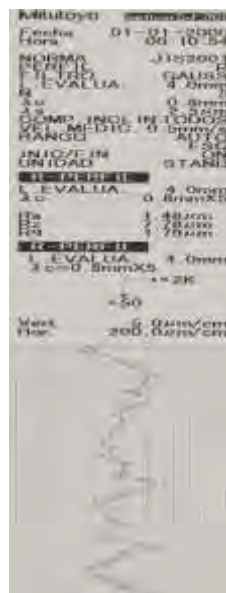


Figura 71. Muestra de una impresión de resultados.

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 72). 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 72. 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.

Para el proceso de calibración del dispositivo tienen que seguirse los siguientes pasos:

1. Coloque el espécimen en una superficie plana.
2. Monte el accesorio para anivelar la unidad lectora (ver Figura 73).

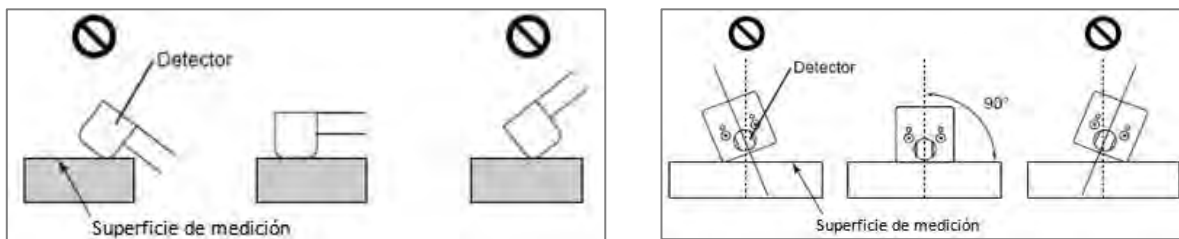


Figura 73. Accesorio de nivelación

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 74.
4. Verifique y corrija la altura de la unidad lectora para tener una posición paralela con la horizontal de la superficie de trabajo. Figura 75.



Figura 74. Calibración del Rugosímetro.



a). Vista frontal del detector.

b) Vista lateral del detector.

Figura 75. Posiciones correctas e incorrectas para la calibración.

4. Verifique que los valores de calibración sean los proporcionados por el fabricante. Compárelos con la tabla 18:

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 18. valores de calibración.

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

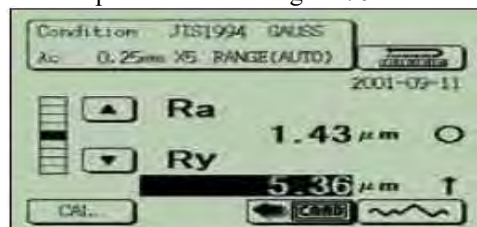


Figura 76. Pantalla inicial

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

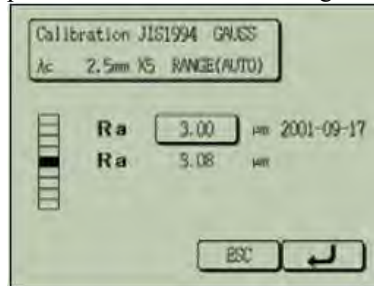


Figura 77. Pantalla del resultado de la calibración.

En el menú de condiciones de medición es posible acceder a los siguientes parámetros y sus respectivas opciones:

Página 1.

NORMA: ISO' 97, DIN'90, JIS' 94, ANSI' 95, JIS' 82 y JIS' 01.

PERFIL: P, R, DIN4776, MOTIF.R y MOTIF.W.

FILTRO: 2CR, PC75 y GAUSS.

λ_c : En el rango de 0.08 a 8.

Página 2.

PERSO. Dependiendo del perfil: Ra, Rz, Ry, Rq, Rt, Rp, Rv, RSm, RS, RPc, Rmr (c), R3z, Rhsc, RsK, Rku, Rlo, Rppi, Pa, Py, Pz, Pq, Pt, Pp, Pv, PSm, Psk, Pppi, Rpk, Rvk, Rk, Mr 1, Mr 2, A1, A2, Vo, R, AR, Rx, W, Aw, Wx. Wte, etc.

UNIDADES: mm, inch.

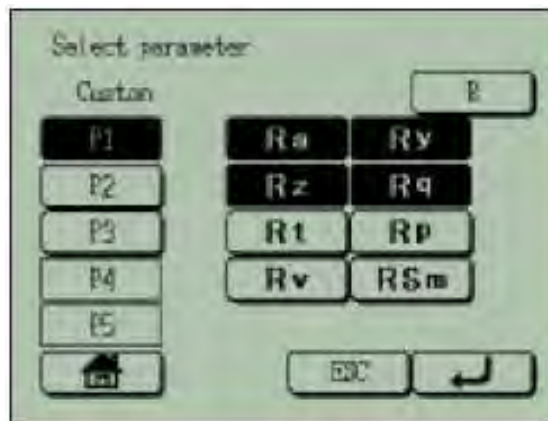


Figura 78. Personalización de parámetros.

3.7 ESPESORES.

Este estudio se realizó en las probetas con el recubrimiento de zinc con el dispositivo positector 6000 marca DeFelsko (figura 79). Esta prueba consiste en poner la sonda perpendicular sobre la superficie a medir, mantener firme el dispositivo cuando se tome una medida válida, el medidor emitirá dos pitidos, el piloto LED parpadeará con luz verde, y la medida aparecerá en el display. Levante la sonda por lo menos 5 cm (2 pulg.) por encima de la superficie entre mediciones o deje la sonda sobre la superficie en el mismo sitio para tomar medidas continuas, cada 2 segundos. No arrastre la sonda lateralmente sobre la superficie.

Para tener unas lecturas más exactas primero mida la parte no recubierta. Este chequeo rápido del cero determina si se necesita un ajuste de calibración para su sustrato. Luego, ponga las galgas de plástico sobre la superficie no recubierta y mídalos individualmente para verificar que el medidor puede medir un espesor conocido dentro de los márgenes de tolerancia.



Figura 79. Medidor de espesores PosiTector 6000 FN1

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

Figura 80. 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.

Este método de ensayo cubre el uso de instrumentos magnéticos para la medición no destructiva del espesor de los recubrimientos no magnéticos más metales bases magnéticas ferrosas 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 (categorizan como "electrónico"). 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 impreso 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.

3.8 ADHERENCIA.

La calidad y el rendimiento de los revestimientos de pulverización térmica son fuertemente dependientes de la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato debido a que la pérdida de adherencia del recubrimiento resultará en el colapso del sistema de rociado. Sin embargo, la predicción y el control de la adhesión del revestimiento son complejos ya que depende de:

- El proceso de termo spray y las condiciones de operación.
- La distribución del tamaño de partículas de materia prima y la morfología.

El material para sustrato: etapa de oxidación (composición del óxido y espesor); rugosidad (picos de altura en comparación con las partículas (splat) tamaño medio, y la distancia de separación de pico, que se caracteriza por la raíz cuadrada $R_{\Delta q}$ rugosidad media, es decir, el promedio de raíz cuadrada media de las coordenadas del perfil de rugosidad); limpieza (eliminación de la contaminación de la superficie y de residuos de grano); y precalentamiento antes de la pulverización a una temperatura eficiente para deshacerse de adsorbatos y condensados.

Las tensiones residuales: son las que dependen del material que se adhiere al sustrato así como las condiciones de proyección y la temperatura media el sustrato.

Las condiciones ambientales tales como a la temperatura ambiente la que rodea, la humedad, la vibración generada externamente transmiten a la muestra en el momento de la prueba.

Además, la estructura de los recubrimientos de aspersión térmica es diferente de la de los materiales a volumen; los recubrimientos generalmente implican capas (splats), el contacto de superficie es aproximadamente 15 y 60% en esta superficie existen, partículas fundidas, poros globulares, grietas. Por lo tanto, los mecanismos de unión básica entre revestimientos de pulverización térmica y el sustrato son, como ya se ha discutido acerca de splats estos son fuertemente dependientes de los contactos reales entre las partículas (splats) y entre las partículas y el sustrato. Se clasifican en tres grandes grupos (1) de enclavamiento mecánico o de anclaje, (2) de metal de unión a metal (fenómeno de difusión), y (3) de unión química (formación de un compuesto intermetálico con un sustrato).

El modo de fallo en el servicio puede ser descrita como interfacial (adhesión), cohesiva, o mixto interfacial / cohesiva. La adhesión puede ser definida a través de la mecánica de fractura que considere la energía necesaria para iniciar o propagar grietas y evaluar la adhesión del sistema de revestimiento en términos de resistencia a la fractura. El experimento debe establecer la condición de equilibrio en el que la energía elástica proporcionada por una fuerza externa (según se ha definido por la geometría de la muestra y la carga aplicada) se equilibra con la propagación de una grieta estable. Más de un valor crítico de la velocidad de liberación de energía de deformación, G_c (Expresado en J / m^2) esto genera la propagación de grietas y por lo tanto se produce el fracaso.

Medidor de adherencia manual portátil por tracción 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.

La dolly (figura. 81) es un 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 81.Dolly

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. 81. El display LCD indicara en Psi ó Mpa de manera directa la presión ejercida y necesaria para hacer despegar la dolly del sustrato. El medidor de adherencia está conformado como lo describe la figura.82.

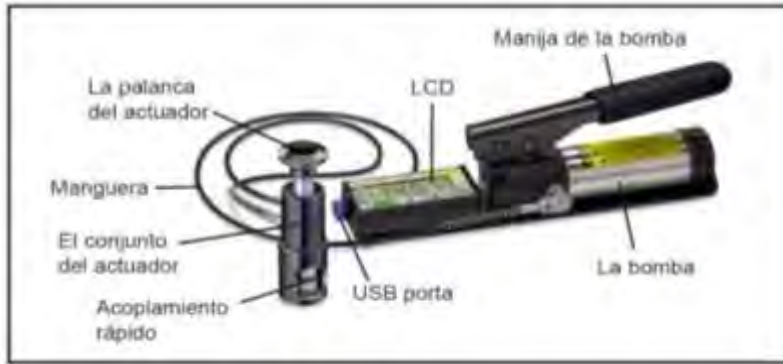


Figura 82. Medidor de adherencia

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.83 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:

$$R = p \cdot \frac{l}{A} \dots (20)$$

dónde:

- R. – Resistencia eléctrica.
- p. – Resistencia específica.
- l. – Longitud.
- A. – Superficie de sección.

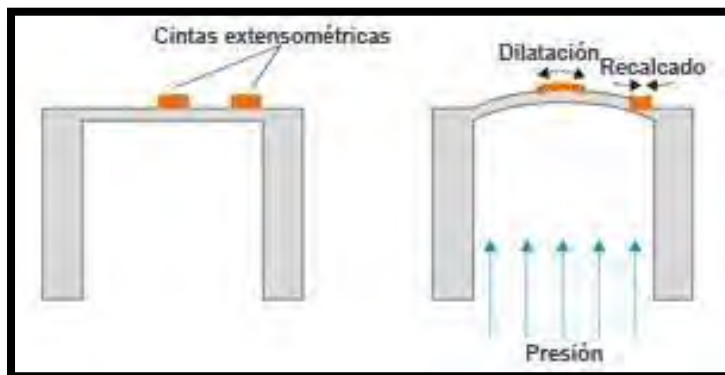


Figura 83. Diafragma de transductor de presión.

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 recalcado tendría el efecto contrario. Para la realización del principio se utiliza un cuerpo base que se deforma de manera controlada 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. 84 en una membrana de las cuales unas están ubicadas en el área de dilatación, otras en el área del recalado. 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 (recalado). Para realizar una medición precisa se conecta las cintas a un puente Wheatstone.

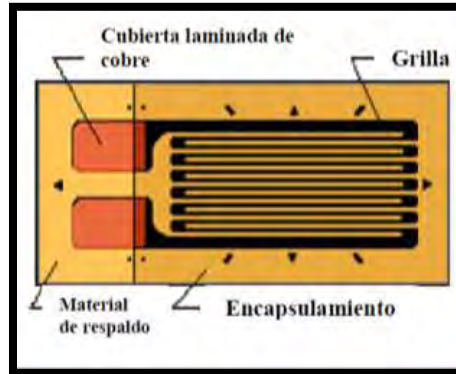


Figura 84. Cinta extensométrica.

Pasos básicos para probar la adherencia del revestimiento con un medidor de adherencia de PosiTest:

1. Preparación del dolly y del recubrimiento
2. Aplicación del adhesivo y del dolly
3. Prueba de desprendimiento de la zona
4. Prueba de tracción
5. Análisis de los resultados
6. Almacenamiento de los datos de la prueba de tracción.

4. EXPERIMENTACIÓN.

4.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

Para la correcta realización de este ensayo las probetas se elaboraron de acuerdo a la norma ASTM E8, la cual nos describe las pruebas realizadas a dichas probetas como son: la prueba de tensión de los materiales en cualquier forma a temperatura ambiente, específicamente, los métodos de determinación de resistencia a la fluencia, rendimiento del punto de alargamiento, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área, dicho esto para materiales metálicos. Este tipo de pruebas puede ser aplicable a cualquier forma de metálica, tales como: alambre, varilla, barra, tubería y tubo. Las disposiciones de prueba pueden necesitar ser hechas con las especificaciones individuales o métodos de prueba para un material en particular.

La máquina para la realización de esta prueba tiene que ajustarse a los requisitos de este ensayo para que las pruebas antes mencionadas se realicen con éxito. Así como también los dispositivos de agarre tienen que ser acordes con el tipo y forma del material a utilizar, ya que las muestras más comunes son rectangulares y redondos. Para este ensayo se analizaron dos tipos de solera la solera 1018 trabajado en frío y la solera 1010 trabajado en caliente.

Como primer paso se cortaron 24 probetas, 12 probetas de la solera 1010 rolado en caliente y 12 probetas 1018 rolado en frío, de las cuales 6 probetas de acero 1010 rolado en caliente y 6 probetas del acero 1018 rolado en frío fueron utilizadas como probetas testigo para la realización de la prueba de corrosión (Tafel) y tensión.

Para la segunda etapa de este trabajo, se tomaron otras 6 probetas de cada uno de los tipos de aceros ya mencionados anteriormente, a estas se les aplico un proceso de limpieza denominado “sand blast” el cual consiste en limpiar de todo tipo de corrosión e impurezas de las probetas todo esto se realiza por medio de arena, la cual es inyectada por un pistola a altas presiones lo cual provoca la limpieza de las probetas. Después del proceso de limpieza se prosiguió al a realizar el proceso de rugosidad, esto para determinar el perfil de anclaje.

Como siguiente paso se procedió a realizar el recubrimiento de zinc con la pistola de metalización MODELO MK 61 a las probetas de acero 1010 rolado en caliente y 1018 rolado en frío. Después de realizar este proceso se procedió a realizar la prueba de tensión y corrosión (Tafel).

Como último paso practico realizado a las probetas de acero 1010 rolado en caliente y acero 1018 rolado en frío fueron las pruebas de adherencia y la prueba de espesores. Para tener unos correctos datos experimentales, se tomó como base el diseño experimental. El análisis de la varianza, ya que un análisis de la varianza permite determinar si los tratamientos realizados nos muestran diferencias significativas o no suponer que sus medias poblacionales no difieren.

Por consiguiente se explicara la elaboración de las probetas tomando como referencia la norma ASTM E8.

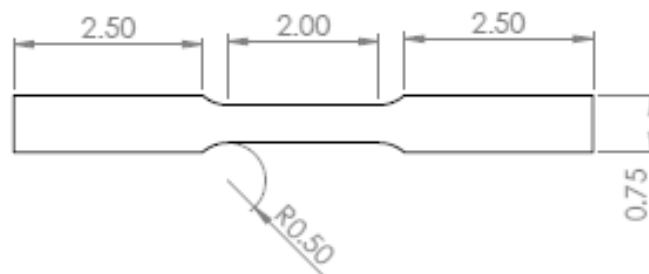


Figura 85. Probeta 1010 rolada en caliente norma ASTM-E8.

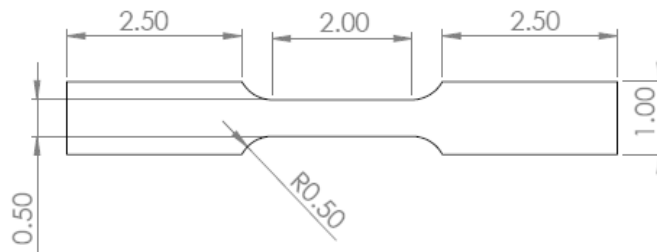


Figura 86. Probeta 1018 rolado en frio norma ASTM-E8.

Para tener una mejor apreciación de la distribución de las probetas se presenta el siguiente esquema:



Figura 87. Esquema del ensayo para las probetas 1010 y 1018

Para en la figura 88 nos ayuda a identificar correctamente los dos tipos de soleras utilizadas en este trabajo, como son la solera de acero 1010 rolado en caliente de $3/4 \times 1/8$ in y la solera 1018 rolado en frio, ya que el objetivo de este trabajo es decretar la diferencia que existe entre cada una de ellas como son: el módulo de Young, carga máxima entre otras, así como también verificar si hay variación de las propiedades de cada uno de los aceros mencionados con anterioridad.



a)



b)

Figura 88. a) Probeta de la solera de acero 1018 rolado en frio $1 \times 1/8$ in, b) Probeta de la solera de acero 1010 rolado en caliente $3/4 \times 1/8$ in.

Cada tipo de solera se sujetó a un tornillo de banco, para luego cortar cada una de las soleras en tramos de 8 pulgadas aproximadamente todo esto se realizó en base a la norma ASTM E8. Para la realización de las pruebas mecánicas y químicas antes mencionadas.



Figura 89. Corte las probetas del acero 1010 y 1018.

Por consiguiente se realizó un maquinado de cada una de las probetas tanto a las de acero 1010 y 1018, esto se realizó en una fresadora vertical OIMSA MODELO FTX-8, como herramienta para realizar el maquinado se utilizó un cortador de carburo de tungsteno.



a)

b)

Figura 90. a) Fresadora vertical OIMSA MODELO FTX-8, b) Cortador de carburo de Tungsteno

Como primer maquinado fue una ranura que se realizó a la mitad de las probetas con una longitud de 2 pulgadas, en la figura siguiente se muestra la posición de las probetas en la fresadora vertical, así como también la forma de las probetas después del maquinado.



Figura 91. Rectificado con una fresadora vertical.



a)



b)

Figura 92. a) Probeta de acero 1018, b) Probeta de acero 1010

Como siguiente paso se realizara un maquinado (redondeo) el cual eliminara los bordes rectos de maquinado anterior, ya que si estos no son erradicados de las probetas provocaran una concentración de esfuerzos y esto conllevaría a que la prueba de tensión no se lleve a cabo correctamente (ver figura. 93).



Figura 93. Realización del maquinado de redondeo

En base a la norma ASTM E8 las probetas quedan de la siguiente forma.



Figura 94. Forma de las probetas según la norma ASTM E8.

Para la eliminación de rebabas e imperfecciones de las probetas después de realizar el maquinado, se procedió a realizar un cepillado con el esmeril como se muestra en la figura siguiente.



Figura 95. Cepillado de las probetas.

Después del proceso antes mencionado, a 12 probetas de cada acero tanto de acero 1010 y acero 1018 se les realizó el proceso de sand blast el cual consiste en limpiar las probetas de todo tipo de óxido e impurezas que contengan cada una de ellas. El proceso consiste en impactar arena sobre la superficie de las probetas a presión por medio de una pistola la cual hace que la arena sea distribuida proporcionalmente en la superficie de la probeta para que quede totalmente limpia.

El tipo de arena utilizada en este proceso se denomina arena de óxido de aluminio de malla 30. Este tipo de arena deja un perfil de anclaje óptimo para la aplicación del recubrimiento metálico de zinc.



a)

b)

Figura 96. a) Máquina de sand blast modelo RRX1 b) Proceso de sand blast.

La presentación de las probetas después del proceso de sand blast se muestra a continuación:



Figura 97. probetas después del proceso de sand blast.

Después de ser aplicado el sand blast se procederá a realizar la prueba de rugosidad para verificar si tenemos un buen perfil de anclaje, el cual nos dará una buena adherencia del recubrimiento.

4.2 PRUEBA DE RUGOSIDAD.

Para la realización de la prueba de rugosidad se tomaron 3 probetas del acero 1018 rolado en frío y acero 1010 rolado en caliente, a dichas probetas previamente se les realizó el proceso de sand blast, y así poder determinar el perfil de anclaje de cada una de ellas.

Para la elaboración de dicha prueba a continuación se muestra la maquina a utilizar.



Figura 98. Dispositivo para prueba de rugosidad MITUTOYO SJ-301.

Para realizar una correcta lectura se siguieron los siguientes pasos:

- 1.- Como primer paso el rugosímetro se tiene que someter a una prueba de calibración esto se realiza tomando una superficie patrón con la cual el dispositivo queda calibrado para realizar la prueba de rugosidad a las probetas.
- 2.- La aguja del rugosímetro se tiene que colocar en una superficie plana y esta debe estar a una distancia mínima de la probeta (rosando) para tener una correcta lectura como se muestra en la figura siguiente.



Figura 99. Aplicación de la Prueba de rugosidad.

4.3 RECUBRIMIENTO.

La prueba de recubrimiento se realizó utilizando la pistola para metalizado flame-spray MK 61, la cual funciona con gas acetileno, oxígeno, aire a presión y zinc 02e de 16 mm de diámetro, el cual se utilizó para el recubrimiento de las probetas destinadas para esta prueba la máquina de metalización, así como sus componentes se muestran en la siguiente figura:

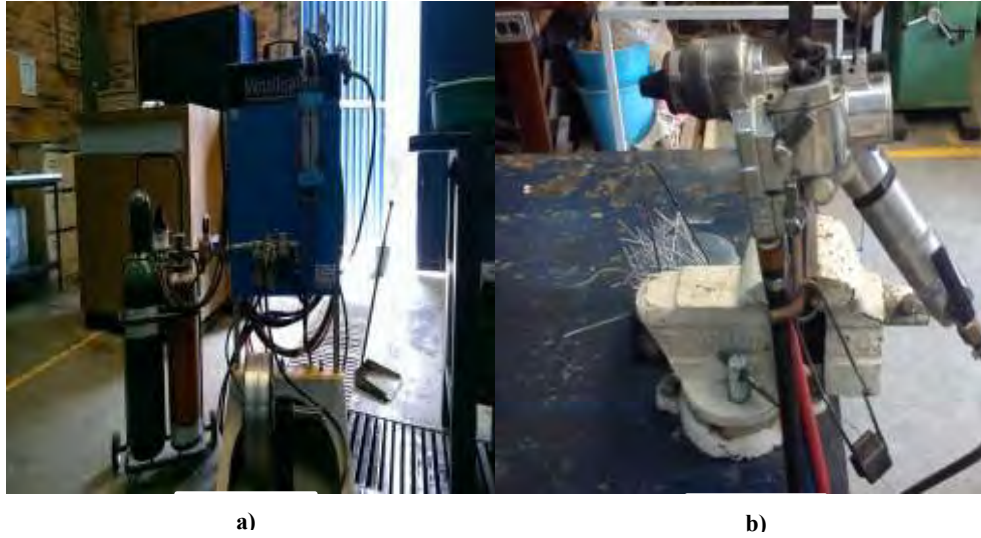


Figura 100.a) Máquina de metalización MK 61 b) pistola para metalización

Previo a la aplicación del recubrimiento las probetas se precalentaron a una temperatura de 105 °C aproximadamente, esto es para tener una mejor adherencia del recubrimiento metálico. Como siguiente paso se aplicó el recubrimiento metálico, éste aplicó de forma vertical, es decir, de arriba hacia abajo, este tipo de aplicación del recubrimiento evita el desperdicio de material de recubrimiento (figura 101).



Figura 101. Aplicación del recubrimiento metálico

4.4 PRUEBA DE ESPESORES.

La prueba de espesores es una prueba muy importante ya que esta nos indica la cantidad de recubrimiento que se ha adherido a las probetas de acero 1010 y acero 1018. Para conocer los espesores de las probetas se utilizó el dispositivo Positector 6000 el cual se muestra en la siguiente figura.



Figura 102. Dispositivo Positector 6000

Para una correcta medición de los espesores de los a continuación se muestra la correcta posición del dispositivo, así como también una medición real en el área de la probeta la cual es de interés.



Figura 103. Medición de espesor de las probetas de acero 1010 y acero 1018

4.5 PRUEBA DE TENSIÓN.

Para llevar a cabo la prueba de tensión se tomaron 12 probetas de acero 1010 rolado en caliente, 6 de las cuales fueron recubiertas con zinc. Después se tomaron 12 probetas de acero 1018 rolado en frío y se dividieron en 6 recubiertas con zinc y 6 probetas sin recubrimiento, para realizar el estudio de las propiedades mecánicas de las probetas se utilizaron la máquina de ensayos universales INSTRON 600-DX (figura 104).



Figura 104.máquina de ensayos universales INSTRON 600-DX

Para comenzar con el ensayo como primer paso se tiene que hacer una calibración de la máquina, así como también se introducen todos los datos relacionados con las probetas, tales como:

- Medidas.
- Tipo de acero.
- Especificaciones de cada probeta

Para tener una idea más clara de cómo se realizó la prueba de tensión a continuación se muestra la máquina de ensayos universales realizando el ensayo de tensión (figura 105) y el estado de las probetas después de la prueba (figura 106).



Figura 105.Ensayo de la prueba de tensión.



Figura 106. probetas después del ensayo de tensión.

4.6 PRUEBA DE ADHERENCIA.

En la prueba de adherencia realizada a las probetas de acero 1010 rolado en caliente y acero 1018 rolado en frío, todas ellas recubiertas con recubrimiento metálico de zinc con el proceso de metalización mencionado anteriormente. La prueba de adherencia realizada en dichas probetas fue regida bajo la norma D4541-02 la cual nos especifica los métodos estándar para la resistencia de recubrimientos Pull-Off, el dispositivo a utilizar fue el POSITEST AT-M (figura 107).



Figura 107. Dispositivo POSITEST AT-M

Para realizar la prueba de adherencia los Dollys (peones) se pegan a las probetas con un pegamento epóxico el cual nos proporciona una buena adherencia de los Dollys, pero para ello se tiene que dejar reposar el pegamento un lapso de 24 horas esto para tener una buena adherencia en la probeta recubierta con zinc (figura 108). Después de esto se quita el excedente de pegamento para que no haya interferencia al momento de hacer la prueba (figura 109).



Figura 108. Colocación de los Dollys en las probetas



Figura 109. Eliminación del exceso de pegamento.

4.7 PRUEBA DE CORROSIÓN.

Para la prueba de corrosión se realizó en base a las normas siguientes:

- NORMA D1193-06: Especificación estándar para el reactivo agua.
- NORMA G3-89: Práctica estándar para convenios aplicables a electroquímicos, mediciones de corrosión.
- NORMA G5-94: Norma de referencia, método de prueba potencioestática y potenciodinámicas anódicas polarización y mediciones.

Las normas antes mencionadas se aplicaron a las probetas tronadas y recubiertas, así como también a las probetas tronadas sin recubrimiento de los aceros 1010 rolado en caliente y acero 1018 rolado en frío. La prueba de corrosión se realizó en la zona de la fractura de cada probeta y en uno de los extremos de las probetas como se muestra en la figura 110.

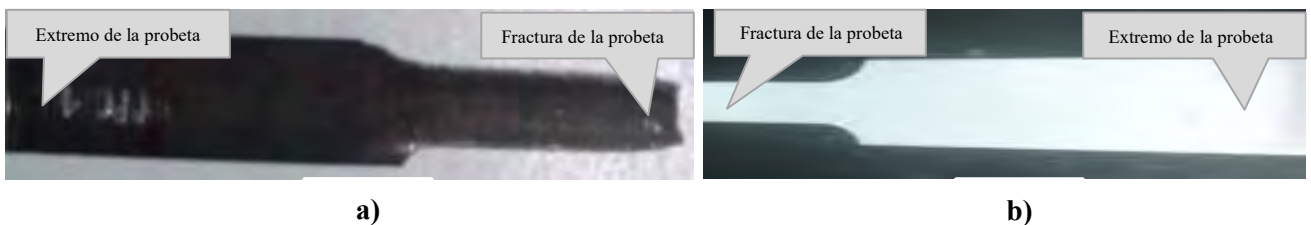


Figura 110. Aplicación de la prueba de corrosión a) probeta sin recubrimiento b) probeta con recubrimiento.

Como siguiente paso se realiza la preparación de la solución salina que contenía 200 ml de agua y 6.8 gr de sal esto se hizo para simular el agua de mar, después se limpia la probeta con acetona para tener una buena lectura. Después se precisa de una célula electrolítica para la realización de las experiencias de polarización, donde se ponen en contacto el medio agresivo (solución salina) y el material metálico bajo estudio (probeta con recubrimiento y sin recubrimiento) (figura 111). Este constituye el electrodo de trabajo, cuyo potencial se mide o impone con respecto a un electrodo de potencial constante el cual es el electrodo de referencia (calomel) cerrando el circuito, también se utilizara un electrodo auxiliar, generalmente de material inerte en este estudio se utilizó el grafito.



Figura 111 Célula electrolítica



Figura 112. Prueba de corrosión y aplicación de software Gamry

5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 ENSAYO DE TENSIÓN.

A partir de los datos obtenidos en este ensayo, se obtuvieron las curvas de esfuerzo y deformación ingenieril y verdadera, correspondientes a cada una de las probetas, tanto de acero 1010 y 1018 a las cuales se les aplico la prueba de tensión de las siguientes curvas se determinó el módulo de Young y la carga máxima de cada una de ellas. A continuación se muestran las gráficas y su tabla de resultados tomados después de analizar la probeta en la máquina de ensayos universales INSTRON 600 DX y en conjunto con el software PARTNER.

La figura 113 nos muestra la representación gráfica, donde se muestra la curva esfuerzo deformación ingenieril de la probeta de acero 1010 rolado.

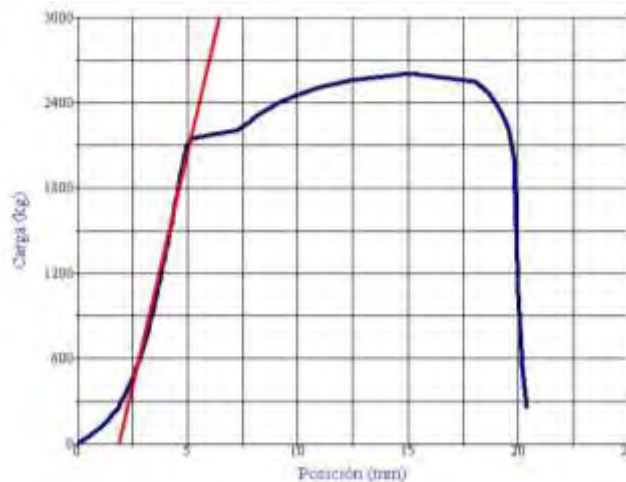


Figura 113. Curva de esfuerzo deformación ingenieril de acero 1010 rolado en caliente.

En la tabla siguiente se muestran las características de la probeta de acero 1010 y propiedades mecánicas

Anchura	Espesor	Área	Resistencia a la tracción	Punto de carga máxima	Longitud de la galga de la probeta	Módulo de Young
0.5120 in	0.1600 in	52.8515 mm ²	50 kg/mm ²	2603 kg	2 in	658.9550 kg/mm

Tabla 19. Características y propiedades del acero 1010 rolado en caliente.

La figura 114 nos muestra la curva de esfuerzo deformación ingenieril del acero 1018 rolado en frío.

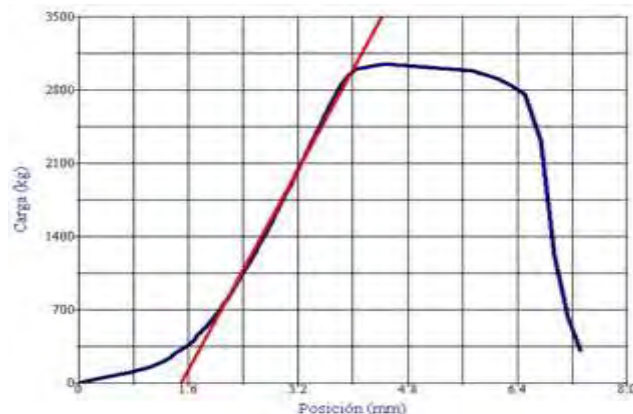


Figura 114. Curva esfuerzo deformación ingenieril 1018 rolado en frío.

Anchura	Espesor	Área	Resistencia a la tracción	Punto de carga máxima	Longitud de la galga de la probeta	Módulo de Young
0.5135 in	0.1315 in	43.5646 mm ²	70 kg/mm ²	3050 kg	2 in	1199.2170 kg/mm

Tabla 20. Características y propiedades del acero 1018 rolado en frío.

5.2 MÓDULO DE YOUNG.

Con el módulo de Young calculado en cada una de las probetas tanto aquellas con el recubrimiento de zinc y aquellas que no fueron recubiertas con el mismo, para ver los efectos significativos del uso del recubrimiento en las probetas se utilizó un diseño factorial 2x2, completamente al azar, detectando así solo los efectos significativos en el módulo de Young.

En el análisis de varianza (ANOVA) se puede observar que existen altos efectos significativos del material sobre el Modulo de Young ($P < 0.05$). También en el ANOVA se determina que para los recubrimientos se detectaron diferencias significativas ($P < 0.05$). Además se pudo observar que existe una interacción entre el material y el recubrimiento.

La grafica de efectos significativos (Figura 115 (a)) nos muestra que la diferencia que existe entre un acero 1010 y 1018, ya que en un acero 1018 tiene un módulo de Young muy alto en comparación con el módulo de Young del acero 1010 que es muy bajo; es decir que el acero 1018 tiene una mayor resistencia contra la deformación elástica; que la deformación elástica es la resistencia del material a deformarse elásticamente regresando a su estado original sin modificarse significativamente las propiedades mecánicas del material. Esto se debe a que el acero 1018 rolado en frío tiene una mayor dureza que acero 1010 rolado en caliente, así como también una de sus propiedades de que un acero este trabajado en frío es que disminuye su plasticidad, (b) Esta grafica nos muestra los efectos principales que tiene el recubrimiento en el módulo de Young. Se puede observar aquellas probetas las cuales fueron recubiertas con zinc tienen una mayor resistencia a la deformación elástica que las probetas las cuales no fueron recubiertas, esto se debe a que el recubrimiento crea una capa protectora en la probeta y a pesar que los recubrimientos solo es un tratamiento superficial tuvo un pequeño impacto en la composición mecánica del acero elevando su módulo de elasticidad; es decir haciéndolo un metal con una mayor resistencia a la deformación elástica.

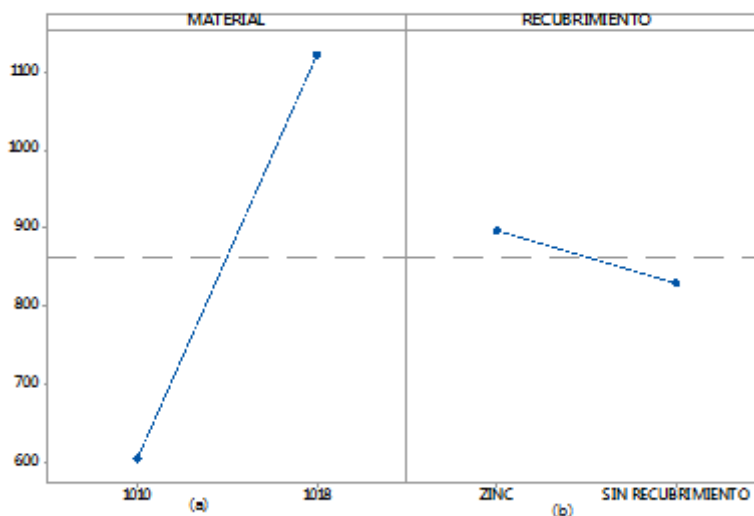


Figura 115.a) Efectos significativos del material en el módulo de Young (b) Efectos significativos del recubrimiento en el módulo de Young.

En la figura 116 nos muestra las gráficas de las interacción del material y el recubrimiento, se puede observar respecto al material, que en el acero 1010 rolado en caliente si hay un interacción favorable ya que el aumento del módulo de Young es relativamente considerable lo cual nos indica que al aplicar el recubrimiento de zinc al acero 1010 mejoran sus propiedades mecánicas que en este caso es el módulo de Young, la buena adherencia del material de recubrimiento provoca el aumento del módulo de Young, esto se debe a que la probeta al aplicarle el recubrimiento llega a una temperatura a la cual provoco que se diera un tratamiento térmico como es el temple, esto provoco un cambio en la microestructura del acero, la cual fue una afinidad de grano, es decir, que el acero fuese relativamente un poco más resistente a la deformación elástica. Para el caso del acero 1018 la aplicación del recubrimiento no hubo una interacción considerable entre el acero y el recubrimiento ya que no tuvo un efecto considerable del módulo de Young, es decir para este tipo de acero la aplicación de un recubrimiento metálico a base de zinc no mejora drásticamente el módulo de elasticidad. Ya que para el acero 1018 se vea afectado por un tratamiento térmico este tiene un bajo-medio contenido de carbono y no permite un tratamiento térmico directo en la probeta, para ello se tiene que llegar a una temperatura 925 °C o cercana a esta para así poder tener una afinidad del grano, es decir, hacer más pequeño el grano y así se reduce la distancia libre que puede provocar una dislocación.

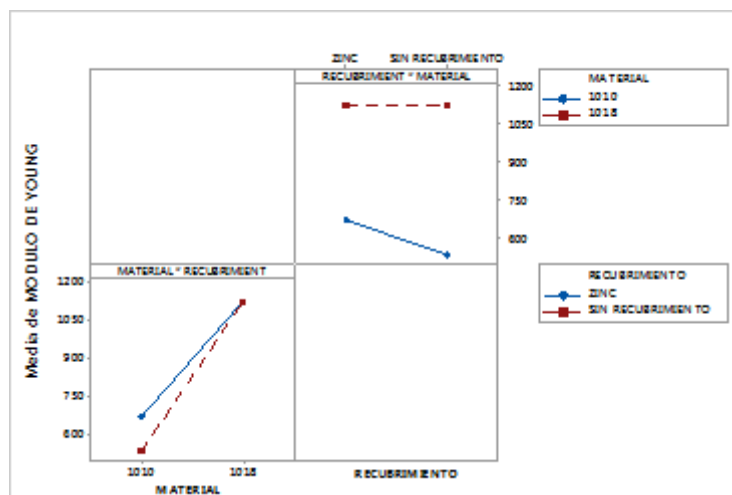


Figura 116. Gráfica de interacción del material y el recubrimiento.

5.3 CARGA MÁXIMA.

Con la carga máxima calculada en cada una de las probetas tanto aquellas con el recubrimiento de zinc y aquellas que no fueron, esto para ver los efectos significativos del uso del recubrimiento en las probetas se utilizó un diseño factorial 2x2, completamente al azar, detectando así solo los efectos significativos en la carga máxima.

En el análisis de varianza (ANOVA) se puede observar que existen altos efectos significativos del material sobre el carga máxima ($P < 0.05$). También en el ANOVA se determina que para los recubrimientos no se detectaron diferencias significativas ya que ($P > 0.05$). Además se pudo observar que no existe una interacción entre el material y el recubrimiento ($P > 0.05$).

Los efecto significativos en un acero con un bajo- medio contenido de carbono aumenta su resistencia y su templabilidad así como también en el caso del acero 1018 tiene más porcentaje de sus elementos de aleación y al estar trabajo en frio tiene una superficie dura y un centro tenaz lo que provoca que sea más resistente a una carga mayor que el que el acero 1010. El acero 1010 por su parte es un menos resistente ya que este acero tiene un 0.10% de carbono y sus elementos de aleación son menores al 1% eso hace que tenga una resistencia relativamente baja, aunque el acero 1010 esta trabajado en caliente tiene un aumento relativo con respecto a sus propiedades mecánicas, ya que este tuvo un tratamiento térmico al momento de su proceso de elaboración. Ver figura 117 (a).

Para el caso del recubrimiento también tuvo un efecto significativo en la carga máxima ya que a pesar de que el recubrimiento es un tratamiento superficial se nota que las probetas a las cuales fueron recubiertas con zinc tuvieron un aumento en su resistencia a la carga, esto se debe a que hubo un ligero calentamiento en las probetas que en poca medida afino la estructura y elimino tensiones internas haciendo el acero un poco más resistente con el recubrimiento de zinc. Como se muestra en la figura 117 (b).

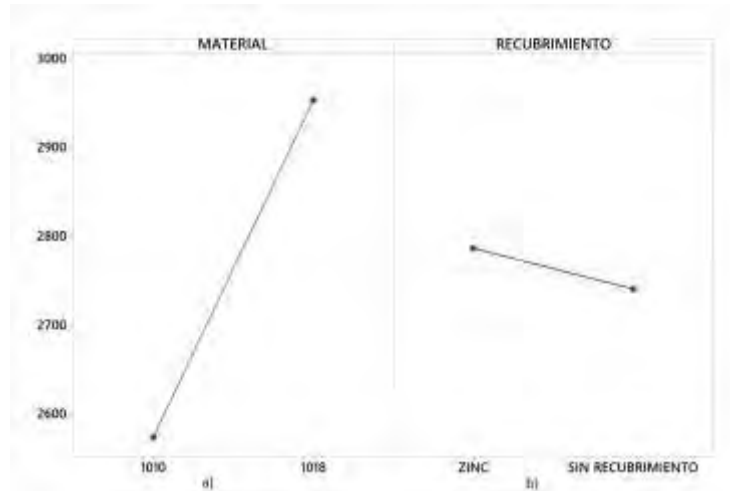


Figura 117. (a) Efectos significativos del material sobre la carga máxima (b) Efectos significativos del material sobre la carga máxima.

Para interacción que hay entre el tipo de acero y el recubrimiento y el efecto que se tiene sobre la carga máxima se puede decir que para el caso del acero 1010 rolado en caliente la aplicación del recubrimiento a base de zinc tuvo un efecto negativo ya que hubo una pequeña reducción de la carga máxima la cual soporta el acero 1010 es debido a que el calor aplicado al acero afecto su microestructura, es decir que la estructura interna del acero 1010 se hizo más propensa a fracturas al momento de aplicar esfuerzo o carga. Para el caso del acero 1018 la aplicación del recubrimiento de zinc tuvo un efecto importante en el acero ya que aumento drásticamente la carga máxima esto debido a que hubo una buena adherencia del recubrimiento lo cual provoco que el acero fuese más resistente, como se sabe la aplicación de un recubrimiento conlleva la aplicación de calor hace provoco que el acero se diera un tratamiento térmico afectando la estructura interna lo cual hizo que el acero 1018 fuera más tenaz y resistente a una carga mayor, como se muestra en la figura siguiente.

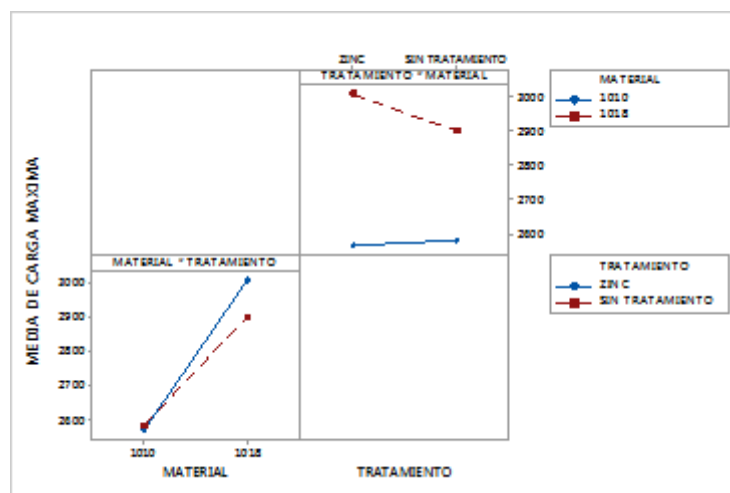


Figura 118. Interacción entre el acero 1010, acero 1018 y el recubrimiento de zinc.

5.3 PRUEBA DE DE CORROSION.

Para calcular la velocidad de corrosión en cada una de las probetas tanto aquellas con el recubrimiento de zinc y aquellas que no fueron, esto para ver los efectos significativos del uso del recubrimiento en las probetas se utilizó un diseño factorial 2x2, completamente al azar, detectando así solo los efectos significativos.

En el análisis de varianza (ANOVA) se puede observar que no existen efectos significativos del material sobre la prueba de corrosión ($P > 0.05$). También en el ANOVA se determina que para los recubrimientos no se detectaron diferencias significativas ($P > 0.05$). Además se pudo observar que no existe una interacción entre el material y el recubrimiento ($P > 0.05$).

La prueba tafel es un ensayo el cual nos muestra las velocidades de corrosión esto con la ayuda de las curvas de tafel la cual nos indican también cuando un material llega a la pasivación, esto es cuando no hay desprendimiento de electrones del acero o material de recubrimiento lo que conlleva a que no haya pérdida de material, este estudio se realizó en un acero 1010 rolado en caliente y acero 1018 rolado en frío así como también de un recubrimiento metálico de zinc el cual fue aplicado a los dos diferentes tipos de aceros.

Con los datos obtenidos de la prueba tafel como fue la velocidad de corrosión dada en milímetros por año se realizó un sistema factorial 2x2 para ver los efectos significativos de la aplicación del recubrimiento de zinc en los aceros, así como también para ver la interacción que hay entre en material de recubrimiento y los aceros antes mencionados. En la figura 119 (a) nos muestra que un acero 1010 tiene una velocidad de corrosión mayor que un acero 1018 esto debido a sus propiedades químicas tales como contenido de carbono y otros elemento de aleación que hacen que el acero 1018 tenga un potencial eléctrico más alto y esto más con la ayuda del recubrimiento metálico lo cual hace que el acero tenga una protección anódica la cual se corroe primero y protege al acero de la solución salina que fue el elemento de corrosión para este estudio. La grafica 119 (b) nos muestra que en la zona donde existe una mayor concentración de esfuerzos y que en este caso este se llevó hasta el punto de ruptura hay una mayor velocidad de corrosión ya que existen grietas en el material de recubrimiento lo cual hace que penetre la solución salina provoca que la protección anódica no sirva de nada. La zona a la cual no tiene ningún esfuerzo o un esfuerzo mínimo tiene una velocidad de corrosión baja debido a que hay una adherencia del recubrimiento.

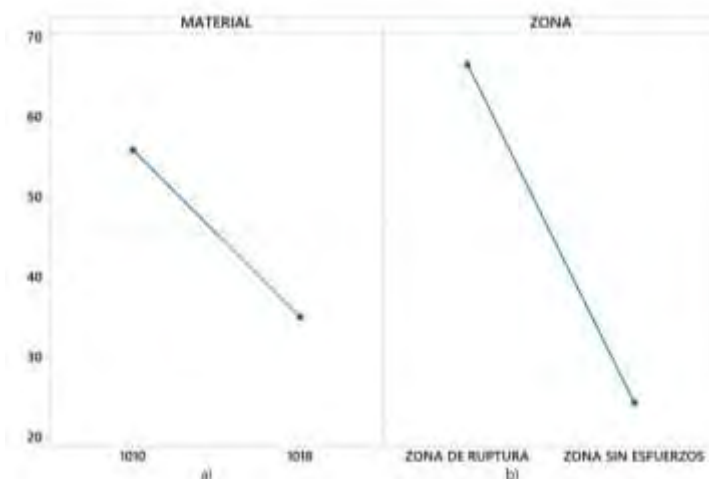


Figura 119. Efectos principales de entre el acero 1010 y 1018

La figura siguiente nos muestra la interacción del material y la zona en la cual se realizó la prueba, como se observa con relación al material no existe una diferencia mínima entre el acero 1010 y 1018, esta mínima diferencia es debida a que en el acero 1018 no hubo una buena adherencia del recubrimiento de zinc y esto provocó grietas o poros por los cuales hubo una penetración del líquido corrosivo (agua salina), esto con respecto a la zona sin esfuerzos, para el caso de la zona de ruptura se tienen una velocidad de corrosión muy alta en comparación de la zona sin esfuerzos tanto en los aceros 1010 y 1018, pero para el caso del acero 1010

existe una mayor velocidad de corrosión, esto se debe como se mencionó anteriormente a una bajo contenido de carbono y sus aleaciones como es el manganeso que nos evita la oxidación del acero y debido al esfuerzo al cual se sometieron los aceros el más afectado fue el acero 1010 en el cual se produjeron grietas o poros las cuales dejaron al descubierto al material.

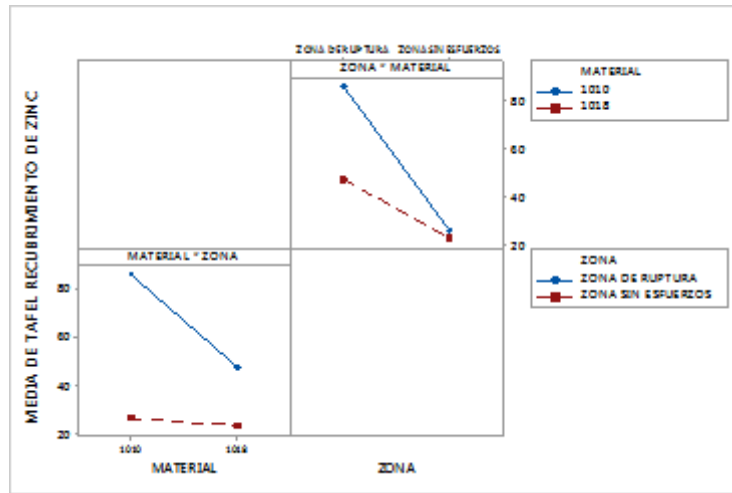


Figura 120. Interacción entre el material y la zonas donde se realizo la prueba

Para tener una idea grafica de la velocidad de corrosión como se muestra la figura 121. Esta nos indica las curvas anódica y catódica del acero 1018 rolando en frío sin recubrimiento, se puede observar en la rama anódica la cual nos indica la velocidad a la cual se corroe el acero 1018, este tiene un lapso de pasivación relativamente largo, es decir, que el acero en este momento no presenta ningún tipo de corrosión en este punto, y a medida que aumenta la intensidad de corriente pasa de un estado de pasivación a un estado de transpasivación, lo que quiere decir esto es que la capa de pasiva que se formó en la superficie del acero y que hacía que el acero 1018 no se produjera corrosión, se comience a producir picaduras o grietas y de ello el acero comience a corroerse. Para el acero 1018 su intensidad de corriente es de $I_{corr} 14.10 \mu A$, esta nos indica que a mayor es a intensidad de corriente mayor será la velocidad de corrosión. La velocidad de corrosión del acero 1018 es de 8.998 mpy, lo que nos dice que el acero 1018 se corroe 8.998 milipulgadas por año.

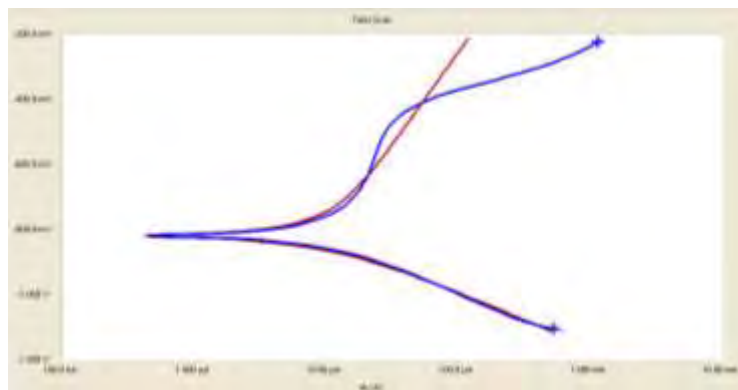


Figura 121. Curvas anódica y catódica del acero 1018 rolando en frío.

La siguiente figura nos representa las curvas anódica y catódica del acero 1010 rolando en caliente, de las siguientes curvas podemos ver que la rama anódica nos indica que para el acero 1010 no se tiene un lapso de pasivación tan largo, por lo que rápidamente pasa al estado de transpasivación, es decir que el acero comienza a corroerse, esto debido a que la corriente de corrosión del acero 1010 es de $I_{corr} 29.60 \mu A$ mucho mayor con respecto a la corriente de corrosión del acero 1018, esto se debe como se mencionó anteriormente a los metales de aleación del acero y de su contenido de carbono, y ya que el acero 1010 tiene un porcentaje menor

de carbono y de sus elemento de aleación, este tiene un velocidad de corrosión más alta la cual es de 28.73 mpy (milipulgadas por año).

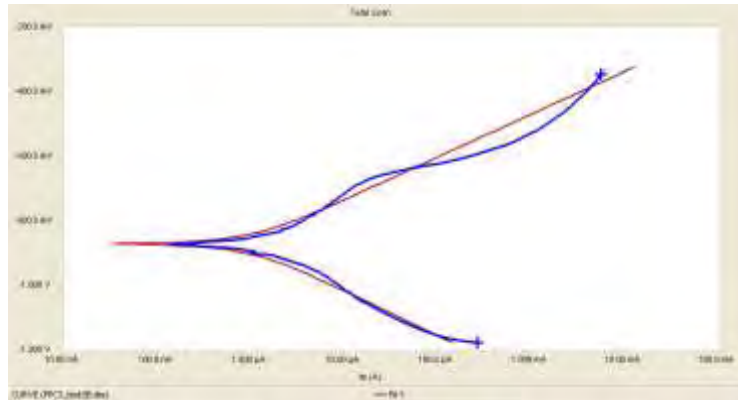


Figura 122. Curvas anódica y catódica del acero 1010 rodado en caliente.

5.4 PRUEBA DE RUGOSIDAD.

Para la prueba de rugosidad aplicada al acero 1010 rodado en caliente, nos indica que en comparación con las probetas de acero 1018 rodado en frío, el acero 1010 tiene una mejor rugosidad, es decir, tiene un mejor perfil de anclaje, esto se debe a que el acero 1010 contiene un mejor porcentaje de carbono lo que hace que posean una menor dureza. Estos aceros tienen relativamente baja resistencia, pero buena capacidad para darles forma. Para el caso del acero 1018 sucede lo contrario por su contenido de carbono tiene una superficie muy dura pero un centro tenaz y por ello el perfil de anclaje es bajo y no se tiene una buena adherencia del material de recubrimiento que en este caso es el zinc. Lo antes mencionado se tomo en cuenta respecto a los parámetros señalados R_a R_z R_q los cuales nos indican los parámetros de rugosidad, como son:

R_z = Promedio de las alturas de pico a valles.

R_a = Valores absolutos de los alejamientos del perfil de anclaje desde la línea central.

R_q = La máxima altura del perfil.

Estos parámetros son representados en las siguientes figuras.

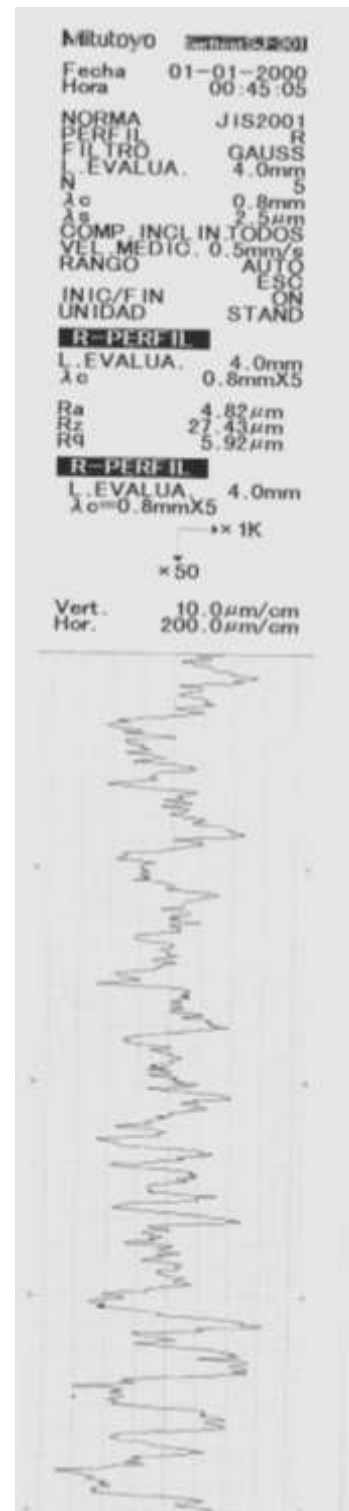
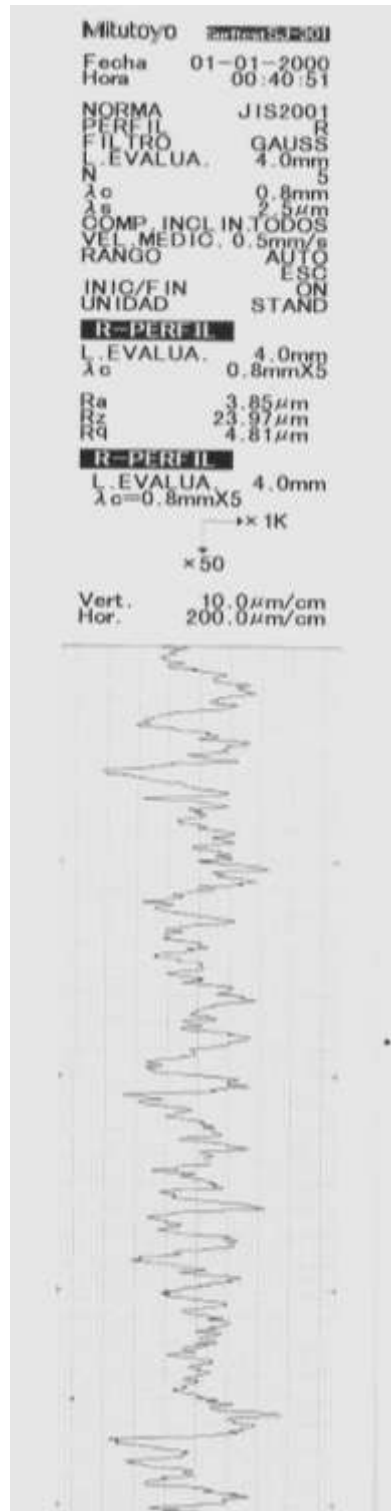


Figura 123. Prueba de rugosidad acero 1010 rolado en caliente.



Figura 124. Prueba de rugosidad acero 1018 rolado en frio.

5.5 PRUEBA DE ADHERENCIA.

Para la prueba de adherencia se tomaron 4 probetas de acero 1010 y 4 probetas de acero 1018 para realizar un estudio estadístico: como calcular el promedio, media, desviación estándar y coeficiente de varianza, para analizar la adherencia del recubrimiento metálico de zinc y hacer una comparación de cada uno de estos aceros antes mencionados. A continuación se muestran las tablas correspondientes de los aceros 1010 y acero 1018.

Probeta	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Acero 1018 rolado en frío	177.75	34.63	19.48%

Tabla 21. Valores estadísticos del acero 1018 rolado en frío.

Probeta	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Acero 1010 rolado en caliente	281	107.80	38.36%

Tabla 22. Valores estadísticos del acero 1010 rolado en caliente.

En las tablas anteriores nos muestra que el acero 1010 rolado en caliente cuenta con un mayor coeficiente de variación, esto debido a que los datos arrojados por las probetas de acero 1010 son mucho mayores a los del acero 1018 esto también se ve reflejado en el promedio de cada uno de los aceros. Estos valores estadísticos nos indican que en el acero 1010 existe un mejor perfil de anclaje para la aplicación del recubrimiento metálico de zinc, en comparación con los datos mostrados por el acero 1018 que son mucho menores y el coeficiente de variación es menor, esto se debe a que el proceso de sand blast realizado en el acero 1018 no provoco que se tuviera mayor perfil de anclaje y por consiguiente tampoco una buena adherencia del recubrimiento metálico de zinc.

5.6 PRUEBA DE ESPESORES.

La prueba de espesores fue realizada a 6 probetas del acero 1018, cada una de estas probetas se le realizaron 9 mediciones a lo largo de la probeta, para tener el espesor del recubrimiento metálico de Zinc a lo largo de la probeta y así tener un análisis estadístico, a continuación se muestra la siguiente tabla con la media, desviación estándar y el coeficiente de variación.

Probeta	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
PFR 1	108.9	36.2	33.20 %
PFR 2	67.24	1.01	1.51 %
PFR 3	59.04	1.83	3.11 %
PFR 4	75.55	2.42	3.20 %
PFR 5	36.66	1.60	4.38 %
PFR 6	51.81	2.15	4.15 %

Tabla 23. Valores estadísticos del acero 1018 rolado en frío.

De los datos obtenidos en la tabla anterior nos muestra que las probetas PFR1, PFR2, PFR4, presentan un mayor espesor con respecto a las probetas PFR3, PFR5, PFR6, pero las probeta PFR1, PFR4 y PFR6 tienen un mayor índice de variabilidad con respecto a su media, es decir, que los datos obtenidos de cada una de estas probetas son muy distantes entre sí, lo que nos dice que el espesor a lo largo de estas probetas no es tan uniforme debido a que el acero 1018 no tiene un buen perfil de anclaje. A su vez el coeficiente de variación de las probetas PFR1, PFR5, PFR6, es el más alto lo que nos muestra que estas probetas tienen mayor porcentaje de variación entre los espesores a lo largo de la probeta de acero 1018.

Para las probetas del acero 1010 rolado en caliente se tomaron 4 probetas de las cuales, se les realizaron diferentes mediciones a lo largo de cada una de estas probetas, para realizar un análisis estadístico y ver la relación que existe entre el perfil de anclaje y el espesor del recubrimiento de zinc, como se muestra en la tabla 24.

Probeta	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
PCR1	26.31	1.05	4 %
PCR2	44.36	1.21	2.74 %
PCR3	28.89	1.09	3.79 %
PCR4	40.09	0.67	1.68 %

Tabla 24. Valores estadísticos del acero 1010 rolado en caliente.

Como se muestra en la tabla anterior nos muestra que las probetas PCR4, PCR2, son las probetas que tienen mayor recubrimiento que las probetas PCR1, PCR3, a las cuales no tuvieron un recubrimiento uniforme, debido a que no tuvieron un buen perfil de anclaje, esto provocado a que en la superficie de la probeta de acero 1010 no tuvo una buena limpieza en el proceso de sand blast, a su vez la desviación estándar nos muestra que las probetas PCR2, PCR3, tienen los valores más alejados de su media es decir, que a lo largo de la probeta se tienen distintos espesores debido a la superficie en cada punto. Por consiguiente el coeficiente de variación nos muestra que las probetas PCR1, PCR3 nos indican que tienen un alto porcentaje de variación en sus mediciones del espesor tomadas en la superficie de la probeta. Esto nos muestra que a pesar de que las probetas sean del mismo acero 1010 las superficies en cada una de ellas son distintas en distintos puntos donde el recubierto de zinc tiene diferentes espesores.

6. CONCLUSIONES.

El objetivo de este trabajo fue la mejora de las propiedades mecánicas a partir de aplicar un recubrimiento de Zinc; de las cuales solo nos enfocaremos en dos: el módulo de Young y la carga máxima de los aceros 1010 rolado en caliente y acero 1018 rolado en frío, con la ayuda de un recubrimiento metálico de zinc, así como también la protección de cada uno de estos aceros de la corrosión. Para comprobar si se tuvo un aumento significativo de las propiedades de los aceros se realizó la prueba de tensión en cada uno de los aceros en cuestión. En el caso del acero 1018 la aplicación del recubrimiento metálico de zinc no tuvo efecto en el módulo de Young ya que este relativamente igual en comparación de cuando no se le aplica el recubrimiento de zinc, esto se debe a que el proceso de la aplicación del recubrimiento y del calentamiento que sufre la probeta no se ve afectada haciendo que el módulo de Young sea mayor. Por otra parte la carga máxima del acero 1018 si sufrió un cambio positivo al momento de la aplicación del recubrimiento metálico ya que como se sabe el acero 1018 por su contenido de carbono tiende a tener una superficie dura y un centro tenaz lo cual hace que este acero soporte cargas mucho mayores, al aplicarle recubrimiento metálico de zinc el precalentamiento de la probeta y a su vez el calentamiento obtenido al aplicarle el recubrimiento de zinc provocó que el acero fuera más tenaz y resistente a mayores esfuerzos y cargas.

Por su parte para el acero 1010 rolado en caliente tiene un porcentaje de carbono más bajo y por consecuente sus elementos de aleación tienen menos del 1% en su composición, esto hace que el acero 1010 sea frágil y un con un módulo de Young bajo pero al momento de la aplicación del recubrimiento metálico si tuvo efectos significativos en el módulo de Young, ya que este aumento después de la aplicación del recubrimiento metálico, esto se debe a que la probeta del acero 1010 sufrió un tratamiento térmico el cual provocó un cambio drástico en su estructura molecular interna y tuvo un efecto positivo al aumentar la elasticidad del acero 1010 haciéndolo más elástico al momento de aplicarle esfuerzos, esto sucedió también con la carga máxima, esta aumento al hacer que el acero 1010 tenga un centro más tenaz, es decir que lo hace más resistente a cargas mucho mayores.

Con los datos obtenidos con respecto a la corrosión nos muestra que para las probetas sin recubrimiento de acero 1010 tienen mayor velocidad de corrosión comparadas a las de acero 1018, esto debido a que el acero 1010 contiene un menor porcentaje de carbono y en menor porción elementos de aleación que es de menos del 0.10% los cuales provocan que el acero no se corra tan rápido, para el acero 1018 la velocidad de corrosión es mucho menor esto debido a su contenido de carbono que es de 0.18% y de sus elementos de aleación los cuales lo hacen un acero más resistente a los medios corrosivos.

La prueba de corrosión se llevó a cabo en dos puntos de las probetas una fue en la zona de ruptura de la probeta y la otra fue en un extremo, para cada uno de los acero 1010 y 1018 respectivamente. Cuando se llevó a cabo la aplicación del recubrimiento metálico de zinc en el acero 1010 rolado en caliente en el extremo de la probeta, la velocidad disminuyó drásticamente, debido a que el recubrimiento metálico actúa como una capa anódica la cual protege al acero 1010, es decir al momento de que el acero 1010 se expone a un medio corrosivo como es el agua salina, el recubrimiento de zinc actúa como una capa protectora que impide que la corrosión llegue al acero 1010 y este pierda sus propiedades.

Para el extremo donde se produjo el esfuerzo en la probeta del acero 1010 la velocidad de corrosión fue mucho mayor ya que en esta parte, hubo desprendimiento de recubrimiento de zinc y como consecuencia no existe una correcta capa de protección del recubrimiento metálico de zinc, y esto provocó que la velocidad de corrosión en esta parte de la probeta aumentara drásticamente, ya que no hubo una protección anódica en esta parte provocando que la corriente de corrosión aumentara y comenzara un desprendimiento de electrones del acero 1010 y este sufriera una disminución del mismo.

Para el caso de las probetas de acero 1018 que al igual que las probetas del acero 1010 se realizó la prueba de corrosión en el extremo de la probeta y en la zona de esfuerzos. Para el caso de la zona de esfuerzos el acero 1018 tiene una menor velocidad de corrosión comparada con la velocidad de corrosión del acero 1010, esto debido a que el acero 1018 a pesar de desprendimiento de recubrimiento, este acero contiene mayor contenido de carbono y de sus elementos de aleación lo cual lo hace un acero más resistente con una superficie resistente y un centro tenaz lo cual hace que la corrosión sea más lenta, ya que el acero 1018 tiene una corriente de

corrosión muy baja, lo que nos conlleva la etapa de pasivación en este punto sea un poco más largo y por consiguiente la corrosión se detenga hasta que la corriente de corrosión aumente y llega a la etapa de transpasivación la cual provoca la corrosión.

Para el caso de la zona sin esfuerzos en la probeta de acero 1018 el recubrimiento de zinc actúa como una protección anódica la cual provoca que la corrosión se vea disminuida a tal grado que no altera la estructura del acero 1018, a pesar de que el recubrimiento en el acero 1010 es mejor que en el acero 1018, para el acero 1018 también se cumplió el objetivo de evitar que la corrosión llegue al centro del acero 1018 y este provoque corrosión por picaduras o por grietas las cuales provoquen que el metal pierda todas sus propiedades mecánicas y los vuelva frágiles y susceptibles a rupturas por esfuerzos mínimos los cuales pueden ser soportados por el acero 1018 cuando está en óptimas condiciones.

La prueba de rugosidad es aplicada después de limpiar las probetas por medio del proceso de sand blast, los valores obtenidos por medio del rugosímetro nos dice que el acero 1010 tiene un mayor perfil de anclaje con respecto al perfil de anclaje del acero 1018, ya que el acero 1018 rolado en frío por su contenido de carbono hace que tenga una superficie dura y un centro tenaz lo cual provoca que al realizar el proceso de sand blast este no debe un perfil rugoso o ligeramente liso. Por su parte el acero 1010 por tener un menor porcentaje de carbono 0.10% tenga una superficie menos rígida lo cual es de gran ayuda desde que al aplicar el proceso de sand blast, ya que este tiene un mayor efecto en la superficie del material, es decir, deja una superficie más rugosa, lo cual nos deja un perfil de anclaje más óptimo para la aplicación de un recubrimiento.

Para la prueba de adherencia de los valores obtenidos y analizados por medio de valores estadísticos nos dicen que el acero 1010 tiene una mejor adherencia del recubrimiento de zinc debido a la que el perfil de anclaje es adecuado, debido a como se mencionó anteriormente el acero 1010 tiene una superficie menos rígida en comparación con la superficie del acero 1018 la cual es mucho más rígida, lo cual provoca que no exista una buena adherencia debido a que la superficie de este acero es menos rugosa y no se tiene una buena adherencia del recubrimiento y este sea susceptible a ser desprendido.

La prueba de espesores fueron analizadas por un modelo estadístico el cual nos muestra que las probetas de acero 1018 tienen un mayor espesor de recubrimiento de zinc que las probetas de acero 1010, esto debido a que las probetas de acero 1018 tienen parámetros de rugosidad mucho menores, el recubrimiento de zinc fue depositado superficialmente, he ahí el hecho de que estas probetas tengan un mayor índice de espesor. Por su parte las probetas tienen un menor índice de espesor debido a que tienen mayor índice de rugosidad y esto provoca que el recubrimiento metálico sea depositado mucho más profundamente y por consiguiente sea mucho más anclaje a la superficie.

Para futuras investigaciones se recomienda que para los recubrimientos metálicos aplicados por termo spray utilizado en este trabajo es de gran utilidad en procesos industriales ingenieriles, esto se debe a que el material metálico es el cual se utiliza como recubrimiento se utiliza en forma de alambre, que por medio de una pistola funde el material de recubrimiento por medio de gas, oxígeno y aire comprimido y este es inyectado al sustrato para recubrirlo de la corrosión. Un beneficio más de los recubrimientos aplicados por el termo spray es que al precalentar la probeta de acero antes y en el proceso de la aplicación del recubrimiento, este provoca un tratamiento térmico como es el temple el cual provoca que el acero modifique su límite de grano haciéndolo más fino y así tener una microestructura más compacta evitando dislocaciones. Después de ver los resultados obtenidos al aplicar el recubrimiento metálico de zinc, estos nos muestran efectos positivos, es decir que las propiedades mecánicas de los aceros 1010 y 1018 aumentaron, como fue el módulo de Young y la carga máxima, esto nos dice que al aplicar un recubrimiento metálico a un acero lo hace más resistente a cargas y esfuerzos mayores que los que soporta un acero al cual no se le aplica ningún recubrimiento.

Con respecto a la corrosión también se tuvieron efectos positivos ya que el recubrimiento metálico de zinc actuó como una protección catódica la cual es una protección muy eficaz y protege al material de todo tipo de agente corrosivo del acero, dándole una vida mucho más duradera. Y así los aceros puedan ser utilizados en diferentes ambientes sin temor a que estos aceros pierdan sus propiedades. Este fue uno de los propósitos de este trabajo, que al aplicar un recubrimiento metálico el acero aumente sus propiedades metálicas y sea más resistente a medios extremadamente corrosivos.

Para tener un mayor aprovechamiento de los recubrimientos metálicos se recomienda que las probetas de acero tengan un tratamiento térmico adecuado, es decir, tener un control de las temperaturas de calentamiento del acero, así como también el enfriamiento del mismo, todo esto posterior a la aplicación del recubrimiento metálico, para que las propiedades metálicas del material aumenten, como su módulo de Young y carga máxima, también tener una buena limpieza de las probetas como el proceso de sand blast, como por ejemplo limpiarlo con un arena más gruesa la cual nos dé un mejor perfil de anclaje al momento de la aplicación del recubrimiento metálico este penetre mejor la superficie rugosa del material y tenga una mejor adherencia así como también se recomienda la aplicación de varias capas de recubrimiento metálico de zinc para tener una mayor protección contra la corrosión y mayor capacidad a soportar esfuerzos y cargas mayores sin que sufra desprendimiento de material del recubrimiento metálico de zinc.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- Mott Robert L. (2004). Diseño de Elementos de Maquinas. University of Dayton: Pearson Educación. Pp. 47-49.
- 2.- Kalpakjian, Serope, Schmid & Steven R.. (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Upper Saddle River, New Jersey. USA: Pearson Educación. Pp. 140-150.
3. - Groover Mikell P. (1997). Fundamentos de Manufactura Moderna 1a. Ed. A. Simon & Schuster Company: Prentice-Hall Inc. Pp. 90-95.
4. - Goldstein J.I. et al, "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis", Plenum Press – Snd Ed (1992), p.342, New York and London.
- 5.- Ashby Michael F., Jones David R. H. (2006). Materiales para Ingeniería 2. Linacre house, Jordan Hill, Oxford: Reverté.
- 6.- Mott Robert L. (2006). Diseño de Elementos de Máquinas.: Pearson Educación.
- 7.- Callister, William D. Jr. (2007). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 1. New York, U.S.A: REVERTÉ.
- 8.- Ermitz, Anatolio. (2013). Manual de Hierros y Aceros. Buenos Aires, Argentina: Alsina.
- 9.- Pazos Peinado, Norma. (2006). Tecnología de los metales y Procesos de Manufactura. Universidad Católica Andres Bello, Caracas: Impresos Miniprés. C.A.
- 10.- Degarmo, E. P., Black, J. T. & Kohser, R. A. (1994). Materiales y Procesos de Fabricación. New York, U.S.A.: Reverté.
- 11.- Díaz del Castillo Rodríguez Felipe. (2011). Apuntes de Diseño de Elementos de Maquinas. Cuautitlán Izcalli, México. : Universidad Nacional Autónoma de México.
- 12.- Díaz del Castillo Rodríguez Felipe. (2011). Apuntes de Tecnología de Materiales II. Cuautitlán Izcalli, México. : Universidad Nacional Autónoma de México.
- 13.- Pineda Becerril M. (2004). Modelo de Superficie de Respuesta de las Propiedades Mecánicas de un Acero Inoxidable Duplex (Werkstoff 1.4462). (Tesis de maestría inédita). Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Nacional Autónoma de México.

Figura 1. Diagrama del proceso de la obtención del acero.....	7
Figura 2. “Diagrama esfuerzo-deformación para un acero de bajo contenido de carbono.....	12
Figura 3. Probeta después de la fractura.....	13
Figura 4. Diagramas esfuerzo-deformación: a) Materiales frágiles b) Materiales dúctiles	14
Figura 5. Maquina universal para pruebas de tensión.....	14
Figura 6. Esquema básico del proceso de TS.....	18
Figura 7. Proceso de formación de un recubrimiento.....	18
Figura 8. Proceso de rociado por llama- alambre.....	20
Figura 9. Tipo de rangos de temperatura y velocidad de los procesos de TS.....	23
Figura 10. Tipos de porosidad de acuerdo a su origen.....	24
Figura 11. Tipos de falla de un recubrimiento.....	24
Figura 12. Métodos de preparación superficial para los procesos de TS.....	25
Figura 13. Clasificación de las tecnologías del termo spray.....	25
Figura 14. Obtención de las temperaturas de los gases y velocidades con diferentes sistemas de termo spray.....	27
Figura 15. Sistema de termo spray.....	28
Figura 16. Aplicación del termo spray en la industria.....	29
Figura 17. Corrosión electroquímica.....	30
Figura 18. Dispositivo para comparar el potencial de los metales (Semipila).....	31
Figura 19. Corrosión de electrodos sencillos.....	31
Figura 20. Fuerza electromotriz generada en una pila electroquímica.....	32
Figura 21. Celda de concentración iónica.....	32
Figura 22. Celda de concentración de oxígeno.....	32
Figura 23. Corrosión uniforme.....	33
Figura 24. Corrosión galvánica.....	33
Figura 25. Corrosión en hendiduras o grietas.....	34
Figura 26. Corrosión por picadura.....	34
Figura 27. Corrosión Intergranular.....	34
Figura 28. Corrosión-Erosión.....	34
Figura 29. Disolución Selectiva.....	35
Figura 30. Corrosión bajo Esfuerzo.....	35
Figura 31. Zinc reaccionando con HCl diluido para producir hidrógeno gas.....	35
Figura 32. Polarización por Activación.....	36
Figura 33. Polarización por Concentración.....	36
Figura 34. Poder oxidante de una solución contra la velocidad de corrosión.....	37
Figura 35. Equipo de Metallisation MK61.....	43
Figura 36. Pistola MK 61.....	43
Figura 37. Fases de la prueba de tensión.....	44
Figura 38. Máquina de ensayos universales INSTRON 600 DX.....	45
Figura 39. Separación de la unidad de carga de la unidad fija.....	47
Figura 40. Bastidor y componentes del sistema.....	47

Figura 41. Conjunto de interruptor de fin de carrera standar	48
Figura 42. Flujo y componentes hidráulicos.	49
Figura 43. Célula de carga de equipos Instron Figura 44. Strain Gage.....	50
Figura 45. Ejecución del software Partner la obtención de datos del ensayo de tracción.	51
Figura 46. Hoja de resultados del ensayo.....	51
Figura 47.Representación como voltaje en función de corriente.....	53
Figura 48. Diagrama para la corrosión de Hierro en medio ácido.....	53
Figura 49. Esquema básico de la instrumentación para el electroanálisis del sistema metal- pintura,.....	54
Figura 50. Esquema simplificado del potencióstato	55
Figura 51. Software de control y configuración.	55
Figura 52. Configuración de parámetros del ensayo.	56
Figura 53. Pendientes de Tafel.....	58
Figura 54. Configuración de parámetros para el ensayo.....	58
Figura 55. Resistencia a la polarización.....	59
Figura 56. Análisis de Impedancia Electroquímica (Bode).....	60
Figura 57. Análisis de Impedancia Electroquímica (Nyquist).....	60
Figura 58. Operación de un instrumento tipo aguja.....	61
Figura 59. Diagrama esquemático de un medidor de rugosidad.....	62
Figura 60. Transductor de inductancia variable.....	62
Figura 61. Voltaje de salida del sensor.....	63
Figura 62. Dispositivo para pruebas de rugosidad MITUTOYO SJ-301.....	63
Figura 63. Prueba de rugosidad.....	64
Figura 64. Componentes del Rugosímetro SJ-301	64
Figura 65. Lector de rugosidad.....	64
Figura 66. Parte posterior de la unidad principal.....	65
Figura 67. Lateral derecha de la unidad principal.....	65
Figura 68. Cable de conexión.....	65
Figura 69. Resultados de la lectura de rugosidad.....	66
Figura 70. Teclado de la unidad principal.....	66
Figura 71. Muestra de una impresión de resultados.....	66
Figura 72. Espécimen de calibración.....	67
Figura 73. Accesorio de nivelación	67
Figura 74. Calibración del Rugosímetro.....	68
Figura 75. Posiciones correctas e incorrectas para la calibración.....	68
Figura 76. Pantalla inicial.....	68
Figura 77. Pantalla del resultado de la calibración.....	69
Figura 78. Personalización de parámetros.....	69
Figura 79. Medidor de espesores PosiTector 6000 FN1	70
Figura 80. Especificaciones del medidor de espesores POSITECTOR 6000 FN1.....	70
Figura 81.Dolly	72
Figura 82.Medidor de adherencia.....	73

Figura 83. Diafragma de transductor de presión.....	73
Figura 84. Cinta extensométrica.....	74
Figura 85. Probeta 1010 rolada en caliente norma ASTM-E8.....	75
Figura 86. Probeta 1018 rolado en frio norma ASTM-E8.....	76
Figura 87. Esquema del ensayo para las probetas 1010 y 1018	76
Figura 88. a) Probeta de la solera de acero 1018 rolado en frio 1 x 1/8 in, b) Probeta de la solera de acero 1010 rolado en caliente 3/4 x 1/8 in.....	76
Figura 89. Corte las probetas del acero 1010 y 1018.....	77
Figura 90. a) Fresadora vertical OIMSA MODELO FTX-8, b) Cortador de carburo de Tungsteno.....	77
Figura 91. Rectificado con una fresadora vertical.	78
Figura 92. a) Probeta de acero 1018, b) Probeta de acero 1010.....	78
Figura 93. Realización del maquinado de redondeo	78
Figura 94. Forma de las probetas según la norma ASTM E8.....	79
Figura 95. Cepillado de las probetas.	79
Figura 96. a) Máquina de sand blast modelo RRX1 b) Proceso de sand blast.	80
Figura 97. probetas después del proceso de sand blast.....	80
Figura 98. Dispositivo para prueba de rugosidad MITUTOYO SJ-301.....	81
Figura 99 . Aplicación de la Prueba de rugosidad.....	81
Figura 100. a) Máquina de metalización MK 61 b) pistola para metalización.....	82
Figura 101. Aplicación del recubrimiento metálico	82
Figura 102. Dispositivo Positector 6000	83
Figura 103. Medición de espesor de las probetas de acero 1010 y acero 1018.....	83
Figura 104. máquina de ensayos universales INSTRON 600-DX.....	84
Figura 105. Ensayo de la prueba de tensión.	84
Figura 106. probetas después del ensayo de tensión.	85
Figura 107. Dispositivo POSITEST AT-M	85
Figura 108. Colocación de los Dollys en las probetas	Figura 109. Eliminación del exceso de pegamento.
	86
Figura 110. Aplicación de la prueba de corrosión a) probeta sin recubrimiento b) probeta con recubrimiento.	86
Figura 111. Célula electrolítica	87
Figura 112. Prueba de corrosión y aplicación de software Gamry.....	87
Figura 113. Curva de esfuerzo deformación ingenieril de acero 1010 rolado en caliente.	88
Figura 114. Curva esfuerzo deformación ingenieril 1018 rolado en frio.	88
Figura 115. a) Efectos significativos del material en el módulo de Young (b) Efectos significativos del recubrimiento en el módulo de Young.....	89
Figura 116. Grafica de interacción del material y el recubrimiento.	90
Figura 117. (a) Efectos significativos del material sobre la carga máxima (b) Efectos significativos del material sobre la carga máxima.	91
Figura 118. Interacción entre el acero 1010, acero 1018 y el recubrimiento de zinc.....	91
Figura 119. Efectos principales de entre el acero 1010 y 1018.....	92

Figura 120. Interacción entre el material y la zonas donde se realizo la prueba	93
Figura 121. Curvas anódica y catódica del acero 1018 rolado en frio.	93
Figura 122. Curvas anódica y catódica del acero 1010 rolado en caliente.	94
Figura 123. Prueba de rugosidad acero 1010 rolado en caliente.	95
Figura 124. Prueba de rugosidad acero 1018 rolado en frio.	96

Tabla 1. Designación AISI-SAE-NOM para aceros simples y aleados.	9
Tabla 2. Composición del lacero al carbono AISI 1010.	10
Tabla 3. Propiedades mecánicas acero AISI 1010 rolado en caliente.	10
Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero 1018.	10
Tabla 5. Composición química del acero 1018.	11
Tabla 6. Tratamientos térmicos recomendados (valores en °C).	11
Tabla 7. Propiedades mecánicas mínimas estimadas según SAE J1397.	11
Tabla 8. Selección de aceros al carbono y de aleación para varias aplicaciones.	12
Tabla 9. Módulo de elasticidad y rigidez de varios materiales.	15
Tabla 10.- Distintas tecnicas de TS agrupadas de acuerdo al tipo de fuente de energia empleado.	17
Tabla 11. Características generales de los principales métodos de recubrimiento.	20
Tabla 12. Tabla de la Resistencia relativa a la corrosión.	37
Tabla 13. Observaciones de la variable de respuesta X.	38
Tabla 14. Calculo cada efecto de S.C. en un diseño 2x2	39
Tabla 15. Tabla ANOVA para el diseño experimental con r bloques aleatorios.	39
Tabla 16. Representación del diseño factorial 2x2.	42
Tabla 17. Módulos de elasticidad a temperatura ambiente.	52
Tabla 18 .valores de calibración.	68
Tabla 19. Características y propiedades del acero 1010 rolado en caliente.	88
Tabla 20. Características y propiedades del acero 1018 rolado en frio.	89
Tabla 21. Valores estadísticos del acero 1018 rolado en frio.	97
Tabla 22. Valores estadísticos del acero 1010 rolado en caliente.	97
Tabla 23. Valores estadísticos del acero 1018 rolado en frio.	97
Tabla 24. Valores estadísticos del acero 1010 rolado en caliente.	98